

**Труды Военно-космической  
академии имени А.Ф. Можайского**  
Научное рецензируемое издание  
Выходит с 1942 года

**Выпуск 669**

2019 г.

---

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение  
высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»  
Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского  
*доктор техн. наук, профессор М.М. Пеньков*

Члены редакционного совета:

**С.В. Буг** – заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии  
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

**В.П. Гаенко** – главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ  
*доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники;*

**А.М. Гончаров** – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического  
сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

**М.А. Еремеев** – профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения  
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Кузичкин** – заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт телевидения»  
по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

**Б.В. Соколов** – главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации  
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ;*

**К.Г. Ставров** – главный научный сотрудник научно-исследовательского океанографического центра  
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Сержантов** – заместитель начальника Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил  
Российской Федерации по научной работе *доктор воен. наук, проф.*

Главный редактор:

*доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов*

Редколлегия:

председатель **Ю.В. Кулешов**, *доктор техн. наук, проф.*;

зам. председателя **И.В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*;

ответственный секретарь **А.Л. Федер**, *кандидат техн. наук, доц.*;

**Н.Ф. Аверкиев**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, доц.*;

**Т.В. Алексеев**, *доктор истор. наук, доц.*; **А.П. Алёшкин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**В.Н. Арсеньев**, *доктор техн. наук, проф.*; **Д.Н. Бирюков**, *доктор техн. наук, доц.*;

**И.А. Готюр**, *доктор техн. наук, доц.*; **А.П. Доронин**, *доктор техн. наук, доц.*;

**И.Ю. Еремеев**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**В.Н. Калинин**, *доктор техн. наук, проф.*; **Б.Д. Казахов**, *доктор воен. наук, проф.*;

**В.В. Клейменов**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.В. Козлов**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Н.С. Кужекин**, *кандидат филос. наук, проф.*; **В.Н. Кузьмин**, *доктор воен. наук, проф.*;

**Н.Б. Кунгурова**, *доктор пед. наук, доц.*; **Е.Л. Лебедев**, *доктор техн. наук, проф.*;

**А.Г. Ломако**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Лоскутов**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Г.Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук;*

**А.Н. Павлов**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Паршуткин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Н.А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*; **А.М. Сычева**, *доктор техн. наук, проф.*;

**И.В. Фоминов**, *доктор техн. наук;* **А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, доц.*;

**К.Ю. Цветков**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Издание зарегистрировано  
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.  
Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы  
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).  
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Ответственный за выпуск:  
начальник РИО **С.В. Чернышев**  
Выпускающий редактор: *А.В. Головина*  
Технический редактор  
и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*  
Техническая поддержка:  
*В.В. Рыбаков*

Адрес:  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;  
тел.: 8 (812) 347-97-69;  
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 22.11.2019  
Формат печатного листа 445×300/4.  
Уч.-печ. л. 81,00. Уч.-изд. л. 40,25  
Тираж 50 экз. Заказ 3759/74-20.  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А.Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

### ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

<i>Абу-Хасан М.С., Егоров В.В., Куправа Л.Р., Сахарова А.С.</i> Автоматизированный расчет и проектирование регулярно стержневых конструкций (сетчатых плит) .....	7
<i>Величкин В.З., Петроченко М.В., Птухина И.С.</i> Матрично-сетевая модель планирования сложных комплексов работ .....	12
<i>Гамаюнова О.С.</i> Модель и методика принятия рационального решения по обеспечению энергоэффективности домов старого фонда военных городков .....	18
<i>Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.</i> Влияние сформировавшегося при особых нагрузках и воздействиях напряженно-деформированного состояния на оценку несущей способности конструкций специальных сооружений .....	29
<i>Гусеница Я.Н., Загрутдинов Ю.А., Карасев С.Ю., Мачнев С.А.</i> Метод определения оптимального объемно-конструктивного решения специального сооружения на этапе предварительного проектирования .....	38
<i>Есенина Н.А., Зайцев А.А., Карасев Ю.С.</i> Обеспечение безопасной эксплуатации и защита гидротехнических сооружений и конструкций от ледовой абразии .....	43
<i>Квитко А.В., Орехов А.В., Петров К.В.</i> Научно-экспериментальное обоснование оптимальных параметров балок пролетных строений военных железнодорожных мостов из композитных материалов .....	48
<i>Клепов А.В., Чернобаев А.Ю., Щербина И.С.</i> Обоснование предложений по разработке программы технического обслуживания и ремонта наземного технологического оборудования ракетно-космических комплексов .....	53
<i>Кужекин И.Н., Сурин Д.В.</i> Модель фугасно-осколочного поражения мобильных средств вооружения при воздействии обычных средств поражения .....	61
<i>Ладышкин Г.С., Федоренко А.В.</i> Методика оценки эффективности мероприятий маскировки .....	71
<i>Мандрица Д.П.</i> Анализ влияния неупругих деформаций на остаточные прогибы несущих конструкций специальных сооружений .....	78

<i>Мандрица Д.П.</i> Метод восстановления эксплуатационной пригодности стартовых сооружений после аварийных нагрузок и воздействий .....	83
<i>Миронов А.Н., Солдатенко Т.Н.</i> Модель нечеткого комплексного оценивания проекта здания .....	92
<i>Солдатенко В.С., Тюрин Е.А.</i> Модель принятия решения на восстановление эксплуатационной пригодности по результатам обследования здания .....	97
<i>Старчуков Д.С., Шмаков Р.Б.</i> Теоретический подход к определению долговечности воинских зданий и специальных сооружений .....	103

#### РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ. ВОЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ

<i>Абсалямов Д.Р., Поляков С.А., Трудов А.В.</i> Моделирование процесса продления назначенных показателей ресурса систем инженерного обеспечения радиолокационных станций на основе формализованного описания отказов и выбор минимального множества контролируемых признаков .....	111
<i>Авсюкевич Д.А., Тупицин Ю.Е., Шишкин Е.В.</i> Математическая модель совокупных затрат на реконструкцию систем водоснабжения ракетно-космических комплексов .....	120
<i>Барановский А.М., Захарова Е.А.</i> Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом показателей качества диагностирования .....	124
<i>Блинов А.В., Вакуненко В.А., Мусатов В.И.</i> Проектирование станций очистки сточных вод на объектах Министерства обороны Российской Федерации, расположенных в Санкт-Петербургском гарнизоне .....	133
<i>Бутырин А.В., Тарасов А.Г., Цветков А.Ю.</i> Нейронечеткая модель шкалы оценок параметров технического состояния автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения .....	139
<i>Буяков С.Н., Миргородский А.Н., Эльцофон Д.А.</i> Оценивание характеристик сооружения по обеспечению требуемых условий эксплуатации изделий военной техники .....	146
<i>Вишняков Е.П., Ильин А.В., Швайковский М.А.</i> Выбор параметров цепи, шунтирующей выключатель постоянного тока индуктивной нагрузки .....	152
<i>Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е.</i> Учет особенностей функционирования специального объекта при нормировании надежности системы электроснабжения .....	157
<i>Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е., Рыбаков В.В.</i> К вопросу обоснования требований к значениям показателей надежности систем электроснабжения в составе специального объекта .....	162

<i>Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е., Рыбаков Д.В.</i> Выбор оптимального набора мероприятий, направленных на повышение надежности систем электроснабжения специальных объектов .....	169
<i>Гордеев А.А., Некрасов И.Н., Сеньченков В.И.</i> Повышение сходимости процессов обучения в диагностических моделях теплоэнергетического оборудования на базе кластерного анализа .....	179
<i>Гринев А.П., Литвинова Н.Б., Саркисов С.В.</i> Практическое применение методики определения колебания расхода сточных вод при эксплуатации насосных станций Западного военного округа .....	187
<i>Гуков Д.В., Загуляев С.Д., Иваньков С.М.</i> Уточненная математическая модель силового трансформатора для расчета намагничивающего тока под нагрузкой .....	196
<i>Гуков Д.В., Загуляев С.Д., Куприенко В.М.</i> Повышение коэффициента мощности асинхронных двигателей при работе на сниженную нагрузку .....	203
<i>Дема И.А., Низовцев В.М., Семенов Е.Н.</i> Расчетно-теоретический анализ силового взаимодействия высокотемпературного потока газа с принудительно охлаждаемыми элементами турбин энергетических установок и газотурбинных двигателей летательных аппаратов .....	209
<i>Дорожко И.В., Захарова Е.А., Осипов Н.А.</i> Модель для оценки вероятности безотказной работы сложных технических комплексов на основе динамических байесовских сетей .....	216
<i>Егоричев М.В., Моторин В.М., Росляков Е.М.</i> Методический подход к процессу управления состоянием систем жизнеобеспечения .....	224
<i>Жабровец Е.И., Пудиков В.В.</i> Особенности управления прямоточно-рециркуляционными системами кондиционирования воздуха при реализации энергосберегающих режимов обработки воздуха .....	229
<i>Иванков В.С., Сапожников М.М., Шароглазов В.Б.</i> Способ обоснования комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей вооружения и военной техники космических войск с учетом состава и размещения .....	235
<i>Капитонов О.В., Сальников В.М., Шишкин Е.В.</i> Анализ способов, средств диагностирования и технических устройств получения, передачи и обработки информации о состояниях и режимах функционирования систем жизнеобеспечения и специальных технических систем .....	241
<i>Карагодин В.В., Полянский К.А., Ревяков Б.А.</i> Оптимизация параметров дизель-генераторных установок и источников бесперебойного питания в системах гарантированного электроснабжения .....	246

<i>Карагодин В.В., Рыжий Н.В., Смирнов С.В.</i> Оценка влияния тепловых процессов на потери электроэнергии в кабельных линиях систем электроснабжения специальных объектов .....	254
<i>Копейка А.Л., Кохановский А.Г., Тарасов А.Г.</i> Модель функционирования автоматизированной системы подготовки и пуска ракет космического назначения для определения вероятностно-временных характеристик работоспособного состояния с учетом результатов предшествующих испытаний и деструктивных внешних воздействий .....	266
<i>Кохановский А.Г., Кошель И.Н., Кузнецов А.Б.</i> Модель диагностирования вычислительных средств автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения с расширенным множеством работоспособных состояний, обусловленных воздействием дестабилизирующих факторов .....	274
<i>Куракин К.Э., Литвинова Н.Б., Тупицин Ю.Е.</i> Разработка математической модели воздухоохлаждаемой конденсационной установки для оптимизации параметров на этапах создания и эксплуатации теплогенерирующего комплекса ...	283
<i>Мальшев А.В., Саркисов С.В., Сорокин А.А.</i> Проблемные вопросы и направления модернизации систем водоснабжения .....	289
<i>Радаев А.Е., Числова М.М.</i> Обоснование характеристик процесса выполнения ремонтных работ объектов военной инфраструктуры .....	293
<i>Саркисов С.В., Сенюкович М.А., Сорокин А.А.</i> Оптимизация реконструируемых систем водоснабжения объектов военной инфраструктуры .....	298
Рефераты статей .....	303
Сведения об авторах .....	314
Сведения о рецензентах .....	323

М.С. Абу-Хасан\*,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
В.В. Егоров\*,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
Л.Р. Куправа\*,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
А.С. Сахарова\*,  
*кандидат техн. наук*

\*Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНО СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ (СЕТЧАТЫХ ПЛИТ)**

Пространственные стержневые конструкции покрытий применяют для более эффективного промышленного производства строительных конструкций, что позволяет снизить затраты от массовости их выпуска, специализации производства и рациональности конструктивных решений.

Ключевые слова: стержневые конструкции, сетчатые плиты, реконструкция, затраты.

Наиболее рациональными конструктивными формами принято считать те, которые, обладая технологичностью изготовления и низкой материалоемкостью, обеспечивают возможность широкой унификации элементов конструкций с учетом отраслевых и межотраслевых требований, позволяют организовывать поточное производство ограниченной номенклатуры однотипных элементов, из которых можно создавать самые разнообразные плоские и пространственные конструкции или здания в целом с высокими архитектурно-эстетическими свойствами [1, 2].

В основу разработки систем металлических перекрестно-стержневых пространственных конструкций (ПСПК) были положены следующие основополагающие архитектурно-конструктивные предпосылки:

- наличие единого унифицированного сортамента элементов с максимальными композиционными возможностями;
- использование в строительстве оптимальных по форме малодефицитных профилей проката;
- применение высокопрочных материалов;
- наличие полной индустриализации производства, основанной на использовании высокопроизводительного автоматического оборудования, литья, штамповки и т.п.;
- компактность элементов системы и возможность их транспортировки любым видом транспорта;
- высокая надежность, быстрота сборки и монтажа элементов, включая конвейерную сборку и крупноблочный монтаж;
- использование объемно-пространственной композиции, которая дает широкие возможности при строительстве.

Высшее достижение в развитии данных систем – практически неограниченное разнообразие конструктивных форм, созданных на базе ограниченного набора исходных типов элементов, применяемых для строительства зданий и сооружений промышленного, гражданского и сельскохозяйственного назначения [3, 4].

Регулярно стержневые конструкции типа сетчатых плит, оболочек состоят из двух сетчатых поясов со стойками, соединяемыми между собой раскосами, образующими единую жесткую конструкцию (рис. 1).

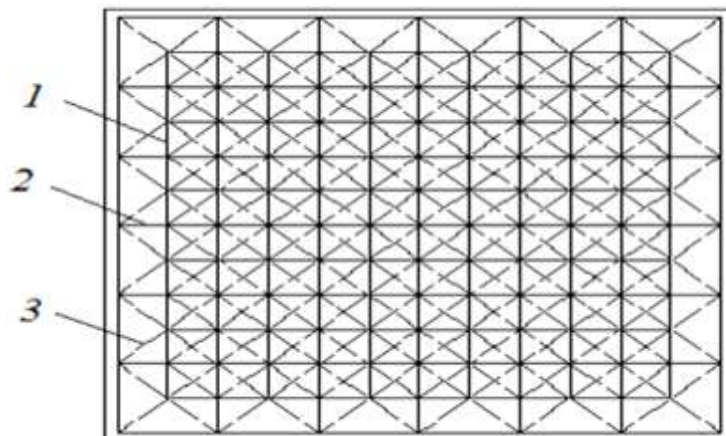


Рис. 1. Регулярно-стержневая плита:  
1, 2 – верхние и нижние пояса соответственно;  
3 – наклонные раскосы

Стержневые конструкции находят широкое применение в области строительства зданий павильонного типа; однопролетных и многопролетных промышленных зданий; в покрытиях общественных зданий (крытых рынков и универсамов, спортивных залов и манежей, вокзальных зданий, больниц, санаториев, гостиниц и т. п.); зданиях, возведенных в труднодоступных и сейсмических районах [5, 6].

Структурные плиты изготавливаются серийно с наиболее распространенной сеткой колонн: 12×18 м, 12×24 м, 18×18 м, 24×24 м [7, 8].

Расчет структурных плит производится в четыре этапа (рис. 2).

1. Задаются исходные параметры структуры покрытия: определяются габариты покрытия в плане, шаг и высота узловой ячейки; выбираются способ опирания конструкции, материал и назначение сечений элементов плиты; осуществляется сбор и задаются нагрузки на плиту [9, 10].



Рис. 2. Укрупненная блок-схема по расчету структурных плит средствами САПР

2. Определяются напряженно деформированное состояние плиты, а также максимальное усилие, деформация всей конструкции и линейное перемещение в узлах элементов.

3. Выполняется проверка несущей способности элементов, проверка прочности, устойчивости и жесткости.

4. Анализируются полученные результаты и при необходимости выполняется оптимизация. Осуществляется корректировка исходных параметров сечений или способа опирания структурной плиты.



В настоящей публикации рассмотрены две структурно стержневые плиты. Расчет выполнен с помощью вычислительного комплекса «SCAD Office» [11, 12].

Плита № 1: размеры в плане  $18 \times 18$  м, шаг ячейки – 3 м, верхние узлы смещены по отношению к нижним на половину шага – 1,5 м, высота берётся в пределах  $1/16$ – $1/25$  пролета, принимаем  $1/16L$ – $1,125$  м (рис. 3).

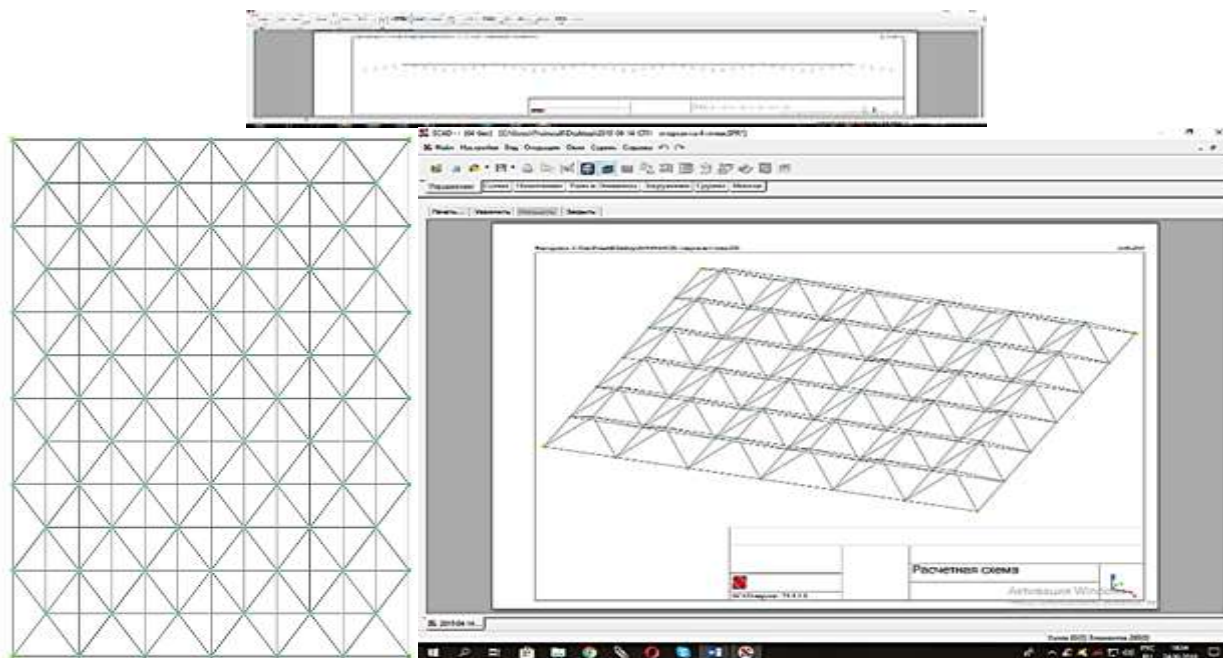


Рис. 3. Расчетная схема плиты №1

Плита № 2: размеры в плане  $18 \times 18$  м, шаг ячейки – 1,5 м, верхние узлы смещены по отношению к нижним на половину шага – 0,75 м, высота берётся в пределах  $1/16$ – $1/25$  пролета, принимаем  $1/16L$ – $1,125$  м (рис. 4).

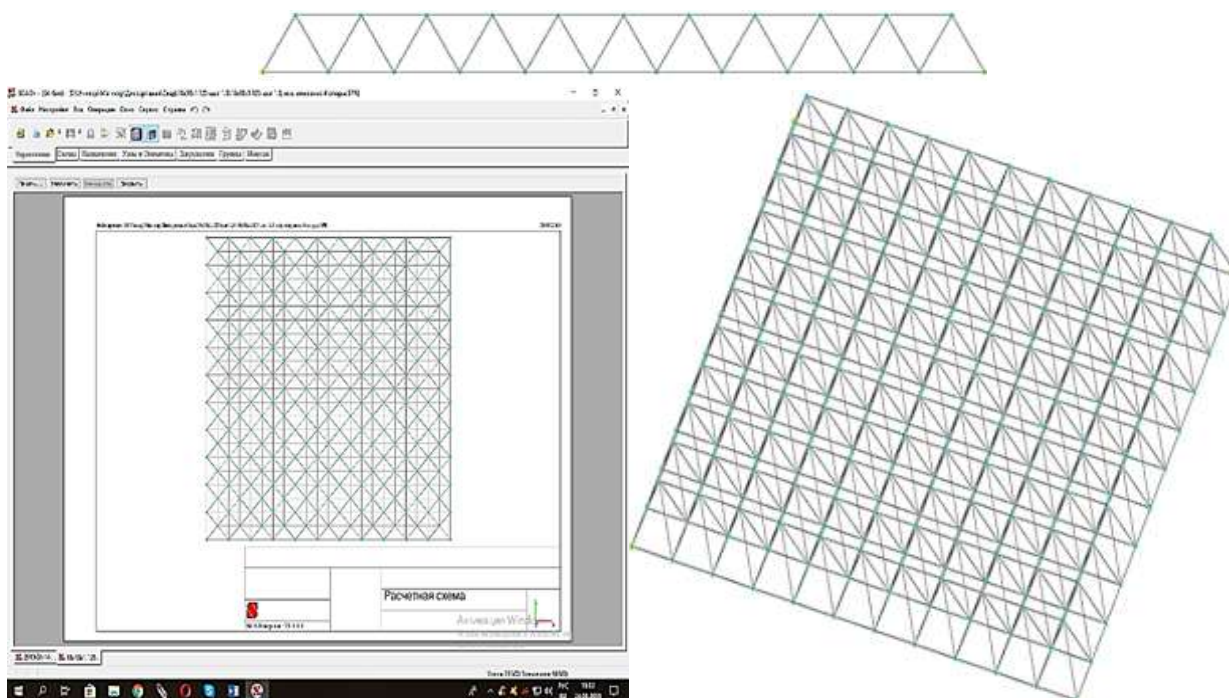


Рис. 4. Расчетная схема плиты №2

Приняты три вида нагрузок: собственный вес конструкции, вес от покрытия, снеговая нагрузка (III снеговой район).

Структурные элементы перекрестно стержневых плит поделены на три группы: нижний пояс, верхний пояс и раскосы. Каждой группе присвоено свое сечение [13, 14].

Для подробного анализа конструкций каждая структурная плита рассматривается с тремя различными способами опирания. Плита № 1 опирается на 4 точки, на 12 точек, по контуру. Плита № 2 – на 4 точки, на 16 точек, по контуру.

Порядок проведения исследования:

1. Создается расчетная схема.
2. Загружается расчетная схема.
3. Назначается тип жесткости структурным элементам (для первого расчета тип сечения подбирается конструктивно).
4. Задается способ опирания.
5. С помощью функций вычислительного комплекса «SCAD Office» выполняется проверка несущей способности принятых сечений.
6. Подбирается оптимальное сечение.
7. Выполняется перерасчет с новыми сечениями.

На рис. 5. приведен пример выполнения п. 5. Здесь показана плита №1 с опиранием на 4 точки, красным цветом показаны элементы, не удовлетворяющие условиям несущей способности, а зеленым – удовлетворяющие [15].

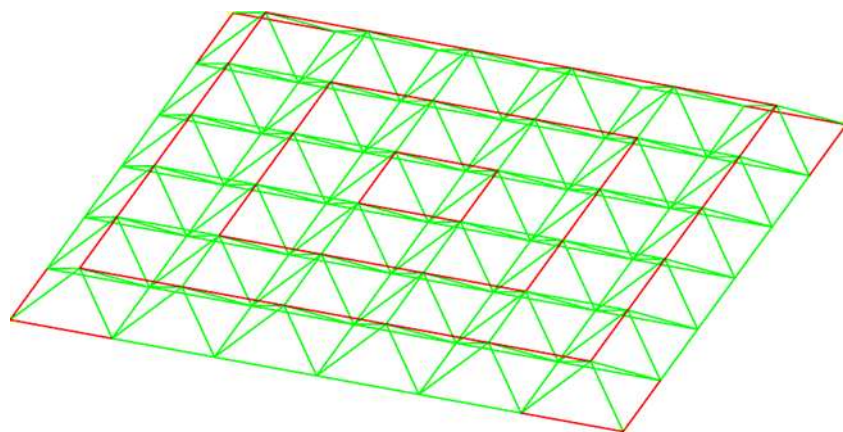


Рис. 5. Плита № 1, проверка несущей способности элементов

После выполнения всех пунктов для одного способа опирания повторяем выполнение п. 3–7 для двух оставшихся способов опирания.

Для выполнения анализа рассматриваем следующие факторы:

- 1) максимальные значения усилий, возникающие в элементах плиты;
- 2) типы сечений, подобранные для элементов плиты;
- 3) стоимость  $1 \text{ м}^2$  плиты и стоимость всех элементов плиты в сумме.

Анализируя характеристики исследуемых плит можно сделать вывод, что с изменением количества опор и способа опирания изменяется значение максимального усилия, уменьшаются сечения элементов. Также можно оптимизировать материалозатраты конструкции.

При одинаковых габаритных параметрах структурной плиты, но с более частым расположением узлов значительно уменьшается сечение элементов и уменьшаются материальные затраты на изготовление конструкции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурные конструкции позволяют создавать различные композиции пространственных каркасов на разных планах, используя при этом ограниченный набор унифицированных стержневых и узловых элементов полной заводской готовности.

В качестве дальнейшего развития структурных плит с целью их оптимизации возможна замена верхних стальных поясов железобетонными плитами, совмещающими несущую и ограждающую функции. Таким образом, предлагается применение сталежелезобетонной комбинированной конструкции покрытия, что весьма эффективно при перекрытии больших пролетов.

### Список используемых источников

1. *Веселов В.В.* Эксплуатационная надежность железобетонных каркасов зданий по Серии ИИ-04 // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VII международной научно-практической конференции. – СПб.: ПГУПС, 2017. – С. 82–87.
2. *Веселов В.В., Забродин М.П.* К вопросу об определении эксплуатационной надежности стальных подкрановых балок // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: материалы IX научно-методической конференции ВИТУ. – СПб.: ВИТУ, 2005. – С. 46–50.
3. Патент на изобретение RUS 2595026. Способ протезирования деревянной балки / Алексашкин Е.Н., Егоров В.В., Веселов В.В.; заявитель и патентообладатель ПГУПС. – № 2015130422; заявл. 22.07.2015; опубл. 20.08.2016.
4. *Егоров В.В., Алексашкин Е.Н., Веселов В.В.* Проектирование деревянных конструкций одноэтажного промышленного здания: монография. – СПб.: ПГУПС, 2005. – 20 с.
5. Патент на полезную модель RUS 165406. Предварительно напряженная шпренгельная ферма / Алексашкин Е.Н., Веселов В.В., Булатов М.С.; заявитель и патентообладатель ПГУПС. – № 2016119468; заявл. 19.05.2016; опубл. 20.10.2016.
6. Технология монтажа монолитных тонкостенных геодезических оболочек в надувной опалубке, рассчитанных методом конечных элементов / В.В. Егоров, М.С. Абу-Хасан, Н.В. Розанцева и др. // Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8 (1008). – С. 32–34.
7. *Вьюненко Л.Ф., Егоров В.В., Морозова Е.Ю.* Алгоритм определения оптимальной формы затяжки шпренгельной конструкции // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2002. – Т. 9, № 2. – С. 352–353.
8. Несущие деревометаллические конструкции ферм покрытия большепролетных железнодорожных депо / В.В. Егоров, М.С. Абу-Хасан, Н.В. Розанцева и др. // Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8 (1008). – С. 37–38.
9. Исследование напряженно-деформированного состояния клеелесовых трехшарнирных рам / В.В. Егоров, М.С. Абу-Хасан, Л.Р. Куправа и др. // Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8 (1008). – С. 52–54.
10. *Сычева А.М., Соломхин А.С., Каменев Ю.А.* Актуальные вопросы поддержания требуемых эксплуатационных характеристик ответственных конструкций зданий, сооружений и инженерных сетей // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: III Всероссийская научно-практическая конференция. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – С. 402–406.
11. Математическая модель определения частоты собственных колебаний пролетных конструкций / А.М. Сычева, В.В. Егоров, И.В. Степанова и др. // Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 9 (1021). – С. 24–26.

12. Повышение эксплуатационных свойств бетона тонкослойными цементными композициями поверхностного и проникающего действия / В.Я. Соловьева, А.М. Сычева, Н.В. Коробов и др. // Бетон и железобетон. – 2009. – № 3. – С. 16–19.

13. Механизм защитного действия ремонтных составов на цементной основе в дорожных покрытиях / В.Я. Соловьева, Л.Л. Масленникова, Н.В. Ершиков и др. // Транспортное строительство. – 2016. – № 10. – С. 13–15.

В.З. Величкин\*,

*доктор техн. наук, профессор;*

М.В. Петроченко\*,

*кандидат техн. наук, доцент;*

И.С. Птухина\*,

*кандидат техн. наук*

\*Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## **МАТРИЧНО-СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАБОТ**

В публикации рассматривается возможность формирования модели строительства крупных и уникальных зданий и сооружений, позволяющей объединить несколько строительно-технологических потоков и разрозненные комплексы работ в единый технологический процесс. Такой процесс может быть технологически увязан и согласован в отношении движения различных технических и трудовых ресурсов по выделенным фронтам работ.

Приведен пример формирования и расчета матрично-сетевой модели строительства отдельного объекта. Показана интерпретация формы модели для мониторинга и управления.

Ключевые слова: уникальные сооружения, матрично-сетевая модель, мониторинг, управление.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Строительство уникальных зданий и сооружений, высотных жилых и общественных зданий, большепролетных промышленных, спортивных и культурных сооружений отличается высокой степенью динамичности и сложности производственных процессов. В ходе строительства таких зданий и сооружений на разных этапах привлекаются значительные достаточно дорогостоящие технические средства и трудовые ресурсы высокой квалификации. В этой связи успешное и качественное строительство таких зданий и сооружений требует предварительной детальной проработки всех основных технологических процессов с высоким уровнем их увязки во времени и пространстве возводимых конструкций.

Увязка во времени и пространстве ведущих технологических процессов, исследование их основных свойств и параметров (надежности, устойчивости, помехозащищенности и др.), прогнозирование развития показателей по мере строительства сооружений невозможно без предварительного построения адекватной математической или графической модели. Описание такой достаточно сложной системы, как строительство уникальных объектов, можно осуществить на основе известной в мировой практике сетевой модели, базирующейся на ряде разделов математики – теории графов, теории вероятности, математической статистики и др. Сетевая модель позволяет не только планировать ход строительства, но и осуществлять функции управления для сохранения значений ранее принятых параметров и показателей [1–10].

### **МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Для достижения современного уровня научной организации труда и высокой эффективности технологических процессов необходимо формирование производства конвейерного типа применительно к процессам возведения сооружений поточной организации строительства [11–14]. Построение сетевой модели в условиях поточной организации строительных процессов различными методами на различных участках и частях сооружений представляется

весьма сложной инженерной задачей. Учет использования дорогостоящих технических и трудовых ресурсов высокой квалификации и их передвижение по частям сооружения с соблюдением элементов поточной организации на простой сетевой модели если и возможно, то наглядность и обозримость развития технологии возведения сооружения близка к математическим задачам высочайшего уровня.

Поточная организация строительства отдельного сооружения с возможностью выполнения видов работ в определенной последовательности и с достаточно определенным формированием фронтов работ хорошо описывается матричной моделью. Матричная модель позволяет не только точно рассчитать планируемые сроки начала и окончания работ на каждом частном фронте, но и оценить качество и сроки выполнения комплексов работ различными методами [13–14]. К этим методам прежде всего следует отнести метод критического пути (основа сетевого планирования и управления), метод непрерывного использования ресурсов (основа поточной организации работ) и метод непрерывного освоения частных фронтов работ [2, 3, 13]. Но матричная модель создает значительные трудности при необходимости учета сложной взаимоувязки частных потоков и частных фронтов работ, особенно при наличии нескольких частей сооружений с различными структурами отдельных комплексов потоков.

## НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТРОИТЕЛЬСТВА

На основе анализа достоинств и недостатков сетевой и матричной моделей строительства комплекса сооружений или крупных объектов авторами было предложено объединить эти модели в одну матрично-сетевую модель, в рамках которой можно отразить несколько потоков специализированных строительных подразделений, показать их развитие и перемещение, а также представить сложные технологические связи между отдельными работами. Пример матрично-сетевой модели приведен на рис. 1. На модели показаны виды работающих ресурсов, продолжительность работ, ранние и поздние сроки начала и окончания работ на всех частных фронтах, выделен критический путь.

На матрично-сетевой модели обязательно показываются виды связей между работами, что позволяет определить переходы ресурсов, последовательность и совмещенность работ, сроки начала и окончания технологических процессов. Учет влияния основных видов связей между работами осуществляется следующим образом. Ресурсные связи должны отражать вид ресурсов, которые переходят после окончания работ соответствующих видов (частных потоков) на предшествующей работе на первый частный фронт того же вида частного потока на последующей работе, например на рис. 1 ресурсы R7 и R8 переходят с работы 5 на работу 6.

Технологические связи между работами сети означают начало последующей работы после окончания всех видов работ (частных потоков) на предшествующем этапе, например это показано на рис. 1 между работами 9 и 14. Фронтальные связи между работами определяют выполнение работ первого частного потока на частных фронтах последующей работы после выполнения работ последнего потока на соответствующих частных фронтах предшествующего этапа, например это отражено на рис. 1 между работами 6 и 7. Временные связи показывают сроки запаздывания начала последующей работы после окончания предыдущей, например при расчете каждой отдельной матрицы по любому соответствующему методу организации работ.

Критический путь выделен тройной линией. Все потоки организованы по методу критического пути. На матрицах работы критического пути показаны другим цветом. Первая строка в ячейке – продолжительность выполнения данного вида работ на рассматриваемом фронте, вторая строка – ранние сроки начала и окончания работы, третья строка – поздние сроки. Вид ресурса и номер работы (комплекса работ) указаны сверху столбца, фронты работ осваиваются сверху вниз, с первого до последнего (1, 2, 3, 4).

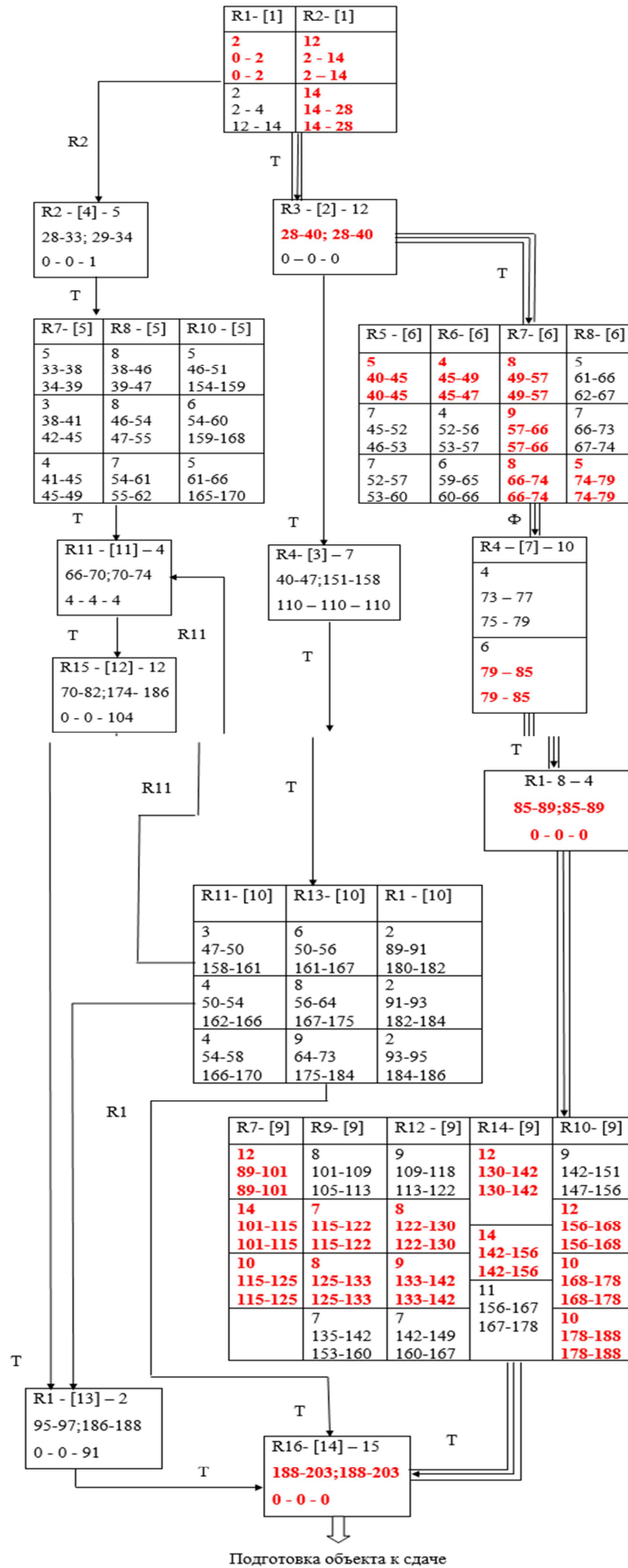


Рис. 1. Матрично-сетевая модель строительства сооружений основного объекта

## РАСЧЕТ МАТРИЧНО-СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Расчет матрично-сетевой модели, как и расчет сетевой модели, производится от начальной работы к конечной в последовательности, обеспечивающей к моменту расчета рассматриваемой работы законченность расчетов по всем предшествующим по связям работам. При расчете сроков выполнения работы учитывается в полной мере действие всех видов связей. Особенно тщательно необходимо учитывать действие связей при расчете поздних сроков начала и окончания работ. В этом случае расчет производится от последней работы на последнем частном фронте по направлению к начальной работе. Важно учесть действие ресурсных и фронтальных связей с учетом мест их приложения (частных фронтов и видов работ).

Для достаточно сложных комплексов работ при наличии большого числа развитых потоков на ряде сооружений и их частей матрично-сетевая модель становится трудно обозримой и непростой для принятия управляющих решений. В сложных случаях топологической схемы взаимоувязки большого числа участковых (объектных) потоков и отдельных работ возможно разделение процесса создания матрично-сетевой модели на три этапа.

На первом этапе формируется сетевая модель по работам, где каждая отдельная работа или участковый (объектный) поток отображаются отдельным прямоугольником. На этом этапе основной задачей является нанесение всех узлов (работ) сетевой модели и установление связей между ними. Связи должны определять сроки начала последующих работ, зависимости работ по частным фронтам, переходы конкретных ресурсов с одного участкового потока на другой.

На втором этапе производится расчет каждого отдельного участкового (объектного) потока. Расчет рассматриваемого потока производится с учетом назначенного метода поточной организации – метода критического пути, метода непрерывного использования ресурсов и др. Расчет проводится от исходной работы в сторону конечной с точным учетом построенной топологии сети и действия нанесенных связей между работами. Участковые потоки отражаются и рассчитываются на отдельных листах практически так же, как показано на рис. 1.

После расчета участковых потоков прямым ходом и определения ранних сроков начала и окончания работ, осуществляется расчет обратным ходом от последней (конечной) работы к начальной и определяются поздние сроки начала и окончания работ. Расчет прямым и обратным ходом проводится в точном соответствии с видом и направлением действия связей.

На третьем этапе все полученные результаты по ранним и поздним срокам начала и окончания работ рассматриваемых потоков выносятся на сеть, построенную по работам. Одновременно на всех работах сети обозначаются вместе с ранними и поздними сроками резервы времени первого и второго вида и общий резерв времени работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, метод матрично-сетевого планирования и управления позволяет добиться следующего.

1. Объединить в одну математическую и графическую модель несколько специфичных потоков по ряду сооружений совместно с отдельными комплексами работ, что обеспечивает расчет сроков выполнения как отдельных сооружений, так и всего строительного комплекса.

2. Организовать, рассчитать и прогнозировать сроки выполнения работ каждой специализированной бригадой на всем строительном комплексе.

3. Спланировать выполнение работ различными методами (методом непрерывного использования ресурсов, методом непрерывного освоения фронтов работ, методом критического пути и др.) на любом участке и на любом этапе строительства.

4. Сократить срок строительства от 5 до 30% и более.



5. Достичь сокращения затрачиваемых средств до 25% от сметной стоимости строительного комплекса за счет сокращения простоя ресурсов, фронтов работ и сроков строительства.

### Список используемых источников

1. *Иванов М.Ю.* Автоматизация сетевого планирования и управления // Системы. Методы. Технологии. – Братск: Братский гос. ун-т, 2013. – № 2 (18). – С. 63–69.
2. *Liū K. F.* A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2003. – Vol. 18. – P. 426–439.
3. *Новицкий Н.И.* Сетевое планирование и управление производством. – М.: Новое знание, 2004. – 150 с.
4. *Хибухин В.П., Величкин В.З., Втюрин В.И.* Математические методы планирования и управления строительством. – Л.: Стройиздат, 1985. – 140 с.
5. *Усимов А.В.* Методы сетевого планирования и управления в условиях неопределенности внешней среды: автореферат дисс. – Нижний Новгород, 2006.
6. *Василина А.А., Агшиева Д.К.* Сетевое планирование и управление (СПУ) в экономике // Международный журнал экспериментального образования. – 2011. – №8. – С. 203–203.
7. *Кудравцев Е.М.* Методы сетевого планирования и управления проектом. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 240 с.
8. *Абрамова И.Г.* Управление проектом на основе сетевых моделей. Метод. Указания. – Самара: Госаэрокосмический ун-т, 2007. – 58 с.
9. *Бызова К.В., Камаринский М.В.* Календарное планирование строительства с использованием «MS PROJECT» // Сборник XXXII неделя науки. – СПб.: СПбГПУ, 2004. – С.148–149.
10. *Войтович С.А.* Поточная организация строительства. – Омск: Изд-во Сиб. АДИ, 2008. – 36 с.
11. СН 508-78. Инструкция по организации и комплексному осуществлению в городах поточного строительства жилых домов, объектов культурно-бытового назначения и коммунального хозяйства. – М.: Госстрой СССР, 1979.
12. *Афанасьев В.А.* Поточная организация строительства. – Л.: Стройиздат, 1990. – 203 с.
13. *Rowinski L.* Organizacja procesow budowlanych. – Warszawa: PWN, 1979. – 520 s.

О.С. Гамаюнова

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## **МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМОВ СТАРОГО ФОНДА ВОЕННЫХ ГОРОДКОВ**

В настоящее время на территориях военных городков в эксплуатации находится большое количество жилых многоквартирных домов старого фонда. Значительная часть из них не соответствует современным нормативным требованиям к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций. Такие здания для их дальнейшей эксплуатации требуют проведения ремонта (реконструкции) с целью улучшения энергоэффективности. Разработаны модель и методика оценивания сравнительной эффективности различных видов утеплителей, обеспечивающих современные требования к тепловой защите домов старого фонда. При этом используется критерий минимума дисконтированного срока окупаемости необходимых затрат. Полученные теоретические результаты иллюстрируются расчетным примером.

Ключевые слова: военный городок, жилая застройка, старый жилой фонд, энергоэффективность, утеплитель, срок окупаемости.

### **ВВЕДЕНИЕ**

На сегодняшний день благодаря усилиям Минобороны РФ во всех военных округах нашей страны оборудованы новые военные городки. По словам министра обороны РФ С.К. Шойгу, «все новые объекты имеют высокие технические характеристики и оснащены современными системами, обеспечивающими надежное хранение и функционирование вооружения и военной техники». Глава Минобороны также поставил задачу в области военно-строительного комплекса на 2019 г. – сохранить набранные темпы и высокое качество работ.

Однако в составе существующей застройки военных городков имеется также значительное количество эксплуатируемых зданий и сооружений, которые были построены в 60–90 гг. прошлого века (в ряде случаев – и раньше). Их характерной особенностью является несоответствие показателей тепловой защиты наружных ограждающих конструкций современным требованиям. Одним из приемлемых подходов к устранению этого серьезного недостатка является ремонт (реконструкция) указанных зданий с использованием различных видов утеплителей. При этом требуется выполнение обоснование типа и толщины используемого материала с учетом не только показателей энергоэффективности, но и экономичности реализуемых проектов. Вопросы повышения энергоэффективности домов старого фонда рассматривались в ряде работ [1–20].

Вопросам реконструкции и обновления сложившейся застройки города, проблемам ветхого и аварийного жилья, а также проблемам санации жилой застройки посвящены работы Мищенко В.Я., Горбаневой Е.П., Вишнякова А.С., Пулиной А.М., Тусниной В.М., Волошина Д.И., Ватина Н.И., Немовой Д.В., Рымкевича П.П., Горшкова А.С. и др. [1–10].

Изучение теплотехнических характеристик ограждающих конструкций находит отражение в работах Корниенко С.В., Ватина Н.И., Горшкова А.С., Ольшевского В.Я., Пестрякова И.И., Немовой Д.В., Иванова Е.С., Котова Е.В., Тарасовой Д.С., Сергеева В.В., Заборовской Д.Д., Куколева М.И., Мусориной Т.А. и др. [11–16].

Мероприятия по повышению энергоэффективности зданий на основе энергетического обследования (энергоаудита) достаточно подробно рассмотрены в работах Ватина Н.И., Немовой Д.В., Корниенко С.В., Казаниной И.В., Мищенко В.Я., Барина В.Н., Горбаневой Е.П., Назарова А.Н., Муровского С.П., Рымкевича П.П., Горшкова А.С., Барановой М.А. и др. [17–20].

Однако общим недостатком названных выше исследований является отсутствие комплексности разработанных моделей. Также в известных работах не приводятся методики обоснования принимаемых рациональных решений по выбранным критериям. Один из возможных подходов к указанным проблемам рассматривается в данной публикации.

## МОДЕЛЬ ИНВЕСТИЦИЙ В УТЕПЛЕНИЕ ФАСАДОВ ДОМОВ СТАРОГО ФОНДА

Для математического моделирования экономической эффективности проектов утепления домов старого фонда военных городков будем использовать общий подход, установленный для строительно-инвестиционных проектов. Критерием предпочтительности варианта утепления будем рассматривать достижение минимального значения дисконтированного срока окупаемости вложений в дополнительное утепление фасадов рассматриваемых домов. Особенностью моделирования при этом является учет использования только бюджетных средств (без привлечения заемных) при расчете окупаемости инвестиций. Для обоснования данного подхода будем использовать следующие предпосылки. Во-первых, военные городки в нашей стране находятся в федеральной собственности (Министерство обороны РФ) либо в региональной или муниципальной собственности. Поэтому для проведения капитального ремонта (реконструкции) зданий и сооружений заемные (кредитные) средства не привлекаются. Во-вторых, принятые на баланс местной власти военные городки, имеющие жилой фонд и инженерную инфраструктуру, как правило, включаются в региональные программы развития.

В соответствии с указанными особенностями для модели прогнозного значения дисконтированного срока  $T_d$  окупаемости инвестиций в дополнительное утепление фасадов будем использовать формулу [10]

$$T_d = \frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta K}{\Delta \mathcal{E}} \cdot \frac{r-i}{1+i}\right)}{\ln\left(\frac{1+r}{1+i}\right)}, \quad (1)$$

где  $\Delta K$  – значение дополнительных капитальных затрат на дополнительное утепление базового варианта наружных стен (фасадов) здания, руб.;

$\Delta \mathcal{E}$  – разность стоимости потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции домов до и после утепления, руб.;

$r$  – средний ежегодный рост стоимости тарифов региона на тепловую энергию, %;

$i$  – ставка дисконтирования, %.

Рассмотрим, как определить составляющие выражения (1). Значение показателя  $\Delta K$  определяется с помощью соответствующих сметных расчетов для рассматриваемых видов работ. Значение годовой экономии  $\Delta \mathcal{E}$  денежных средств, достигаемой в результате проведения работ по утеплению фасадов здания, определяется по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = (V_1 - V_2) \cdot \frac{0,024 \cdot D_d}{1163} \cdot c_T, \quad (2)$$

где  $V_1$  – коэффициент теплопередачи наружных стен до утепления;

$V_2$  – коэффициент теплопередачи наружных стен после утепления;

$D_d$  – градусо-сутки отопительного периода;

$c_T$  – стоимость тепловой энергии в текущем году.

В формуле (2) используются численные значения коэффициентов приведения единиц измерения: коэффициент 0,024 служит для преобразования единиц измерения при переходе от сут/кВт к ч/Вт; коэффициент 1163 – для перехода от единиц измерения Гкал к кВт·ч.

Коэффициент  $V_1$  в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» определяется по формуле

$$V_1 = \frac{1}{R_0}, \quad (3)$$

где  $R_0$  – термическое сопротивление конструкции рассматриваемой стены дома,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Отметим, что расчет значения  $R_0$  выполняется в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» с помощью соотношения

$$R_0 = R_{\text{int}} + R_{\text{ext}} + \sum_{i=1}^K R_i, \quad (4)$$

где  $R_{\text{int}}$  – сопротивление теплообмену на внутренней поверхности анализируемой стены;

$R_{\text{ext}}$  – сопротивление теплообмену на внешней поверхности анализируемой стены;

$K$  – количество слоев ограждения;

$R_i$  – термическое сопротивление  $i$ -го слоя ограждения,  $i = 1(1)K$ .

При этом значение  $R_{\text{int}}$  определяется в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» по формуле

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{\text{int}}$  – коэффициент теплопередачи внутренней поверхности стены,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Значение  $R_{\text{ext}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , определяется по формуле

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\text{ext}}$  – коэффициент теплопередачи внешней поверхности стены,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Значение слагаемого  $\sum_{i=1}^K R_i$  в формуле (4) определяется путем сложения термических сопротивлений всех слоев ограждающей конструкции (без учета утеплителя). При этом

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (7)$$

где  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя стены;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя стены,  $(i = 1(1)K)$ .

Коэффициент  $V_2$  в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» определяется по формуле

$$V_2 = \frac{1}{R_{\text{req}}}, \quad (8)$$

где  $R_{\text{req}}$  – требуемое для рассматриваемого климатического пояса значение термического сопротивления конструкции стены дома,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Рассмотрим теперь, как установить взаимосвязь между типом используемого утеплителя, его толщиной, типом стены дома и климатическим поясом. Для этого предположим, что выполняется следующее неравенство:

$$R_0 < R_{\text{req}}. \quad (9)$$

Определим минимально допустимое (требуемое) значение термического сопротивления  $R_{ут}^{req}$  теплоизоляционного материала для рассматриваемого дома. Очевидно, что искомое значение  $R_{ут}^{req}$  может быть получено по формуле

$$R_{ут}^{req} = R_{req} - R_0. \quad (10)$$

Рассмотрим теперь, как с помощью  $R_{ут}^{req}$  определить толщину  $\delta_{ут}^{req}$  анализируемого утеплителя, которая обеспечит требуемое термическое сопротивление стены. Искомый показатель определяется с помощью формулы

$$\delta_{ут}^{req} = \lambda_{ут} \cdot R_{ут}^{req}, \quad (11)$$

где  $\lambda_{ут}$  – коэффициент теплопроводности утеплителя определенного типа (значения этих показателей – справочные).

Таким образом, соотношение (1) позволяет установить взаимосвязь между дисконтированным сроком окупаемости утепления стен старого фонда, типом утеплителя и его толщиной. Для конкретного типа дома из старого фонда необходимо проанализировать доступные для применения виды утеплителей и выбрать из них тот, при котором показатель эффективности затрат на утепление (дисконтированный срок окупаемости) будет минимальным. Поскольку количество возможных вариантов при этом, как правило, сравнительно невелико, для обоснования рациональности принимаемого решения по реконструкции дома можно использовать метод прямого перебора. Рассмотрим теперь методику формирования рационального по экономическому критерию решения по утеплению фасадов домов старого фонда.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РЕШЕНИЯ ПО УТЕПЛЕНИЮ ФАСАДОВ ДОМОВ СТАРОГО ФОНДА

Сформируем этапы методики определения оптимального критерия с точки зрения минимума дисконтированного срока окупаемости проекта решения по обеспечению требований, связанных с энергоэффективностью домов старого фонда.

*Этап 1.* Выполнение расчета термического сопротивления  $R_0$  конструкции рассматриваемой стены дома. Для этого следует использовать соотношение (4). Исходные данные  $\alpha_{int}$  и  $\alpha_{ext}$  для расчета  $R_{int}$  и  $R_{ext}$  по формулам (5) и (6) берутся из соответствующих таблиц для этих показателей в зависимости от типа стены. Для расчета  $\sum_{i=1}^K R_i$  учитывается тип стены.

*Этап 2.* Определение требуемого для рассматриваемого климатического пояса значения термического сопротивления  $R_{req}$  конструкции стены дома. Это значение также является справочным.

*Этап 3.* Проверка условия (9). Если неравенство не выполняется, то работу по совершенствованию энергоэффективности для рассматриваемого дома выполнять нецелесообразно. Если неравенство справедливо, то переходим к этапу 4.

*Этап 4.* Выполнение расчета значения  $R_{ут}^{req}$  по формуле (10).

*Этап 5.* Выполнение расчета значения показателя  $\delta_{ут}^{req}$  по формуле (11).

*Этап 6.* Выполнение расчета значения показателя  $V_1$  по формуле (3).

*Этап 7.* Выполнение расчета значения показателя  $V_2$  по формуле (8).

*Этап 8.* Выполнение расчета значения показателя  $\Delta Э$  по формуле (2).

*Этап 9.* Выполнение расчета значения показателя  $\Delta K$ . Для выполнения этого расчета необходимо использовать результаты сметных расчетов для соответствующих работ применительно к рассматриваемому типу стены.

*Этап 10.* Расчет показателя  $T_d$  по формуле (1) для каждого типа утеплителя. Формирование множества возможных вариантов решения по необходимым работам со стенами дома.

*Этап 11.* Определение методом прямого перебора рационального варианта решения по дополнительному утеплению стен исследуемого дома.

Рассмотрим применение разработанных модели и методики на расчетном примере.

## РАСЧЕТНЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим применение модели и методики для достаточно широко распространенных домов серии КПД-4570 (модификация 1989 г.).

Серия КПД-4570 (разработана Первым Центральным Военпроектом МО) длительное время являлась основной типовой серией жилых домов для застройки военных городков [5]. Здание рассматриваемого типа представляет собой многоквартирный 5-этажный жилой дом с холодным чердаком. В доме 5 подъездов и 75 квартир (по 3 на этаже). В подземной части здания размещается неотапливаемый подвал. Здание имеет прямоугольную форму, размеры в плане 11,8×80,5 м и высоту 16,3 м.

Следует отметить, что на момент разработки проекта и последующего строительства потребительские свойства домов данной серии в целом соответствовали уровню жилищного строительства в нашей стране. Основные характеристики домов серии КПД-4570 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики домов серии КПД-4570

Регионы строительства	Территория бывшего СССР, Восточная Европа
Технология строительства	Панельный дом
Период строительства	1957–1990 гг.
Регионы строительства	Территория бывшего СССР, Восточная Европа
Количество этажей	5
Высота потолков	2,5 м
Санузлы	Раздельные во всех квартирах
Мусоропровод	Нет
Лифты	Нет
Количество квартир на этаже	3
Стены и облицовка	Наружные – в зависимости от местоположения и модификации – трехслойные, навесные или кассетные, несущий остов – поперечные и продольная центральные стены

Проанализируем особенности энергоэффективности жилых домов серии КПД-4570. Отметим, что при их возведении применялись различные виды и модификации наружных стен в зависимости от местоположения военных городков (табл. 1). Так, например, в модификации 1989 года наружные стены здания были выполнены из керамзитобетонных панелей плотностью 1000 кг/м, общей толщиной 400 мм.

Основные теплотехнические характеристики внешних стен домов серии КПД-4570 приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Теплотехнические характеристики внешних стен домов серии КПД-4570**

Номер слоя	Материал	Толщина слоя ( $\delta$ ), м	Плотность ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
1	Керамзитобетон	0,4	1000	0,25

Дано. Тип дома – серия КПД-4570 (модификация 1989 г.), используемые стены – керамзитовая плита с характеристиками, соответствующими данным, приведенным в табл. 2.

Климатический регион – Санкт-Петербург.

Могут быть использованы виды утеплителей, указанные в табл. 3.

Таблица 3

**Исследуемые типы утеплителей**

№	Наименование утеплителя	Коэффициент теплопроводности утеплителя ( $\lambda_{ут}$ ), Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	Толщина утеплителя ( $\delta_{ут}$ ), м	Стоимость 1 м <sup>2</sup> утеплителя ( $C_{ут}$ ), руб.
1	KNAUF Ecoroll Экстра Плита	0,037	0,05	66
2	KNAUF ТеплоКнауф Норд	0,035	0,05	97
3	ISOROC Ультралайт Л	0,038	0,1	165
4	ISOROC Изофас 140	0,035	0,05	262
5	ISOROC Изолайт	0,038	0,1	193
6	ISOVER Классик Плюс	0,037	0,1	128
7	ISOVER Профи	0,037	0,1	134
8	ISOVER Теплые стены	0,036	0,05	85
9	ISOVER Теплый Дом Плита	0,038	0,1	123
10	ROCKWOOL Рокфасад	0,037	0,05	286
11	ROCKWOOL Фасад Баттс	0,037	0,05	318
12	ROCKWOOL Лайт Баттс	0,036	0,05	108
13	PAROC eXtra	0,036	0,1	95
14	PAROC eXtra Light	0,038	0,05	162
15	PAROC eXtra Smart	0,036	0,05	100
16	URSA Универсальный	0,036	0,05	58
17	URSA Terra	0,036	0,05	64
18	URSA Geo П-15	0,037	0,05	60
19	URSA PureOne 34PN	0,034	0,05	113
20	URSA PureOne 37RN	0,037	0,05	84
21	ЭКОБЕР Лайт 30	0,037	0,05	78
22	ЭКОБЕР Лайт Универсал	0,037	0,05	84
23	ЭКОБЕР Экофасад Оптима	0,035	0,05	241
24	ПЕНОПЛЭКС Стена	0,032	0,04	280
25	ПЕНОПЛЭКС Комфорт	0,03	0,05	217
26	ТЕХНОНИКОЛЬ Роклайт	0,04	0,1	170

Окончание табл. 3

№	Наименование утеплителя	Коэффициент теплопроводности утеплителя ( $\lambda_{ут}$ ), $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Толщина утеплителя ( $\delta_{ут}$ ), м	Стоимость 1 м <sup>2</sup> утеплителя ( $C_{ут}$ ), руб.
27	Мастер Терм ПСБ-С-15	0,043	0,1	229
28	Мастер Терм ПСБ-С-25	0,041	0,1	292
29	Мастер Терм ПСБ-С-35	0,038	0,1	410
30	BASWOOL Стандарт 50	0,038	0,1	207
31	BASWOOL Фасад 110	0,038	0,1	436
32	BASWOOL Фасад 120	0,038	0,1	473

*Требуется:*

1. Определить необходимость выполнения ремонта (реконструкции) жилого дома по его энергоэффективности.

2. В случае несоответствия фактической энергоэффективности требуемой получить рациональное по критерию минимума дисконтированного срока окупаемости решение по утеплению здания.

*Решение задачи.*

Выполним расчеты в соответствии с этапами разработанной методики.

*Этап 1.* Проведем теплотехнический расчет ограждающих конструкций с использованием соотношений (5) и (6). Учтем, что для исследуемого типа стены  $\alpha_{int} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , а  $\alpha_{ext} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . При этом для однослойной керамзитовой плиты с характеристиками, соответствующими данным, приведенным в табл. 2, имеем:  $K = 1$ ,  $\delta = 0,4$ ,  $\lambda = 0,25$ . В соответствии с формулой (7) имеем следующий результат:  $R_0 = 1,76 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$ .

*Этап 2.* Для региона Санкт-Петербурга  $R_{req} = 3,06 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$ .

*Этап 3.* Сравним полученные значения  $R_0$  и  $R_{req}$ . Очевидно, что неравенство (9) справедливо.

*Этап 4.* Выполним расчет показателя  $R_{ym}^{req}$  по формуле (10). В результате имеем следующее значение:  $R_{ут}^{req} = 1,32 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$ .

*Этап 5.* Порядок выполнения дальнейших расчетов будем рассматривать на примере утеплителя «ISOROC Изолайт» (см. табл. 3). Выполним расчет показателя  $\delta_{ут}^{req}$  по формуле (11). Для данного типа утеплителя коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,036 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . В результате имеем:  $\delta_{ут}^{req} = 0,048 \text{ м}$ . Поскольку данный тип утеплителя выпускается плитами толщиной только 50 и 100 мм, то результатом выбора будет  $\delta_{ут}^{req} = 0,050 \text{ м}$ . Для данного значения  $\delta_{ут}^{req}$  значение показателя  $R_0^{ут} = 3,15 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$ . Это значение удовлетворяет требованиям к стене по теплозащите.

*Этап 6.* Выполним расчет значения показателя  $V_1$  по формуле (3). В результате имеем следующий результат:  $V_1 = 0,57 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

*Этап 7.* Выполним расчет значения показателя  $V_2$  по формуле (8). В результате имеем следующий результат:  $V_2 = 0,325 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

*Этап 8.* Определим значение величины  $\Delta \text{Э}$  уменьшения эксплуатационных затрат за первый отопительный период в результате внедрения энергосберегающих мероприятий. Для



указанного региона (Санкт-Петербург) числовые значения необходимых для расчета показателей стоимости поставки тепловой энергии в жилые дома приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Динамика роста тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге в 2008–2019 гг.

Год	Тариф на тепловую энергию, руб./Гкал	Прирост стоимости тепловой энергии к предыдущему году
2008	650,00	–
2009	795,73	+22,4%
2010	931,00	+17,0%
2011	1 050,00	+12,8%
2013	1 175,00	+11,9%
2014	1 351,25	+15,0%
2015	1 408,01	+4,20%
2016	1 541,78	+9,50%
2017	1 621,95	+5,20%
2018	1 678,72	+3,50%
2019	1 775,45	+5,76%

Примем во внимание, что в текущем году стоимость  $c_T$  тепловой энергии установлена в размере 1775,45 руб./Гкал. Поэтому с учетом формулы (3) значение величины  $\Delta \mathcal{E}$  уменьшения эксплуатационных затрат за первый отопительный период в результате внедрения энергосберегающих мероприятий составит 43,05 руб./м<sup>2</sup>.

Учтем, что с 2008 по 2019 гг. среднее значение относительного роста тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге составило 10,73 % в год. Поэтому расчетное значение среднегодового роста  $r$  тарифов на тепловую энергию примем равным 0,1073. Дисконтирование будущих денежных потоков произведем по ставке рефинансирования ЦБ РФ (7,5 %). Таким образом, значение параметра  $i$  при расчете срока окупаемости инвестиций равно 0,075.

*Этап 9.* Выполним расчет значения показателя  $\Delta K$ . Для этого необходимо использовать результаты сметных расчетов для соответствующих работ применительно к рассматриваемому типу стены. Капитальные затраты на дополнительное утепление 1 м<sup>2</sup> наружной стены существующего здания равны 1823 руб./м<sup>2</sup>, при этом каждая из его составляющих имеет следующие значения:

- стоимость утеплителя «ISOROC Изолайт» толщиной 100 мм составляет 193 руб./м<sup>2</sup>;
- стоимость крепежа и направляющих составляет 120 руб./м<sup>2</sup>;
- затраты на сухие строительные смеси составляют 300 руб./м<sup>2</sup>;
- стоимость полного цикла строительного-монтажных работ составляет 1210 руб./м<sup>2</sup>.

*Этап 10.* Чтобы сформировать множества возможных вариантов решения по теплозащитным работам со стенами дома, необходимо выполнить расчет значений показателя  $T_d$  по формуле (1) для каждого типа утеплителя. Данное множество соответствует составу исследуемых видов утеплителей (см. табл. 3). Результаты расчетов в соответствии с моделью (1) приведены в итоговой табл. 5.

*Этап 11.* Определение рационального варианта повышения энергоэффективности домов рассматриваемого типа на множестве исследуемых вариантов утепления будем выполнять методом прямого перебора. Искомым вариантом решения по дополнительному утеплению стен исследуемого дома является тот, для которого показатель  $T_d$  имеет наименьшее значение. Анализ итоговой таблицы показывает, что рациональным по используемому экономическому критерию является вариант 6 – утеплитель «ISOVER Классик Плюс» ( $\lambda=0,037$ ,

$\delta=0,1$  м,  $C_{\text{ут}} = 128$  руб./м<sup>2</sup>). Данный тип утеплителя позволяет обеспечить требуемый уровень энергоэффективности жилого дома, и при этом проект данного утепления имеет минимальный срок окупаемости инвестиций. Таким образом, решение задачи получено.

Таблица 5

## Технико-экономическая оценка применения утеплителей

Номер варианта	Наименование утеплителя	Термическое сопротивление стены с утеплителем ( $R_0^{\text{ут}}$ ), (м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	Стоимость 1 м <sup>2</sup> утеплителя ( $C_{\text{ут}}$ ), руб.	Дисконтированный срок окупаемости инвестиций в дополнительное утепление фасадов ( $T_{\text{д}}$ ), лет
1	KNAUF Ecoroll Экстра Плита	3,11	66	26,13
2	KNAUF ТеплоКнауф Норд	3,19	97	25,88
3	ISOROC Ультралайт Л	4,39	165	21,63
4	ISOROC Изофас 140	3,19	262	27,56
5	ISOROC Изолайт	4,39	193	21,87
6	ISOVER Классик Плюс	4,46	128	21,13
7	ISOVER Профи	4,46	134	21,19
8	ISOVER Теплые стены	3,15	85	26,03
9	ISOVER Теплый Дом Плита	4,39	123	21,25
10	ROCKWOOL Рокфасад	3,11	286	28,41
11	ROCKWOOL Фасад Баттс	3,11	318	28,73
12	ROCKWOOL Лайт Баттс	3,15	108	26,28
13	PAROC eXtra	3,15	95	26,14
14	PAROC eXtra Light	4,39	162	21,60
15	PAROC eXtra Smart	3,15	100	26,19
16	URSA Универсальный	3,15	58	25,75
17	URSA Terra	3,15	64	25,81
18	URSA Geo II-15	3,11	60	26,06
19	URSA PureOne 34PN	3,23	113	25,77
20	URSA PureOne 37RN	3,11	84	26,32
21	ЭКОВЕР Лайт 30	3,11	78	26,25
22	ЭКОВЕР Лайт Универсал	3,11	84	26,32
23	ЭКОВЕР Экофасад Оптима	3,19	241	27,35
24	ПЕНОПЛЭКС Стена	3,32	280	26,86
25	ПЕНОПЛЭКС Комфорт	3,09	217	27,87
26	ТЕХНОНИКОЛЬ Роклайт	4,26	170	22,00
27	Мастер Терм ПСБ-С-15	4,09	229	23,02
28	Мастер Терм ПСБ-С-25	4,20	292	23,25
29	Мастер Терм ПСБ-С-35	4,39	410	23,74
30	BASWOOL Стандарт 50	4,39	207	22,00
31	BASWOOL Фасад 110	4,39	436	23,96
32	BASWOOL Фасад 120	4,39	473	24,26

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В публикации предложен подход по обоснованию рационального по экономическому критерию варианта утепления стен домов старого фонда военных городков. При этом приняты во внимание основные факторы, оказывающие влияние на используемую целевую функцию – дисконтированный срок окупаемости предстоящих работ по ремонту (реконструкции) домов. К ним относятся следующие: требования действующих нормативных документов по тепловой защите зданий и сооружений; вид стеновой панели дома; тип утеплителя и его толщина; затраты на работы по выполнению дополнительного утепления существующих стен; климатический пояс, в котором расположено здание; текущие стоимости поставки тепла в регионе; статус жилого фонда военных городков.

Выполненные расчеты показали работоспособность предложенных модели и методики обоснования рационального варианта решения по обеспечению современных требований к энергоэффективности жилых домов.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности их применения при планировании ремонтов (реконструкции) домов старого фонда военных городков.

## Список используемых источников

1. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П., Зубенко К.Ю. Социально-экономическая эффективность санации жилой застройки // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 1 (9). – С. 103–107.
2. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П. Санация как форма воспроизводства объектов недвижимости // Известия Тульского государственного университета. Сер.: Строительство, архитектура и реставрация. – 2006. – № 9. – С. 31–36.
3. Мищенко В.Я. Пути решения проблемы сохранности жилищного фонда города // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 11. – С. 53–54.
4. Горбанева Е.П., Мищенко В.Я. Проблемы санации жилых домов первого и второго периодов массового и индустриального домостроения // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: сборник трудов международной научной конференции, посвященной 25-летию Старооскольского технологического института. – Старый Оскол, 2004. – С. 173–176.
5. Вишняков А.С., Данилина А.А., Сайманова О.Г. Капитальный ремонт и реконструкция зданий старого фонда // Инновационные стратегии развития экономики и управления. – Самара, 2017. – С. 227–231.
6. Gumerova E., Gamayunova O., Meshcheryakova T. Energy efficiency upgrading of enclosing structures of mass housing of the soviet union // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Т. 692. – С. 432–439.
7. Пулина А.М. Необходимость энергоэффективного капитального ремонта в России // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 4. – С. 333–335.
8. Гуснина В.М., Волошин Д.И. К вопросу сохранения старого жилищного фонда Санкт-Петербурга // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 11. – С. 46–51.
9. Мартыненко Е.А., Старицына А.А., Рыбаков В.А. Реконструкция жилого квартала исторического центра Санкт-Петербурга // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 1 (40). – С. 32–42.
10. Техничко-экономическое обоснование утепления фасадов при реновации жилых зданий первых массовых серий / Д.Н. Цейтин, Н.И. Ватин, Д.В. Немова и др. // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 1 (40). – С. 20–31.

11. Обоснование расчетных теплотехнических характеристик стен из автоклавных газобетонных блоков / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, А.С. Горшков и др. // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 6 (69). – С. 35–58.
12. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Анализ теплоэнергетических характеристик жилого здания из газобетонных блоков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 12 (51). – С. 45–60.
13. Воздушный режим трехслойной стеновой конструкции / Д.В. Немова, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко и др. // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 6 (45). – С. 102–114.
14. Иванова Е.С., Горшков А.С. Расчет энергопотребления здания, построенного по минимальным требованиям к тепловой защите // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 4 (43). – С. 58–72.
15. Numerical simulation of ventilated facades under extreme climate conditions / M.R. Petrichenko, E.V. Kotov, D.V. Nemova and others // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – № 1 (77). – P. 130–140.
16. Математическая модель энергетической эффективности слоистых строительных ограждений / Д.Д. Заборова, М.И. Куколев, Т.А. Мусорина и др. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – № 4 (254). – С. 28–33.
17. Казанина И.В., Бигали Ж.Т. Мероприятия по повышению энергоэффективности зданий на основе энергоаудита // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2016. – № 11-1 (19). – С. 65–70.
18. Энергетическое обследование (энергоаудит) объектов социальной сферы / В.Я. Мищенко, В.Н. Баринов, Е.П. Горбанева и др. // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1 (25). – С. 77–84.
19. Муровский С.П., Коба А.А., Коба А.А. Применение тепловизионной съемки – основной этап качественного проведения энергоаудита // Инновационное развитие. – 2017. – № 2 (7). – С. 29–31.
20. Баранова М.А., Белокур И.А. Алгоритм проведения энергоаудита на примере учебного заведения // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2018. – № 12. – С. 63–66.

Н.Н. Гусев,  
доктор техн. наук, профессор;  
А.О. Кучеренко

## **ВЛИЯНИЕ СФОРМИРОВАВШЕГОСЯ ПРИ ОСОБЫХ НАГРУЗКАХ И ВОЗДЕЙСТВИЯХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОЦЕНКУ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью учета сформировавшегося напряженно-деформированного состояния строительных конструкций специальных сооружений, подвергшихся особым нагрузкам и воздействиям, при проведении их обследования. Выработан новый подход к оценке несущей способности таких конструкций. Предложены рекомендации по совершенствованию существующих методик обследования специальных сооружений с сформировавшимся напряженно-деформированным состоянием за весь период их эксплуатации. Обоснована необходимость совершенствования средств контроля максимальных и минимальных значений параметров напряженно-деформированного состояния строительных конструкций на всех этапах жизненного цикла объекта, в том числе сформировавшихся под действием аварийных нагрузок.

Ключевые слова: обследование технического состояния, оценка несущей способности, напряженно-деформированное состояние, аварийное воздействие, струнные преобразователи, датчики деформаций.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Известные на сегодняшний день методики обследования специальных сооружений реализуют алгоритмы, определенные в нормативных документах [1], которые, как правило, предписывают выполнение следующих основных процедур и их последовательность:

- 1) определение фактических геометрических параметров конструкций;
- 2) определение фактических физико-механических характеристик (ФМХ) строительных материалов;
- 3) выявление дефектов и повреждений конструкций;
- 4) уточнение расчетной схемы с учетом имеющихся дефектов и повреждений;
- 5) определение фактических действующих нагрузок;
- 6) проведение расчета по действующим нормам с введением в расчет данных, полученных при выполнении п. 1–5;
- 7) определение категории технического состояния специального сооружения.

Современный уровень развития измерительной техники и средств неразрушающих методов контроля (НМК) обеспечивает определение параметров, получаемых при выполнении п. 1, 2, с достаточной точностью, определение параметров, получаемых при выполнении п. 3–5, для объектов, находящихся в эксплуатации, на практике вызывает определенные сложности [3–5].

Так, требование по выявлению наличия и определению параметров всех трещин в конструкциях монолитного железобетонного остова специального сооружения, находящегося в эксплуатации, нереалистично. На практике эти параметры можно определить только в доступных местах или выборочно [6].

Из сказанного следует, что фактические параметры, получаемые при выполнении п. 3 и 4, носят в значительной степени вероятностный характер.

Принимаемые в поверочных расчетах значения фактических действующих на строительные конструкции нагрузок (п. 5), в свою очередь, зависят: во-первых, от сочетания параметров, полученных при выполнении п. 1–4, и, следовательно, также носят вероятностный

характер; во-вторых, от параметров сформировавшегося напряженно-деформированного состояния (НДС) на момент проведения обследования, значения этих параметров тоже носят вероятностный характер.

Современные методики обследования специальных сооружений не требуют учета в поверочных расчетах влияния сформировавшегося НДС конструкций на момент проведения обследования. Необходимо отметить, что НМК при проведении обследования определить фактические напряжения в железобетонной конструкции (ЖБК) в отличие от стальных не представляется возможным.

Вместе с тем в процессе эксплуатации, и особенно после аварийных воздействий на специальные сооружения, формируется определенное НДС конструкций, параметры которого нестабильны во времени. Например, от изменения давления грунта на заглубленные части специальных сооружений или его неравномерных осадок, отдельные конструкции несущего остова воспринимают дополнительные сжимающие или растягивающие усилия, которые также изменяются во времени. Свой вклад в изменение параметров НДС вносят температурные воздействия как техногенного, так и природного характера.

Опыт обследования и мониторинга технического состояния специальных сооружений, как у нас в стране [7–12], так и в мире [13–17], в том числе опыт обследования и мониторинга специальных сооружений космических комплексов [18–22] показал, что достаточно часто повреждения несущих строительных конструкций специальных сооружений (трещины и разломы) формируются в зонах, в которых расчетные значения параметров НДС не превышают предельных значений. Это означает, что расчетные (определенные на стадии проектирования) параметры НДС конструкций существенно отличаются от фактических, формирующихся в процессе строительства и эксплуатации специальных сооружений на момент проведения обследования и поверочного расчета.

Целью настоящей публикации является экспериментальное исследование влияния сформировавшегося НДС на несущую способность конструкций.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ БАЛОК**

Для достижения поставленной цели был проведен эксперимент. Исследовались 10 железобетонных балках марки 2ПБ 10-1 с геометрическими размерами: 120/140/1030 мм из бетона класса В25. Арматурный каркас балок выполнен из арматурных стержней класса В500 диаметром 4 мм. Для контроля усилий в арматурных стержнях нижней зоны армирования в качестве первичных преобразователей на них установлены струнные преобразователи (СП) типа ПЛДС-150 (заводские номера: №780, №788, №806, №808, №821, №759, №775, №819, №825, №828). В качестве вторичной аппаратуры использовался периодометр ПЦП-1 (заводской №00387443). Деформации изгиба балок задавались с помощью прессы ИП6010-100-1 и контролировались лазерным прогибомером и прогибомером часового типа. Ширина раскрытия трещин контролировалась отсчетным микроскопом МПБ-2. Осевые усилия обжатия балок задавались с помощью домкрата. Общий вид экспериментальной установки для варианта без обжатия и с обжатием представлен на рис. 1,а и 1,б соответственно.

Нагружение балки осуществлялось статической нагрузкой с шагом  $P_i \leq 0,25P_{\max}$  с последующим ее снятием. На каждой ступени нагружения фиксировались прогибы  $h$  балки и ширина раскрытия трещин  $\delta$ , а также определялись линейные деформации арматурных стержней  $\Delta$  и период выходного сигнала СП  $T$ . В процессе эксперимента было выполнено две серии испытаний: без обжатия балки и с обжатием балки постоянной нагрузкой в 1000 кг.



а)

б)

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Полученные в ходе эксперимента зависимости прогиба балки  $h$ , ширины раскрытия трещин  $\delta$  и периода выходного сигнала струнного преобразователя  $T$  от нагрузки  $P$  для балки без обжатия представлены на рис. 2–4.

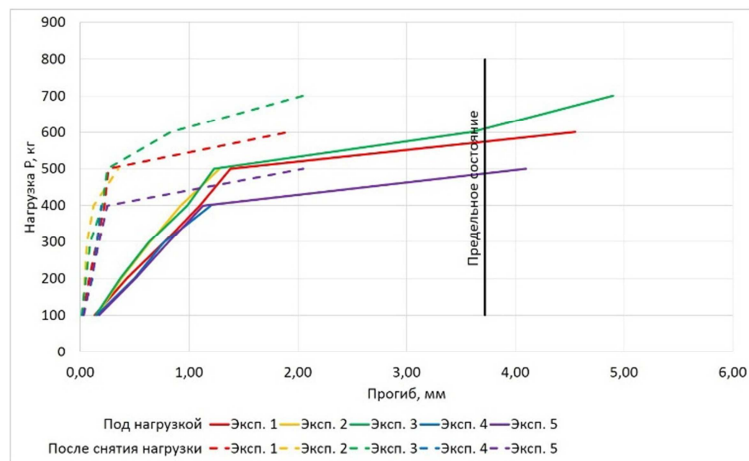


Рис. 2. Зависимости прогиба балки  $h$  от нагрузки  $P$  (без обжатия балки)

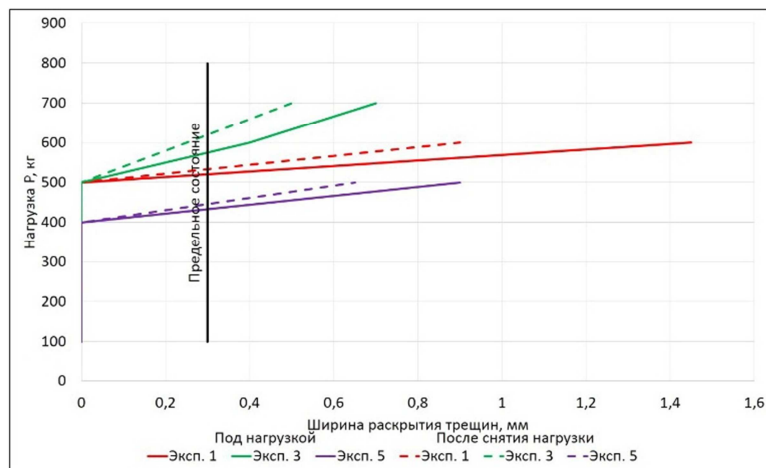


Рис. 3. Зависимости ширины раскрытия трещин  $\delta$  балки от нагрузки  $P$  (без обжатия балки)

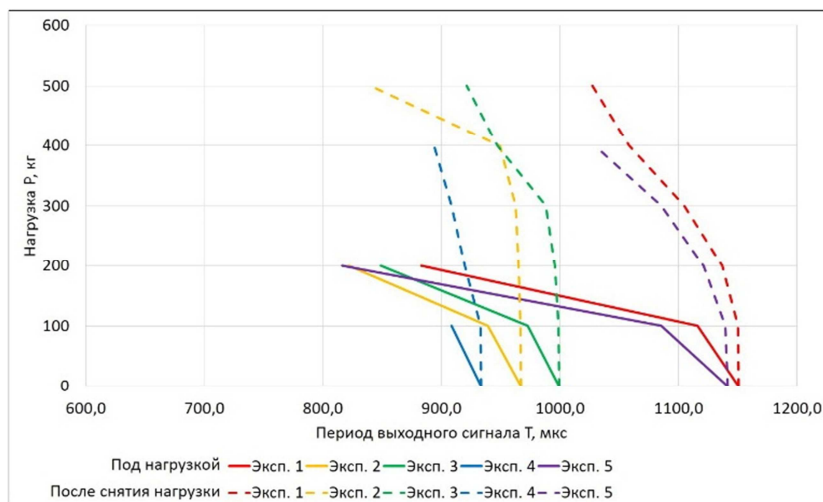


Рис. 4. Зависимости периода выходного сигнала струнного преобразователя  $T$  от нагрузки  $P$  (без обжатия балки)

Указанные зависимости для балки с обжатием представлены на рис. 5–7.

В ходе эксперимента были получены следующие результаты:

1. Эксперимент без обжатия балки:

- начало стадии образования трещин при нагрузках от 450 до 559 кг;
- полное разрушение балки при нагрузках от 485 до 753 кг;
- прогиб балки под нагрузками 100, 200, 300, 400 кг: от 0,13–0,17 мм; от 0,37–0,51 мм; от 0,63–0,81 мм; от 0,92–1,2 мм соответственно;
- остаточный прогиб балки после снятия нагрузками в 100, 200, 300, 400 кг: от 0,01–0,02 мм; от 0,04–0,11 мм; от 0,06–0,17 мм; от 0,12–0,25 мм соответственно.

2. Эксперимент с обжатием балки:

- начало стадии образования трещин при нагрузках от 630 до 756 кг;
- полное разрушение балки при нагрузках от 1086 до 1224 кг;
- прогиб балки под нагрузками 100, 200, 300, 400 кг: от 0,07–0,13 мм; от 0,29–0,45 мм; от 0,53–0,80 мм; от 0,73–1,06 мм соответственно;
- остаточный прогиб балки после снятия нагрузок в 100, 200, 300, 400 кг: от 0,03–0,05 мм; от 0,07–0,15 мм; от 0,1–0,27 мм; от 0,13–0,33 мм соответственно.

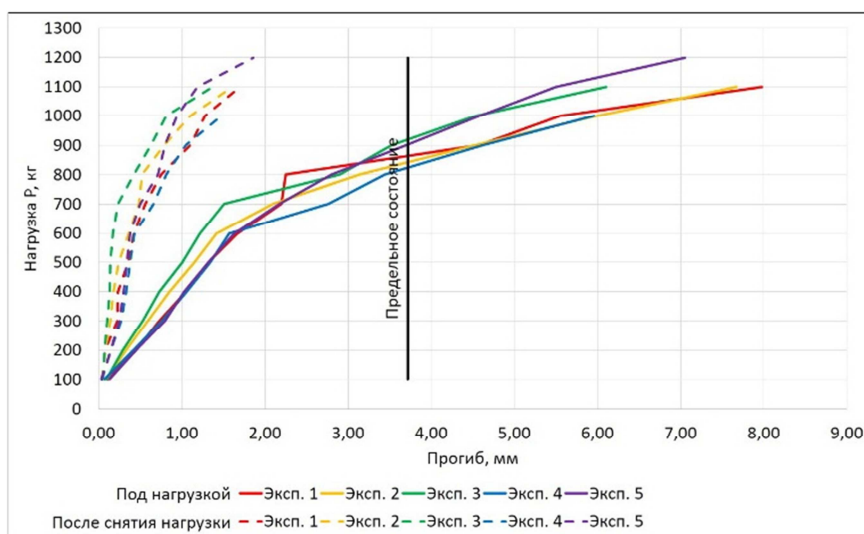


Рис. 5. Зависимости прогиба балки  $h$  от нагрузки  $P$  (с обжатием балки)



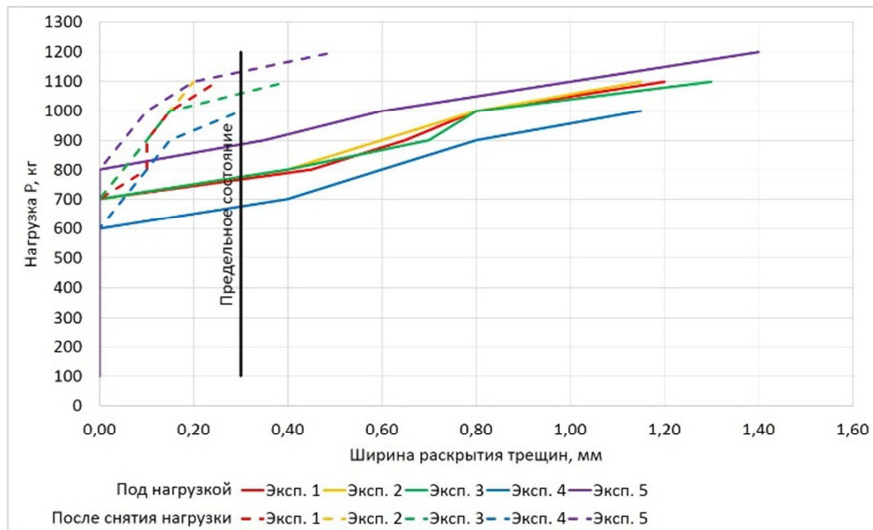


Рис. 6. Зависимости ширины раскрытия трещин  $\delta$  балки от нагрузки  $P$  (с обжатием балки)

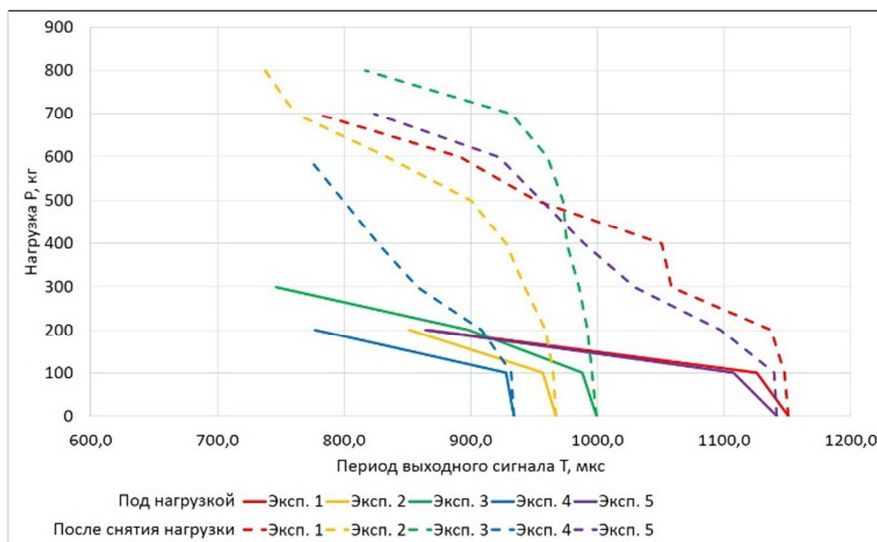


Рис. 7. Зависимости периода выходного сигнала струнного преобразователя  $T$  от нагрузки  $P$  (с обжатием балки)

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- стадия образования трещин для балок с обжатием наступает при нагрузках на 35–40 % выше, чем для балок без обжатия;
- полное разрушение балок с обжатием наступает при нагрузках в 1,6–2,2 раза выше, чем для балок без обжатия;
- прогиб балок с обжатием на 13–26 % меньше, чем для балок без обжатия при тех же значениях нагрузки;
- остаточный прогиб после снятия нагрузки для балок с обжатием в 1,3–2,5 раза больше чем для балок без обжатия при тех же значениях нагрузки.

Выявленный в процессе эксперимент эффект имеет общую природу с эффектом предварительного напряжения ЖБК [22, 24], однако он имеет свою специфику. Во-первых, предварительному напряжению подвергаются сборные ЖБК, изготавливаемые преимущественно в

заводских условиях, а несущие ЖБК специальных сооружений имеют, как правило, монолитное исполнение [18, 19, 20, 21] и возводятся непосредственно на строительной площадке без предварительного напряжения. Во-вторых, эффект предварительного напряжения сборных ЖБК рассчитывается и контролируется в процессе их производства. На стадии эксплуатации процесс предварительного напряжения сборных предварительно напряженных конструкций не контролируется. В несущих конструкциях специальных сооружений указанный эффект формируется в результате изменения НДС конструкций в процессе эксплуатации, в том числе в процессе аварийных воздействий, и также не контролируется. Есть основание предположить, что в случае изменения НДС, в процессе которого происходит не сжатие, а растяжение конструкции, выявленный эффект также будет иметь место, но с отрицательным знаком. В процессе же обследования, при проведении поверочных расчетов выявленный эффект не учитывается [1, 2, 22], что приводит к значительным погрешностям. Данное обстоятельство в конечном счете приводит к недостоверности оценки несущей способности конструкции и оценки категории ее технического состояния. Как показали результаты эксперимента, погрешности оценки несущей способности могут в этом случае превышать 60 % и более.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что для повышения достоверности оценки несущей способности конструкций и соответственно оценки категории их технического состояния в наиболее ответственных конструкциях специальных сооружений должно контролироваться их обжатие (или растяжение), сформировавшееся в процессе эксплуатации, в том числе после аварийных воздействий.

Следовательно, при оценке фактической несущей способности несущих конструкций, проводимой на основании поверочного расчета, в поверочном расчете должны учитываться не только полученные в результате обследования геометрические параметры конструкций, параметры их армирования, фактическая прочность строительных материалов, действующие нагрузки и уточненные расчетные схемы с учетом имеющихся дефектов и повреждений, но и параметры НДС этих конструкций, сформировавшиеся на момент проведения обследования.

Такой контроль может осуществляться путем установки в тело ЖБК датчиков долговременного контроля деформаций бетона и усилий в арматуре [19, 21], как это было реализовано в эксперименте. Начальные значения этих параметров могут быть получены с помощью технических средств систем мониторинга за состоянием строительных конструкций только в том случае [3, 6, 8, 12], если эти технические средства будут установлены в самый начальный момент возведения специального сооружения.

Теоретические основы такого подхода известны [11, 17, 20] и сводятся к актуализации расчетных моделей сооружений данными мониторинга и диагностики, которые включают процедуры учета появившихся трещин, изменения свойств материалов и параметров конструкций, построение адекватной численной модели массива грунтового основания, а также учета пространственного деформирования сооружений. Сложность в практической реализации такого подхода состоит в том, что актуализировать параметры НДС конструкции можно только в том случае, если имеются достоверные значения этих параметров на начальный момент времени (момент ввода объекта в эксплуатацию), а не их изменения только на определенном интервале времени [25].

Очевидно, что объективную оценку фактической несущей способности конструкций можно произвести не только на основе анализа информации о всех параметрах НДС конструкций на момент проведения обследования, но и на основе анализа информации об этих параметрах за весь период эксплуатации объекта. При этом определяющими из них являются максимальные и минимальные значения этих параметров за весь период существования объекта, в

том числе сформировавшиеся после аварийных воздействий на сооружение. Это положение особенно актуально для специальных сооружений, к которым предъявляются повышенные требования по обеспечению непрерывности контроля за их техническим состоянием.

Для реализации указанного требования системы мониторинга специальных сооружений должны отслеживать эти параметры НДС либо непрерывно, либо иметь в своем составе средства, способные, как минимум, фиксировать информацию о максимальных и минимальных значениях этих параметров за все время эксплуатации объекта. Это требование должно соблюдаться даже в случае отключения систем мониторинга от питания (например, при авариях). Проведенные в данном направлении исследования позволили авторам разработать струнный преобразователь – датчик деформаций, реализующий данные требования. Новизна принятых при создании такого преобразователя технических решений подтверждена патентом на изобретение [26]. Разработка и совершенствование программно-методического обеспечения систем мониторинга специальных сооружений [27] должны базироваться на использовании данных, получаемых с помощью СП предложенного типа. Сами методики обследования, помимо процедур, предусмотренных действующими нормативными документами в области обследования сооружений [1, 2], должны включать в себя процедуры, обеспечивающие получение и использование в поверочных расчетах данных о параметрах НДС объекта, сформировавшихся за весь период его существования, в том числе сформировавшихся после аварийных воздействий на сооружение.

Полученные результаты эксперимента позволяют сформулировать будущие направления исследований:

- исследование влияния на несущую способность ЖБК специальных сооружений не только сжимающих, но и растягивающих усилий;
- исследование выявленного эффекта для других типов строительных конструкций, например стальных;
- совершенствование программно-методического обеспечения систем мониторинга с использованием СП предложенного типа.

### Список используемых источников

1. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: МНТКС, 2012. – 89 с.
2. СП 13-102-2003. Правила обследования строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2011. – 47 с.
3. *Коргина М.А.* Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий и сооружений в ходе мониторинга их технического состояния.: дис. канд. техн. наук / Мария Андреевна Коргина. – М., 2008. – 225 с.
4. *Ермаков В.А.* Методика МКЭ-оценки несущей способности конструкций с учетом наличия дефектов / А.В. Коргин, В.А. Ермаков. – М.: Вестник МГСУ, 2009. – С. 26–28.
5. *Ермаков В.А.* Методика актуализации расчетных моделей зданий и сооружений в ходе мониторинга их технического состояния.: дис. канд. техн. наук / Ермаков Валерий Алексеевич. – М., 2012. – 226 с.
6. *Крутиков О.В., Блохина Н.С., Сошников А.А.* Контроль состояния сооружений при непрерывном мониторинге: накопление и предоставление данных // Промышленное и гражданское строительство. – М.: ООО «Издательство ПГС», 2011. – С. 35–37.
7. *Базаров А.Д.* Разработка аппаратно-программного комплекса для контроля динамических характеристик инженерных сооружений.: дис. канд. техн. наук / Базаров Артем Дамбиевич. – Томск., 2014. – 134 с.
8. *Хиллер Бернд, Ямбаев Х.К.* Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга. – Новосибирск: Вестник СГУГиТ, 2016. – С. 48–61.

9. *Лысов Д.А.* Автоматизированный контроль конструктивной безопасности уникальных объектов, включая высотные и большепролетные / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев, Д.А. Лысов, и др. // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – М.: РУДН, 2011. – С. 55–61.
10. *Блохина Н.С., Сошников А.А.* Формирование структуры и состава банка данных системы эксплуатационного мониторинга уникальных строительных объектов // *Вестник МГСУ*. – М.: НИ МГСУ, 2012. – С. 288–292.
11. *Сошников А.А.* Теоретические основы информационного обеспечения систем непрерывного мониторинга технического состояния уникальных сооружений // *Вестник МГСУ*. – М.: НИ МГСУ, 2012. – С. 283–287.
12. *N. Gusev, L. Svatovskaya, A. Kucherenko.* Effect of changing of the parameters of the cable network of monitoring systems of high-rise buildings on the basis of string converters on their operability // *E3S Web of Conferences* 33, 02069 (2018). – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302069> (дата обращения: 15.09.2019).
13. *J.P. Lynch* An overview of wireless structural health monitoring for civil structures // *The Royal Society*. – 2007. – March. – URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1932> (дата обращения: 15.09.2019).
14. *Swartz R.A., Lynch J.P.* Damage Characterization of the Z24 Bridge by Transfer Function Pole Migration // *Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC) XXVI*, 4-6 February 2008. – Orlando, Florida. – 13 p.
15. *Rades M.* Mechanical Vibrations II. Structural Dynamic Modeling. – Rumania: University Politehnica, Bucharest, 2010. – 354 p.
16. *Olson L.D.* Dynamic Bridge Substructure Evaluation and Monitoring. – USA: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2005. – 219 p.
17. *Chen H-P.* Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures. – Wiley-Blackwell, 2018. – 336 p.
18. *Гусев Н.Н., Исхаков Ш.Ш.* Опыт обследования технического состояния строительных объектов космической отрасли на основе современных нормативных документов // *Сборник научных трудов*. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – С. 95–97.
19. *Исхаков Ш.Ш., Васкевич В.М., Ковалёв Ф.Е.* Опыт применения систем испытания и долговременного контроля на стартовых сооружениях наземных космических комплексов. Безопасность России. Безопасность строительного комплекса: коллект. монография / под ред. Н.А. Махутова, О.И. Лобова, К.И. Ерёмина. – М.: МГОФ «Знание», 2012. – С. 711–719.
20. *Гусев Н.Н., Прозоровская С.Д., Бажухин А.В.* Проблемные вопросы создания и эксплуатации систем контроля и безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. – СПб.: ФГБОУ ВО СПбГУПС, 2015. – С. 45–52.
21. *Гусев Н.Н.* Опыт применения систем испытаний и долговременного контроля на стартовых сооружениях наземных космических комплексов // *Научно-технический сборник Безопасность России. Безопасность строительного комплекса*. – М.: МГОФ, 2012. – С. 711–719.
22. *Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.* Актуальные вопросы обследования и усиления каменных и бетонных конструкций // *Сборник научных статей XXII Научно-методической конференции (28 марта 2018 г.)*. – СПб.: ВИ(ИТ) ВАМТО им. генерала армии А.В. Хрулёва. – С. 28–32.
23. *Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.* Перспективы совершенствования тензометрического комплекса систем испытаний и долговременного контроля для оценки эксплуатационного состояния стартовых сооружений после аварийных ситуаций // *Сборник научных трудов участников межвузовской научно-практической конференции (12 апреля 2018 г.)*. – СПб.: ВИ(ИТ) ВАМТО им. генерала армии А.В. Хрулёва. – С. 30–33.
24. СП 63.13330.2012. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минрегион РФ, 2012. – 152 с.

25. ГОСТ Р 22.1.13–2013 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мероприятия по гражданской обороне, мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Требования к порядку создания и эксплуатации. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.

26. Пат. 2685803 РФ: МПК G01L 1/10 (2006/01). Датчик перемещения / Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.; заявители и патентообладатели Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. – № 2017144153/28; заявл. 15.12.2017 ; опубл. 23.04.2019, Бюл. № 12. – 3 с.

27. Гусев Н.Н., Исхаков Ш.Ш. Задачи совершенствования программно-методического обеспечения в нормативной базе по диагностике и мониторингу состояния строительных объектов // Научно-технический сборник Безопасность России. Безопасность строительного комплекса. – М.: МГОФ, 2012. – С. 548–558.

Я.Н. Гусеница,

*кандидат техн. наук*

Санкт-Петербург, Военный инновационный технополис «ЭРА»;

Ю.А. Загруддинов\*,

*кандидат техн. наук;*

С.Ю. Карасев\*,

*кандидат техн. наук;*

С.А. Мачнев\*,

*кандидат техн. наук*

\*Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЕМНО-КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ НА ЭТАПЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Рассмотрены новые подходы к выбору оптимального конструктивного решения при проектировании специальных сооружений. Представлен метод оптимизации объемно-конструктивных решений специальных сооружений, в котором приведены показатель и критерий эффективности разработки принципиального варианта несущего остова и его основного конструкционного материала с учетом обеспечения требуемой защищенности.

Ключевые слова: специальное сооружение, защищенность, этап проектирования, конструктивное решение.

Специальные сооружения (СС) являются важным элементом боевого управления войсками в мирное и военное время. На современном этапе модернизации и технического перевооружения систем вооружения ВС РФ необходимо произвести оценку подходов существующего типового проектирования объектов данного назначения. Проведенный анализ показывает, что разработанные в середине прошлого века подходы к проектированию СС на сегодняшний день уже не позволяют в полной мере учесть и обеспечить современные тактико-технические требования, предъявляемые к ним [1, 2, 3]. Это вызвано множеством разносторонних факторов, таких как: совершенствование средств поражения; существенное изменение массогабаритных и эксплуатационных характеристик технического и технологического оборудования; развитие строительных технологий и конструкционных материалов. Следовательно, для того чтобы при новом строительстве СС была обеспечена в комплексе система тактико-технических, эксплуатационных и общестроительных требований, необходимо своевременно дополнять инновационными решениями практику проектирования.

Важнейшим тактико-техническим требованием для СС является обеспечение необходимого уровня защищенности и, как следствие, живучести при воздействии современных средств поражения. Данное требование дополняется тем, что при альтернативном выборе принятых решений должно быть обеспечено снижение затрат на строительство. Кроме того, на выбор объемно-конструктивного решения (ОКР) СС существенно влияет применяемый вид конструкционного материала несущих и ограждающих конструкций, условия посадки относительно поверхности земли, способы защиты от механического воздействия средств поражения противника.

Оптимальные объемно-конструктивные решения на этапе предварительного проектирования СС формируются в результате рассмотрения различных геометрических решений несущего остова  $(i) \{i|1 < i < 5\}$ , применения различных видов конструкционного железобетона  $(j) \{j|1 < j < 5\}$  в условиях обеспечения требуемой защищенности сооружений.

Для осуществления непосредственного процесса оптимизации ОКР СС необходимо формирование альтернативных вариантов ОКР СС ф-го типа. В качестве альтернативных вариантов несущего остова СС рассматриваются (рис. 1) [4]:

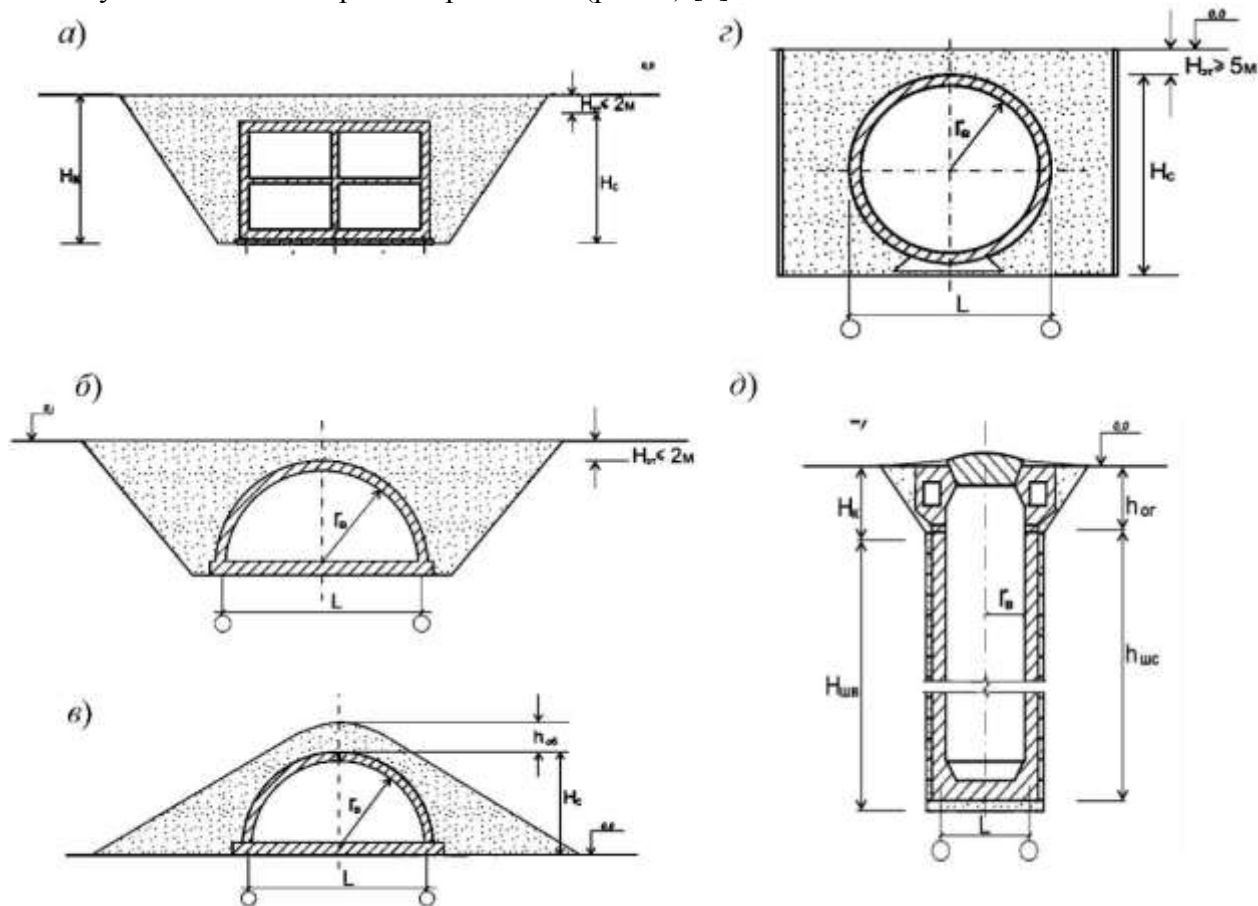


Рис. 1. Схемы несущего остова специальных сооружений:

- а – котлованное рамное сооружение; б – котлованное арочное сооружение;  
в – котлованное купольное сооружение; г – котлованное сферическое сооружение;  
д – шахтное сооружение

В качестве альтернативных вариантов видов конструкционного железобетона рассматриваются:

- сборный железобетон;
- сборно-монолитный железобетон;
- монолитный железобетон;
- армобетон (изготовленный на основе армокаркасов из полосовой и тонкой листовой стали для внешней и внутренней граней и высокопрочного бетона);
- металлобетон (изготовленный на основе толстой листовой стали для внешней и внутренней граней и высокопрочного бетона).

Представленные конструкционные материалы обладают различной несущей способностью. При этом чем выше несущая способность материала, тем выше становится его стоимость.

Решение указанной задачи для СС определенного ф-го назначения осуществляется методом структурно-параметрической оптимизации с использованием критерия эффективности в виде минимума стоимости затрат на обеспечение требуемого уровня защищенности единицы внутреннего объема сооружения:

$$K_{\text{эф(ОКР)}} = \min \{ \Pi_{\text{эф}(ij)} \}, (i=1(1)5; j=1(1)5). \quad (1)$$



Рис. 2. Блок схема алгоритма определения оптимального объемно-конструктивного решения специального сооружения на этапе предварительного проектирования

В выражении (1)  $\Pi_{\text{эф}(ij)}$  обозначен показатель эффективности оптимизации ОКР  $i$ -го типа при возведении сооружения из  $j$ -го вида конструкционного железобетона, тыс. руб/м<sup>3</sup>:

$$\Pi_{\text{эф}(ij)} = k_{ij} f_{k(ij)} S_{k(б)}, \quad (2)$$

где  $k_{ij}$  – коэффициент, характеризующий относительное объемно-конструктивное удорожание варианта  $ij$ -го типа ОКР по отношению к базовому варианту ОКР – котлованному рамному СФС;

$f_{k(ij)}$  – удельный расход конструкционного железобетона  $j$ -го вида на защитные и ограждающие конструкции  $i$ -го варианта ОКР (при условии обеспечения тре-



буемой степени защиты сооружения);  
 $S_{k(б)}$  – удельная стоимость затрат на возведение единицы полезного объема сооружения из конструкционного железобетона для базового варианта ОКР сооружения, тыс.руб/м<sup>3</sup>.

Кроме того, для формирования альтернативных вариантов ОКР сооружений задаются варианты СС по назначению ( $\phi = 1(1)5$ ), где основной показатель – требуемая полезная площадь  $F_{\phi(тр)}$ , м<sup>2</sup>.

Применяя известные методы предварительного оперативного расчета параметров поперечных сечений защитных и ограждающих конструкций, требуемых зазоров на размещение и работу системы амортизации (СА), коэффициентов требуемого увеличения внутреннего объема сооружений для размещения СА и компенсации неиспользованного объема сооружений из-за пространственной кривизны защитных конструкций, можно сформировать множество вариантов ОКР СС по назначению. Однако основным требованием при формировании множества вариантов ОКР СС остается необходимая степень их защиты от поражающих факторов средств поражения, для чего необходимо провести оценку защищенности СС при воздействии расчетных средств поражения [5]. В ходе выполнения расчета – оценки выясняется достаточность или недостаточность защиты СС с учетом воздействия. При недостаточности защиты по местному действию расчета на СП принимается решение об изменении варианта ОКР СС или применении способов дополнительной конструктивной защиты ограждающих конструкций.

Для выбора окончательного варианта ОКР СС необходимо произвести технико-экономическую оценку по основным показателям двух лучших вариантов ОКР СС в виде приведения к базовому варианту. Базовым вариантом по затратам на возведение единицы внутреннего объема СС является вариант  $ij = 13$  – котлованное рамное сооружение на основе монолитного железобетона [6].

Представленный в данной публикации метод определения оптимального объемно-конструктивного решения специального сооружения на этапе предварительного проектирования наглядно представлен в виде блок схемы на рис 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный метод позволяет на этапе предварительного проектирования специальных сооружений определить их оптимальные объемно-конструктивные решения с заданными тактико-техническими требованиями по критерию минимальной стоимости строительства. В условиях модернизации и технического переоснащения систем вооружения ВС РФ данный метод может быть предложен Заказчикам для технико-экономической оценки выбранного варианта специального сооружения.

## Список используемых источников

1. Мачнев С.А., Загрудинов Ю.А. Метод оптимизации объемно-планировочных решений специальных фортификационных сооружений на этапе эскизного проектирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 175–181.
2. Бабкина Н.А., Макеев Н.Ф., Оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений общественных зданий в условиях комфортной среды // Инновационное развитие: Международный научный журнал. – 2017. – Вып. 8(13). – С. 5–6.
3. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях: учеб. пособие. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. – 152 с.

4. Сурин Д.В. Специальные фортификационные сооружения: учебник. – МО РФ, 2010. – 429 с.
5. Способ обоснования расчетных степеней защиты специальных сооружений при воздействии обычных средств поражения противника / Д.В. Сурин, А.М. Шевчук, С.Ю. Карасев и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 204–208.
6. Сурин Д.В., Стахно Р.Е. Оптимальное проектирование и оперативный расчет специальных фортификационных сооружений: учеб. пособие. – МО РФ, 2008. – 142 с.

Н.А. Есенина\*,  
кандидат физико-математических наук;  
А.А. Зайцев\*,  
кандидат техн. наук;  
Ю.С. Карасев\*

\*Санкт-Петербург, 23 ГМПИ – АО «31 ГПИСС»

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ЗАЩИТА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ОТ ЛЕДОВОЙ АБРАЗИИ**

В публикации представлены результаты испытаний экспериментальных исследований параметров ледовой абразии образцов бетона классов В30 и В60. Даны краткое описание условий проведения испытаний на лабораторной установке и результаты испытаний.

Ключевые слова: ледовая абразия, бетон, экспериментальная установка.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Повреждения гидротехнических сооружений (свайных оснований причалов, ростверков) из-за абразии вызываются не только механическим действием льда, но и периодическими замораживанием и размораживанием воды. Анализ данных по натурным измерениям, моделированию и расчёту истирающих нагрузок от торосов и других ледовых образований на морские сооружения, а также основные экспериментальные данные, на которых строятся теоретические исследования абразии от действия льда, представлены в работах [1, 2].

В первую очередь изучение процесса истирания конструкций льдом опирается на данные натурных (полевых) наблюдений за конструкциями устоев мостов и маяков, подвергающихся интенсивному истиранию при достаточно высокой скорости коррозионного износа марок бетона невысокой прочности. Так, наблюдения за истиранием маяков в Швеции показали, что за 24 года эксплуатации, износ 15 маяков находился в пределах от 3 до 140 мм при средней интенсивности истирания 0,2–7 мм в год.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для разработки мероприятий по защите гидротехнических сооружений от абразии необходимо получить экспериментальные данные о глубинах абразии для бетонов различных марок.

Для определения глубины истирания бетонов льдом была создана установка, реализующая возвратно поступательное движение образца бетона относительно неподвижного ледяного образца, имитирующего ледяное поле.

Общая схема установки показана на рис. 1, общий вид – на рис. 2.

Установка позволяет обеспечивать:

- длительное истирание образцов с размерами репрезентативной площади истирания;
- заданное нормальное давление на контакте и режим относительной скорости;
- удаление последствий трения абразивных материалов (обломков льда и бетона) в процессе истирания;
- заданный режим носит форму как статического, так и кинетического трения, поскольку фактическое движение льда имеет прерывистый характер.

Принцип действия установки следующий. Ледовый образец в виде ледяной плиты размерами 14×100 см крепится в металлической форме на неподвижном основании.

Бетонный образец устанавливается в специальной металлической обойме и пригружается грузом, вес которого может варьироваться.

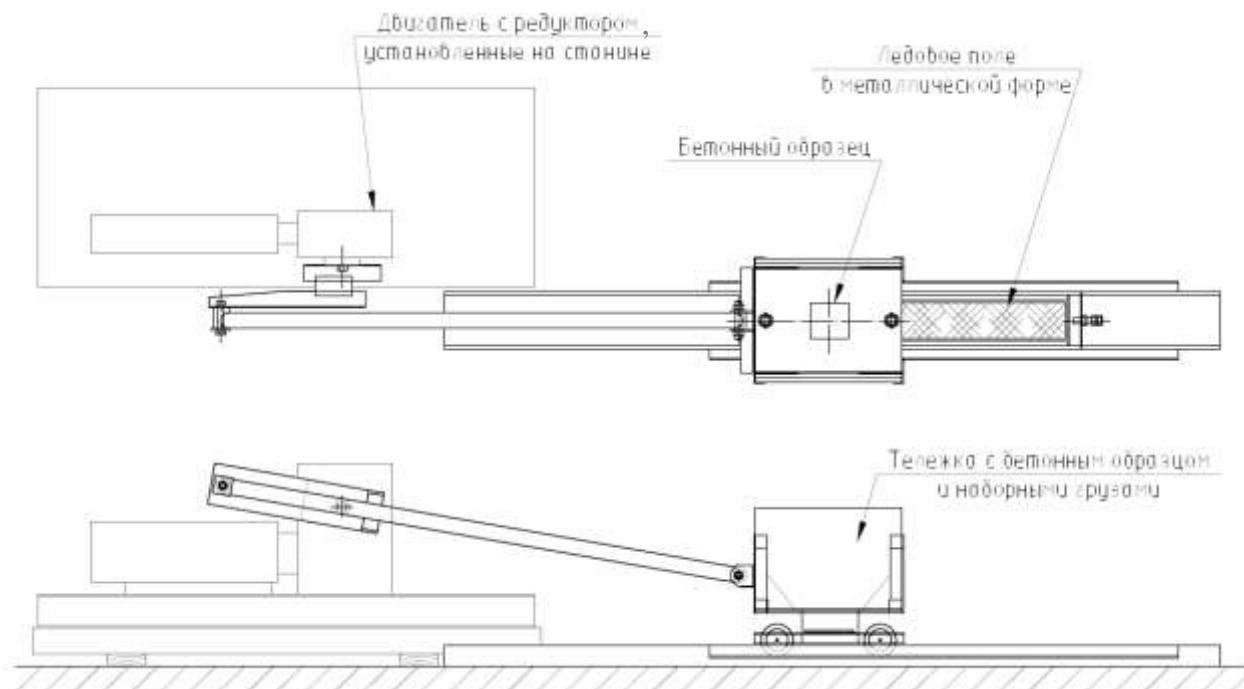


Рис. 1. Стендовая установка

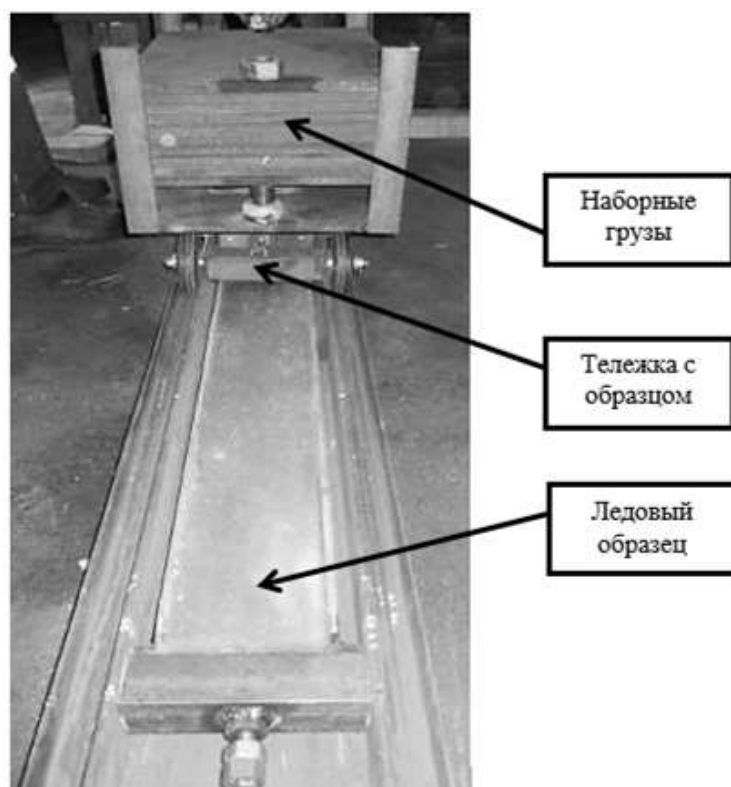


Рис. 2. Тележка с образцом и грузом для создания прижимного усилия

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

На установке, реализующей возвратно поступательное движение, выполнены испытания железобетонных образцов из бетонов классов В60, В30.

Общий вид образца для испытаний показан на рис. 3. Площадь истирания образца составляет 28 см<sup>2</sup>.



Рис. 3. Испытываемый образец из бетона В60

В опытах в каждой точке измерений выполнялось по 5 замеров глубины истирания, по которым вычислялись средние значения.

Для фиксированного значения пути истирания вычислялись средние значения и дисперсия величины истирания по всем измерительным точкам поверхности образца.

Измерения проводились при следующих значениях пройденного пути  $L = 1, 2, 4, 6, 8, 10$  и 12 км. Прижимное усилие составило 1 и 0,5 МПа.

Полученные средние (по длине образца) значения величины истирания приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние (по длине образца) значения величины истирания

Образец	Прижимное усилие	Путь $L$ , км						
		1	2	4	6	8	10	12
В60	1 МПа	0,27	0,27	–	0,31	0,31	0,31	0,27
В30	1 МПа	0,19	0,19	0,26	0,24	0,3	0,25	0,27
В60	0,5 МПа	0,03	0,03	0,03	0,048	0,04	0,05	0,05
В30	0,5 МПа	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08

По данным табл. 1 были построены зависимости средней по длине образца величины истирания от пути  $L$  (рис. 4 и 5). Зависимости, показанные на рис. 4, получены для образцов В30 и В60 при прижимном усилии  $P=1$  МПа, а зависимости, показанные на рис. 5, – для образцов В30 В60 при прижимном усилии  $P=0,5$  МПа.

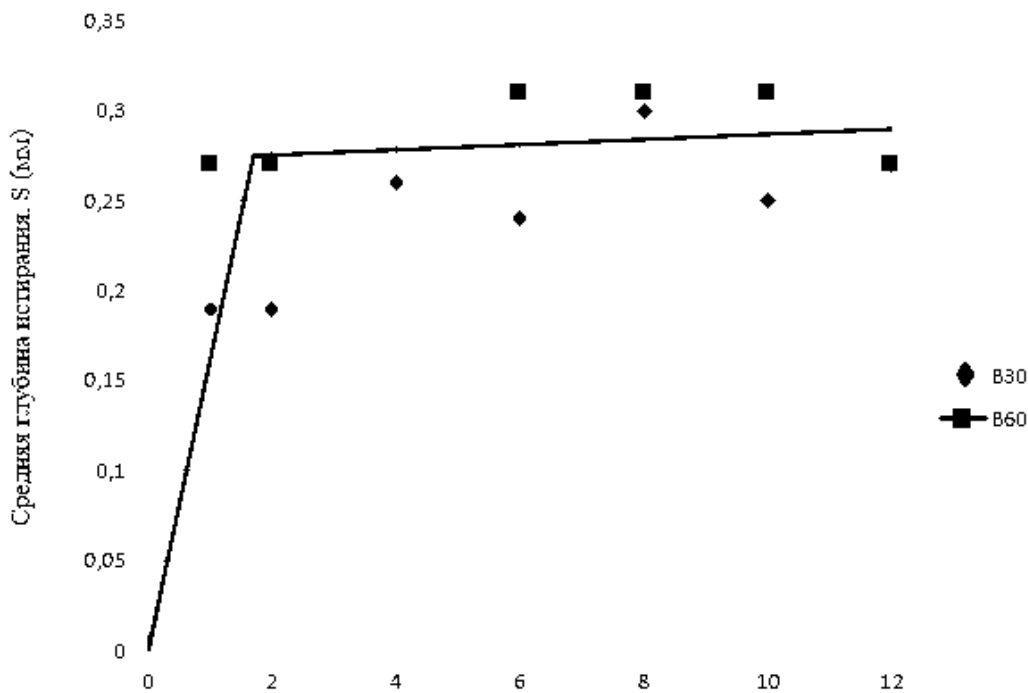


Рис. 4. Зависимости средней глубины истирания  $S$  (мм) от пути  $L$  (км) при  $P=1,0$  МПа

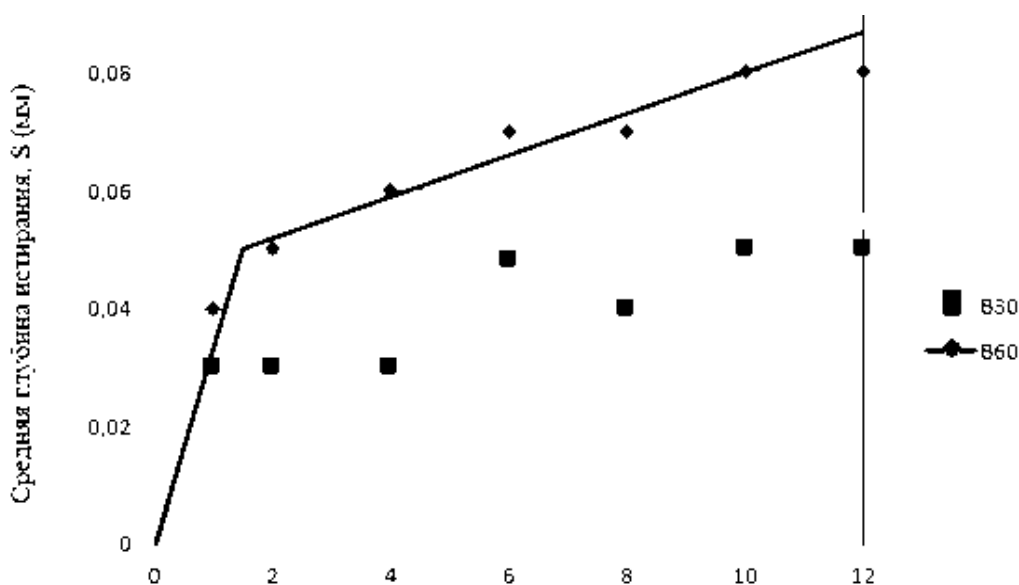


Рис. 5. Зависимости средней глубины истирания образцов  $S$  (мм) от пути  $L$  (км) при  $P=0,5$  МПа

Из анализа табл. 1 и рис. 4 и 5 следует, что процесс истирания имеет две стадии, первая стадия от 0 до 2 км пути – поверхностная область, от 2 до 12 км – область переходного режима. Скорость истирания на первом этапе составляет 0,14 мм/км, на втором – 0,003 мм/км при прижимном усилии  $P = 1$  МПа. При прижимном усилии  $P = 0,5$  МПа на первом этапе скорость истирания составляет 0,025 мм/км, на втором – 0,003 мм/км.

Из анализа рис. 4 и 5 можно также сделать вывод, что отличие в физико-механических характеристиках образцов В60 и В30 не существенно влияет на величину абразии и скорость истирания. Определяющим для величины истирания является прижимное усилие.

В целом анализ данных, полученных в экспериментах, а также приведенных в литературе [1–4] свидетельствует о большом разбросе величин, характеризующих скорость и глубину истирания бетонов льдом.

Результаты наиболее статистически значимых испытаний, выполненных для больших длин путей истирания ( $\approx 200$  км) приведены в [3], где предлагается при расчете величин истирания бетона льдом в качестве средней скорости истирания брать значение 0,002 мм/км.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования включали в себя определение абразии образцов бетона классов В30 и В60. Полученные экспериментальные данные о величинах абразии образцов бетонных конструкций используются для разработки способов защиты ГТС от абразии.

Для получения статистически значимых оценок о влиянии свойств материалов и прижимного усилия на величину абразии необходимо проведение исследований для больших длин путей истирания.

## Список используемых источников

1. *Moen E.* Ice abrasion data on concrete structures – an overview // Innovative construction concepts/ Hybrid structures. – 2007. – P. 66.
2. *Saeki H.* Mechanical properties between ice and various materials used in hydraulic structures: The Jin S. Chung award lecture // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2010. – Vol. 21, № 2. – P. 81–90.
3. *Вершинин С.А., Трусков П.А.* Трение и истирающее воздействие льда на сооружения континентального шельфа. – М., 2010. – 210 с.
4. ISO 19906:2010. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения арктического шельфа. – Geneva: ISO, 2010.

А.В. Квитко\*,  
кандидат техн. наук, доцент;

А.В. Орехов\*;

К.В. Петров\*,

доктор техн. наук, профессор

\*Санкт-Петербург, ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва

## **НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ВОЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В публикации описана последовательность этапов разработки научно-экспериментального обоснования оптимальных параметров балок пролетных строений военных железнодорожных мостов из композитных материалов.

Ключевые слова: пролетные строения, транспортные сооружения, композитные материалы.

Железные дороги занимают одно из важнейших мест среди транспортных коммуникаций на стратегических направлениях, так как именно по ним в оперативной зоне осуществляется почти половина всего объема подвоза материальных средств войскам. Прервать поставку материальных средств на длительные сроки можно путем разрушения в первую очередь мостовых переходов.

Опыт прошедших локальных войн и вооруженных конфликтов в Югославии, Ираке, Ливане, Ливии, Сирии показал, что мосты на автомобильных и железных дорогах являются объектами первоочередного воздействия при реализации противником концепции «глобальной изоляции района боевых действий» [1].

Восстановление и техническое прикрытие мостов на железных дорогах с использованием прежде всего табельных средств является наиболее важной и сложной задачей железнодорожных войск в современных условиях [2].

Для успешного решения комплекса задач по скоростному восстановлению железнодорожных мостов необходимо иметь на снабжении новые усовершенствованные конструкции мостового имущества из современных инновационных строительных материалов.

Таковыми материалами являются композитные материалы, их применение при изготовлении пролетных конструкций для строительства железнодорожных мостов позволит повысить темпы их восстановления [3].

Однако возникают противоречия в практике и теории. С одной стороны, необходимы новые конструкции пролетных строений из перспективных материалов для повышения темпов восстановления железнодорожных мостов, а с другой – необходимы методы расчета и проектирования этих конструкций. Таким образом, возникла необходимость разработки методики обоснования параметров балок пролетных строений из композитных материалов, предназначенных для строительства военных железнодорожных мостов.

В названной методике впервые с помощью методов математического моделирования был разработан алгоритм решения задачи с использованием современных средств программирования, позволяющий оценить зависимость напряженно-деформированного состояния конструкций из композитных материалов от нормативной временной подвижной нагрузки, возникающей от пропуска поездов. Методика была реализована на примере применения стеклопластика марки СППС-240 для изготовления балки коробчатого сечения пролетного строения военного железнодорожного моста (рис. 1).



Исходные данные						Длина конструкции, м	
h, м	b1, м	b2, м	t1, м	t2, м	s, м	L= 12,5	
1,0400	0,3000	0,3000	0,0900	0,0900	0,0742	Плотность материала (СППС - 240), т/м <sup>3</sup>	
						ρ= 1,8	
Геометрические характеристики						вес болтов	
A1= 0,02700	m2					коэф= 1,05	
A2= 0,02700	m2					Модуль упругости	
A3= 0,07719	m2					E= 2345347,00 тс/м <sup>2</sup>	
A4= 0,07719	m2					Расчетное сопротивление при изгибе	
A= 0,20838	m2					Rи= 7800,00 тс/м <sup>2</sup>	
z1= 0,04500	м					Расчетное сопротивление при действии осевых сил	
z2= 1,17500	м					Rо= 4077,47 тс/м <sup>2</sup>	
z3= 0,61000	м						
z4= 0,61000	м						
z= 0,61000	м						
Jy1= 0,00864	м <sup>4</sup>						
Jy2= 0,00864	м <sup>4</sup>						
Jy3= 0,03568	м <sup>4</sup>						
Jy= 0,08863	м <sup>4</sup>						
Sy1= 0,00122	м <sup>3</sup>						
Sy2= 0,03173	м <sup>3</sup>						
Sy3= 0,04708	м <sup>3</sup>						
Sy= 0,12711	м <sup>3</sup>						

Рис. 1. Фрагмент реализации предлагаемой методики в электронных таблицах программного продукта

В результате реализации методики были определены оптимальные параметры балок из стеклопластика в диапазоне длин от 18 до 23 м под нагрузку ВФ и 12,5 м под нагрузку ВТ и указаны их математические зависимости.

Для подтверждения результатов научных исследований была проведена экспериментальная проверка [5]. Целями экспериментальной проверки стали: определение соответствия разработанной методики реальным процессам, оценка работоспособности конструкции балки пролетного строения, изготовленной из стеклопластика.

Для достижения целей экспериментальной проверки необходимо было решить следующие задачи:

1. Экспериментально подтвердить работоспособность балки пролетного строения из композитных материалов на нормативную эквивалентную поездную нагрузку.
2. Сравнить теоретические результаты исследования с экспериментальными исследованиями.

Объектом исследования стали модели балок из стеклопластика.

Предметом исследования явились числовые значения параметров высоты и толщины полок балок, а также возникающие в них напряжения.

Для проведения экспериментальной проверки на Средне-Невском судостроительном заводе были изготовлены четыре модели балок из стеклопластика марки СППС-240 с варьируемыми конструктивными размерами с целью определения их напряженно-деформированного состояния в зависимости от приложенной нагрузки. Размеры модели были определены в соответствии с основными положениями теории подобия и физического моделирования.

Марка стеклопластика, из которой выполнена модель, СППС-240, модуль упругости  $E=23000$  Мпа (рис. 2).

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов: машины испытательной универсальной УТ-05-2000 с нагружающей рамой грузоподъемностью 2000 кН, электронного блока управления (рис. 3).

Принцип действия универсальной испытательной машины основан на преобразовании тензометрическим датчиком силы нагрузки, приложенной к испытываемому образцу, в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этой нагрузке.

Для получения напряжений на модели балок были припаяны тензометрические датчики. После приложения нагрузки сигнал от тензометрических датчиков передавался на многоканальный измерительный комплекс в виде мгновенных напряжений.

Полученные в ходе теоретических исследований зависимости напряжений, возникающих в балках из композитных материалов от нагрузки, представлены на рис. 4.



Рис. 2. Мелкомасштабная модель балки из стеклопластика



Рис. 3. Машина испытательная универсальная УТ-05-2000

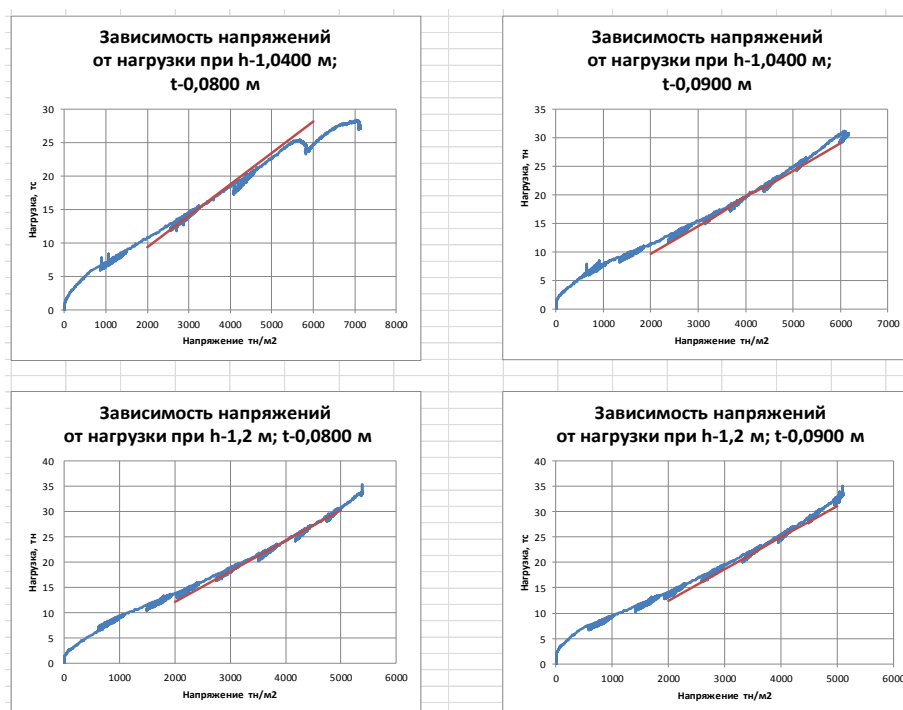


Рис. 4. Зависимости напряжений, возникающих в балках из композитных материалов, при различных нагрузках

При оценке значений напряжений, полученных при проведении экспериментальной проверки с теоретическими данными (табл. 1; 2; 3; 4), был получен корректировочный коэффициент, который введен в метод расчета напряжений:

$$K_{\text{кор}} = \frac{G_{\text{теор}}}{G_{\text{эксп}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{теор}}$  – значения нормальных напряжений, полученных в теории;

$G_{\text{эксп}}$  – значения нормальных напряжений, полученных в результате экспериментальной проверки.

Таблица 1

**Оценка зависимости значений напряжений от нагрузки h-1,0400 м при t-0,0800 м**

$F$ , тс	$G_{\text{теор}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$G_{\text{эксп}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$K_{\text{кор}}$
10	2200	1700	1,29
15	3250	3200	1,015
20	4300	4450	0,966
25	5350	5450	0,988
Среднее значение, $G_{\text{ср}}$			1,065

Таблица 2

**Оценка зависимости значений напряжений от нагрузки, h-1,2 м при t-0,0800 м**

$F$ , тс	$G_{\text{теор}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$G_{\text{эксп}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$K_{\text{кор}}$
15	2500	2300	1,0869
20	3350	2300	1,015
25	4200	4100	1,024
30	4950	4900	1,01
Среднее значение, $G_{\text{ср}}$			1,034

Таблица 3

**Оценка зависимости значений напряжений от нагрузки h-1,0400 м при t-0,0900 м**

$F$ , тс	$G_{\text{теор}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$G_{\text{эксп}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$K_{\text{кор}}$
10	2000	1700	1,176
15	3150	2900	1,086
20	4050	4100	0,987
25	5150	5100	1,0098
Среднее значение, $G_{\text{ср}}$			1,0534

Таблица 4

**Оценка зависимости значений напряжений от нагрузки h-1,2 м при t-0,0900 м**

$F$ , тс	$G_{\text{теор}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$G_{\text{эксп}}$ , тс/м <sup>2</sup>	$K_{\text{кор}}$
15	2400	2200	1,091
20	3300	3100	1,065
25	4000	4000	1
30	4800	4600	1,043
Среднее значение, $G_{\text{ср}}$			1,0498

Физический смысл коэффициента состоит в том, что при значении больше 1 в пределах от 1,034 до 1,0534 параметры балки будут наиболее оптимальными:

$$K_{\text{кор}} = \frac{\sum_{t=1}^4 K_{\text{кор}}}{4} = \frac{1,065 + 1,034 + 1,0534 + 1,0498}{4} = 1,053.$$

**Вывод.** Полученные значения коэффициента подтвердили работоспособность и пригодность предлагаемой методики.

### Список используемых источников

1. Низов А.С., Попов Д.И., Ложечников Г.А. Организация восстановления железных дорог: учебник. – СПб.: ВАМТО, 2014.
2. Организация восстановления мостов на железных дорогах: учеб. пособие / Б.М. Григорьев, В.А. Вуколов, В.А. Вороной и др. – СПб.: ВА МТО, 2015. – 359 с.
3. Орехов А.В. Оптимальные геометрические параметры главной балки из полимерных КМ. // Сборник научных статей по материалам научно-теоретической конференции. – СПб.: ВАМТО, 2017. – С. 34–37.
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620558. Результаты обоснования оптимальных параметров сечения главных балок пролетных строений ВЖДМ из КМ / А.В. Орехов, А.Ю. Федоров, О.А. Хижавский. – Заявл. 09.01.2018, опубл. 11.04.2018.
5. Адлер Ю.П., Марков Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

А.В. Клепов,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
А.Ю. Чернобаев;  
И.С. Щербина,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

В работе выполнен анализ проблемы обоснования выбора стратегий технического обслуживания и ремонта (ТОиР) сложных технических систем, входящих в состав наземного технологического оборудования ракетно-космических комплексов.

Разработана содержательная модель функционирования сложной технической системы (СТС), учитывающая влияние различных факторов на эффективность ее функционирования.

Сформулирована задача анализа стратегий ТОиР с точки зрения влияния приведенных в модели факторов на эффективность их применения. Предложены подходы к решению задачи с использованием метода анализа иерархий, представлена иерархическая структура критериев выбора стратегий ТОиР.

Ключевые слова: стратегия технического обслуживания, ремонт, отказ, сложная техническая система.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При проектировании, создании и эксплуатации сложных технических комплексов (СТК) можно выделить ряд задач, которые связаны с разработкой концепции и программы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) для входящих в состав СТК систем [1].

Программа ТОиР содержит общие принципы организации ТОиР изделий и их основных компонентов и включает в себя, как минимум, описание предполагаемых методов организации ТОиР, ориентировочный состав основных работ по ТОиР, а также наличие и прогнозируемую периодичность их проведения.

Документы по стандартизации в области интегрированной логистической поддержки содержат рекомендации относительно того, что разработку программы ТОиР необходимо начинать еще на ранних стадиях проектирования и создания СТК. Это позволяет обеспечить разработчиков необходимой информацией для обоснования стратегий снабжения запасными частями, определения целесообразного уровня замен составных частей, определения потребностей в инструменте и испытательном оборудовании, установлении численности, квалификации и загрузки обслуживающего и ремонтного персонала, а также обосновании иных потребностей для поддержки предлагаемой концепции ТОиР.

Программу ТОиР составляют до начала эксплуатации изделий, однако на этапе проектирования из-за отсутствия необходимой информации корректно решить такую задачу с использованием строгих научных подходов не удастся. Поэтому часто такая программа представляет собой результат использования имеющихся наработок, полученных разработчиком при выполнении похожих проектов.

Такой способ является допустимым, но не всегда достаточно обоснованным, поскольку во многих случаях, особенно когда речь ведется о наземном технологическом оборудовании (НТО) ракетно-космических комплексов (РКК), это оборудование является в значительной степени уникальным, и использование накопленных на разных объектах данных о ТОиР аналогов для новых систем не всегда бывает корректным.

С научной точки зрения разработка программы ТОиР в определенной мере эквивалента задаче выбора стратегии управления техническим состоянием технических систем. Строго говоря, эта задача новой не является, и с той или иной степенью детализации она уже решалась, например в [2, 3, 4]. Однако необходимо отметить, что решаемые в этих работах задачи в большинстве своем относились к стадии эксплуатации СТК и касались корректировки существующих способов ТОиР, либо эти задачи решались в общем виде (в силу своей специфики), без учета рисков и возможного ущерба, вызванных отказами оборудования. Поэтому разработка предложений и подходов к решению задачи синтеза программы ТОиР как для существующих, так и для перспективных СТК НТО РКК имеет достаточно важное значение.

При рассмотрении возможных способов решения задачи разработки программы ТоиР необходимо обратить внимание на хорошо зарекомендовавшую себя методологию RCM (сокр. от англ. Reliability Centered Maintenance – обслуживание, ориентированное на надежность) анализа [5, 6], использование которой в конечном итоге направлено на повышение эффективности процессов обеспечения требований надежности и безопасности сложных систем за счет формирования обоснованной программы технического обслуживания и ремонтов оборудования.

Важным достоинством методологии RCM является идея принятия решения о выборе стратегии управления безотказностью изделия на основе классификации последствий его отказов. Выбор предпочтительной стратегии производится из заранее predetermined спектра стратегий, применимых в контексте локализации возможных последствий данного вида отказа.

В процессе RCM анализа рассматривают различные виды потенциальных отказов, которые в зависимости от имеющихся у них характеристик, связанных с их последствиями, классифицируются на следующие виды:

- а) скрытые или явные отказы;
- б) отказы, влияющие на безопасность, экономичность и эффективность эксплуатации изделий.

Принадлежность характеристик возможных отказов к какой-либо категории (категориям) определяет возможность выбора конкретной стратегии или их комбинации.

Такой подход представляется весьма интересным, но требующим своего развития применительно к специфике технологического оборудования ракетно-космической отрасли.

Для формализации и решения задачи синтеза программы ТОиР авторами разработана представленная ниже содержательная модель функционирования системы.

## СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Сложная техническая система состоит из множества  $n$  систем более низкого уровня иерархии (изделий), связанных между собой определенными структурными и функциональными отношениями, т.е. они образуют некоторую структуру  $St$ .

В процессе эксплуатации системы управление ее техническим состоянием осуществляется путем проведения ТОиР ее составных частей.

ТОиР изделия  $n$  должны производиться в соответствии с наиболее приемлемой для этого изделия и системы в целом стратегией  $s_n$ .

Используя применяемую в RCM анализе классификацию, к перечню таких стратегий отнесем следующие:

- плановое восстановление или замена изделия  $s_{1n}$ ;
- обслуживание оборудования по техническому состоянию  $s_{2n}$ ;
- эксплуатация до отказа и единовременные изменения  $s_{3n}$ .

В общем случае для ТОиР изделия может быть применена одна или нескольких допустимых стратегий  $s_{kn}^{\partial}$  из перечисленного списка, т.е.  $s_n : \{s_{kn}^{\partial}\} \subset \{s_{kn}\}$ , где  $k = 1, 2, 3$ ;  $n = \overline{1, N}$ .

Очевидно, что для отдельных изделий должен быть произведен выбор одной единственной стратегии  $s_n^*$  из  $\{s_{kn}^\partial\}$ , которая по каким-либо критериям превосходит другие. Полученное таким образом множество наилучших стратегий при определенных условиях может рассматриваться как основа стратегии ТОиР для системы в целом, т.е.

$$S^* = \{s_n^*\}, \text{ где } k = 1, 2, 3 \text{ и } n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Однако, несмотря на кажущуюся очевидность сделанного выше утверждения, строго говоря, это множество в своей совокупности оптимальным являться не будет, так как стратегия  $S$  будет представлять собой достаточно разнородную смесь стратегий входящих в нее изделий, которую на практике трудно реализовать, потому что потребуются решение задачи их комплексирования. Формально, если взять за основу классическую постановку задачи, приведенную в [7], эта задача может быть представлена в следующем виде:

$$S^*: \quad \operatorname{argmax}_{S \in \Delta} P^{\text{ДЦ}}(S), \quad \text{где } \Delta = \{s_{kn}^\partial \mid c(s_{kn}) \leq c^\partial, t(s_{kn}) \leq t^\partial\}, \quad (2) \\ k = 1, 2, 3 \text{ и } n = \overline{1, N}.$$

где  $P^{\text{ДЦ}}$  – вероятность достижения цели (показатель эффективности) применения стратегии  $S$  ТОиР системы;

$\Delta$  – область допустимых управлений  $S$ ;

$c, t, c^\partial, t^\partial$  – виртуальные и допустимые значения ресурсоемкости и оперативности реализации стратегии  $s_{kn}^\partial$ .

При решении такой задачи необходимо учитывать, что эффективность применения той или иной стратегии зависит от достаточно большого числа факторов, влияние которых на эффективность должно быть детально исследовано и учтено.

Можно выделить две группы таких факторов. Первая включает в себя внешние по отношению к системе факторы, а вторая такие, которые связаны с характеристиками самой системы и ее составных частей.

Первая группа факторов (внешние факторы) определяется тем, что сложная система функционирует (эксплуатируется) в условиях воздействия множества факторов окружающей среды  $B'$  (например, климатические и погодные условия, характеристики местоположения системы).

Также к внешним факторам относится множество характеристик организации процесса функционирования системы  $A''$ . К последним можно отнести:

- заданные в нормативно-технической документации (НТД) требования по безопасности и экологичности;
- заданные параметры технологических процессов, их напряженность;
- заданные параметры организационной структуры эксплуатирующего предприятия;
- параметры структуры заказов и поставок запасных частей (ЗИП) и материальных средств (МС).

Вторая группа факторов отражает влияние тактико-технических и эксплуатационно-технических характеристик  $A'$  системы и изделий  $n$ , их структуры  $St$  и имеющих между ними связей, а также требований по их производительности.

Кроме того, в процессе эксплуатации системы у входящего в ее состав изделия  $n$  возможно наступление состояния отказа  $r_n$ , а система в целом может быть охарактеризована множеством  $R$  возможных отказов составных частей, т.е.  $R = \{r_n\}$ , где  $n = \overline{1, N}$ .

Каждый отказ  $r_n$  обладает множеством характерных признаков  $x_n$ , таких как очевидность отказа (скрытый или явный), характер проявления (постепенный или внезапный), а также вероятность отказа.

Отказы составных частей связаны с рисками наступления негативных последствий, которые могут влиять на такие характеристики процесса функционирования системы, как его безопасность, результативность, ресурсоемкость и оперативность.

В первом случае, когда речь идет о рисках, связанных с безопасностью  $p_b$ , негативные последствия традиционно рассматриваются в контексте возможного ущерба, который может быть нанесен жизни и здоровью человека, окружающей среде (природе) и имуществу.

Риск ухудшения результативности процесса  $p_z$  связан с такими последствиями, как:

- невыполнение системой заданной функции, что повлияло на результаты функционирования СТК в целом;
- невыполнение заданной функции составной частью системы, повлекшее за собой ухудшение результатов отдельной технологической операции;
- иные, как правило, более мягкие последствия, не имеющие признаков первых двух (их наличие или отсутствие определяется дополнительно сформулированными задачами функционирования системы).

Следующие два вида последствий связаны с рисками возникновения материального ущерба из-за необходимости устранения отказа и возникающими при этом задержками выполнения основной цели функционирования системы.

Риски материального ущерба  $p_c$  и возникновения задержек работ  $p_t$  определяются наличием в распоряжении эксплуатирующей организации (ЭО) необходимых для устранения последствий отказов технических средств, ЗИП и МС, а также специалистов, т. е. от структуры системы заказов и поставок ЗИП и МС и организационно-штатной структуры ЭО.

Таким образом, каждому возможному отказу  $r_n$  из множества  $R$  может быть поставлено в соответствие множество свойственных ему характерных признаков и рисков:

$$r_n: \{x_n, p_b, p_z, p_c, p_t\},$$

- где  $x_n$  – множество характерных признаков отказа;  
 $p_b$  – характеристики риска нанесения ущерба человеку, ОС, имуществу;  
 $p_z$  – характеристики риска невыполнения поставленных перед системой задач;  
 $p_c$  – характеристики риска возникновения материального ущерба, связанного с устранением последствий отказа;  
 $p_t$  – характеристики риска возникновения задержек выполнения работ (снижения производительности);

Важными с точки зрения выбора стратегии обслуживания изделия  $n$  являются такие свойства, которые касаются его контроле- и ремонтпригодности, их можно представить в виде множества:

$$k_n = \{k_{1n}, k_{2n}\},$$

- где  $k_{1n}$  – вероятность обнаружения потенциальных отказов изделия;  
 $k_{2n}$  – физическая возможность устранения потенциальных отказов изделия без его разборки в специализированном ремонтном органе или на заводе-изготовителе.

Контроле- ремонтпригодность системы  $Kp$  определяется аналогичными свойствами входящих в нее изделий (составных частей)  $-k_{mn}$ , т.е.  $Kp = \{k_{mn}\}$ , где  $n = \overline{1, N}$ ;  $m = 1, 2$ .

Как видно из представленной модели, эффективность  $P^{ДЦ}$  стратегии ТОиР системы зависит от того, какими тактико- и эксплуатационно-техническими характеристиками ( $A'$ ) обладает система, какие характеристики и связи ( $r_n, k_{mn}, St$ ) имеют входящие в состав системы изделия, а также от выбранных в отношении изделий стратегий ТОиР ( $s_{kn}$ ).

Она также зависит от того, в каких условиях  $B'$  эта система эксплуатируется и какие параметры имеет организация эксплуатации  $A''$ .

С учетом вышеизложенного формальная постановка задачи синтеза оптимальной стратегии ТОиР системы (2) должна учитывать зависимость показателя эффективности от вышеперечисленных параметров, т.е.

$$P^{ДЦ} = P^{ДЦ}(S; St, A', A'', B', R, Kp). \quad (3)$$



Очевидно, что учет такого количества разнородных факторов при решении задачи (2) приведет к значительному увеличению ее размерности и отсутствию возможности формулирования аналитических зависимостей между этими факторами и эффективностью ТООР. Указанные обстоятельства требуют проведения декомпозиции задачи (2), как минимум, на две частные задачи.

*Первая частная задача* – анализ эффективности применения известных стратегий с учетом влияния приведенных в модели факторов. Результаты ее решения позволят сформировать область допустимых стратегий ТООР  $\Delta = \{s_{kn}^{\partial}\}$  для каждого изделия в составе системы. Предполагается, что в результате решения этой частной задачи размерность общей задачи (2) будет существенно снижена, что позволит перейти к использованию более строгих аналитических и других методов для поиска ее оптимального решения. Также необходимо сразу отметить, что предлагаемый для решения этой частной задачи метод анализа иерархий, по сути, позволит выполнить ранжирование допустимых альтернатив по степени предпочтения, что также должно облегчить поиск оптимального решения.

*Вторая частная задача* – моделирование и точный количественный анализ свойств конкретных систем и входящих в их состав изделий, а также параметров организационно-технической системы, в рамках которой будет реализована программа ТООР. Результатами решения этой задачи будут:

- получение исходных данных для уточнения результатов первой частной задачи;
- получение исходных данных для решения общей задачи (2), т.е. для проведения оптимизации программы ТООР.

## **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЧАСТНОЙ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА СТРАТЕГИЙ ТООР ИЗДЕЛИЯ В СОСТАВЕ СИТЕМЫ**

Поставленная в работе общая задача (2) по сути связана с измерением качества (эффективности) разных стратегий ТООР при различных исходных данных, представленных в (3). Для решения этого класса задач при недостаточности и разнородности исходных данных и при отсутствии возможности строгой формализации хорошо себя зарекомендовал метод анализа иерархий (МАИ) [8]. Поэтому идеология и основные процедуры этого метода были приняты за основу при решении первой частной задачи.

Выбранный метод позволяет учитывать факторы различной природы, материальные и нематериальные, он позволяет работать с объективными данными и экспертными оценками, количественными и качественными характеристиками.

Алгоритм решения задачи с использованием МАИ на начальном этапе предполагает структурирование проблемы в виде иерархии или сети, которая в рамках решения представленной в работе задачи строится с вершины, где содержится цель – выбор наиболее приемлемой стратегии ТООР (рис.1). Далее строятся промежуточные уровни, на которых располагаются критерии, определяющие в конечном итоге выбор той или иной стратегии ТООР.

Самый низший уровень является перечнем альтернатив.

Предлагается использовать трехуровневую иерархию с двухуровневой системой критериев, при этом на первом (после цели) уровне располагаются основные, комплексные критерии, определяющие выбор наиболее приемлемой альтернативы (стратегии ТООР), а на втором – группы подкритериев, которые уточняют специфику каждого из основных критериев.

В качестве критериев сравнения выбраны показатели, использованные при разработке содержательной модели. К комплексным (в [8] они называются направляемыми) критериям относятся критерии, определяемые внешними факторами воздействия на процесс функционирования системы (рис.1):

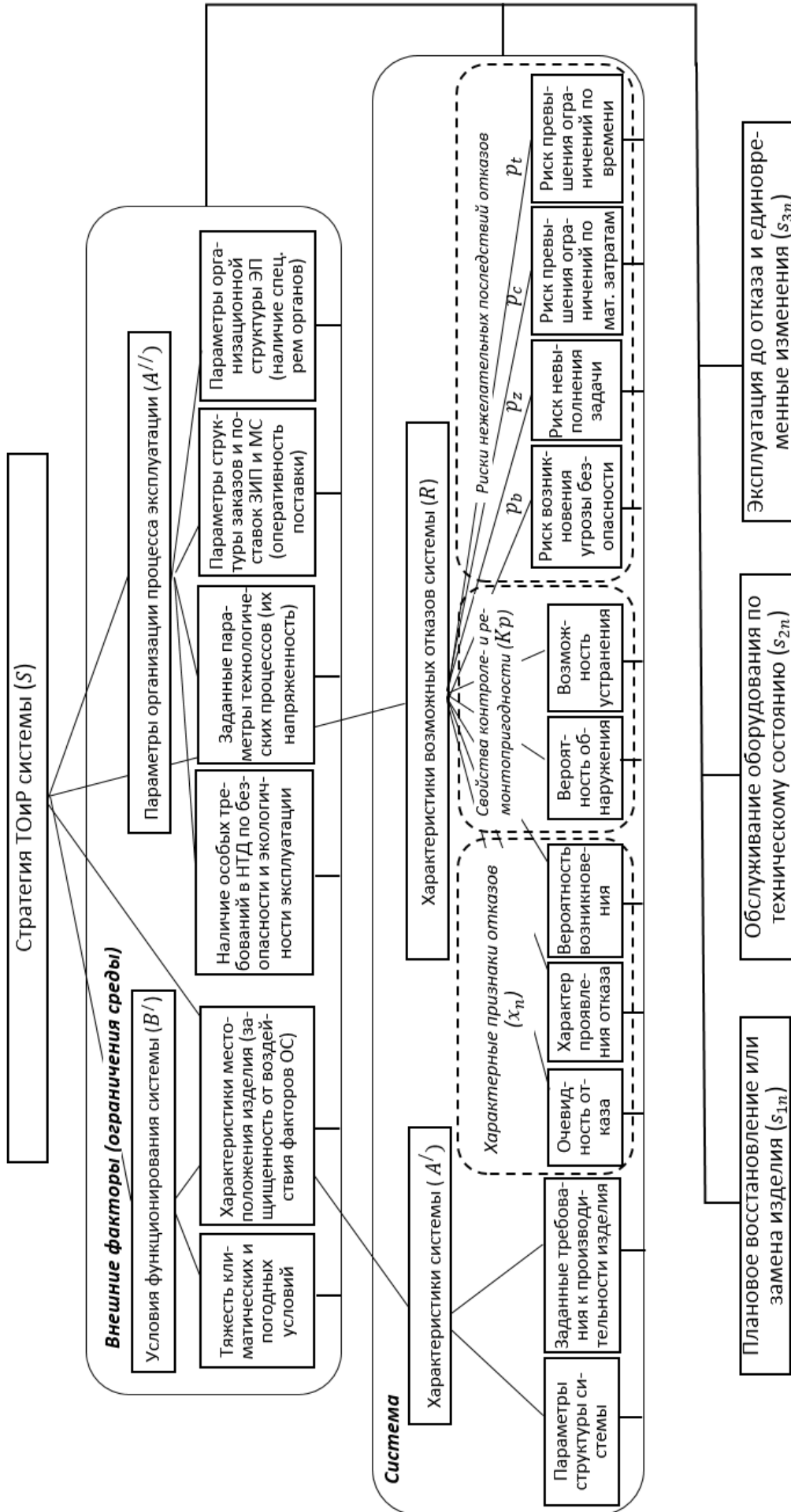


Рис. 1. Задача анализа стратегии ТОиР системы: иерархическое представление

– критерии, основанные на использовании показателей свойств условий функционирования системы  $B'$ ;

– критерии, основанные на показателях организации процесса функционирования системы  $A''$ , которые выражают собой ограничения, наложенные ресурсоемкость  $c^d$ , оперативность  $t^d$  и требования  $z^{TP}$ , предъявляемые к результатам ее функционирования.

Также к комплексным критериям относятся факторы, определяемые свойствами самой системы в целом, а также свойствами входящих в нее изделий:

– заданные значения тактико-технических и эксплуатационно-технических характеристик системы  $A'$ , в частности, ее структура и требования к производительности;

– характеристики возможных отказов изделий и связанные с ними риски нежелательных последствий  $p_b, p_z, p_c, p_t$ .

Входящие в состав комплексных (направляемых) и находящиеся на втором уровне частные критерии, которые влияют на элемент верхнего уровня, также представлены в содержательной модели и в иерархии на рис. 1.

После построения иерархии в соответствии с наиболее часто используемым на практике алгоритмом МАИ необходимо построить матрицы парных сравнений. Их элементами являются числа, которые отражают относительную важность (приоритет) элемента иерархии по сравнению со сравниваемым с точки зрения примыкающего к ним элемента верхнего уровня иерархии.

Если по некоторому критерию можно получить объективные количественные оценки интенсивности сравниваемых свойств, то в качестве приоритетов берут отношение этих оценок. Например, это могут быть отношения цен, масс, сроков. В случае субъективного оценивания важности приоритетов могут быть использованы специальные шкалы сравнения. О выборе таких шкал подробно говорится в [8].

Дальнейший алгоритм решения предполагает использование стандартных процедур МАИ. К числу основных относятся следующие:

1. Синтез локальных приоритетов, связанный с вычислением множества собственных векторов для каждой матрицы и дальнейшей нормализацией полученных результатов к единице.

2. Проверка согласованности локальных приоритетов, которая может потребовать выполнить поиск дополнительной информации и пересмотр использованных на предыдущих этапах данных, т. е. решить вторую частную задачу исследования.

3. Определение глобальных приоритетов каждой из альтернатив стратегий ТООР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что решение первой частной задачи с использованием инструментов МАИ будет представлять собой многоступенчатый процесс, кратность которого определяется числом входящих в состав СТС изделий. Однако объем вычислений после анализа первого изделия существенно сократится, так как результаты анализа по критериям внешних условий функционирования системы для всех других изделий, входящих в систему, будут типовыми.

Результат решения первой частной задачи в виде ранжированного списка допустимых стратегий ТООР может быть использован в качестве исходных данных (предложений) для дальнейшей разработки программы ТООР.

При решении второй частной задачи, в частности, для проверки согласованности локальных приоритетов, проводимой в рамках решения первой частной задачи, может потребоваться применение методов статистической обработки, анализа надежности, а также методов анализа физических явлений, протекающих в технических устройствах в процессе их эксплуатации и приводящих к ухудшению их технического состояния. Также к числу

отдельных направлений дальнейшей работы при решении второй частной задачи можно отнести моделирование конкретных организационно-технических систем и реализуемых ими эксплуатационных процессов.

### Список используемых источников

1. ГОСТ Р 53393- 2009. Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. – М., 2010. – 15 с.
2. *Перминов А.Н.* Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния. – СПб.: Министерство обороны РФ, 2005. – 320 с.
3. *Пеньков М.М., Петров Г.Д., Птушкин А.И.* Новые принципы построения системы эксплуатации космодромов // *Авиакосмическое приборостроение.* – 2015. – № 4. – С. 55–65.
4. *Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Решетников Д.В.* Методика выбора стратегии технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники // *Современные проблемы науки и образования.* – 2015. – № 2-2. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21650> (дата обращения: 08.10.2018).
5. Standard SAE JA1011\_200908. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes // SAE International-2009. – URL: [https://www.sae.org/standards/content/ja1011\\_200908/](https://www.sae.org/standards/content/ja1011_200908/)(дата обращения: 08.10.2018).
6. SAE J1012\_201108. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) // SAE International-2011. – URL: [https://www.sae.org/standards/content/ja1012\\_201108/](https://www.sae.org/standards/content/ja1012_201108/) (дата обращения: 08.10.2018).
7. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – МО СССР, 1989. – Ч.1. – 660 с.
8. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

И.Н. Кужекин;  
Д.В. Сурин,  
доктор техн. наук, профессор

## МОДЕЛЬ ФУГАСНО-ОСКОЛОЧНОГО ПОРАЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ВООРУЖЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОБЫЧНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

В публикации представлены научно-методические положения оценки совместного поражающего действия воздушной ударной волны (ВУВ) и осколков, образующихся при взрыве высокоточных боеприпасов фугасного типа на слабо защищенные мобильные средства вооружения (СВ). Поражение таких объектов рассматривается с учетом ориентации их относительно эпицентра фугасного взрыва. Такой подход обеспечивает более точный математический расчет возможных степеней поражения объектов-целей военного комплекса.

Ключевые слова: фугасное воздействие, осколочное поражение, живучесть, степени поражения, закон поражения.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при оценке защищенности и живучести объектов (личного состава, вооружения, военной и специальной техники) возникают характерные трудности при определении количественных параметров воздействия механических поражающих факторов фугасного взрыва (ФВ). Это обусловлено тем, что основным поражающим фактором фугасного боеприпаса является ВУВ, образующаяся при взрыве заряда взрывчатого вещества. Однако анализ опыта боевых действий показал, что наряду с поражающим воздействием ВУВ происходит поражение объектов-целей осколками, образовавшимися в результате естественного дробления оболочки боеприпаса. Радиус поражения такими осколками значительно больше радиуса поражения ВУВ.

### МОДЕЛЬ ФУГАСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЛАБО ЗАЩИЩЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ-ЦЕЛИ

Теория фугасного воздействия высокоточного оружия (ВТО) на мобильные СВ основывается на гипотезе определения объектов-целей (ОЦ) как «точных объектов-целей».

При оценке радиуса поражения при ФВ  $R_{п(ФВ)}$  принимается за основу теория воздействия ВУВ ядерного взрыва (ЯВ), но с учетом того, что вводятся поправки на импульсное воздействие ФВ по отношению к кратковременному воздействию ВУВ ЯВ:

$$R_{п(ФВ)} = \frac{31,6q_{ФВ}^{1/3}}{\Delta p_{сз}^{0,621}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_{сз}$  – степень защиты объекта-цели, кгс/см<sup>2</sup>;

$q_{ФВ}$  – тротиловый эквивалент ФВ, тс.

Учет импульсивности ФВ основан на теории формирования импульса ВУВ – интегральное значение  $\Delta p_{\varphi(t)}$ :

$$\Delta p_{\varphi(t)} = \Delta p_{\varphi} \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right)^n, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель крутизны фронта ВУВ (биномиальная форма),  $n = 1,9\sqrt{\Delta p_{\varphi}}$ ;

$\tau_+$  – динамическая фаза сжатия ВУВ.

Заметим, что радиус поражения ОЦ формирует на плоскости (поверхности) нахождения ОЦ круговую зону поражения, в которой выполняется условие [3]

$$P_{п(1)} = 0,5, \text{ если } R_{вз} = R_{п}, \quad (3)$$

где  $P_{п(1)}$  – вероятность поражения ОЦ.

Однако повреждения ОЦ получает при взрыве боеприпаса (БП) обычного средства поражения (ОСП) также за пределами круговой зоны поражения до радиуса, соответствующего следующему условию:

$$P_{пр(1)} = 0,05, \text{ если } R_{вз} > R_{п}, \quad (4)$$

где  $P_{пр(1)}$  – вероятность получения повреждения, которое практически не вызывает нарушения функционирования объекта-цели после воздействия по нему взрыва БП.

Отмеченные условия как закономерности представлены графически на рис. 1.

Расположение расчетного эпицентра ФВ относительно центра ОЦ в плановой проекции является случайным событием в отличие от экспериментальных взрывов. Поэтому необходимо решение новой задачи – обоснование расчетных расстояний (радиусов) эпицентрального положения ФВ БП ОСП с учетом их точности по круговому вероятному отклонению – параметру  $E$ .

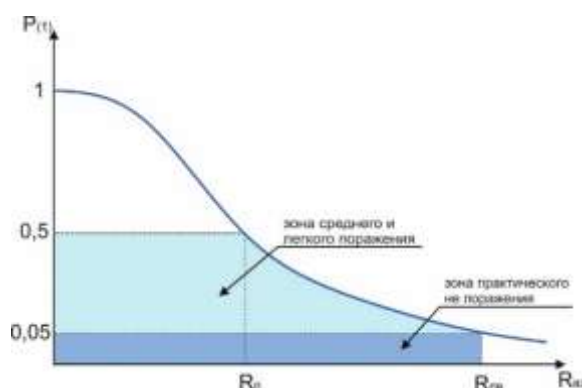


Рис. 1. Интервалы зон поражения объектов-целей

Пологая, что круговая зона поражения объекта-цели при ФВ БП ОСП формируется случайно в соответствии с законом распределения Рэля [3]:

$$P(R) = 1 - e^{-\alpha(R)}. \quad (5)$$

В выражении (5) символом  $\alpha(R)$  обозначен показатель попадаемости средства поражения при прицеливании по некоторому центру (в данном случае – по центру проекции объекта-цели):

$$\alpha(R) = \left(\rho \frac{R_{п}}{E}\right)^2, \quad (6)$$

где  $R_{п}$  – радиус поражения объекта-цели, м;

$E$  – круговое вероятное отклонение ОСП, м;

$\rho$  – постоянная Лапласа нормального закона распределения ( $\rho = 0,4679$ ).

Предположим, что  $R = R_{п}$ , исходя из вида плотности распределения  $\varphi(R)$ , имеем некоторое значение  $R^*$ , которое назовем наиболее вероятным расстоянием (радиусом) нахождения эпицентра ФВ от центра прицеливания объекта-цели.

Пологая функцию  $\varphi(R)$  неизвестной, экстремум (минимум) находим из равенства

$$R^* = \frac{E}{\rho\sqrt{2}}. \quad (7)$$

При воздействии стандартного ЯВ (наземный ЯВ мегатонной мощности) формируется важнейший классификационный признак защищенности ОЦ – степень защиты  $\Delta p_{сз}$ :

$$\Delta p_{сз} = \Delta p_{\phi}, R = R_{п(ЯВ)}. \quad (8)$$

По степени защищенности ОЦ принято классифицировать следующим образом:

- сверх высокой степени защиты ( $\Delta p_{сз} > 750 \text{ кгс/см}^2$ );
- высокой степени защиты ( $\Delta p_{сз} = 50 \div 750 \text{ кгс/см}^2$ );
- средней степени защиты ( $\Delta p_{сз} = 10 \div 50 \text{ кгс/см}^2$ );
- малой степени защиты ( $\Delta p_{сз} = 2 \div 10 \text{ кгс/см}^2$ );
- слабой степени защиты ( $\Delta p_{сз} = 0,25 \div 2 \text{ кгс/см}^2$ );
- незащищенные ОЦ ( $\Delta p_{сз} < 0,25 \text{ кгс/см}^2$ ).

Таким образом, к слабо защищенным объектам-целям относятся здания и сооружения общевойскового назначения и ВВТ без броневой защиты, которые в среднем имеют собственную степень защиты  $0,25\text{--}0,35 \text{ кгс/см}^2$  и  $0,15\text{--}0,25 \text{ кгс/см}^2$ . Бронированные образцы ВВТ имеют в среднем степени защиты  $\Delta p_{сз} = 0,35 \div 0,75 \text{ кгс/см}^2$ .

Вместе с тем следует отметить, что фактическое воздействие ВУВ ФВ и ЯВ на объект-цель принципиально отличается по эффективности поражающего воздействия вследствие различия в импульсах воздействия динамической нагрузки на защитные конструкции ОЦ из-за различия в длительности фазы сжатия ВУВ.

При воздействии ЯВ и ФВ имеем соответственно  $\tau_+ \geq 1,8 \text{ с}$  и  $\tau_+ \leq 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ . Данное обстоятельство приводит к тому, что при одинаковом значении на фронте ВУВ избыточного давления ( $\Delta p_{\phi(фз)} = \Delta p_{\phi(ЯВ)}$ ) динамическая нагрузка, определяемая по формуле вида

$$P_d = k_{д(зк)} \Delta p_{\phi(вз)}, \quad (9)$$

формируется с коэффициентом динамичности для ЯВ и ФВ соответственно со значениями  $k_{д(ЯВ)} \leq 2$  и  $k_{д(ФВ)} < 0,01$ , что видно из расчета :

$$k_{д(ЯВ)} = 2 \left( 1 - \frac{\arctg \omega_{зк} \tau_{ЯВ}}{\omega_{зк} \tau_{ЯВ}} \right), \quad (10)$$

$$k_{д(ФВ)} = 2 \sin \frac{\omega_{зк} \tau_{ФВ}}{2}, \quad (11)$$

где  $\omega_{зк}$  – низшая частота собственных колебаний ЗК объекта-цели, 1/с.

Для защитной конструкции ВВТ, изготовленной из стали толщиной  $0,15\text{--}0,3 \text{ см}$   $\omega_{зк} \approx 350 \div 400 \text{ 1/с}$ , для элементов, выполненных из пластмассы  $\omega_{зк} \approx 180 \div 200 \text{ 1/с}$ .

В предложенном методическом аппарате расчет избыточного давления на фронте ВУВ ФВ для слабо защищенных ОЦ (степень защиты  $\Delta p_{сз} < 0,5 \text{ кгс/см}^2$ ) осуществляется по формуле вида [4]

$$\Delta p_{\phi} = \frac{216}{\bar{R}_{п}^{1,61}}, \quad (12)$$

где  $\bar{R}_{п}$  – приведенное расстояние взрыва БП ОСП для условий наземного взрыва, м/тс<sup>1/3</sup>.

Значение  $\bar{R}_{п}$  можно определить из выражения

$$\bar{R}_{п} = \frac{R_{вз}}{q_{вз}^{1/3}}, \quad (13)$$

где  $R_{вз}$  – расстояние эпицентра взрыва БП ОСП в условиях наземного взрыва, м;  
 $q_{вз}$  – тротильный эквивалент взрыва с учетом высоты подрыва, тс.

Но имеется важное обстоятельство – взаимодействие ВУВ с защитной конструкцией (ЗК) ОЦ. Так, на переднюю фронтальную ЗК ОЦ будет действовать давление отраженной ВУВ

$$\Delta p_{\text{отр}} = \Delta p_{\phi} (1 + k_{\text{отр}} \cos \varphi), \quad (14)$$

где  $\varphi$  – угол падения фронта ВУВ на защитную конструкцию в условии регулярного отражения ( $\varphi < 40^\circ$ );

$k_{\text{отр}}$  – коэффициент отражения потока воздуха в ВУВ от земли,

$$k_{\text{отр}} = 1 + \frac{6}{1 + \frac{7P_0}{\Delta p_{\phi}}}. \quad (15)$$

Для определения значения избыточного давления на фронте ВУВ ЯВ, которая будет воздействовать на ОЦ, достаточно знать расстояние от эпицентра взрыва до центра объекта-цели в плановой проекции. В условии ФВ размер самого взрыва соизмерим с размерами ОЦ, поэтому при расчетах воздействия ВУВ ФВ на защитную конструкцию ОЦ необходимо учитывать ее высоту

$$\Delta p_{\phi(\text{ФВ})} = \Delta p_{\text{отр}} = \Delta p_{\phi} (1 + k_{\text{отр}} \cos \varphi). \quad (16)$$

Здесь

$$\varphi = \arctg \frac{0,5h_{\text{оц}}}{R^* - 0,5b_{\text{оц}}}, \quad (17)$$

где  $b_{\text{оц}}$  – ширина ОЦ;

$h_{\text{оц}}$  – высота ОЦ.

$R^*$  – наиболее вероятное эпицентральное положение ФВ, м.

Фактическая степень защиты ОЦ при ФВ определяется выражением

$$\Delta p_{\text{сз}(\phi)} = \left( \frac{\Delta p_{\text{сз}}}{\bar{k}_d} \right) f_{\text{отр}}. \quad (18)$$

В выражении (18)  $\bar{k}_d$  – соотношение коэффициентов динамичности при воздействии ЯВ и ФВ,

$$\bar{k}_d = \frac{k_{d(\text{ЯВ})}}{k_{d(\text{ФВ})}} \approx \frac{2}{\omega_{\text{зк}} \tau_{\text{ФВ}}}, \quad (19)$$

где  $f_{\text{отр}}$  – функция отражения,

$$f_{\text{отр}} = 1 + \left( 1 + \frac{6}{1 + \frac{7P_0}{\Delta p_{\phi(\text{ФВ})}}} \right) \cos \varphi. \quad (20)$$

Как отмечалось ранее, радиус поражения ОЦ – это эпицентральное расстояние от взрыва до центра плановой проекции ОЦ. Исходя из этого получается, что при попадании БП ОСП в область наиболее вероятного попадания фронтальная ЗК находится гораздо ближе к эпицентру взрыва, следовательно, значение избыточного давления на фронте ВУВ при встрече с ЗК будет выше.

При определении радиуса поражения боевых средств мобильных СВ при ФВ также необходимо учитывать, что имеется два варианта ориентации объекта относительно эпицентра ФВ:

- ориентация торцевой (короткой) частью;
- ориентация боковой (длинной) частью.

На рис. 2 представлена расчетная схема воздействия ВУВ ФВ с учетом ориентации боевых средств мобильного СВ относительно эпицентра ФВ. Исходя из расчетной схемы, получим зависимости расчета радиуса поражения для каждого варианта ориентации:

1) для торцевой ориентации:

$$R_{\text{п}(1)} = R_{\text{п}(\text{оц})} + \frac{l_{\text{оц}}}{2}. \quad (21)$$

Здесь



$$R_{п(оц)} = \frac{31,6q_{ФВ}^{1/3}}{\Delta p_{сз(Ф)}} \tag{22}$$

где  $R_{п(оц)}$  – радиус поражения ОЦ с учетом его фактической степени защиты, м;  
 $l_{оц}$  – общая длина объекта-цели, м.

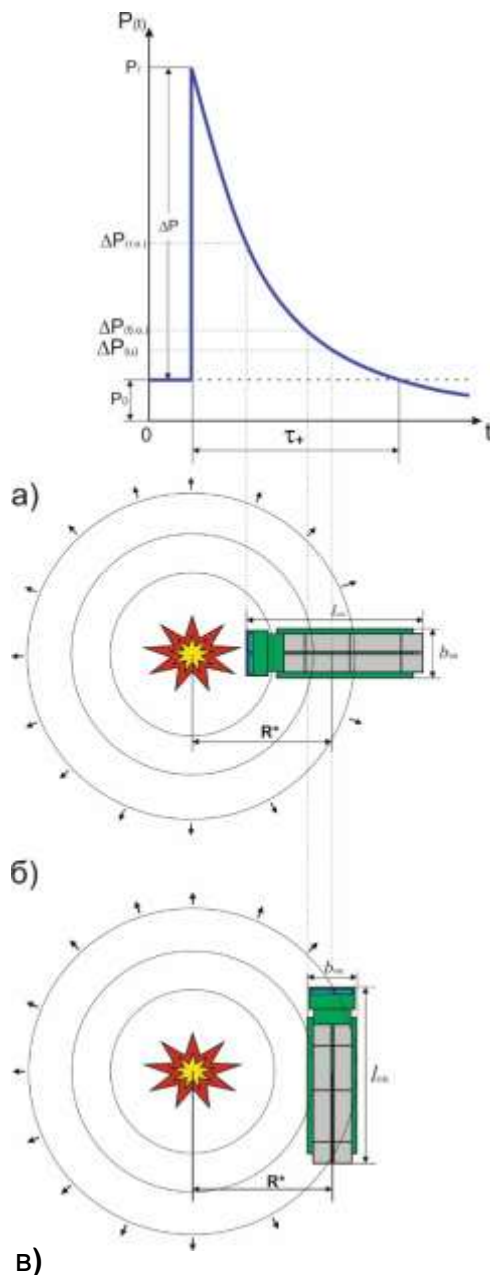


Рис. 2. Расчетная схема воздействия ВУВ ФВ (а) с учетом торцевой (б) и боковой (в) ориентации боевых средств мобильных СВ относительно эпицентра ФВ

2) для боковой ориентации:

$$R_{п(2)} = R_{п(оц)} + \frac{b_{оц}}{2}, \tag{23}$$

где  $b_{оц}$  – общая ширина ОЦ, м.

Таким образом, радиус поражения ВУВ ФВ является суперпозицией двух ориентаций положения центра ФВ относительно фронтальной части ЗК ОЦ:

$$R_{п(фв)} = \frac{R_{п(1)} + R_{п(2)}}{2}. \quad (24)$$

Полученный результат является принципиально важным для формирования показателя относительной защищенности  $\bar{h}_{з(фв)}$  для расчета закона поражения, который будет иметь следующий вид:

$$G_{(1)фв} = 0,5 \bar{h}_{з(фв)}, \quad (25)$$

$$\bar{h}_{з(фв)} = \frac{R_{фв}^*}{R_{п(фв)}}. \quad (26)$$

### МОДЕЛЬ ОСКОЛОЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЛАБО ЗАЩИЩЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ-ЦЕЛИ

Осколочное поражение ОЦ слабой защищенности происходит в результате образования осколков от оболочки БП фугасного типа.

В отличие от ОСП фугасного-осколочного типа, в которых осколки формируются как части «нарубленной рубашки» от оболочки БП, в ОСП фугасного типа осколки формируются хаотично и случайно – от мелких осколков до крупных осколков-частей оболочки. Поэтому для ОСП фугасного типа имеется дополнительная проблема, связанная с обоснованием «расчетного осколка».

Главная проблема по оценке поражающего осколочного воздействия ОСП фугасного типа для ОЦ слабой защищенности состоит в обосновании способности пробивания расчетным осколком ЗК ОЦ.

Предположим, что поражение ОЦ расчетным осколком БП происходит по аналогии с поражением при местном действии удара ОСП проникающего типа. Для последнего Д.В. Суриным разработана теория проникания ОСП в защитные среды [4].

Так, полученная расчетная формула для оценки проникания ОСП в ЗК ОЦ применительно к решаемой задаче будет иметь следующий вид:

$$h_{пр(зк)} = \frac{4P_{оск}V_{оск} \cos \beta_{оск}}{\pi g a_{(зк)} \rho_{зк} d_{оск(ср)}^2}, \quad (27)$$

где  $P_{оск}$  – вес осколка, тс;  
 $V_{оск}$  – скорость встречи осколка с ЗК ОЦ, м/с;  
 $\beta_{оск}$  – угол подлета осколка к поверхности ЗК ОЦ;  
 $d_{оск(ср)}$  – средний диаметр осколка, подлетающего к ЗК ОЦ, м;  
 $a_{(зк)}$  – скорость распространения упругой деформации ЗК ОЦ, м/с;  
 $\rho_{зк}$  – массовая плотность материала ЗК ОЦ, тс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>.

В данной формуле неизвестными параметрами будут:  $P_{оск}$ ,  $V_{оск}$ ,  $\beta_{оск}$ ,  $d_{оск(ср)}$ .

Полагаем, что расчетный осколок – это минимальный по виду осколок БП ОСП фугасного типа, который образован вследствие среза его в виде круга при воздействии давления в детонационной волне взрыва.

Тогда имеет место предельное равновесие двух сил, а именно, силы давления детонационной волны и силы сопротивления срезу:

$$P_{д(пв)} \pi r_{оск}^2 = \sigma_{ср} 2\pi r_{оск} \delta_{об}, \quad (28)$$

где  $P_{д(пв)}$  – динамическое давление продуктов взрыва в детонационной волне взрыва (ВВ), тс/м<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{ср}$  – напряжение среза для материала оболочки БП;

$r_{\text{оск}}$  – радиус осколка, м;  
 $\delta_{\text{об}}$  – толщина оболочки БП, м.

Расчетные значения минимального радиуса осколка определяются из выражения

$$r_{\text{оск}} = 2\delta_{\text{об}} \frac{\sigma_{\text{ср}}}{P_{\text{д}}}. \quad (29)$$

Вес расчетного осколка определяется по формуле

$$P_{\text{оск}} = 4\pi\delta_{\text{об}}^3 \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{P_{\text{д}}}\right)^2 \gamma_{\text{об}}. \quad (30)$$

Скорость разлета осколков определяется по формуле Д.В. Сурина, имеющей вид

$$V_{\text{оск}} = \frac{D_{\text{д}}}{2} \left(\frac{r_{\text{ВВ}}}{r_{\text{рпв}}}\right)^3, \quad (31)$$

где  $D_{\text{д}}$  – скорость фронта детонации в ВВ, м/с;  
 $r_{\text{ВВ}}$  – радиус ВВ в форме сферы, м;  
 $r_{\text{рпв}}$  – радиус разлета продуктов взрыва ВВ после детонации, м.

На основании экспериментальных исследований по подрыву безоболочных ВВ в виде ТНТ, что представлено в расчетах [4], установлены значения  $r_{\text{ВВ}}/r_{\text{рпв}} = 1,5 \div 2,5$  м. Принимая среднее значение  $r_{\text{ВВ}}/r_{\text{рпв}} = 2$ , получим следующую формулу:

$$V_{\text{оск}} = 0,0625D_{\text{д}}. \quad (32)$$

Расчетный диаметр осколка  $d_{\text{оск(р)}}$  определяется путем вероятностной декомпозиции при вращении осколка плоской поверхностью и ребром в воздухе с вероятностью 0,5 в двух проекциях.

Среднее сечение проекции осколка получим из выражения

$$F_{\text{ср}} = 0,5\pi r_{\text{оск}}(r_{\text{оск}} + 2\delta_{\text{об}}). \quad (33)$$

Пологая, что имеет место

$$d_{\text{оск(р)}} = 2\sqrt{\frac{F_{\text{ср}}}{\pi}}, \quad (34)$$

получим расчетную формулу для среднего диаметра осколка:

$$d_{\text{оск(ср)}} = 4,82\delta_{\text{об}}\sqrt{\frac{\sigma_{\text{ср}}}{P_{\text{д}}}\left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{P_{\text{д}}} + 1\right)}. \quad (35)$$

Разлет расчетного осколка будет происходить по принципу минимального сопротивления воздуху, т.е. осколок будет лететь к объекту-цели ребром.

Исходя из этого предположения, расчетный диаметр осколка, проникающего в ЗК ОЦ, получим в виде следующей зависимости:

$$d_{\text{оск}} = 0,5(r_{\text{оск}} + \delta_{\text{об}}). \quad (36)$$

Для расчетного угла  $\beta_{\text{оск}}$  имеем решение вида

$$\beta_{\text{оск}} = \left(\frac{\pi}{2} - \beta_{\text{осп}}\right) - \arctg\left(\frac{H_{\text{оц}} - H_{\text{бп}}}{R_{\text{п(фв)}}^*}\right), \quad (37)$$

где  $R_{\text{п(фв)}}^*$  – наиболее вероятное расстояние от центра плановой проекции ОЦ до эпицентра ФВ, м;  
 $H_{\text{оц}}$  – высота центра вертикальной проекции объекта-цели относительно поверхности земли, м;

$H_{\text{бп}}$  – высота центра БП ОСП относительно поверхности земли, м.

На основе полученных выше зависимостей для параметров  $P_{\text{оск}}, V_{\text{оск}}, d_{\text{оск}}$  мы можем определить глубину проникания  $h_{\text{пр(оск)}}$  одного расчетного поражающего осколка. Глубина проникания является важнейшим параметром при расчете относительной защищенности  $\bar{h}_{\text{з(оск)}}$  ОЦ при осколочном воздействии, который будет иметь вид

$$\bar{h}_{\text{з(оск)}} = \frac{h_{\text{зк}}}{h_{\text{пр(оск)}}}, \quad (38)$$

где  $h_{\text{зк}}$  – толщина защитной конструкции, м.

Закон поражения при воздействии одного расчетного осколка оболочки ОСП фугасного типа будет иметь вид

$$G_{(1)\text{оск}} = 0,5\bar{h}_{\text{з(оск)}}. \quad (39)$$

Оценка осколочного воздействия на образцы ВВТ показывает, что необходимо учитывать массовость поражающих осколков. В этом случае закон поражения при осколочном воздействии примет следующий вид:

$$G_{(m)\text{оск}} = 1 - (1 - G_{(1)\text{оск}})^{m_{\text{оск}}}, \quad (40)$$

где  $m_{\text{оск}}$  – расчетное количество попадающих поражающих осколков;

$G_{(1)\text{оск}}$  – закон поражения для одного поражающего осколка.

Далее рассмотрим модель обоснования количества расчетных попаданий осколков в ЗК боевых средств НК СВ. Исходя из необходимости при оценке воздействия поражающих факторов ФВ учитывать ориентацию ОЦ относительно эпицентра взрыва для боевых средств мобильных НК СВ, мы определим два вида ЗК – боковая (ЗК<sub>(б)</sub>) и торцевая (ЗК<sub>(т)</sub>), которые представлены боковой и торцевой гранями изделия ВВТ соответственно.

Общее количество доминирующих осколков, образующихся при подрыве БП фугасного типа, определяется по формуле

$$N_{\text{оск(бп)}} = \rho_{\text{оск}} \frac{F_{\text{бп}}}{F_{\text{оск}}}. \quad (41)$$

Здесь  $\rho_{\text{оск}}$  – доля доминирующих осколков ( $\rho_{\text{оск}} \approx 0,6$ );

$F_{\text{бп}}$  – площадь поверхности БП, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{оск}}$  – площадь доминирующего осколка, м<sup>2</sup>,

$$F_{\text{бп}} = \pi l_{\text{об(бп)}} d_{\text{об(бп)}}, \quad (42)$$

где  $l_{\text{об(бп)}}$  – длина цилиндрической оболочки БП, м;

$d_{\text{об(бп)}}$  – диаметр цилиндрической оболочки БП, м,

$$F_{\text{оск}} = \frac{\pi d_{\text{оск}}^2}{4}, \quad (43)$$

где  $d_{\text{оск}}$  – диаметр доминирующего осколка, м.

Схема осколочного воздействия на ЗК<sub>(б)</sub> изделие ВВТ представлена на рис. 3. Как видно из данного рисунка, под областью разлета осколков образуется так называемая «мертвая зона», где ОЦ не получает осколочного поражения. Высоту «мертвой зоны» можно определить по следующей формуле:

$$h_{\text{мз}} = \left( R^* - \frac{b_{\text{оц}}}{2} \right) \tan \beta_{\text{бп}}, \quad (44)$$

где  $R^*$  – наиболее вероятное расстояние до эпицентра взрыва;

$\beta_{\text{бп}}$  – угол подлета БП к поверхности земли.

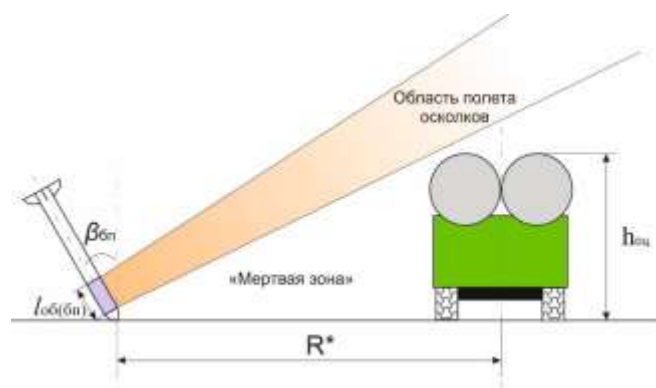


Рис. 3. Схема разлета осколков (вид сбоку)

При торцевой ориентации изделия ВВТ, будет иметь место поражение нижней части торцевой ЗК<sub>(Т)</sub>. Высоту поражения торцевой части определим по формуле

$$h_{\text{оск(Т)}} = \frac{l_{\text{бп}}}{\tan \beta_{\text{бп}}}. \quad (45)$$

Но изделие ВВТ имеет шасси, и основание его уязвимой части находится на определенной высоте от уровня земли. Таким образом, площадь поражения ЗК<sub>(Т)</sub> необходимо определять с учетом данной высоты:

$$F_{\text{п(Т)}} = (h_{\text{оск(Т)}} - h_{\text{уч}})b_{\text{оц}}. \quad (46)$$

При этом относительная площадь поражения ЗК<sub>(Т)</sub> будет вычисляться по формуле

$$\gamma_{\text{оск(Т)}} = \frac{F_{\text{п(Т)}}}{F_{\text{оц(Т)}}}. \quad (47)$$

Используя представленные выше зависимости, можно определить общее количество попадающих поражающих осколков  $m_{\text{оск(Т)}}$  в ЗК<sub>(Т)</sub> при воздействии одного БП ОСП:

$$m_{\text{оск(Т)}} = 0,5N_{\text{оск}}\gamma_{\text{оск(Т)}} = 0,5 \left( \frac{4\rho_{\text{оск}}l_{\text{об(бп)}}d_{\text{об(бп)}}}{d_{\text{оск}}^2} \right) \gamma_{\text{оск(Т)}}. \quad (48)$$

Таким образом, совместный закон фугасно-осколочного поражения ОЦ слабой защищенности при воздействии одного ОСП с учетом массовости поражающих осколков в соответствии с теорией вероятностей будет иметь следующий вид:

$$G_{(1)\text{фоп}} = 1 - (1 - G_{(1)\text{фв}})(1 - G_{m(1)\text{оск}}) \quad (49)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель фугасно-осколочного воздействия позволяет разработать методику обоснования уровней защищенности мобильных средств вооружения, не имеющих фортификационной защиты. Исходя из полученных результатов, можно сделать объективный вывод о том, что при оценке живучести слабо защищенных ОЦ в условиях воздействия ОСП фугасного типа решающую роль играет ориентация ОЦ относительно эпицентра ФВ. Это, в свою очередь, позволит сделать оптимальный выбор средств и способов повышения живучести мобильных средств вооружения.

**Список используемых источников**

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
2. *Стахно Р.В.* Теория моделирования расчетного воздействия обычных средств поражения противника на объекты наземных комплексов // Сб. научных трудов АВН регионального отделения. – 2005. – № 5. – С. 43–50.
3. *Сурин Д.В.* Аналитические методы оценки защищенности и живучести объектов и комплексов. – МО РФ. 1997. – 145 с.
4. *Сурин Д.В.* Специальные фортификационные сооружения: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2010. – 429 с.

Г.С. Ладышкин  
кандидат техн. наук;  
А.В. Федоренко,  
кандидат военных наук

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ МАСКИРОВКИ

В статье рассматривается порядок применения алгоритма обеспечения живучести стационарного или мало-подвижного объекта, особое внимание уделяется раскрытию методики оценки эффективности мероприятий скрытия как составляющей части маскировки.

Ключевые слова: система комплексного противодействия средствам поражения противника, живучесть объекта, эффективность мероприятий скрытия.

### ВВЕДЕНИЕ

В вооруженных силах вероятного противника не оставляют попыток разработки планов нанесения первого превентивного удара по военной инфраструктуре Российской Федерации, рассматриваются различные концепции быстрой и малокровной войны, которая должна будет обеспечить ослабление военного и экономического потенциала нашей страны до приемлемого уровня. Например, в концепции Быстрого глобального удара (от англ. *Prompt Global Strike, PGS*) предусмотрено проведение комплекса мероприятий по разработке системы, позволяющей нанести массированный разоружающий удар обычным (неядерным) вооружением по любой части мира в течение короткого промежутка времени. При этом предполагается применение неядерных средств поражения, с помощью которых можно вывести из строя на территории потенциального противника пункты государственного и военного управления, узлы связи, нанести неприемлемый ущерб потенциалу вооруженных сил противника [1].

В идеале концепция глобального молниеносного удара предполагает, что у противника не будет ни одного шанса, чтобы воспользоваться своим ядерным и стратегическим неядерным оружием.

При этом на объекты, которые осуществляют управление всеми видами космических аппаратов, будет выделен наряд сил, который обеспечит вывод из строя этих объектов на время, в течение которого должны будут решаться задачи «молниеносной» войны. Для осуществления этих целей Пентагон предполагает задействовать все силы и средства армии, авиации и флота. В ходе первых массированных ударов предусматривается уничтожение заранее и тщательно разведанных стационарных и квазистационарных объектов средствами поражения и в первую очередь высокоточным оружием (ВТО) [1, 2].

Под ВТО подразумевают оружие, эффективность которого достигается главным образом за счет точного попадания средств поражения (СП) в цель. И на сегодняшний день при определении наряда сил противника, который будет действовать по стационарным, крупногабаритным объектам, необходимо рассматривать крылатые ракеты всех видов базирования и боевые беспилотные аппараты.

Внезапное и массированное применение высокоточного оружия, снаряженного обычным взрывчатым веществом повышенной мощности или объемного взрыва, наносит ущерб объекту на длительное время, что может обеспечить вероятному противнику решение тех же задач, которые ранее возлагались на ядерное оружие, пилотируемую авиацию или сухопутные войска.

## АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Анализ принципов построения высокоточного оружия позволяет выявить не только его достоинства, но и явные слабые места. Учет всех особенностей построения этого класса оружия создает условия для успешного противодействия ему.

Применение алгоритма обеспечения живучести стационарных объектов [3] позволяет разработать эффективные мероприятия противодействия всем типам средств поражения.

Анализ показывает, что для определения мероприятий маскировки, которые должны обеспечить повышение живучести стационарных и малоподвижных объектов, можно выделить несколько этапов. Этап оценки обстановки наиболее сложный и при этом наиболее важный при решении этой задачи.

Необходимо оценить состав обеспечивающих и ударных сил противостоящей группировки неприятеля, их дислокацию и возможные главные задачи на первый этап военного конфликта. Эта сложная задача с несколькими неизвестными должна учитывать постоянные изменения обстановки в зависимости от развития событий. При анализе своего объекта необходимо выявить критически важные его элементы и исходя из этого на этапе обоснования наряда средств поражения противника спрогнозировать потребный наряд средств поражения противника для нанесения ущерба (рис. 1).

На следующем этапе необходимо определить мероприятия комплексного противодействия средствам поражения противника. Основными из них будут мероприятия зенитной ракетной обороны, радиоэлектронной борьбы, инженерного обеспечения и маскировки. Они выбираются на основе полученной задачи от вышестоящего штаба, выводов, сделанных из оценки обстановки, возможного развития противостояния с противником и проведения комплекса тактических расчетов.

Важное место в рассмотренном комплексе противодействия средствам поражения противника занимают мероприятия маскировки.

Для стационарных и малоподвижных объектов наиболее приемлемыми будут мероприятия маскировки, обеспечивающие противодействие системам наведения оружия. При этом они должны проводиться непосредственно перед ударом средств поражения.

Для проверки соответствия требований к мероприятиям маскировки необходимо оценить их эффективность. Поэтому на последнем этапе производим проверку соответствия эффективности мероприятий предъявляемым требованиям.

Для мероприятий маскировки имеем:

$$\mathcal{E}_M \geq \mathcal{E}_M^{\text{тр}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_M$  – расчетная эффективность маскировки объекта;

$\mathcal{E}_M^{\text{тр}}$  – требуемая эффективность маскировки объекта.

При определении эффективности мероприятий маскировки возможно рассматривать два подхода. Первый – эмпирический, основывающийся на личном предыдущем опыте специалистов или обобщенных итогах учений и проведенных исследований и, как правило, определяется коэффициентными методиками или методом экспертных оценок. Метод прост в применении и в практическом использовании, однако главным недостатком этого метода является субъективизм, малая гибкость показателей и большие рамки допущений.

Второй подход основан на математических методах исследования, в частности, методах математического моделирования. При математическом моделировании воссоздается в формализованном (математическом) виде процесс действий всех сторон противоборства. Информационную основу моделей составляет статистический материал по вероятностям обнаружения одиночных объектов при различных приемах маскировки и математические алгоритмы, позволяющие оценить соответствие рассчитанных показателей предъявляемым требованиям. Важным на этом этапе является создание простого, стройного и точного мате-



математического алгоритма, позволяющего рассчитать численные значения для оценки планируемых или проведенных мероприятий маскировки.



Рис. 1. Алгоритм обеспечения живучести стационарных объектов

Мероприятия маскировки можно проводить одним из четырех способов [4, 5]: скрывание, имитация, демонстративные действия и дезинформация. В статье рассмотрим порядок оценки эффективности мероприятий скрывания как составляющей части маскировки.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ СКРЫТИЯ

Рассмотрим порядок оценки эффективности мероприятий скрывания. Его основу составляют математические зависимости, связывающие аналитические критерии эффективности. Оценка эффективности скрывания объектов осуществляется поэтапно:

- определение вероятности обнаружения одиночного или элемента группового (сложного) объектов при  $i$ -м приеме скрывания и одноразовом контакте со средством разведки;
- оценка эффективности приемов, средств скрывания одиночных объектов во времени;

- оценка эффективности мероприятий (приемов) скрытия группового объекта во времени;
- оценка эффективности мероприятий скрытия объекта от нескольких видов разведки;
- оценка эффективности мероприятий скрытия объекта, состоящего из нескольких групповых объектов.

Вероятность обнаружения одиночных объектов при  $i$ -м приеме скрытия и однократном контакте со средством разведки может производиться одним из способов: по номограммам или аналитическими расчетами.

Готовые номограммы для расчетов вероятности обнаружения представлены в ряде справочников и позволяют быстро произвести соответствующие расчеты [6], однако при этом расчеты получаются с большим закруглением и полученные результаты рекомендуется использовать на этапе предварительной оценки.

Для более точных расчетов необходимо использовать аналитические зависимости, которые, как правило, отличаются большей точностью.

В общем виде вероятность обнаружения одиночных объектов можно определить по формуле

$$P_{об} = 1 - e^{-\varpi_{rj}(1 - k_{об(\mu rj)})}, \quad (2)$$

- где  $k_{об(\mu rj)}$  – коэффициент интегрального качества маскировки соответственно при обнаружении и опознании цели  $j$ -го типа при применении средств маскировки  $\mu$ -го типа и ТСР  $r$ -го вида;
- $\varpi_{rj}$  – коэффициент обзорности цели  $j$ -го типа при применении ТСР  $r$ -го вида.

Коэффициент  $k_{об(\mu rj)}$  определяется экспериментальным путем на основании статистической обработки данных по демаскированию целей техническими средствами разведки (ТСР). Для характерных целей и определенных видов ТСР данные по коэффициентам  $k_{об(\mu rj)}$  приведены в таблицах п.1 [7].

Коэффициент обзорности разведки цели  $\varpi_{rj}$  определяются по зависимости

$$\varpi_{rj} = 3,5\varphi_r \sqrt{\frac{B_r R_r}{B_{пр} R_{ц}(j)}}, \quad (3)$$

- где  $B_r$  – ширина полосы захвата местности ТСР  $r$ -го вида;
- $B_{пр}$  – ширина позиционного района;
- $R_{ц}$  – размеры радиуса цели  $j$ -го типа;
- $R_r$  – разрешающая способность ТСР;
- $\varphi_r$  – коэффициент благоприятности условий проведения разведки;
- $\varpi_{rj}$  – коэффициент обзорности цели  $j$ -го типа при применении ТСР  $r$ -го вида.

Учитывая, что контакт объекта со средствами разведки противника будет длиться какое-то время  $t$ , необходимо определить вероятность обнаружения одиночного объекта во времени по формуле

$$P_o(t) = 1 - e^{-\lambda P_{пр} \sum_{i=1}^m P_{oi} \tau_i}, \quad \sum_{i=1}^m \tau_i = t, \quad (4)$$

- где  $\lambda$  – интенсивность применения средств разведки, сам/ч;

- $P_{пр}$  – вероятность преодоления носителем средств разведки зоны противодействия;  
 $P_{oi}$  – вероятность обнаружения одиночных объектов при  $i$ -м приеме маскировки и однократном контакте со средством разведки;  
 $m$  – возможное число приемов скрытия;  
 $\tau_i$  – продолжительность  $i$ -го приема скрытия.

Изменение численных значений отдельных параметров (4), позволяет разработать группу вариантов приемов, оценить эффективность их применения в различных условиях обстановки, дать сравнительный анализ вариантов, определить наиболее приемлемые из них и, если потребуется, разработать рациональные рекомендации по подготовке и выполнению необходимых мероприятий.

На основе полученных значений вероятности обнаружения одиночных объектов можем определить вероятность обнаружения группового объекта из выражения

$$P_{об} = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{N_{об}}{N_k} < 0,1 \\ \frac{N_{об} - 0,1N_k}{N_k} \times \frac{1 - \alpha}{0,8 \cdot e^{-\alpha} - 0,1(1-\alpha)}, & \text{если } 0,1 \leq \frac{N_{об}}{N_k} < 0,8 \frac{e^{-\alpha}}{1-\alpha}, \\ 1, & \text{если } \frac{N_{об}}{N_k} \geq 0,8 \frac{e^{-\alpha}}{1-\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь  $N_{об}$  – математическое ожидание числа обнаруженных одиночных объектов, входящих в состав группового объекта,

$$N_{об} = \sum_{i=1}^n N_{oi} \cdot P_{oi}(t), \quad (6)$$

где  $n$  – число типов объектов;

$N_{oi}$  – количество одиночных объектов  $i$ -го типа;

$P_{oi}(t)$  – вероятность обнаружения одиночного объекта  $i$ -го типа (4);

$N_k$  – общее количество одиночных объектов в составе группового объекта;

$\alpha$  – коэффициент скрывающих свойств местности,

$$\alpha = 9 \cdot 10^{-3} \cdot C_{зм} \cdot K, \quad (7)$$

где  $C_{зм}$  – степень закрытости местности, %;

$K$  – коэффициент, учитывающий изменение скрывающих свойств местности, от времени года и типа леса [3].

Степень закрытости местности определяется как соотношение размеров естественных масок в позиционном районе объекта к общей площади позиционного района.

По формулам (5) и (6) могут быть определены вероятности обнаружения объекта каждым из расчетных средств воздушной разведки.

В случае проведения противником комплексной разведки, а это, как правило, и происходит, оценка эффективности скрытия при условии обнаружения не менее  $\tilde{m}$  средствами из  $N$  возможных производится по формуле:

$$P_{\tilde{m}} = \sum_{i=\tilde{m}}^N (-1)^{i-\tilde{m}} C_{i-1}^{i-\tilde{m}} \cdot S_i, \quad (8)$$

где  $\tilde{m}$  – минимально допустимое число средств разведки, обнаруживающих одиночный объект;

$N$  – возможное количество средств разведки;

$C_{i-1}^{i-\tilde{m}}$  – число различных сочетаний, применяемых средств разведки;

$S_i$  – сумма комбинаций вероятностей обнаружения средствами разведки.

Значение суммы можно рассчитать как

$$S_i = P_{об1}(t) + P_{об2}(t) + \dots + P_{обN}(t), \quad (9)$$

Число сочетаний  $m$  комбинаций из  $n$  возможных рассчитывается по формуле [8]

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}. \quad (10)$$

Вероятность обнаружения крупного объекта, состоящего из нескольких групповых размещенных на удалении друг от друга, может быть определена по формуле (8), полагая, что для его обнаружения, необходимо обнаружение не менее 70% от общего состава групповых объектов ( $N_{гр}$ ), поэтому значение минимально допустимого числа средств разведки противника, обнаруживающих объект, определяем по формуле

$$\tilde{m} = e^{0,7N_{гр}}. \quad (11)$$

Расчеты в целом за отдельные объединения (командования) производятся путем расчета математического ожидания числа обнаруженных групповых объектов, входящих в их состав:

$$M = \sum_{i=1} Nc_i P_{c_i}, \quad (12)$$

где  $Nc_i$  – число групповых объектов  $i$ -го типа;

$P_{c_i}$  – вероятность обнаружения  $i$ -го группового объекта.

Таким образом, может быть определена эффективность инженерных мероприятий скрытия различных типов объектов от одиночных до сложных, состоящих из нескольких групповых, с учетом возможностей воздушной разведки вероятного противника, противодействия, условий местности, времени года, состава и характера действий войсковых объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная выше методика оценки эффективности мероприятий скрытия как составной части маскировки объектов совместно с другими разработками позволяет обеспечить теоретическую оценку реального вклада маскировки в живучесть объектов различных типов на строгой научной и математической базе, а также рационально определить мероприятия скрытия.

Простота математического аппарата алгоритма, его завершенность позволяют использовать его в дальнейшем при разработке математической модели боевых действий формирования различного уровня и оценивать их эффективность не только по критерию числа уничтоженных (выведенных из строя) средств поражения вероятного противника, но и по критерию вероятности сохранения функционирования объекта.

## Список используемых источников

1. Орленко Л.П. Главная угроза для России // Стратегия России. – 2015. – № 4.
2. Макаров К.В., Ченцов А.Е. Крылатые ракеты противника – фактор изменения в соотношении сил воюющих сторон // Военная мысль. – 2017. – № 10. – С. 52–57.

3. Федоренко А.В. Алгоритм обеспечения живучести стационарных объектов при воздействии обычных средств поражения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 180–183.
4. Маскировка: учебник / В.В. Княжев, О.Р. Сайфулин, М.Ф. Крысанов и др. – М.: ВУНЦ СВ, 2016. – 149 с.
5. Военный энциклопедический словарь. – М.: ВИ, 2007. – С. 1024.
6. Беркович С.Б. Оценка эффективности вариантов построения интегрированных комплексов навигации, наведения и целеуказания в условиях воздействия помех специального вида // Известия института инженерной физики. – 2017. – № 1. – С. 2–14.
7. Сурин Д.В. Инженерное обеспечение выполнения задач космическими войсками: учебник / Д.В. Сурин, Г.Г. Бутенко, И.Е. Петрушин и др. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2001. – С. 314.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. – М.: Наука, 1969. – С. 576.

Д.П. Мандрица,  
кандидат техн. наук, доцент

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСТАТОЧНЫЕ ПРОГИБЫ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Представлены результаты численного исследования остаточных деформаций и перемещений при оценке остаточного ресурса стартовых сооружений. Определен коэффициент нарастания остаточных деформаций, позволяющий определить предельное значение циклов нагружения несущих конструкций специальных сооружений.

Ключевые слова: специальные сооружения, остаточные перемещений, жесткость сечения, момент инерции.

Вопросам оценки остаточного срока службы (остаточного ресурса) несущих конструкций специальных сооружений, в том числе стартовых после воздействия эксплуатационных динамических нагрузок и аварийных нагрузок, уделяется особое внимание [1–9]. Это обусловлено следующими причинами:

1) повышенными требованиями к уровням защищенности и безопасности при эксплуатации специальных сооружений РКК, так как специальные сооружения РКК обеспечивают безопасность и работоспособность личного состава и большого комплекса технического и технологического оборудования;

2) снижением эксплуатационных свойств сооружений, обусловленным их деградацией (старением) с течением времени. Это приводит к изменению эксплуатационной пригодности и снижению параметров специальных сооружений по назначению, живучести и защищенности;

3) наличием на стартовых комплексах РКК большого объема пожаровзрывоопасных веществ и материалов, компонентов ракетных топлив, которые при возможных аварийных ситуациях могут образовывать взрывчатые вещества стехиометрического состава. Опыт эксплуатации стартовых сооружений свидетельствует, что такие сооружения после аварийных воздействий получают значительные деформации и повреждения (рис. 1);



Рис. 1. Повреждения на стартовом сооружении  
после аварийного взрыва

4) необходимостью оценивания после особых воздействий остаточного ресурса специальных сооружений для различных этапов эксплуатации, в том числе в угрожаемый период.

В настоящее время достоверной методики оценки эксплуатационной пригодности несущих конструкций с учетом полученных повреждений и деформаций не существует, что не позволяет реально оценить остаточную прочность и деформативность специальных сооружений. Без таких методик невозможно спланировать оптимальные по составу и объему ремонтно-восстановительные работы.

Кроме того, большое внимание уделяется прогнозированию срока службы различных зданий и сооружений. В процессе длительной эксплуатации материалы и конструкции претерпевают различные изменения: происходит деградация свойств бетона в результате воздействия неблагоприятных факторов, усиливается процесс коррозии бетона и рабочей арматуры. Поэтому важнейшим моментом при оценке остаточного ресурса становится оценка состояния бетонных и железобетонных конструкций на определенный момент времени: параметры остаточной прочности, деформаций и перемещений.

На сегодняшний момент в ведомствах [1, 2, 3, 5] разработаны различные методические документы: методики оценки интенсивности старения строительных материалов и определения остаточного ресурса работоспособности сооружения [1]. Так, в нормативном документе [2] введен термин «деградация», который соответствует термину «старение». Под термином «деградация» в данной методике понимается изменение эксплуатационных качеств сооружений (прочности, устойчивости, водонепроницаемости), обусловленное изменением с течением времени физико-механических характеристик строительных материалов и грунтов оснований при нормальных условиях эксплуатации сооружений.

В условиях повседневного функционирования стартового комплекса изменение таких эксплуатационных качеств сооружений, как прочность, устойчивость, водонепроницаемость происходит постепенно, а при особых воздействиях – аварийных нагрузках – может значительно ускориться. При этом моментом истощения остаточного ресурса является наступление первого и второго предельных состояний.

Однако на стартовом комплексе высока вероятность возникновения аварийных ситуаций, приводящих в ряде случаев к аварийному взрыву. Данная нагрузка является особой и на нее строительными нормами должны вводиться особые предельные состояния. В результате воздействия особых нагрузок: взрывных и эксплуатационных динамических воздействий, нарушение технологического процесса подготовки изделий, разрушение несущих конструкций происходит мгновенно и может привести к прогрессирующему разрушению. Определение технического состояния таких конструкций и их материалов должно производиться в результате тщательного обследования.

Проанализируем влияние неупругих деформаций на остаточные прогибы изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций и остаточный ресурс несущих конструкций стартовых сооружений по прогибам. Для этого определим степени влияния неупругих прогибов (деформаций) на остаточный срок службы.

Расчет упругих деформаций выполняется на основе нелинейной деформационной модели. Принимаем деформации в нормальном сечении бетона распределенными по линейному закону, напряжения – с учетом экспериментально полученных диаграмм состояний бетона и арматуры.

Для оценки остаточного ресурса стартовых сооружений выполним расчет параметров колебаний системы с учетом как упругих, так неупругих колебаний при действии динамических нагрузок. Дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$m \cdot y'' + C \cdot y_e = P(t), \quad y = y_e + y_p,$$

где  $y_e$  – упругие колебания системы;  
 $y_p$  – неупругие (пластические) перемещения;  
 $C$  – жесткость системы;  
 $P(t)$  – внешняя нагрузка на систему.

Представим уравнение движения системы с учетом неупругих колебаний в виде выражения

$$y = y_0 + \dot{y}_0(t - \theta) - \frac{C \cdot f}{m} \cdot \frac{(t - \theta)^2}{2} + \iint_0^t \frac{P(u)}{m} dudv,$$

где  $P(u)$  – интенсивность внешней нагрузки;

$\theta$  – время начала неупругих деформаций;

$y_0, \dot{y}_0$  – соответственно начальные перемещения и скорости в системе.

В общем случае определение остаточных перемещений с помощью данного уравнения затруднено. Для частных случаев уравнение максимальных перемещений можно представить в виде выражений:

1) для свободных колебаний:

$$y_{\max} = f + \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2 \cdot C \cdot f},$$

неупругие (остаточные) деформации:

$$y_{p,\max} = \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2 \cdot C \cdot f},$$

2) при действии мгновенного импульса:

$$S y_{\max} = \frac{f}{2} + \frac{S^2}{2 \cdot m \cdot C \cdot f},$$

неупругие деформации:

$$y_e = \frac{S^2}{2 \cdot m \cdot C \cdot f} - \frac{f}{2}.$$

При свободных колебаниях система будет совершать колебания с частотой  $\omega$  и амплитудой  $\pm f$  около остаточного деформированного состояния. В случае действия мгновенного импульса, достигнув скорости  $\dot{y}_0 = \frac{S}{m}$ , система будет двигаться равно замедленно при восстанавливающей силе  $C \cdot f$ .

При повторных последующих динамических нагружениях уравнение максимальных перемещений можно представить в виде выражений:

1) при свободных колебаниях:

$$y_{\max,2} = (f_2 + f_1) + \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2 \cdot C \cdot (f_2 + f_1)}, \dots \dots y_{\max,n} = (f_n + f_{n-1} \dots + f_1) + \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2 \cdot C \cdot (f_n + f_{n-1} \dots + f_1)},$$

$$y_{p,n \max} = \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2 \cdot C \cdot (f_n + f_{n-1} \dots + f_1)};$$

2) при действии мгновенного импульса:

$$S y_{n,\max} = \frac{f_n + f_{n-1} \dots + f_1}{2} + \frac{S^2}{2 \cdot m \cdot C \cdot (f_n + f_{n-1} \dots + f_1)},$$

$$y_e = \frac{S^2}{2 \cdot m \cdot C \cdot (f_n + f_{n-1} \dots + f_1)} - \frac{f_n + f_{n-1} \dots + f_1}{2}.$$

Полученные зависимости указывают на нелинейный характер зависимости неупругих остаточных деформаций после  $n$ -х повторных динамических нагружений системы. Рассмотрим определение упругих деформаций применительно к изгибаемым бетонным и железобетонным конструкциям. В соответствии с требованиями [3, 4] наступление неупругих деформаций в бетоне характеризуется моментом образования трещин без учета продольной силы:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W_{pl}$$

где  $W_{pl}$  – упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона.

С учетом упругого момента сопротивления приведенного сечения  $W_{red}$  [3, 4] для растянутой зоны сечения получим



$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot 1.3 \cdot \frac{I_{red}}{y_t},$$

где  $R_{bt,ser}$  – расчетные значение сопротивления бетона осевому растяжению;

$I_{red}$  – момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести,

$y_t$  – расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента.

Нагрузку, соответствующую моменту образования трещин, можно определить исходя из кривизны бетонных и железобетонных элементов и условий их закрепления выражением

$$y = A \cdot \frac{M}{EI},$$

где  $A$  – коэффициент, учитывающий схему загрузки и условия закрепления изгибаемого элемента;

$M$  – изгибающий момент в сечении;

$EI$  – жесткость сечения.

Тогда с учетом момента трещинообразования и кривизны железобетонных элементов неупругие деформации представляют выражением

$$y_e = \frac{1.31 \cdot A \cdot R_{bt,ser}}{E_{b1} \cdot y_t}.$$

Подставим выражение для  $y_e$  в формулу для неупругих (остаточных) деформаций при однократном динамическом воздействии:

$$y_{p,max} = \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2 \cdot C} \cdot \frac{E_{b1} \cdot y_t}{1.31 \cdot A \cdot R_{bt,ser}} = \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2} \cdot \frac{y_t}{1.31 \cdot I_{red} \cdot R_{bt,ser}}.$$

Анализ данного выражения показывает, что остаточные деформации незначительно, но будут зависеть от жесткости изгибаемого железобетонного элемента и расстояния до наиболее растянутой зоны элемента. Остаточный прогиб при  $n$ -воздействиях определяется из выражений:

1) при свободных колебаниях:

$$y_{p,n} = \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2.62 \cdot R_{bt,ser}} \cdot \left( \frac{y_{t1}}{I_{red,1}} + \frac{y_{t2}}{I_{red,2}} + \dots + \frac{y_{tn}}{I_{red,n}} \right);$$

2) при действии мгновенного импульса:

$$y_e = \frac{S^2}{2 \cdot m \cdot C \cdot (y_{t,n} + y_{t,n-1} + \dots + y_{t,1})} - \frac{(y_{t,n} + y_{t,n-1} + \dots + y_{t,1})}{2}.$$

Обозначим выражение  $\frac{y_{t1}}{I_{red,1}} + \frac{y_{t2}}{I_{red,2}} + \dots + \frac{y_{tn}}{I_{red,n}}$  коэффициентом нарастания остаточных деформаций  $k_{dec}$ . Пусть высота сечения изгибаемого элемента при появлении остаточных деформаций равняется  $h_i = h_0 - a$ . Тогда выражение для  $k_{dec}$  после первого динамического воздействия составит

$$k_{dec,1} = \frac{y_{t1}}{I_{red,1}} = \frac{1}{W_{red,1}} = \frac{6}{b \cdot (h_0 - a)^2}, \quad k_{dec,2} = \frac{6}{b \cdot (h_0 - 2a)^2}, \quad k_{dec,3} = \frac{6}{b \cdot (h_0 - na)^2}.$$

После подстановки выражений для  $a$  и учитывая малость  $a^2$ , уравнение для приведенного коэффициента нарастания остаточных деформаций будет иметь вид

$$\bar{k}_{dec,1} = k_{dec,1} \cdot b \cdot h_0^2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^2} + \frac{1}{\left(1 - 2\frac{a}{h}\right)^2} + \dots + \frac{1}{\left(1 - n\frac{a}{h}\right)^2}.$$

Результаты расчетов и графики функции  $\bar{k}_{dec,1}$  в зависимости от коэффициента  $\frac{a}{h}$  для  $n = 2, 4$  представлены на рис.1.

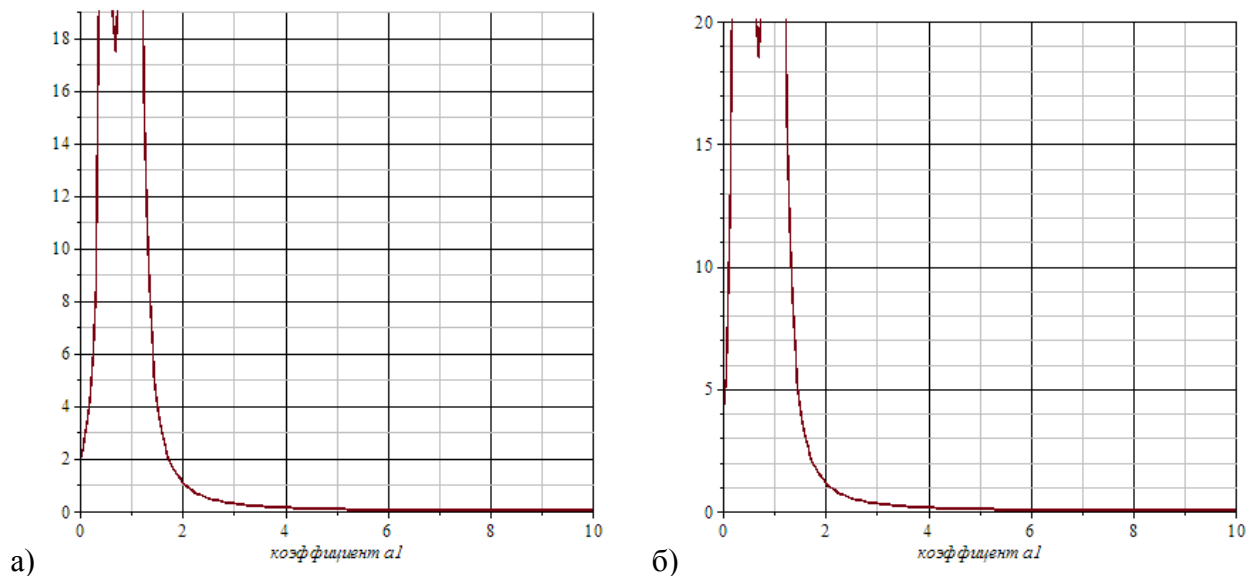


Рис. 1. График функции  $\bar{k}_{dec,1}$  в зависимости от коэффициента  $\frac{a}{h}$ :  
 а – для  $n=2$ ; б – для  $n=4$

Анализ представленных графиков показывает:

1. Максимальное нарастание остаточных деформаций происходит в диапазоне значений 0–2. Максимальное значение при  $a1=0,732$  и равно 17,4.

2. Графики коэффициентов нарастания остаточных деформаций при  $n>4$  практически не изменяются.

3. Полные выражения для остаточных перемещений (деформаций) наиболее растянутой зоны элемента приведены ниже. Остаточный прогиб при  $n$ -воздействиях определяется выражениями:

– при свободных колебаниях:

$$y_{p,n} = \frac{\dot{y}_0^2 \cdot m}{2.62 \cdot R_{bt,ser} \cdot b \cdot h_0^2} \cdot \left( \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^2} + \frac{1}{\left(1 - 2\frac{a}{h}\right)^2} + \dots + \frac{1}{\left(1 - n\frac{a}{h}\right)^2} \right),$$

– при действии мгновенного импульса:

$$y_e = \frac{s^2}{2 \cdot m \cdot b \cdot h_0^2} \cdot \left( \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^2} + \frac{1}{\left(1 - 2\frac{a}{h}\right)^2} + \dots + \frac{1}{\left(1 - n\frac{a}{h}\right)^2} \right) - \frac{(y_{t,n} + y_{t,n-1} + \dots + y_{t,1})}{2}.$$

**Выводы.** В результате проведенных исследований определены остаточные деформации и основные факторы, влияющие на величину остаточных деформаций при  $n$  динамических воздействиях. Количество динамических загрузений при предельно допустимых остаточных деформациях может быть определено численно для конкретных параметров изгибаемых железобетонных элементов.

#### Список используемых источников

1. Руководство по методике оценки ресурса работоспособности и безопасности бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. – СПб.: ВНИИГ, 1997.

2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2015.

3. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Общие положения. – М., 2018. – 150 с.
4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М., 2013. – 85 с.
5. ГОСТР 42.2.01–2014. Гражданская оборона. Оценка состояния потенциально опасных объектов, объектов обороны и безопасности в условиях воздействия поражающих факторов обычных средств поражения. Методы расчета. – М.: Стандартиформ, 2015.
6. ГОСТ 54317-2011. Комплексы стартовые и технические ракетно-космических комплексов. – М., Стандартиформ 2001.
7. Способ определения остаточного ресурса промышленных дымовых и вентиляционных труб / В.Г. Сатъянов, П.Г. Пилипенко, В.А. Французов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – №12. – С. 34–38.
8. *Шматков С.Б.* Способ расчета остаточного ресурса строительных конструкций // Технадзор. – 2007. – №5.
9. *Мельчаков А.П.* Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.

Д.П. Мандрица,  
кандидат техн. наук, доцент

## МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОСЛЕ АВАРИЙНЫХ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ

Рассматриваются вопросы повышения остаточного ресурса стартовых сооружений после аварийных нагрузок и воздействий. Предложены способы восстановления (усиления) несущих конструкций стартовых сооружений на основе основных показателей восстановления: условий эксплуатации стартовых сооружений, технологичности и экономичности способов восстановления.

Ключевые слова: стартовые сооружения, аварийные нагрузки и воздействия, эксплуатационная пригодность, модель восстановления.

Центральным и важнейшим элементом стартового комплекса СК является стартовое сооружение. К основным особенностям эксплуатации стартовых сооружений СК РКК относятся следующие:

1. Стартовые сооружения (СС) в ходе подготовки к запуску и запуска РКН подвергаются разнообразным по амплитуде и времени статическим и динамическим эксплуатационным нагрузкам и воздействиям.

2. Риск возникновения аварийных ситуаций существует на всех этапах эксплуатации. Установлено, что вероятность отказа для современных отечественных РКН колеблется в диапазоне 0,063–0,11.

3. Срок службы существующих стартовых комплексов РКК и вместе с ними стартовых сооружений (созданных в 1960–1990 годы) истекает либо давно истек, что приводит к труднопрогнозируемым оценкам технического состояния таких сооружений [7, 8].

В результате приложения аварийных нагрузок и воздействий несущие и ограждающие конструкции СС получают значительные повреждения, а само стартовое сооружение приходит в неработоспособное состояние (рис. 1). Данные тенденции накладывают значительные ограничения на живучесть и защищенность стартовых сооружений.

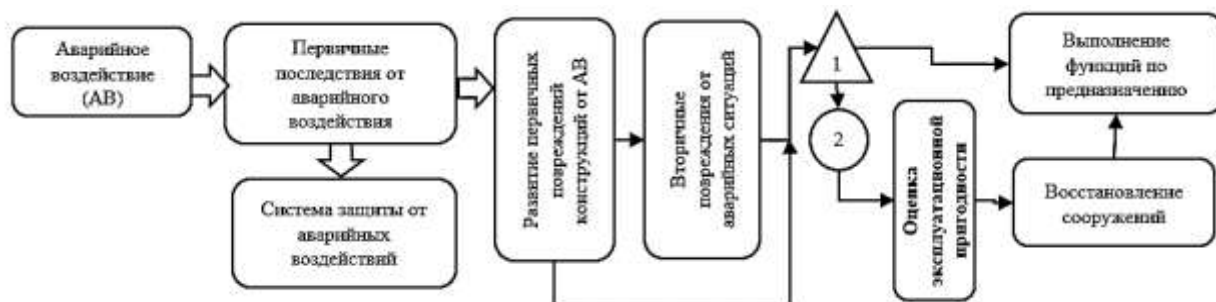


Рис. 1. Технические состояния стартовых сооружений после аварийных воздействий

Под живучестью стартовых сооружений будем понимать свойство, характеризующее способность специального сооружения сохранять эксплуатационную пригодность при получении повреждений или восстанавливать данную пригодность в течение заданного времени.

Основными факторами, определяющими живучесть стартового сооружения СК РКК, являются фактор условий работы и фактор готовности стартового сооружения СК к решению задач по предназначению с вероятностью не ниже заданной.

Для обеспечения надежной и безопасной работы стартовых сооружений сформулированы современные положения по их проектированию и эксплуатации в условиях аварийных нагрузок и воздействий [3, 9, 11]. В целом, отмечая высокий уровень нормативно-технических документов, необходимо указать следующие недостатки и ограничения, которые не позволяют достоверно оценить уровень живучести и защищенности стартовых сооружений [1–4]:

1. Отсутствие современных научно-методических положений по восстановлению стартовых сооружений после аварийных нагрузок и воздействий при минимальных затратах и средствах на их восстановление.

2. Необходимость обеспечения работоспособного состояния несущих и ограждающих конструкций стартовых сооружений в угрожаемый период без проведения в необходимом объеме ремонтно-восстановительных работ.

3. Необходимость оценки остаточной прочности и долговечности несущих конструкций и их остаточный ресурс с учетом поврежденностей и разрушений специальных сооружений РКК после аварийных нагрузок и воздействий.

Таким образом, изучение вопросов восстановления эксплуатационной пригодности после аварийных нагрузок и воздействий свидетельствует об актуальности научных исследований по этой теме.

Проблеме восстановления материалов и конструкций после аварийных воздействий посвящены НТД [1–4, 6, 7]. Теория восстановления представлена в работах Феллера, Смита, Севастьянова Б.А. и др. Практические рекомендации по восстановлению материалов и конструкций даны в работах Сурина Д.В., Бойко М.М., Гроздова В.Т., Курлапова Д.В., Тамразяна А.Г., Мольганова А.И. и др.

Под восстановлением понимается процесс восстановления таких показателей эксплуатационной пригодности  $i$ -го элемента, как время восстановления  $T_{\text{в}}$ , трудоемкость восстановления. Модель восстановления эксплуатационной пригодности представлена на рис. 2.

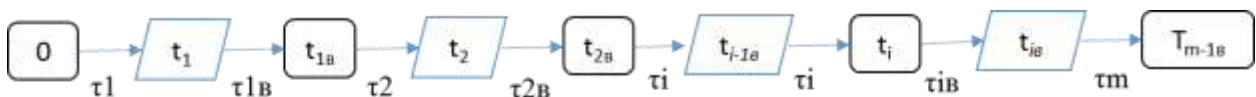


Рис. 2. Модель восстановления эксплуатационной пригодности

На рисунке введены следующие обозначения:  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m$  – моменты отказов;  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$  – промежутки времени нормального функционирования;  $\tau_{1B}, \tau_{2B}, \dots, \tau_{iB}$  – промежутки времени на восстановление свойств сооружения.

Существующие методы восстановления несущих конструкций и материалов основываются на оценке вероятного ущерба и применения на его основе коэффициента пересчета стоимостного выражения повреждения в стоимость его восстановления  $K_c$  [3]. Математическая зависимость коэффициента восстановления для зданий и сооружений  $K_c$  может быть записана в виде

$$K_c = -1,069 \cdot 10^{-7} \cdot P^4 + 1,365 \cdot 10^{-5} \cdot P^3 - 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 + 0,0077 \cdot P - 0,0024.$$

Графическое представление этого коэффициента показано на рис. 3. В зависимости от степени повреждения  $P$  (рис. 3) различают 4 состояния:

1) в интервале 1–20% – капитальный ремонт проводится лишь на отдельных участках;

2) в интервале 21–40% – конструктивные элементы в целом пригодны для эксплуатации, но требуется некоторый капитальный ремонт;

3) в интервале 41–60% – эксплуатация конструктивных элементов возможна лишь при условии значительного капитального ремонта;

4) в интервале 61–80% – ограниченное выполнение конструктивными элементами своих функций возможно лишь после проведения охранных мероприятий или полной замены конструктивного элемента.

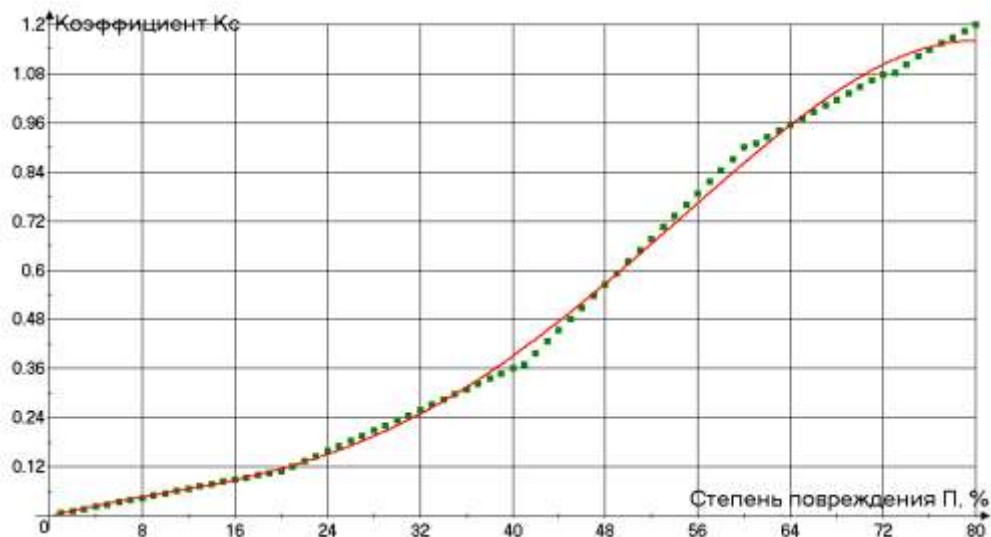


Рис. 3. Коэффициент восстанавливаемости  $K_c$

Основные способы восстановления (усиления) несущих конструкций стартовых сооружений представлены на рис. 4.

Применение данных способов усиления без учета предназначения отдельных помещений, учета условий работы отдельных конструкций и возможности их усиления без остановки запусков РКН является ограниченным и в ряде случаев – невозможным.

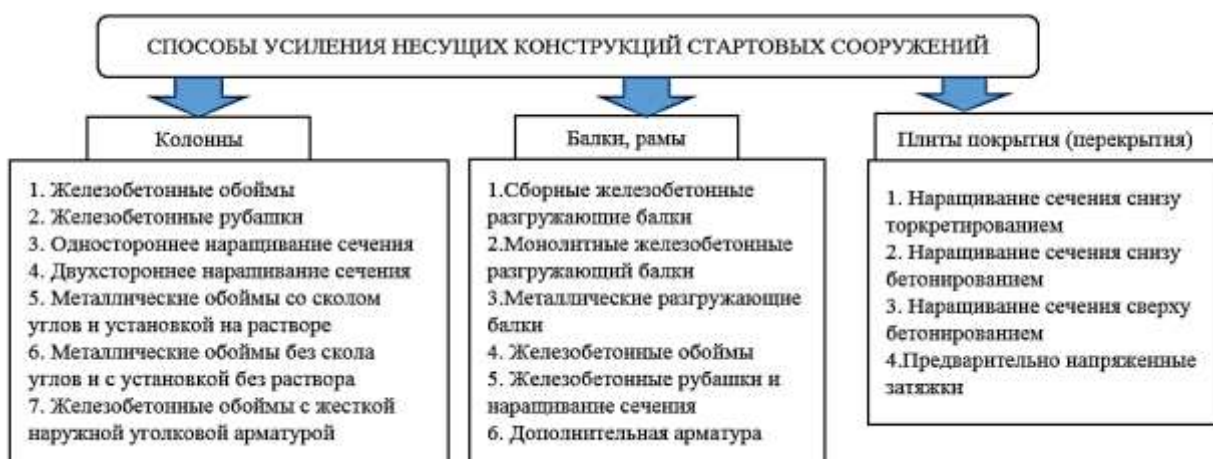


Рис. 4. Способы усиления несущих конструкций стартовых сооружений

Модель восстановления эксплуатационной пригодности СС после аварийных нагрузок и воздействий показана на рис. 5.

Предлагаемая модель включает следующие этапы:

1. Оценка вероятного (возможного) ущерба после аварийного воздействия с определением коэффициентов поврежденностей.
2. Разработка рационального (оптимального) способа восстановления эксплуатационной пригодности.
3. Определение остаточного ресурса стартовых сооружений.

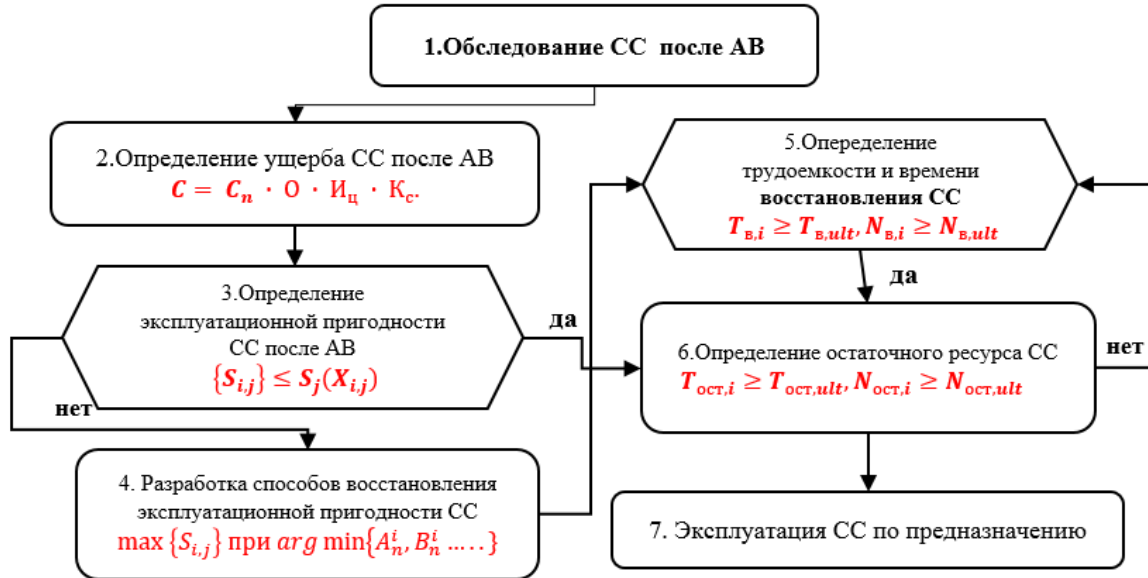


Рис. 5. Модель восстановления эксплуатационной пригодности СС после аварийных нагрузок и воздействий

Математическая модель восстановления несущих конструкций представляет собой максимизацию их эксплуатационной пригодности при минимизации параметров восстановления:

$$\max \{S_{i,j}\} \text{ при } \arg \min \{A_n^i, B_n^i, \dots\},$$

где  $S_{i,j}$  – параметры эксплуатационной пригодности  $i$ -ой конструкции стартовых сооружений при воздействии  $j$ -го параметра поражающих факторов аварийных ситуаций;

$A_n^i, B_n^i, \dots$  – основные свойства несущих конструкций стартовых сооружений: прочность, деформативность, устойчивость и пр.

Предлагается метод восстановления эксплуатационной пригодности, включающий следующие этапы:

1. Определение параметров восстановления, к которым относятся: параметры эксплуатации в пожароопасных условиях; параметры остановки запуска РКН и снятия нагрузки; наличия минимально необходимых рабочих зон вокруг усиливаемой конструкции; возможность изменения расчетной схемы стартового сооружения и т.д.

2. Выбор определяющих показателей восстановления несущих конструкций: показателей возможности применения способа, его технологичности и экономичности.

3. Определение весовых коэффициентов определяющих показателей восстановления несущих конструкций СС СК РКК.

4. Определение времени восстановления несущих конструкций СС СК.

В отличие от существующих способов восстановления специальных сооружений после аварийного воздействия предлагаемый метод комплексно оценивает все факторы, влияющие на эксплуатационную пригодность, и только на последнем этапе оценивает экономичность

принимаемого решения. Графическое представление метода восстановления эксплуатационной пригодности показано на рис. 6. В качестве исходных данных используются следующие параметры: 1) наличие пожароопасных условий (помещений) –  $x_1$ ; 2) остановка запусков РКН –  $x_2$ ; 3) снятие нагрузки с несущей конструкции –  $x_3$ ; 4) наличие взрывоопасных условий (помещений) –  $x_4$ ; 5) возможность значительного увеличения несущей способности –  $x_5$ .

Возможность применения способов восстановления стартовых сооружений производится исходя из заданных нагрузок, результатов обследования, поверочных расчетов, состояния существующих конструкций, вида повреждения, прочности бетона, вида и механических характеристик арматуры, возможности передачи нагрузки на другие существующие конструкции и других факторов.



Рис. 6. Метод восстановления эксплуатационной пригодности несущих конструкций СС

Кроме того, при выборе способа усиления важную роль играет степень агрессивности среды на стартовом сооружении (постоянная загазованность при пусках, высокая температура при эксплуатационных динамических нагрузках), которая определяется по данным анализа химического состава и влажности воздуха.

Способ усиления, включающий материал усиления и метод защиты от коррозии, определяется требованиями [5], включает работы по антикоррозионной защите конструкций.

Приемлемость каждого из рассматриваемых способов усиления без остановки запусков РКН и демонтажа оборудования (в том числе разрушенного) определяется также исходя из следующих условий:

1) наличия минимально необходимых рабочих зон вокруг усиливаемой конструкции (приближение оборудования и конструкций);

2) возможность использования готовых (инвентарных) средств усиления, способных активно включаться в работу несущих и ограждающих конструкций (наличие специализированных закладных деталей);



3) возможность изменения расчетной схемы стартового сооружения в целях использования запаса несущей способности и эксплуатационной пригодности отдельных конструкций и элементов конструкций.

В качестве определяющих показателей выбора способов восстановления несущих конструкций используются следующие показатели.

1. Показатель эксплуатации несущих конструкций СС в пожароопасных условиях по глубине прогревания бетона:

$$P_{\alpha} = \frac{a_{t,res}}{a_t},$$

где  $a_{t,res}$  – глубина прогревания бетона восстановленной несущей конструкции;

$a_t$  – глубина прогревания бетона несущей конструкции в нормальном эксплуатационном состоянии.

2. Показатель эксплуатации несущих конструкций СС в пожароопасных условиях по температуре нагрева растянутой арматуры:

$$P_{\alpha} = \frac{A_s \cdot h_0}{A_{s,res} \cdot h_{0,res}},$$

где  $A_s, h_0$  – соответственно площадь арматуры растянутой зоны и высота сечения изгибаемой конструкции;

$A_{s,res}, h_{0,res}$  – соответственно площадь арматуры растянутой зоны после восстановления и новая высота сечения изгибаемой конструкции.

Рассмотрим показатели технологичности способов восстановления стартовых сооружений, они включают несколько групп.

*Первая группа* – с изменением размеров конструкций. Эта группа включает приведенные ниже характеристики.

Индустриальность – возможность изготовления конструкций усиления в заводских условиях. В зависимости от конструктивных элементов можно выделить следующие факторы, влияющие на индустриальность восстановления несущих конструкций СС: геометрические размеры конструкций; возможность их разделения на подконструкции; наличие свободного объема; наличие кранового (механического) оборудования, необходимого для монтажа элементов усиления (восстановления).

В качестве показателя индустриальности принимается  $P_{инд}$ :

$$P_{инд} = f(l_{max}) \cdot f_{конс.} \cdot \left(1 - \frac{V_{обор}}{V_{полн}}\right) f_{кр.}$$

Здесь  $f(l_{max})$  – фактор, учитывающий отношение максимальных размеров конструкций усиления (восстановления) к максимальным размерам помещений, в которых производится усиление;

$f_{конс.}$  – фактор, учитывающий возможность разделения конструкции усиления на подконструкции;

$V_{обор}$  – объем, занимаемый оборудованием;

$V_{полн}$  – полный объем помещения (сооружения), в котором производится усиление (восстановление);

$f_{кр.}$  – коэффициент, учитывающий наличие кранового оборудования.

Следующей характеристикой является быстрота устройства усиления на месте. На быстроту устройства элементов восстановления (усиления) влияют следующие факторы (условия): наличие свободного объема; наличие кранового (механического) оборудования, необходимого для монтажа элементов усиления (восстановления); наличие подготовленных специалистов (рабочих).

Показателем быстроты устройства усиления на месте будет следующий комплексный показатель:

$$P_{\text{быс.}} = \left(1 - \frac{V_{\text{обор}}}{V_{\text{полн}}}\right) \cdot f_{\text{кр}} \cdot f_{\text{спец}},$$

где  $f_{\text{спец}}$  – коэффициент, учитывающий наличие специалистов (рабочих).

Еще одной характеристикой является простота устройства. Она обозначается показателем  $P_{\text{пр}}$ . Данный показатель существенным образом зависит от большого количества факторов. Все установленные способы усиления (восстановления) по простоте устройства условно можно разделить на три группы.

1. Простое устройство. В данном случае используются инвентарные средства, которые подготовлены заранее. Значение показателя в этом случае будет 1.

2. Ограниченно простое устройство. В данную группу включаются все способы с применением арматуры и прокатных профилей. Значение показателя – 0,5.

3. Трудное устройство. Применение инвентарной опалубки и добетонирование конструкции сооружения. Значение показателя – 0,2.

И последней характеристикой будет простота обеспечения хорошей совместной работы усиливаемой и усиливающей конструкции. Ее обозначают показателем  $P_{\text{сов.}}$ . На данный показатель большое влияние оказывают следующие факторы: необходимость проведения сварки закладных деталей; необходимость устройства технологических отверстий и сколов.

Предложенные показатели с уменьшением габаритов конструкций можно представить следующей зависимостью:

$$P_{\text{тех.1}} = f(l_{\text{max}}) \cdot f_{\text{конс.}} \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{обор}}}{V_{\text{полн}}}\right) f_{\text{кр}}^2 \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{обор}}}{V_{\text{полн}}}\right) \cdot f_{\text{спец.}} \cdot P_{\text{пр.}} \cdot P_{\text{сов.}}$$

*Вторая группа* – без изменения габаритов конструкций.

На процесс усиления восстановления (усиления) конструкций влияют практически те же характеристики, что и при уменьшении габаритов помещений (кроме индустриальности изготовления): быстрота устройства усиления на месте; простота устройства; простота обеспечения хорошей совместной работы усиливаемой и усиливающей конструкций. Тогда итоговый показатель можно выразить зависимостью

$$P_{\text{тех.2}} = f_{\text{кр}} \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{обор}}}{V_{\text{полн}}}\right) \cdot f_{\text{спец}} \cdot P_{\text{пр.}}$$

*Третья группа* – усиление без нарушения усиливаемой конструкции при производстве работ.

В процессе усиления конструкций без нарушения их целостности важное значение имеют следующие характеристики: геометрические размеры конструкций; наличие свободного объема; наличие кранового (механического) оборудования, необходимого для монтажа элементов усиления (восстановления); необходимость проведения сварки закладных деталей; простота устройства элементов усиления (восстановления). Итоговый показатель можно выразить зависимостью

$$P_{\text{тех.3}} = f_{\text{кр}} \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{обор}}}{V_{\text{полн}}}\right) \cdot P_{\text{пр.}} \cdot P_{\text{сов.}}$$

Выбор показателей технологичности представляет собой максимизацию показателей  $P_{\text{тех.1}}$ ,  $P_{\text{тех.2}}$ ,  $P_{\text{тех.3}}$ . Получение интегрального показателя технологичности усиления (восстановления) конструкций и сооружений можно выполнить с помощью методов свертки показателей на основе аддитивных, мультипликативных и агрегированных функций.

**Вывод.** Таким образом, предложенный метод восстановления эксплуатационной пригодности стартовых сооружений на основе комплексного оценивания всех факторов позволяет оптимально выбрать способ восстановления и тем самым повысить остаточную прочность и деформативность и остаточный ресурс стартовых сооружений.

### Список используемых источников

1. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения / Харьковский Промстройниипроект, НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1992. – 191 с.
2. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений / НИИСК. – М.: Стройиздат, 1989. – 104 с.
3. ГОСТР 42.2.01-2014. Гражданская оборона. Оценка состояния потенциально опасных объектов, объектов обороны и безопасности в условиях воздействия поражающих факторов обычных средств поражения. Методы расчета. – М.: Стандартинформ, 2015.
4. Каталог конструктивных решений по усилению и восстановлению строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: ОАО «ЦНИИ Промзданий», 2009. – 258 с.
5. СНиП 2.03.11-85\*. Защита строительных конструкций от коррозии. – М., 2013. – 85 с.
6. Оценка экономического ущерба от аварий на опасном производственном объекте Методические указания к практическим занятиям по курсу «Управление техносферной безопасностью» / под редакцией Н. Н. Вершинина. – Пенза, 2014. – 24 с.
7. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004.
8. ГОСТ Р 22.10.01-2001. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Оценка ущерба. Термины и определения. – М., 2001.
9. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010.
10. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. – М., 2000.
11. Оценка последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах: учеб. справочник / сост. С.А. Ковалев, В.С. Кузеванов. – Омск: Изд-во Омского гос. ун-та, 2012. – 40 с.

А.Н. Миронов,  
доктор техн. наук, профессор;  
Т.Н. Солдатенко

## МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПРОЕКТА ЗДАНИЯ

В статье представлена разработка комплексного показателя эффективности варианта проекта строительства и последующей эксплуатации здания. Предложено рассматривать составляющие этого обобщенного показателя как результаты экспертных заключений. При этом допускается применение как количественных значений показателей в форме нечетких чисел, так и вербальная форма высказываний специалистов, которые трансформируются в лингвистические переменные. Необходимые преобразования осуществлены с использованием нечеткой логики. Полученные результаты поясняются расчетным примером.

Ключевые слова: комплексный показатель эффективности проекта, нечеткая логика, функция принадлежности, лингвистическая переменная.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценивания эффективности проекта здания относится к задачам, решаемым в условиях неопределенности. Как правило, для решения подобных задач используется аппарат теории вероятностей. Однако в ряде случаев недостаток имеющихся исходных данных затрудняет получение достаточно адекватных вероятностных моделей, описывающих требуемые характеристики проекта.

Для снижения уровня неопределенности могут быть применены экспертные заключения о предполагаемых показателях различных вариантов анализируемого проекта. Однако в таких ситуациях необходимо сводить качественные экспертные оценки к количественным показателям эффективности, которые соответствуют требованиям нормативных документов отрасли строительства [1].

Один из способов решения указанной проблемы основан на применении теории нечетких множеств [2].

Проект возведения и последующего целевого использования здания является сложным для анализа объектом. Поэтому для описания предполагаемой эффективности проекта вводится некоторое количество характеристик. Предложено использовать выводы теории квалиметрии о формировании комплексного показателя сложной системы при совместном оценивании нескольких ее характеристик [3].

### МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА

Пусть для описания эффективности проекта здания используются  $K$  характеристик, описывающих данный объект с различных точек зрения. Установим для удобства изложения материала, что уровень каждой характеристики оценивается только одним показателем. При этом допустим, что каждый показатель может иметь как количественную форму представления, так и словесное описание соответствующего свойства. Это позволяет формировать их на основе экспертных заключений.

Пусть имеются  $L$  вариантов проекта возведения и последующей эксплуатации здания, которые различаются между собой значениями используемых показателей. Предположим, что при описании эффективности проекта используются  $K$  нечетких характеристик. Вос-

пользуемся аддитивной формой свертки частных показателей. Тогда соотношение для комплексного нечеткого показателя  $\tilde{P}_l$   $l$ -го варианта проекта имеет следующий вид:

$$\tilde{P}_l = \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{lk}, \quad l = 1(1)L. \quad (1)$$

Виды результативности проекта могут иметь различную значимость для заказчика проекта. Для учета этой особенности введем коэффициенты  $\alpha_k$  ( $k = 1(1)K$ ), которые определяют уровень важности  $k$ -го вида результативности проекта. При этом должно выполняться условие:  $\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ . Тогда конечное выражение для комплексного показателя  $\tilde{P}_l$  принимает следующий вид:

$$\tilde{P}_l = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot \tilde{p}_{lk}, \quad l = 1(1)L. \quad (2)$$

При использовании соотношений (1) и (2) должно быть обеспечено условие одинаковой размерности для их составляющих. Поэтому в необходимых случаях следует применить операцию нормирования значений анализируемых показателей.

### МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА

Показатели, входящие в соотношения (1) и (2), являются нечеткими величинами. В соответствии с правилами нечеткой логики будем задавать нечеткое множество  $\tilde{A}$  посредством функции принадлежности (ФП)  $\mu_{\tilde{A}}(X)$  [2]. Предположим, что используемые в расчетах нечеткие величины имеют функции принадлежности трапециевидной формы [2]. В этом случае ФП  $\mu_{\tilde{A}}(X)$  описывается соотношениями:

$$\mu_{\tilde{A}}(X) = \begin{cases} 0, & x < a_1; \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x < a_2; \\ 1, & a_2 \leq x < a_3; \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x < a_4; \\ 0, & x > a_4. \end{cases} \quad (3)$$

Для каждого нечеткого числа  $\tilde{A}$  будем использовать следующую форму записи:  $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ , где  $a_1 - a_4$  являются характерными точками функции принадлежности вида (3).

### МОДЕЛИ НЕЧЕТКИХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗАКЛЮЧЕНИЙ О ПРОЕКТЕ

Будем рассматривать две группы заключений экспертов о характеристиках проекта. К первой группе относятся заключения, которые могут быть выражены количественно. Для показателей, которые описываются этими выводами, будем непосредственно применять модели вида (3).

Во вторую группу включим экспертные заключения, формулируемые в терминах естественного языка. Для показателей, которые формируются для этой группы, будем исполь-

зовать описания в виде лингвистических переменных, имеющих соответствующие термы [4]. Каждому из термов соответствует нечеткое число, которое и будет включено в выражение (2).

Пусть анализируются только две характеристики проекта: экономическая эффективность и результативность целевого применения здания на интервале  $T$  лет. Будем рассматривать показателем первой из указанных характеристик нечеткий чистый дисконтированный доход (ЧДД)  $\underline{Q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)$  [1]. Для расчета  $\underline{Q}$  необходимо использовать значения интегральных эффектов (ИЭ)  $\underline{C}_t = (c_{t1}, c_{t2}, c_{t3}, c_{t4})$  на каждом шаге расчета  $t$  ( $t = 0(1)T$ ). Этот показатель вычисляется как разность между сальдо потока и капитальными вложениями на этом шаге [1]. Установим также, что ставка дисконтирования проекта задается как нечеткое число  $\underline{E} = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ .

Заключение по результативности целевого применения будем оценивать с помощью лингвистической переменной «оценка», выраженной через термы «удовлетворительно», «хорошо», «очень хорошо», «отлично». Каждому  $j$ -му из указанных термов ЛП сопоставим нечеткое число  $\underline{\Theta}_j = (\theta_{j1}, \theta_{j2}, \theta_{j3}, \theta_{j4})$ .

### МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО РАНЖИРОВАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗАКЛЮЧЕНИЙ О ПРОЕКТЕ

Для принятия решения о выборе варианта проекта здания необходимо упорядочить полученные по формуле (2)  $L$  нечетких переменных  $\underline{P}_l$  по их рейтингу. Очевидно, что предпочтительным является вариант проекта, имеющий наивысший рейтинг. Для ранжирования вариантов будем использовать методы Чанга и Чью-Парка [5]. При применении первого метода модель  $h(\underline{A})$  уровня рейтинга нечеткого числа  $\underline{A}$  определяется по формуле

$$h(A) = \frac{a_3^2 + a_3 \cdot a_4 + a_4^2 - a_1^2 - a_1 \cdot a_2 - a_2^2}{6}. \quad (4)$$

Для принятия решения необходимо упорядочить полученные значения  $h(\underline{A})$  по возрастанию.

При применении второго из указанных методов модель  $z(\underline{A})$  уровня рейтинга нечеткого числа  $\underline{A}$  определяется по формуле

$$z(A) = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} + w \cdot \frac{a_2 + a_3}{2}, \quad (5)$$

где  $w$  – предварительно задаваемый параметр.

Для принятия решения необходимо упорядочить полученные значения  $z(\underline{A})$  по возрастанию.

### РАСЧЕТНЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим применение описанной модели для обоснования выбора варианта проекта. Для расчетов будем использовать исходные данные, описанные ранее для экономической эффективности и результативности целевого применения здания на интервале  $T$  лет. Пусть  $T = 4$  года. Вид функций принадлежности термов ЛП «оценка» представлен на рис. 1.

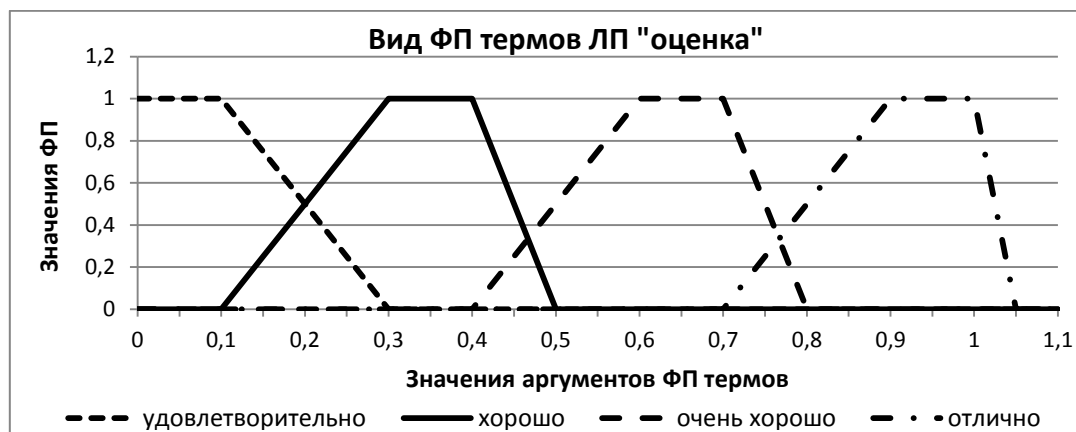


Рис. 1. Функции принадлежности термов ЛП «оценка»

В первом варианте проекта для ЛП «оценка» выбран терм «удовлетворительно», а во втором варианте – терм «очень хорошо». Нечеткие интегральные эффекты  $\tilde{C}_{1r}$  и  $\tilde{C}_{2r}$  по шагам проекта для двух вариантов представлены в табл. 1.

Нечеткие ставки дисконтирования  $\tilde{E}_1$  и  $\tilde{E}_2$  для двух вариантов проекта представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Параметры нечетких интегральных эффектов по шагам проекта**

Номер шага	Первый вариант				Второй вариант			
	$C_{1r1}$	$C_{1r2}$	$C_{1r3}$	$C_{1r4}$	$C_{2r1}$	$C_{2r2}$	$C_{2r3}$	$C_{2r4}$
0	-1200	-1000	-900	-800	-1400	-900	-700	-600
1	-700	-500	-450	-300	-500	-400	-350	-200
2	150	180,00	220,00	250,00	100	120	200	230
3	1800	1900	2100	2200	1200	1600	1900	2000
4	2700	3000	3000	3400	2300	2800	3000	3200

Таблица 2

**Параметры нечетких ставок дисконтирования проекта**

Номер варианта	Значения составляющих нечеткого числа			
	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
Вариант 1	0,10	0,20	0,20	0,30
Вариант 2	0,25	0,30	0,35	0,40

Расчеты выполнены для разных соотношений коэффициентов важности анализируемых видов результативности. В первом случае предпочтение отдается экономической эффективности, а во втором – результативности целевого применения специального объекта. Результаты расчетов для указанных случаев представлены на рис. 2 и 3. Результаты расчета рейтингов приведены в табл. 3.

Таким образом, в первом случае предпочтительным является первый вариант проекта, а во втором – второй вариант проекта.

Расчеты выполнены в среде MS Excel.

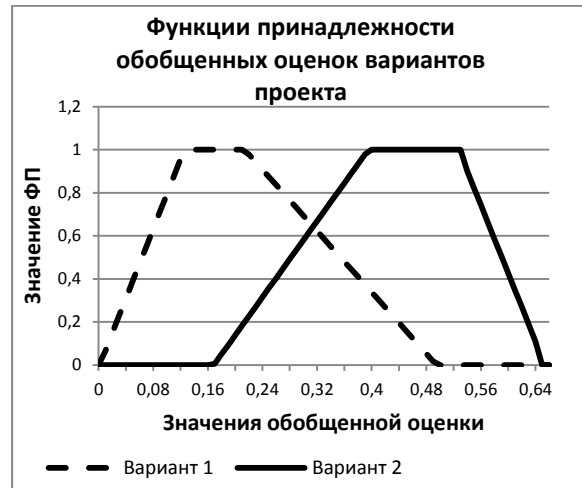
Рис. 2. Результаты при  $\alpha_1=0,9$ ;  $\alpha_2=0,1$ Рис. 3. Результаты при  $\alpha_1=0,4$ ;  $\alpha_2=0,6$ 

Таблица 3

Значения чисел Чанга и Чью-Парка для различных предпочтений

Уровни предпочтений	Числа Чанга		Числа Чью-Парка	
$\alpha_1 = 0,9$ ; $\alpha_2 = 0,1$ ; $w = 3$	0,856	0,449	2,262	2,154
$\alpha_1 = 0,4$ ; $\alpha_2 = 0,6$ ; $w = 3$	0,381	0,799	1,227	4,513

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что использование нечетких показателей характеристик проекта строительства и последующей эксплуатации здания дают возможность использовать опыт и знания экспертов при неопределенности условий реализации проекта. Практическая значимость данной работы состоит в том, что представленные в ней модели и расчетные соотношения могут быть применены при обосновании варианта проекта возведения здания с учетом различных сочетаний значений характеристик его результативности при недостатке статистических данных о предстоящей эксплуатации.

## Список используемых источников

1. Экономика отрасли: учеб. пособие / П.А. Козин, А.В. Леонтьев, Д.С. Старчуков и др.; под общ. ред. П.А. Козина. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 268 с.
2. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, Гл. ред. физико-мат. лит., 1986. – 312 с.
3. Квалиметрическая экспертиза строительных объектов / под ред. В.М. Маругина и Г.Г. Азгальдова. – СПб.: Политехника, 2008. – 527 с.
4. Chui Y.C., Chan, S.P. Fuzzy cash flow analysis using present worth criterion // Engineering Economist. – 1994. – №39. – P. 113–138.
5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 167 с.



В.С. Солдатенко,  
кандидат техн. наук, доцент;

Е.А. Тюрин,  
кандидат техн. наук

## **МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЯ**

Описывается разработка модели принятия решения на восстановление эксплуатационной пригодности по результатам обследования здания. Предложено использовать в качестве решающего правила критерий информационной ценности признаков параметров технического состояния здания. Необходимые преобразования осуществлены с учетом выводов теории информации и теоремы Байеса. Полученные результаты поясняются расчетным примером.

Ключевые слова: обследование здания, информационная ценность параметра, техническое состояние.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Проблема формирования совокупности эксплуатационных действий на восстановление эксплуатационной пригодности по результатам текущего обследования элементов здания является актуальной. Она решается различными способами [1]. Однако в ряде случаев недостаток имеющихся исходных данных затрудняет получение достаточно адекватных вероятностных моделей, описывающих параметры, которые в наибольшей мере характеризуют фактическое техническое состояние элемента обследуемого здания. Для снижения уровня неопределенности могут быть применены отдельные положения теории информации [2, 3].

В настоящей работе предложено формировать необходимые эксплуатационные воздействия на элементы здания по результатам его текущего обследования на основании сравнительного анализа информационной ценности контролируемых параметров элементов строительных конструкций [4]. При этом дополнительная информация для формирования указанных показателей может быть получена по результатам ранее проведенных обследований при эксплуатации однотипных зданий.

### **МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЦЕННОСТИ ПАРАМЕТРА ЭЛЕМЕНТА ЗДАНИЯ**

Пусть для описания технического состояния элемента конструкции здания используются  $K$  характеристик (параметров). Установим для удобства изложения материала, что уровень каждой характеристики оценивается только одним показателем. Будем полагать, что установленные при обследовании признаки указанных показателей характеризуют категорию работоспособности элемента здания в соответствии с СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений». Эти категории позволяют определить необходимые мероприятия на восстановление эксплуатационной пригодности для поддержания работоспособности здания. Однако из-за неравномерности износа конструкций однотипных зданий при эксплуатации в силу действия различных факторов априорные сведения могут не в полной мере соответствовать фактическому техническому состоянию элементов здания. Поэтому целесообразно использовать дополнительную информацию,

которую можно собрать за время эксплуатации однотипных объектов. Рассмотрим указанный подход.

Пусть обследованию подлежат элементы конструкции здания. Каждый элемент  $S$  конструкции здания может находиться в одном из возможных технических состояний (категорий работоспособности)  $D_i$  ( $i=1(1)N$ ). Каждому из состояний, в свою очередь, соответствуют определенные эксплуатационные мероприятия. Распознавание технических состояний  $D_i$  ( $i=1(1)N$ ) элемента  $S$  здания осуществляется путем наблюдения за связанной с ними совокупностью параметров. Значения (или признаки) этих параметров рассматриваются как признаки соответствующих состояний (далее – признаки) элементов конструкции. В общем случае для рассматриваемого элемента  $S$  конструкции здания необходимо исследовать некоторое множество характеристик (параметров). Для упрощения изложения материала предположим, что исследуемые параметры являются независимыми друг от друга. Это позволяет рассматривать описываемый подход для каждого параметра исследуемого объекта по отдельности.

Обозначим анализируемый параметр элемента конструкции через  $X$ . В общем случае для параметра  $X$  можно задать  $M$  признаков  $x_j$  ( $j=1(1)M$ ). Например, для такой важной характеристики состояния несущей конструкции, как трещина, различают несколько ее признаков по ширине раскрытия [5]: волосная, мелкая, развитая, большая, крупная.

Если в результате обследования элемента  $S$  выявлено, что параметр  $X$  имеет для данного объекта признак  $x_j$  ( $j=1(1)M$ ), то этот признак будем называть реализацией  $x^*$  параметра  $X$ . Таким образом, в данном случае  $x^* = x_j$  ( $j=1(1)M$ ). Установлено, что говорить об однозначном соответствии полученной реализации  $x^*$  конкретному техническому состоянию элемента  $S$  можно только в вероятностном смысле [4]. Поэтому для повышения уровня обоснованности принятия решения на восстановление эксплуатационной пригодности здания необходимо использовать дополнительную информацию. Такой информацией могут служить сведения, накопленные за период эксплуатации однотипных объектов.

Будем исходить из того, что в первую очередь следует проводить обследования по признакам, которые дают специалисту наиболее полные сведения о фактическом состоянии элемента здания. Для решения указанной задачи может быть использован показатель  $Z_{D_i}(x_j)$ , который в теории информации имеет название «ценность информации» [5]. Этот показатель характеризует информацию о состоянии  $D_i$ , которой обладает признак  $x_j$  параметра  $X$ . Расчетное соотношение для  $Z_{D_i}(x_j)$  имеет следующий вид [6]:

$$Z_{D_i}(x^*) = Z_{D_i}(x_j) = \log_2 \frac{P(D_i/x_j)}{P(D_i)}, \quad i=1(1)N, \quad j=1(1)M, \quad (1)$$

где  $P(D_i/x_j)$  – вероятность состояния  $D_i$  при условии, что при обследовании для параметра  $X$  установлен признак  $x_j$ ;

$P(D_i)$  – априорная (определенная по результатам эксплуатации) вероятность состояния  $D_i$  элемента конструкции объекта.

Если вероятность состояния  $D_i$  после того, как стало известно, что параметр  $X$  имеет признак  $x_j$ , увеличилась ( $P(D_i/x_j) > P(D_i)$ ), то  $Z_{D_i}(x^*) > 0$ . Это означает, что информационный вес данного признака для параметра рассматриваемого состояния элемента  $S$  здания положителен. Если значение  $x_j$  параметра  $X$  не изменяет вероятность технического состояния элемента конструкции здания, то  $Z_{D_i}(x_j) = 0$ , поскольку  $P(D_i/x_j) = P(D_i)$  в соответствии с формулой (1).

Выражение для диагностического веса признака  $x_j$  параметра  $X$  для состояния  $D_i$  может быть записано в виде, более удобном для практических расчетов:

$$Z_{D_i}(x_j) = \log_2 \frac{P(x_j / D_i)}{P(x_j)}, \quad i = 1(1)N, \quad j = 1(1)M, \quad (2)$$

где  $P(x_j / D_i)$  – вероятность появления признака  $x_j$  параметра  $X$  для всего используемого множества элементов  $S$  (одинаковых конструкций однотипных зданий) с состоянием  $D_i$ ;

$P(x_j)$  – вероятность появления признака  $x_j$  ( $j = 1(1)M$ ) у всех элементов типа  $S$  со всеми возможными состояниями  $D_i$  ( $i = 1(1)N$ ).

На основе выводов [6] сформируем правила принятия решения по составу эксплуатационных мероприятий на восстановление эксплуатационной пригодности по результатам текущего обследования элементов конструкции здания.

1. Если показатель  $Z_{D_i}(x_j)$  ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M$ ) имеет положительное значение, то рассматриваемый признак параметра  $X$  пригоден для его использования при определении технического состояния объекта. Поэтому следует запланировать эксплуатационные мероприятия, которые соответствуют выявляемой категории работоспособности конструкции здания.

2. Если показатель  $Z_{D_i}(x_j)$  ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M$ ) имеет нулевое значение, то для рассматриваемого признака параметра  $X$  нельзя сделать вывод о том, в каком состоянии находится анализируемый объект. Поэтому требуется проведение дополнительного контроля.

3. Если показатель  $Z_{D_i}(x_j)$  ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M$ ) имеет отрицательное значение, то рассматриваемый признак параметра  $X$  отрицает возможность соответствующего состояния объекта и не может использоваться для определения эксплуатационного мероприятия в отношении конструкции объекта.

Рассмотрим теперь методику оценивания информационного веса признака  $x_j$  ( $j = 1(1)M$ ) параметра  $X$  по эксплуатационным данным.

## ПОРЯДОК ОЦЕНИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЕСА ПАРАМЕТРА ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ДАННЫМ

Предположим, что собираются эксплуатационные данные о состоянии элементов конструкций  $K$  однотипных зданий. Эти данные используются для формирования необходимых информационных показателей. Для решения указанной задачи потребуется выполнить приведенную ниже последовательность действий.

1. Установить количества  $k_i$  ( $i = 1(1)N$ ) зданий, у которых элементы рассматриваемой конструкции находятся в каждом  $i$ -м техническом состоянии. Каждое из отношений чисел  $k_i$  к числу  $K$  представляет собой оценку априорной вероятности соответствующего технического состояния конструкции  $S$ . Поэтому можно записать:

$$P(D_i) = \frac{k_i}{K}, \quad i = 1(1)N. \quad (3)$$

2. Установить количества  $L_{ji}$  объектов, у которых параметр  $X$  имеет признак  $x_j$   $j = 1(1)M$  при нахождении элемента  $S$  конструкции объекта в  $i$ -м техническом состоянии  $D_i$  ( $i = 1(1)N$ ). Каждое из отношений  $L_{ji}$  к числу  $K$  представляет собой оценку условной вероятности  $P(x_j / D_i)$  наличия признака  $x_j$  ( $j = 1(1)M$ ) параметра  $X$  при условии нахождения элемента конструкции в состоянии  $D_i$  ( $i = 1(1)N$ ). Можно записать:

$$P(x_j / D_i) = \frac{L_{ji}}{K}, \quad i = 1(1)N, \quad j = 1(1)M. \quad (4)$$

3. Получить оценки вероятностей  $P(x_j)$  ( $j = 1(1)M$ ). Эти показатели представляют собой вероятности появления за время эксплуатации признаков  $x_j$  ( $j = 1(1)M$ ) параметра  $X$ . Для получения требуемых соотношений необходимо применить формулу Байеса. Соотношения для вероятностей  $P(x_j)$  ( $j = 1(1)M$ ) имеют следующий вид:

$$P(x_j) = \sum_{i=1}^N P(D_i) \cdot P(x_j / D_i), \quad j = 1(1)M. \quad (5)$$

4. Выполнить расчет оценок показателей  $Z_{D_i}(x_j)$  ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M$ ) в соответствии с соотношением (2).

5. Определить признаки параметра  $X$ , которые имеют ценность при определении каждого из технических состояний конструкции здания.

6. Сформировать совокупность эксплуатационных мероприятий по результатам обследования здания только на основании тех признаков параметров, которые имеют ценность для определения технических состояний анализируемого вида конструкции однотипных зданий.

Проиллюстрируем предложенный в данной работе подход с помощью расчетного примера.

## РАСЧЕТНЫЙ ПРИМЕР

Исследуемые однотипные здания имеют некоторый физический износ, возникающий в ходе их использования после ввода в эксплуатацию.

Для элемента  $S$  конструкции здания рассматриваются только два возможных технических состояния  $D_i$  ( $i = 1, 2$ ):  $D_1$  – работоспособное (не требует ремонта);  $D_2$  – неработоспособное состояние (требуется проведение ремонта).

Техническое состояние элемента  $S$  оценивается по значениям одного параметра  $X$  этого объекта («трещина»). Для указанного параметра  $X$  рассматриваются три вида трещин  $x_j$  ( $j = 1(1)M, M = 3$ ): мелкая, развитая, большая соответственно.

По результатам эксплуатации накоплены данные о соответствии параметра  $X$  («трещина») элемента  $S$  одному из видов трещин  $x_j$  ( $j = 1(1)3$ ) для объектов, находящихся в работоспособном  $D_1$  и неработоспособном  $D_2$  состояниях. Они приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав эксплуатационных данных

Состояние элемента $D_i$	Доля объектов, у которых установлен вид трещины $x_j$ при нахождении элемента $S$ в состоянии $D_i$ ( $i = 1, 2, j = 1(1)3$ )			Доля объектов, у которых элемент $S$ находится в состоянии $D_i$
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	
$D_1$	60%	30%	10%	80%
$D_2$	0%	30%	70%	20%

Необходимо сформировать совокупность эксплуатационных мероприятий на восстановление эксплуатационной пригодности с учетом ценности информационных признаков параметра  $X$  для определения технического состояния элемента  $S$  конструкции.

*Решение задачи.* Сначала проанализируем данные, содержащиеся в табл. 1. В соответствии с материалом подраздела «Порядок оценивания информационного веса параметра элемента конструкции здания по эксплуатационным данным» эти данные можно представить в форме табл. 2.

Таблица 2

**Состав эксплуатационных данных (уточненный)**

Состояние элемента	Вероятности $P(x_j / D_i)$ наличия признака $x_j$ параметра $X$ при условии нахождения элемента $S$ в состоянии $D_i$ ( $i=1, 2, j=1(1)3$ )			Оценка вероятностей $P(D_i)$ , $i=1, 2$
	$s=1$	$s=2$	$s=3$	
$D_1$	0,6	0,3	0,1	0,8
$D_2$	0,0	0,3	0,7	0,2

Расчетные соотношения для вероятностей  $P(x_1)$ ,  $P(x_2)$  и  $P(x_3)$  нетрудно получить с помощью формулы (5). Так, выражение для определения вероятности  $P(x_1)$  имеет следующий вид:

$$P(x_1) = \sum_{i=1}^2 P(D_i) \cdot P(x_1 / D_i) = P(D_1) \cdot P(x_1 / D_1) + P(D_2) \cdot P(x_1 / D_2). \quad (6)$$

Расчетные значения оценок вероятностей  $P(x_1)$ ,  $P(x_2)$  и  $P(x_3)$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Расчетные значения оценок вероятностей  $P(x_j)$** 

Расчетная вероятность		
$P(x_1)$	$P(x_2)$	$P(x_3)$
0,48	0,30	0,22

Теперь следует выполнить расчет оценок  $Z_{D_i}(x_j)$  информационных ценностей видов трещины  $x_j$  ( $j=1(1)3$ ) параметра  $X$  («трещина») элемента  $S$  конструкции здания. Выполним необходимые расчеты по формуле (2). Так, выражение для показателя  $Z_{D_1}(x_1)$  имеет следующий вид:

$$Z_{D_1}(x_1) = \log_2 \frac{P(x_1 / D_1)}{P(x_1)}. \quad (7)$$

Полученные расчетные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Расчетные значения оценок информационных ценностей**

Расчетный показатель					
$Z_{D_1}(x_1)$	$Z_{D_1}(x_2)$	$Z_{D_1}(x_3)$	$Z_{D_2}(x_1)$	$Z_{D_2}(x_2)$	$Z_{D_2}(x_3)$
0,32	0	-1,14	$-\infty$	0	1,67

Сделаем по данным табл. 4 выводы о составе мероприятий применительно к элементу  $S$  конструкции здания.

Если обнаружена трещина вида  $x_1$ , то элемент  $S$  находится в состоянии  $D_1$ , т.е. не требует проведения ремонтных мероприятий. Если обнаружена трещина вида  $x_3$ , то элемент  $S$  находится в состоянии  $D_2$ , т.е. требует проведения ремонтных мероприятий. Вид трещины  $x_2$  говорит о том, что следует провести дополнительное обследование конструкции, сделать однозначный вывод о состоянии элемента  $S$  не представляется возможным. Поскольку показатели  $Z_{D_i}(x_2)$  ( $i=1, 2$ ) имеют отрицательные значения, то вид  $x_2$  трещины параметра  $X$  («трещина») не определяет возможность соответствующего состояния элемента конструкции

$S$  и не может использоваться для принятия решения о воздействии на этот элемент по результатам обследования конструкции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что использование накопленных данных о результатах проведенных обследований конструкций здания при его эксплуатации дают возможность оценить уровень информационной ценности контролируемых при обследованиях параметров указанных объектов.

Практическая значимость данной работы состоит в том, что представленные в ней модели и расчетные соотношения могут быть применены для более полного обоснования решений по составу необходимых действий на восстановление эксплуатационной пригодности по результатам текущего обследования технического состояния элементов конструкции здания.

## Список используемых источников

1. *Болотин В.В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 564 с.
2. *Скоробогатов С.М.* Принцип информационной энтропии в механике разрушения инженерных сооружений и горных пластов. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2000. – 419 с.
3. *Соколов В.А.* Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 6. – С. 48–57.
4. *Мельчаков А.П., Байбурун Д.А., Казакова Е.А.* Конструкционная безопасность строительного объекта: оценка и обеспечение: учеб. пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 136 с.
5. Оценка недвижимости: учеб. пособие / Т.Г. Касьяненко, Г.А. Маховикова, В.Е. Есипов и др. – М.: КНОРУС, 2010. – 752 с
6. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

Д.С. Старчуков,  
кандидат техн. наук;  
Р.Б. Шмаков,  
кандидат техн. наук

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОИНСКИХ ЗДАНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Анализ опыта эксплуатации воинских зданий и специальных сооружений показывает, что многие из них имеют существенные недостатки, которые усложняют использование этих зданий (сооружений) по назначению, ведут к удорожанию их технического обслуживания и ремонту. В частности, несвоевременное проведение ремонтов влияет на повышенную интенсивность физического износа здания и влечет за собой существенные затраты на его устранение.

Известно, что межремонтный период до сих пор определить не удавалось. В публикации приведен теоретический подход к определению долговечности зданий и сооружений, позволяющий теоретически рассчитать периодичность профилактических ремонтов. Предложена формула расчета межремонтного периода, которая позволяет согласовывать периодичность капитальных ремонтов зданий (сооружений) с фактической интенсивностью физического износа, а также их отдельных конструктивных элементов.

Ключевые слова: долговечность, воинские здания, специальные сооружения, система технической эксплуатации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При эксплуатации воинских зданий и специальных сооружений приходится обращать внимание на эффективность мероприятий по их техническому обслуживанию и ремонту. Такое обстоятельство вызвано потребностью снижения эксплуатационных издержек, возникающих при применении существующей системы технической эксплуатации. Кроме снижения издержек, что является обратной научной задачей и для военных объектов имеет второстепенное значение, особенно важно решать прямую задачу. Прямая задача заключается в повышении долговечности воинских зданий и специальных сооружений и позволяет им выполнять целевые функции по предназначению.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что вопросы повышения долговечности воинских зданий и специальных сооружений остаются актуальными и до сих пор изучены не полностью.

### **МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗРУШАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ВОИНСКИЕ ЗДАНИЯ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ**

Анализ опыта эксплуатации воинских зданий и специальных сооружений показывает, что многие из них имеют существенные недостатки, которые усложняют использование этих зданий (сооружений) по назначению, ведут к удорожанию их технического обслуживания и ремонту [1, 2]. В частности, несвоевременное проведение ремонтов влияет на повышенную интенсивность физического износа здания и влечет за собой существенные затраты на его устранение.

Подобное несоответствие фактических эксплуатационных качеств проектным (нормативным) можно объяснить отрывом стадии строительства от стадии эксплуатации зданий и сооружений. На данных этапах жизненного цикла выявляются недостаточная ответственность проектировщиков и строителей за конечный результат, за эксплуатационные качества зданий (сооружений), их стремление любыми средствами выполнить план, не заботясь о качестве,

перекладывая заботы об устранении допущенных ими дефектов на эксплуатационников, а затраты – на государство.

Необходимо также учитывать, что любое здание или сооружение является сложной технической системой. Поэтому при планировании ремонтов необходим научно-методический аппарат, который позволит эффективно решить поставленную задачу.

Рассмотрим модель воздействия разрушающих факторов на воинские здания и специальные сооружения, представленную на рис. 1.

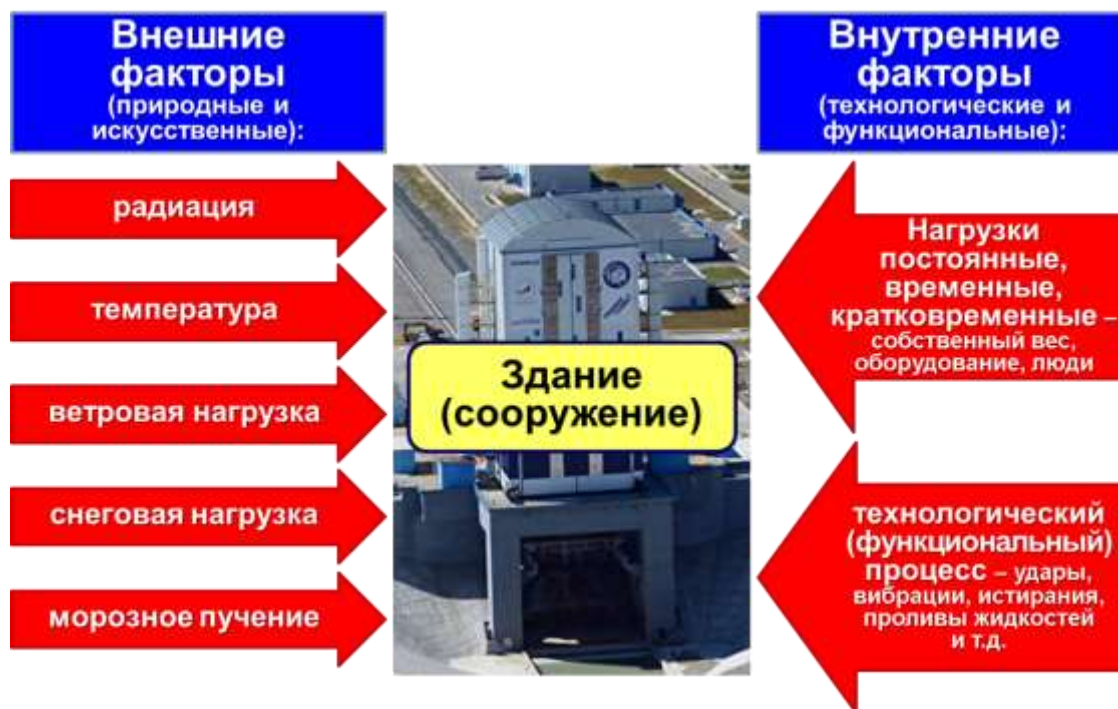


Рис. 1. Модель воздействия разрушающих факторов на воинские здания и специальные сооружения

Представленная модель позволяет получить информацию об объекте исследования – здании или сооружении. Необходимо помнить, что мы здесь рассматриваем только этап эксплуатации. Если говорить обо всем жизненном цикле здания (сооружения), то причины возникновения повреждений могут быть следующими:

- 1) ошибки и просчеты при проведении инженерных изысканий и проектировании;
- 2) использование некачественных строительных материалов и изделий;
- 3) нарушение правил производства строительно-монтажных и ремонтных работ;
- 4) воздействие природных факторов;
- 5) воздействие технологических факторов и факторов жизнедеятельности человека;
- 6) нарушение правил эксплуатации зданий и сооружений:

– несвоевременный доклад эксплуатационного персонала обо всех обнаруженных повреждениях,

– несвоевременное принятие мер по их ликвидации,

– изменение технологических условий эксплуатации и производства;

- 7) естественное старение (физический износ).

Так как воинское здание и специальное сооружение являются сложной технической системой, то необходимо выделять наиболее уязвимые места различных конструктивных элементов. Такими местами являются:

– места сопряжения разных материалов (граница раздела сред);



- места сопряжения плоскостей (примыкания);
- места опирания конструкций;
- места ввода коммуникаций в здание, сооружение;
- места воздействия агрессивных сред на конструкции;
- места воздействия высоких и низких температур;
- стыки конструкций;
- места резкого уменьшения поперечного сечения конструкций;
- места разнообразных дефектов и концентраций напряжений (сварка).

Таким образом, обеспечение требуемых эксплуатационных качеств конкретного здания (сооружения) связано с выявлением и взаимным согласованием трех групп данных:

- 1) воздействующих факторов;
- 2) эксплуатационных требований;
- 3) состава конструктивных элементов.

На основании этих данных исследователь строит структурную схему здания (сооружения), в которой обозначены воздействующие на него факторы и необходимые конструктивные элементы, которые обеспечат поддержание его эксплуатационных качеств на требуемом уровне. В общем виде пример такой схемы представлен на рис. 1, но необходимо отметить, что это только общий вид, для конкретного здания или сооружения факторы, воздействующие на него, должны быть тщательно изучены и уточнены. Только в этом случае можно решить поставленную научную задачу по повышению долговечности за счет учета фактической интенсивности физического износа.

Для точного описания объекта исследования воспользуемся методами регрессионного анализа.

Продолжая далее рассматривать зависимость физического износа от различных факторов, можно также выделить, что он зависит и от габаритных размеров самого здания (сооружения), конструкций и материалов, из которых оно построено, а также технологий, которые применялись при этом [3–10]. Кроме того, на него влияют конкретные внешние факторы, представленные на рис. 1, которые нельзя не учитывать, так как они также напрямую влияют на долговечность здания или сооружения.

Схема построения математической модели описания процессов физического износа зданий и сооружений представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема построения математической модели описания процессов развития физического износа зданий и сооружений

Далее были определены факторы эксплуатационного качества здания или сооружения:

количество этажей, шт. ....	$x_1$
высота здания, м .....	$x_2$
площадь проемов в здании, $m^2$ .....	$x_3$
площадь кровли, $m^2$ .....	$x_4$
длина кровельных парапетов, м .....	$x_5$
толщина стен, м .....	$x_6$
ширина фундамента, м .....	$x_7$
глубина заложения фундамента, м .....	$x_8$
длина здания, м .....	$x_9$

ширина здания, м .....	$x_{10}$
площадь боковой поверхности фундамента, $m^2$ .....	$x_{11}$
период эксплуатации, год .....	$x_{12}$
площадь фасада здания, $m^2$ .....	$x_{13}$

Таблица 1

**Анализ значимых факторов, влияющих на физический износ  
зданий и сооружений, по видам конструкций**

№ п/п	Наименование основных конструкций здания (сооружения)	Значимые факторы	Мультиколлинеарные факторы
1	Конструкции фундаментов	$x_2; x_7; x_8; x_9; x_{10}; x_{11}; x_{12}$	—
2	Ограждающие стены	$x_2; x_3; x_6; x_8; x_9; x_{12}; x_{13}$	—
3	Кровли	$x_1; x_4; x_5; x_9; x_{12}$	—

Таблица 2

**Пример уравнений множественной регрессии зависимости физического износа  
зданий и сооружений от различных эксплуатационных факторов**

Наименование конструкций	Корреляционно-регрессионные уравнения	$R^2$	Уровень достоверности
Наружные каменные стены	$\Phi = (-1,9168x_2 + 0,0279x_3 - 40,8751x_6 - 19,3122x_8 - 0,1451x_9 - 0,1774x_{12} - 0,0120x_{13}) \times (-0,0006)$	0,74	Level of confidence: 95,0%
Железобетонные стены фундаментов и подвалов	$\Phi = 0,1404 x_2 - 16,9649 x_7 + 7,4553 x_8 + 0,2323 x_9 + 0,0596 x_{10} - 0,0293x_{11} - 0,0504x_{12} + 1,3396$	0,72	Level of confidence: 95,0%
Конструкции рулонных кровель	$\Phi = -0,000416x_{12} - (-0,002324x_1 + 0,000013x_4 + 0,000219x_5 - 0,000284x_9) + 0,039397$	0,68	Level of confidence: 92,0%
Конструкции кровель из штучных материалов	$\Phi = -0,001126x_{12} - (-0,001322x_1 + 0,000023x_4 + 0,001111x_5 - 0,000284x_9) + 0,055$	0,75	Level of confidence: 92,0%

Таким образом, можно точно описывать воздействие реальных разрушающих факторов на конкретные воинские здания и специальные сооружения (табл. 1 и 2).

Далее рассмотрим, каким образом можно повысить их долговечность.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОИНСКИХ ЗДАНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Воинские здания и специальные сооружения имеют группы капитальности, самая высокая из них – первая группа. Для воинских зданий по долговечности существуют 6 групп капитальности, а для специальных сооружений – 8 групп. Капитальность здания (сооружения) в целом зависит от конструктивных элементов, из которых оно состоит.

За основу долговечности здания принимают срок службы его несменяемых элементов, классификация которых по признаку долговечности представлена на рис. 3.

Вследствие воздействия на воинское здание (специальное сооружение) различных факторов его физический износ может развиваться по-разному, то есть с различной скоростью.



Рис. 3. Классификация элементов здания (сооружения) по долговечности

На рис. 4 приведены теоретические зависимости снижения физического износа здания (сооружения) за счет проведения профилактических ремонтов.



Рис. 4. Теоретические зависимости снижения физического износа

Фактическая интенсивность физического износа на  $i$ -м отрезке времени будет определяться выражением:

$$j_{(i)} = \frac{q_{(i)}}{t_{р(i)}} \quad (1)$$

В общем виде предельно допустимый износ можно представить следующим образом:

$$q_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^k j_{(i)} \cdot t_{\text{p}(i)}, \quad (2)$$

где  $j_{(i)}$  – скорость износа на расчетном промежутке времени, %/год;  
 $t_{\text{p}(i)}$  – межремонтный период, годы или месяцы.

Средняя фактическая интенсивность физического износа на отрезке времени до наступления его предельно допустимого значения  $q_{\text{пр}}$  будет определяться уравнением

$$J_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{q_{(i)}}{t_{\text{p}(i)}}}{k}. \quad (3)$$

Фактический межремонтный период  $T_{\text{р}}$  тогда можно определить следующим образом:

$$T_{\text{р}} = \frac{q_{\text{пр}}}{J_{\text{ср}}} \quad \text{или} \quad T_{\text{р}} = \frac{q_{\text{пр}} \cdot k}{\sum_{i=1}^k \frac{q_{(i)}}{t_{\text{p}(i)}}}. \quad (4)$$

Как известно [1], значение предельно допустимого физического износа равно 20%. Далее подставляем его в формулу (4):

$$T_{\text{р}} = \frac{20 \cdot k}{\sum_{i=1}^k \left( \frac{q_{(i)}}{t_{\text{p}(i)}} \right)}. \quad (5)$$

Формула (5) учитывает фактическое накопление реального физического износа и тем самым дает возможность повысить долговечность воинских зданий и специальных сооружений за счет ее применения при планировании профилактических ремонтов. С помощью данной зависимости появляется возможность прогнозировать развитие физического износа конкретного здания или сооружения в реальных климатических условиях. На рис. 5 представлены кривые накопления физического износа за счет применения эффективной системы технической эксплуатации, учитывающей фактический межремонтный период.

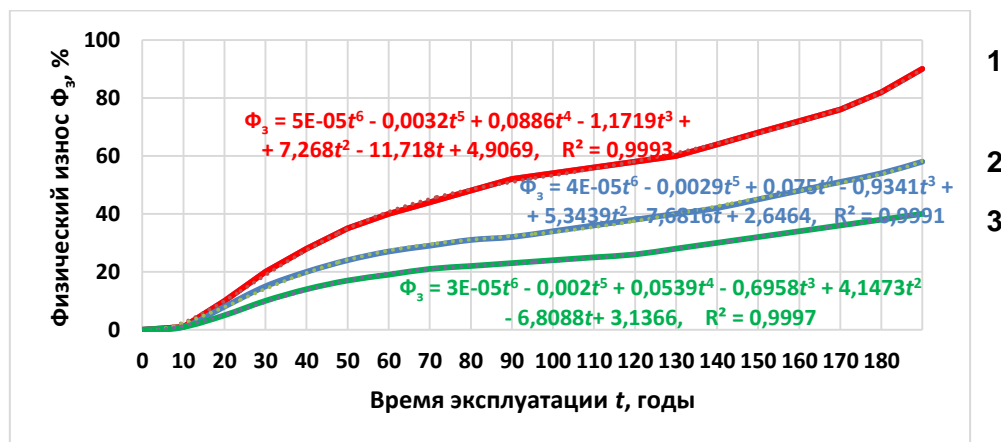


Рис. 5. Пример зависимости физического износа здания (сооружения) от времени: 1 – функция нормативного износа; 2 – функция фактического износа; 3 – функция износа за счет применения эффективной системы технической эксплуатации, учитывающей межремонтный период

Очевидно, что распределение положений кривых 1, 2 и 3 зависит от фактической интенсивности физического износа конкретного здания (сооружения). Например, может оказаться, что кривая 2 будет располагаться выше кривой 1, что на практике часто встречается, когда ремонты проводятся несвоевременно или не в полном объеме. Часто встречающимися причинами этого могут быть: отсутствие финансирования, несвоевременное выявление дефектов и повреждений, некачественное выполнение ремонтных работ из-за низкой квалификации сотрудников, что особенно характерно для военных объектов.

Кривая 3 описывает накопление физического износа с учетом своевременного проведения ремонтов за счет учета фактически необходимого межремонтного периода, рассчитанного по предложенной зависимости.

Даже сам опыт эксплуатации военных объектов показывает [2], что в случае своевременного проведения профилактических ремонтов технический срок службы многих конструктивных элементов и зданий (сооружений) в целом обычно больше нормативного. В случае же точного расчета межремонтного периода долговечность здания (сооружения) еще повышается.

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы.

До сих пор не удавалось рассчитать фактически необходимый межремонтный период, поэтому рекомендовалось руководствоваться положениями [11], в которых приведены усредненные сроки периодичности ремонтов конструкций для перспективного планирования, а необходимость конкретного ремонта каждый раз следовало уточнять с использованием диагностических методов, в частности, для определения границ ремонта конструкций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изложен теоретический подход к определению долговечности воинских зданий и специальных сооружений, учитывающий фактическую интенсивность физического износа отдельных конструктивных элементов в реальных условиях эксплуатации.

2. Выявлено, что межремонтный период важно согласовывать с фактическим состоянием воинских зданий и специальных сооружений. Предложена формула расчета межремонтного периода, позволяющая своевременно устранять физический износ благодаря проведению текущих и капитальных ремонтов, позволившая прогнозировать его развитие.

## Список используемых источников

1. Старчуков Д.С., Козин П.А., Леонтьев А.А. Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 271 с.

2. Особенности технической эксплуатации специальных сооружений объектов ракетно-космических комплексов / Д.С. Старчуков, В.В. Кожин, П.Н. Салов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2012. – Вып. 636. – С. 30–38.

3. Повышение качества бетона в монолитной обойме / А.М. Сычева, Л.Б. Сватовская, Д.С. Старчуков и др. // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 4(80). – С. 3–14.

4. Повышение долговечности тяжелого бетона за счет золированного антикоррозионного барьера / Д.С. Старчуков, А.М. Сычева, Л.Б. Сватовская и др. // Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 7. – С. 58–61.

5. Повышение уровня свойств бетона методом модифицирования поверхности / Д.С. Старчуков, Л.Б. Сватовская, П.А. Козин и др. // Транспортное строительство. – 2016. – № 7. – С. 30–32.

6. Оценка повышения несущей способности железобетонного покрытия посредством неорганической минеральной обоймы / Ш.Ш. Исхаков, А.М. Сычева, Д.С. Старчуков и др. // Транспортное строительство. – 2018. – № 5. – С. 4–7.

7. *Старчуков Д.С.* Метод модифицирования поверхностного слоя бетона кремнеземом в процессе твердения // Транспортное строительство. – 2016. – № 12. – С. 22–24.

8. *Старчуков Д.С.* Математические модели модифицирования кремнеземом поверхностного слоя бетона в процессе твердения // Транспортное строительство. – 2016. – № 10. – С. 20–21.

9. *Старчуков Д.С., Сватовская Л.Б., Шмаков Р.Б.* Комплексная оптимизация технологических показателей при поверхностном модифицировании высокопрочного бетона зольсодержащими составами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 211–217.

10. *Старчуков Д.С.* Математические модели описания физико-химических процессов поверхностного и объемного модифицирования высокопрочных бетонов зольсодержащими растворами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 218–224.

11. ВСН 58-88(р) Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий объектов коммунального и социально-культурного назначения: нормы проектирования. – М.: Госстрой России, 2004. – 74 с.

Д.Р. Абсалямов,  
*доктор техн. наук, доцент;*  
С.А. Поляков;  
А.В. Трудов,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДЛЕНИЯ НАЗНАЧЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛИЗОВАННОГО ОПИСАНИЯ ОТКАЗОВ И ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПРИЗНАКОВ**

Предлагается подход к продлению назначенных показателей ресурса систем инженерного обеспечения радиолокационных станций (РЛС), основанный на результатах проактивного анализа их технического состояния. Методика анализа технического состояния систем инженерного обеспечения РЛС при этом включает формализованное описание отказов, в котором обучающая процедура совмещена с процедурой выбора минимального множества контролируемых признаков. Решение задачи выбора минимального множества контролируемых признаков производится на основе свойств ортогональных векторных систем.

Ключевые слова: процедура обучения, отказ, контролируемый признак, обучающая выборка, рекуррентное соотношение, ортонормированный базис.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Наряду с высокими требованиями к функционированию космического сегмента систем противоракетного нападения (СПРН) возрастает роль и радиолокационных станций (РЛС) наземного эшелона СПРН по своевременному и достоверному обнаружению запуска ракет вероятного противника. С возросшими требованиями к оперативности и достоверности выдаваемой информации РЛС наземного эшелона СПРН возрастают и требования к поддержанию потенциала РЛС СПРН на высоком уровне. Например, требования к технологическому потенциалу станций высокой заводской готовности (ВЗГ) типа «Воронеж» составляют 90%.

Штатное функционирование наземных РЛС невозможно без систем инженерного обеспечения (СИО), предназначенных для снабжения технологического оборудования РЛС СПРН энергоресурсами, потоками энергоносителей и рабочих сред, а также для создания необходимых условий жизнедеятельности личного состава дежурных смен и технологического оборудования РЛС [1].

Сроки эксплуатации систем инженерного обеспечения совпадают со сроками эксплуатации самих РЛС СПРН и зачастую находятся близко к границам назначенного ресурса или за его пределами. При этом наблюдается тенденция к росту числа отказов, а следовательно, и затрат на восстановление элементной базы СИО, что приводит к отказам технологического оборудования РЛС и как следствие этого к снижению технологического потенциала станции.

Имеющиеся данные по отказам за время эксплуатации ВЗГ РЛС (9 лет для объекта 77Я6 «Лехтуси» и 4 года для объекта 77Я6 «Армавир») уже позволяют составить прогнозную картину для определения технического состояния элементной базы СИО и своевременного проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР). Разработанные на их основе методики ТОиР по фактическому состоянию являются важными при рассмотрении вопросов дальнейшего продления назначенного ресурса.

Количество отказов и затрат на восстановление СИО станций РЛС, находящихся в области, близкой к окончанию назначенного ресурса (на примере объекта 77Я6 «Лехтуси»), показаны на примере систем вентиляции и кондиционирования воздуха (СВиКВ) на рис. 1 и 2. Динамика количества отказов и затрат на восстановление и динамика снижения технологического потенциала как следствие отказов СИО представлены на рис. 3 и 4 на примере станции 77Я6 «Армавир».

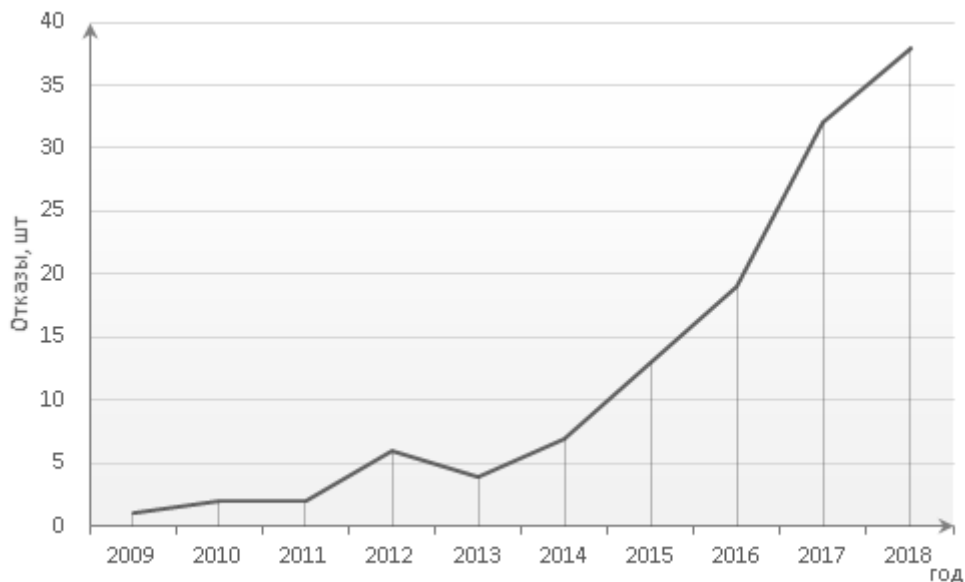


Рис. 1. Количество отказов СВиКВ объекта 77Я6 «Лехтуси»

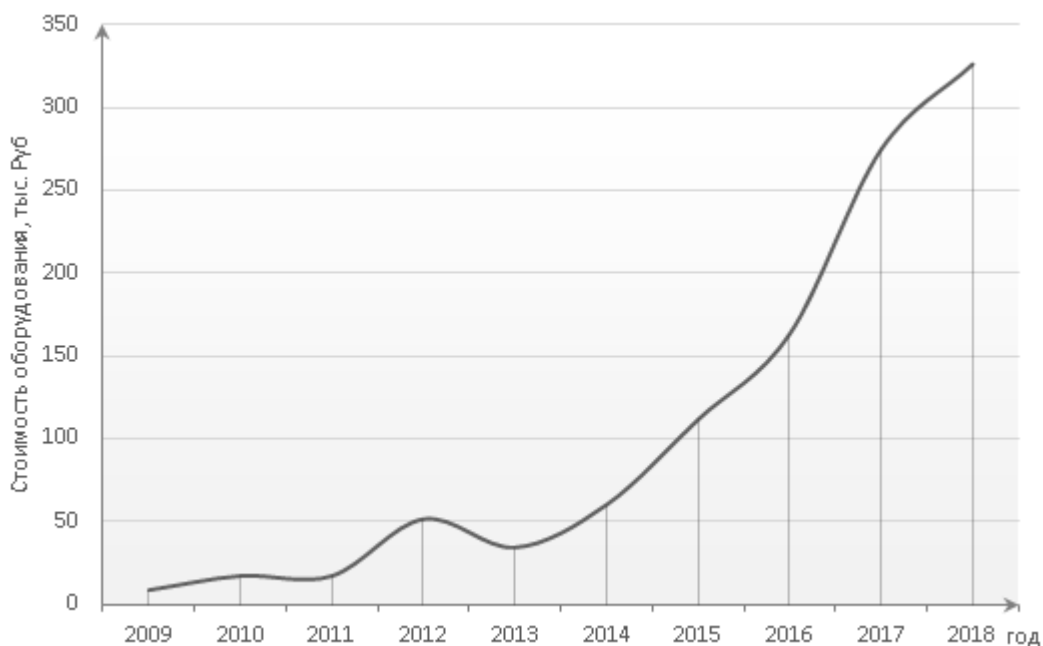


Рис. 2. Затраты на восстановление СВиКВ объекта 77Я6 «Лехтуси»

Стратегия ТОиР при эксплуатации РЛС ВЗГ заключается в оперативном обнаружении и замене отказавшего оборудования (блока) типового элемента замены (ТЭЗ). К недостаткам данной стратегии относятся:

– слабая проработка вопросов анализа технического состояния СИО и технологического оборудования РЛС ВЗГ;



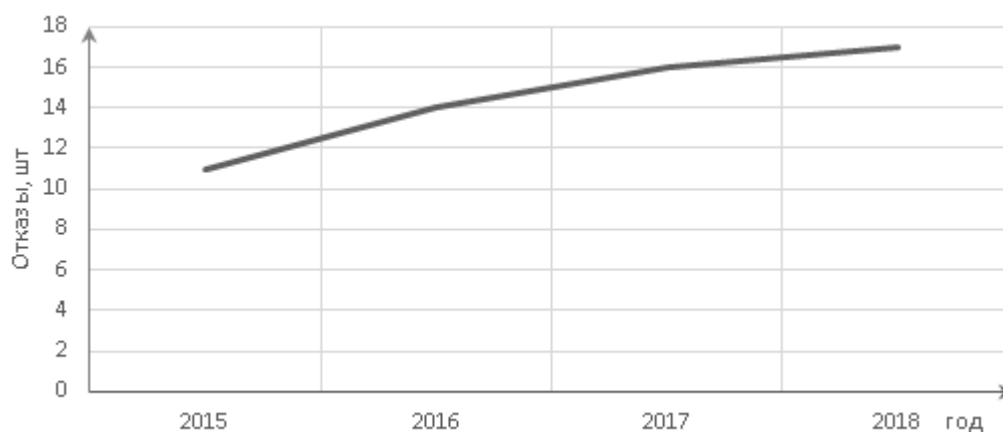


Рис. 3. Количество отказов из-за системы ВА 1УМН6 на объекте 77ЯБ «Армавир»

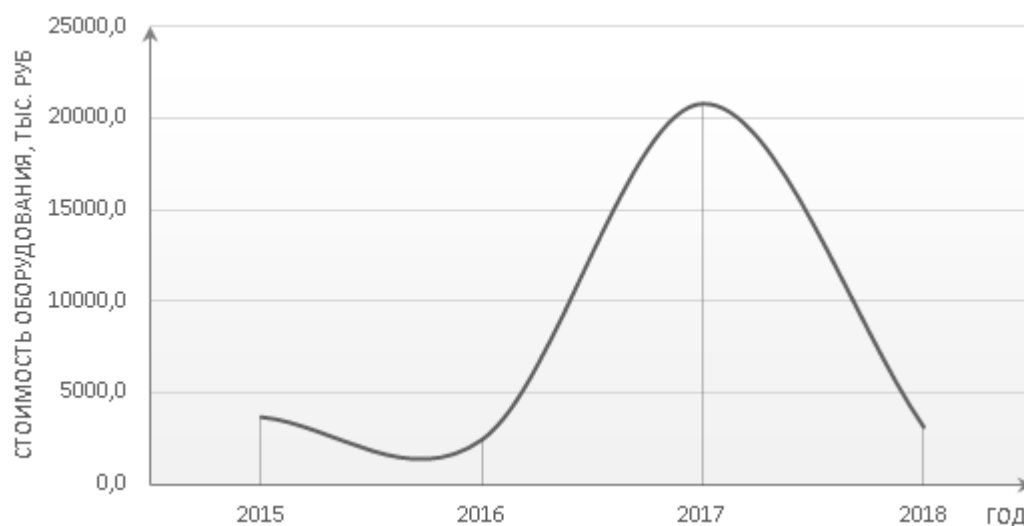


Рис. 4. Затраты на восстановление системы СВКВ на объекте 77ЯБ «Армавир»

- необходимость разработки новой стратегии восполнения запасов ТЭЗ в условиях импортозамещения и нового хозяйственного механизма;
- увеличение числа подсистем РЛС с выработанными гарантийными сроками и техническими ресурсами, в том числе в составе вновь принимаемых в эксплуатацию комплексов и систем;
- неоправданная дороговизна ТЭЗ.

Указанные недостатки приобретают критичный характер за пределами назначенных показателей ресурса, поскольку анализ графиков, представленных на рис. 1–4, свидетельствует о увеличении интенсивности отказов к указанным срокам эксплуатации, и отказы порой носят лавинообразный характер (рис. 1).

Для технико-экономического обоснования сроков и объема работ по продлению назначенных показателей ресурса (НПР) систем инженерного обеспечения РЛС СПРН требуется разработка соответствующей методики оценивания показателей остаточного ресурса и продление НПР на ее основе.

## ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ПРОДЛЕНИЯ НАЗНАЧЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА

Опыт продления ресурса сложных технических систем свидетельствует о том, что существует два возможных способа оценивания показателей остаточного ресурса. В работах [5, 12] говорится: «Первый способ применяется в отношении объектов, для которых продление НПР осуществляется без проверки на работоспособность. В данном случае оценивание остаточного ресурса объекта проводится по истечении некоторого интервала наработки  $\tau$  ( $\tau > 0$ ) после последнего полного контроля работоспособности объекта, в частном случае – после начала эксплуатации.

Второй способ применяется в отношении объектов, для которых продление НПР осуществляется после полной проверки работоспособности с обработкой всех доступных к данному моменту исходных данных о надежности элементов объекта. Данная ситуация имеет место при оценивании остаточного ресурса объектов непосредственно после окончания обследования их фактического технического состояния (ТС) и проверки на функционирование, когда работоспособность всех составных частей (СЧ) достоверно установлена».

Эффективность применения любого из представленных способов значительно возрастает, если продлению НПР будет предшествовать работа по диагностированию технического состояния объекта исследования [2, 3, 4], которая позволит предупредить переход оборудования СИО РЛС в состояние отказа или состояние, при котором затраты на обеспечение его функционирования значительно увеличатся. Справиться с этой задачей можно за счет применения проактивных методов управления техническим состоянием оборудования, которые позволят предотвратить его переход в названные состояния [4, 7, 10].

Для организации такого управления необходимо создание системы мониторинга технического состояния СИО, которая должна обеспечить непрерывный контроль минимального множества параметров, обеспечивающих наблюдаемость оборудования СИО и возможность прогнозирования их изменения. Для этого предлагается методика выбора минимального множества контролируемых показателей, обеспечивающих наблюдаемость состояния, и технико-экономическая модель СИО, на основании которых можно прогнозировать неблагоприятное изменение контролируемых параметров и определять величину управляющих воздействий с целью продления НПР [5, 6, 12].

## ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТКАЗОВ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для выбора минимального множества контролируемых показателей СИО РЛС предложен новый метод формализованного описания отказов, который в отличие от известных методов позволяет научно обосновать требования к средствам диагностирования. При этом процедура удаления неинформативных диагностических признаков из множества наблюдаемых технических состояний (табл.1) интегрирована в приведенную ниже процедуру построения изображения видов технического состояния (1–3) [4, 11, 14].

Таблица 1

Множество ТС

№ наб.	Номера признаков									Вид состояния			
	1	2	3	...	m	...	n	...	n'	1	2	...	m
1	1	1	1	...	1	...	1	...	1	1		...	
2	1	0	1	...	1	...	0	...	1	1		...	
...	.	.	.	...	.	...	.	...	.	.	.	...	
m	0	1	1	...	0	...	1	...	1		1	...	
...				...		...		...				...	
m'	1	1	0	...	1	...	1	...	1			...	1



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Размерность вектора наблюдаемых технических состояний  $Y_{\langle n \rangle}$  СИО РЛС в общем случае избыточна. Это говорит о том, что есть такой набор диагностических показателей  $Y_{\langle n' \rangle}$ , вектор которого меньше исходной размерности ( $n < n'$ ) и на этом векторе все отказы являются определяемыми. Линейная независимость двух одномерных векторов обеспечивает их различимость. При этом наличие у них свойств ортогональности усиливает степень их различимости. Из этого следует, что для диагностирования и обеспечения различимости отказов необходимо соблюдение двух представленных условий [12, 13, 14].

1. При формировании транспонированной матрицы  $E$  векторов изображений  $E_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) необходимо исключить наличие пропорциональных строк:  $E_i \neq a_1 E_k, \forall a_1 \in \{R \setminus 0\}, i, k = \overline{1, m}, i \neq k$ , где  $R$  – множество вещественных чисел. Это условие задает требование к линейной независимости строк матрицы векторов изображений  $E$ .

2. Различимость технических состояний достигается при стремящемся к нулю значении скалярного произведения векторов  $E_i$  и  $E_k$ :  $(E_i, E_k) \rightarrow 0, i, k = \overline{1, m}, i \neq k$ . Приближение значения скалярного произведения к нулю свидетельствует о возрастании меры ортогональности рассматриваемых векторов  $E_i$  и  $E_k$ .

Жесткость требований к достоверности результатов диагностирования и контроля технического состояния определяет область порогового значения  $a_2$ :

$$(E_i, E_k) < a_2, \quad i, k = \overline{1, m}, \quad i \neq k, \quad a_2 \in R^+, \quad (8)$$

где  $R^+$  – множество положительных вещественных чисел.

Для формирования правила получения  $a_2$  и вычисления минимального количества диагностических признаков необходимо учитывать правило получения ортогональных систем векторов исходя из того, что изначально имеются линейно независимые, но при этом не ортогональные системы, например такие, как рассматриваемая система векторов  $E_1, E_2, \dots, E_m$ . Анализ способов решения задач такого вида показал, что наиболее оптимальным является алгоритм ортогонализации Грама – Шмидта. Он обеспечивает линейным преобразованием системы  $E_1, E_2, \dots, E_m$  получение ортогональной системы  $E_1^\perp, E_2^\perp, \dots, E_m^\perp$ , при условии, что количество векторов  $m$  не превосходит и менее их размерности  $n'$ :  $m < n'$ . Указанный алгоритм ортогонализации позволяет задать связь между первоначальными и преобразованными векторами в виде следующих соотношений [13, 14]:

$$E_1^\perp = a_{11} E_1, E_2^\perp = E_2 - a_{21} E_1^\perp; E_3^\perp = E_3 - a_{31} E_1^\perp - a_{32} E_2^\perp, \dots, E_m^\perp = E_m - \sum_{k=1}^{m-1} a_{mk} E_k^\perp, \quad (9)$$

где

$$a_{11} = 1, \quad a_{ik} = \frac{(E_i, E_k^\perp)}{(E_k^\perp, E_k^\perp)}, \quad i = \overline{2, m}, \quad k = \overline{1, m-1}. \quad (10)$$

Из выражений (9) следует, что любой из векторов  $E_i^\perp$  ортогональной системы является комбинацией линейно независимых векторов  $E_1, E_2, \dots, E_m$  и поэтому не является нулевым. В противоположном случае векторы  $E_1, E_2, \dots, E_m$  были бы линейно зависимыми, а это противоречило бы условию, принятому изначально.

Матрица  $E^\perp$ , образуемая векторами  $E_i^\perp$  ( $i = \overline{1, m}$ ), подчинена исходной матрице  $E$  в соответствии с линейным законом  $E^\perp = AE$ .

Линейный коэффициент преобразования  $A$  является левой треугольной матрицей. Элементы главной диагонали матрицы  $A$  равны единице, а внедиагональные элементы определяются формулами (10), т.е.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -a_{21} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_{31} & -a_{32} & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{m1} & -a_{m2} & -a_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Матрица  $\bar{E}^\perp$ , выстроенная из скалярных произведений векторов вида  $(E_i^\perp, E_k^\perp)$ ,  $i, k = \overline{1, m}$ , получила название матрицы Грама. Определитель матрицы Грама имеет вид [4, 11, 14]

$$\det \bar{E}^\perp = \begin{vmatrix} (E_1^\perp, E_1^\perp) & (E_1^\perp, E_2^\perp) & \dots & (E_1^\perp, E_m^\perp) \\ (E_2^\perp, E_1^\perp) & (E_2^\perp, E_2^\perp) & \dots & (E_2^\perp, E_m^\perp) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (E_m^\perp, E_1^\perp) & (E_m^\perp, E_2^\perp) & \dots & (E_m^\perp, E_m^\perp) \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Все элементы определителя (12), кроме диагональных, равны нулю:

$$(E_i^\perp, E_k^\perp) = 0, \quad i, k = \overline{1, m}, \quad i \neq k, \quad (13)$$

в связи с ортогональностью векторов  $E_i^\perp$  и  $E_k^\perp$ . Для элементов, размещенных по диагонали, актуально следующее неравенство:

$$(E_i^\perp, E_i^\perp) > 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (14)$$

поскольку в рассматриваемой матрице  $\bar{E}^\perp$  нет строк, равных нулю. Поэтому  $\det \bar{E}^\perp > 0$  и, следовательно, матрица  $\bar{E}^\perp$  имеет ранг, равный  $m$ :

$$\text{rang} \bar{E}^\perp = m. \quad (15)$$

Известна следующая закономерность [13, 14]: если рассматриваемая матрица Грама, состоящая из системы векторов  $E_1, E_2, \dots, E_m$ , обладает ведущими минорами, не равными нулю, и в каждой  $i$ -й строке исследуемой матрицы Грама диагональный элемент является максимальным среди других элементов своей строки, то актуальны приведенные ниже утверждения.

1. Существует  $n$  координат ( $m \leq n < n'$ ) таких, что сформированные из них векторы  $E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})^T$ ,  $i = \overline{1, m}$  будут попарно ортогональны.

2. Обеспечение ортогональности не требует линейного преобразования исходной системы векторов  $E_1, E_2, \dots, E_m$  в связи с вырождением в единичную матрицу матрицы преобразования. При применении в качестве линейного преобразования процедура Грама – Шмидта, матрица (11) обращается в единичную.

Из сказанного выше следует, что для обеспечения различимости всех отказов исследуемой технической системы с множеством из  $n$  диагностических показателей необходимо и достаточно выполнение двух условий:

1)  $M_B \neq 0$ , т.е. неравенство нулю ведущих миноров –  $M_B$  матрицы Грама;

2)  $(E_i, E_i) > (E_i, E_k)$ ,  $i, k = \overline{1, m}$ ,  $i \neq k$ .

Поскольку изначально справедливо равенство (15), то первое условие выполняется всегда. Выполнение второго условия обеспечивается справедливостью выражений (13), (14) и (15). Также второе условие может быть применено для задания величины порога  $a_2$  в выражении (8):  $a_2 = \min\{(E_i, E_i)\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

Из сказанного следует, что из начального множества диагностических признаков можно выбрать  $n$  ( $m \leq n < n'$ ) таких, которые обеспечивают различимость и наблюдаемость всех отказов системы. Практически необходимо стремиться к реализации случая, когда  $n = m$ , так как именно при этом достигается использование минимально возможного множества диагностических показателей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная схема управления техническим состоянием СИО для снижения расхода средств на эксплуатацию представляет собой замкнутую систему управления с обратной связью и с возможностью выдачи рекомендаций по поддержке принятия решений органом выполняющим ТОиР.

Алгоритм управления техническим состоянием СИО, разработанный для этой схемы, позволяет осуществлять управление техническим состоянием СВКВ с целью поддержания коэффициента оперативной готовности СИО и технологического потенциала РЛС на требуемом уровне за счет предупреждения перехода оборудования СИО РЛС в состояние отказа или состояние, при котором затраты на обеспечение его функционирования значительно увеличиваются.

Метод стохастической аппроксимации, использованный в статье, позволяет построить изображения всех видов технического состояния (ТС) СИО при неизвестных пределах измерения диагностических признаков (ДП) (2), соответствующих каждому отказу. В представленном примере очевидна простота применения данного метода на практике. Он дает представление о том, как при отказе  $i$ -го функционального элемента изменяется поведение каждого ДП. Таким образом, каждое изображение ТС можно будет различить среди сформированного множества изображений всех видов технических состояний.

## Список используемых источников

1. АВК – система автономной вентиляции и кондиционирования / И.А. Губина, К.Ю. Курочкина, С.Г. Колбая и др. // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №5(32). – С. 7–17.
2. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Физматлит, 2009.
3. Треногин В.А. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1980.
4. Сеньченков В.И. Процедура обучения при разработке моделей контроля технического состояния сложных систем // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 1.
5. Рахматова М. У., Эргашев Х.А. Управление качеством эксплуатации энергетического оборудования // Молодой ученый. – 2016. – №9. – С. 270–271.
6. Никитин О. Ф. Поддержание качества эксплуатации гидропривода // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – №10. – С. 5–10.
7. Надежность работы вентиляционных систем / Н.В. Вадулина, С.Р. Ахмедянова, А.Р. Губайдуллина и др. // Вестник молодого ученого. – 2016. – № 4. – С. 20–23.
- 8.. Improvement of operational efficiency of equipment / Gaurav Gera, Gurpreet Saini, Rajender Kumar, S.K. Gupta // International Journal of Industrial Engineering Research and Development (IJERD). – 2012. – Vol.3. – P. 67–73.
9. Miqdam T Chaichan. The impact of engine operating variables on emitted PM and Pb for an SIE fueled with variable ethanol-Iraqi gasoline blend // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2015. – Vol. 12, Issue 6, Ver. I. – P. 72–79.

10. *Сеньченков В.И.* Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 377 с.
11. *Сеньченков В.И., Абсалямов Д.Р.* Формальное описание отказов и выбор минимального множества контролируемых признаков в технических системах // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2011. – №3.
12. *Авсюкевич Д.А.* Оперативное управление эксплуатацией теплоэнергетических объектов ракетно-космических комплексов в нестандартных ситуациях: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 140 с.
13. Обеспечение надежности систем гарантированного электропитания наземных комплексов космического назначения методом формализации поиска отказов и выбора минимального множества контролируемых признаков / Д.Р. Абсалямов, М.А. Марченко, Р.Н. Аитов и др. // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – №1. – С. 9–14.
14. *Абсалямов Д.Р.* Повышение надежности инженерных систем методом формализации поиска отказов // *Инженерно-строительный журнал*. – 2012. – №2 (28). – С. 39–47.
15. Алгоритмы оперативного обоснования оптимальных планов доставки комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей / А.Н. Дьяков, Е.А. Жеребцов, А.С. Кокарев и др. // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2017. – Вып. 658. – С. 130–138.

Д.А. Авсюкевич,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
Ю.Е. Тупицин,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Е.В. Шишкин,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВОКУПНЫХ ЗАТРАТ НА РЕКОНСТРУКЦИЮ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Статья посвящена постановке задачи структурно-параметрической оптимизации систем водоснабжения ракетно-космических комплексов на вербальном и формальном уровнях. В качестве критерия оптимизации предлагается использовать минимум совокупных затрат на реконструкцию. Ограничениями и граничными условиями выступают структурные и функциональные особенности систем водоснабжения и заданные требования по режимам функционирования.

Ключевые слова: структурно-параметрическая оптимизация, система водоснабжения, реконструкция, совокупные затраты.

### ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью современного этапа развития и совершенствования космических войск является не создание новых, а реконструкция существующих ракетно-космических комплексов (РКК) под новые типы ракет-носителей и космических аппаратов.

В процессе реконструкции РКК вследствие изменения режимов и объемов водопотребления, принципиальных схем внутренних систем технического, противопожарного, хозяйственно-питьевого водоснабжения сооружений возникает необходимость изменения, как структуры, так и параметров систем водоснабжения (СВС) [6] комплексов в целом.

### ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ И КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В качестве критерия оптимизации возможных вариантов структуры и параметров СВС в современных условиях ограниченного финансирования на реконструкцию и эксплуатации РКК целесообразно принять минимум совокупных затрат на реконструкцию:

$$C_{\Sigma} \rightarrow \min.$$

Модель СВС строится на основе следующих предпосылок [1, 3].

1. СВС состоит из большого числа подсистем трех типов: нагрузок или потребителей, активных элементов (насосных станций), линий связи (трубопроводы водоводов).

2. Каждая такая подсистема  $i$  характеризуется двумя переменными величинами: расходом  $q_i$  и потерей напора  $h_i$ . Потеря напора  $h_i$  представляет собой разность напоров воды в начале и конце  $i$ -го участка трубопровода.

3. В качестве потребителей в сети рассматриваются фиктивные участки, направленные от узлов сети к точкам с нулевыми давлениями. Эти участки характеризуются своими расходами и напорами. Для нормального функционирования потребителей необходимо, чтобы эти напоры были не меньше некоторых минимально допустимых.

4. Структура СВС представляется с помощью графа, отражающего характерные связи между подсистемами.



5. Общий поток воды, поступающей в сеть, равен суммарному потоку, потребляемому из сети.

6. В сети СВС имеют место законы Кирхгофа (постулаты сетей), согласно которым алгебраическая сумма расходов в любом узле сети равна нулю и суммарная потеря напора по любому замкнутому циклу также равна нулю [5].

Указанные предпосылки позволяют рассматривать СВС как сильно связный линейный граф, на котором определены два закона Кирхгофа. Этот граф содержит  $v$  вершин и  $e$  дуг, каждой из которых соответствует ряд активных и пассивных элементов и две переменные: расход  $q_i$  и потеря напора  $h_i$ , связанные между собой.

Для формального описания СВС введем следующие обозначения:

$R = \{r/r = 1, \dots, k\}$  – множество индексов вариантов реконструкции рассматриваемой СВС;

$I = \{i/i = 1, \dots, n\}$  – множество индексов участков СВС с заданной структурой;

$I_1 \subset I$  – подмножество вновь проектируемых участков СВС;

$I_2 \subset I$  – подмножество существующих участков СВС;  $I_1 \cup I_2 = I$ ;

$I_3 \subset I$  – подмножество участков СВС, на которых возможно и целесообразно строительство повысительных насосных станций;

$J = \{j/j = 1, \dots, m\}$  – множество индексов отдельных узлов СВС с заданной структурой;

$J_1 \subset J$  – подмножество индексов узлов-потребителей (площадок космодрома);

$J_2 \subset J$  – подмножество индексов узлов питания;

$J_3 \subset J$  – подмножество индексов узлов без нагрузки (точки разветвления на схеме СВС);

$J_4 \subset J$  – подмножество индексов узлов, где осуществляется обработка воды;

$Q_\Sigma = \Sigma Q_j = \Sigma Q_j$  – суммарная производительность головных насосных станций, которая совпадает с общей нагрузкой потребителей;

$\mathcal{E} = \Sigma H_j Q_j$  – суммарная энергия, создаваемая источниками водоснабжения.

Зависимость между потерей напора и расходом для  $i$ -го участка водопровода определяется по эмпирическим расчетным формулам, полученным Шевелевым, Андрияшевым, Абрамовым для труб из различных материалов [4]. Однако указанные формулы целесообразно применять при выполнении немеханизированных гидравлических расчетов. Учитывая, что в данной работе все вычисления проводятся с помощью ЭВМ, то гидравлические и технико-экономические расчеты водоводов выполняются с использованием приближенных одночленных формул, которые с достаточной для практических целей точностью аппроксимируют выражение для потерь напора при различных режимах работы водопроводной сети [3]:

$$h = k (lQ^\beta / d^m),$$

где  $k$ ,  $\beta$ ,  $m$  – коэффициенты, полученные для неновых металлических труб.

В общем случае задача оптимизации реконструкции СВС с требуемым уровнем ее надежности имеет следующий вид:

$$C_\Sigma = \Sigma \varphi_i(d_i, l_i) + \Sigma \psi_i(q_i, h_i) + \Sigma \xi_j(p_j, Q_j) + \Sigma \chi_j(q_j, H_j) + \Sigma \zeta_i(q_i, H_i) + \Sigma \phi_j(q_j, h_j) \rightarrow \min \quad (1)$$

при выполнении условий:

$$Aq = Q; \quad (2)$$

$$Bh = 0; \quad (3)$$

$$h_i + H_i = f_i(q_i, d_i, l_i), \quad i \in I; \quad (4)$$

$$p_{j\min} \leq p_j \leq p_{j\max}, \quad j \in J; \quad (5)$$

$$q_{i\min} \leq q_i \leq q_{i\max}, \quad i \in I; \quad (6)$$

$$d_i \in D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}, i \in I; \quad (7)$$

$$V_i \in V = \{v_i^{(r)}, r = 1, 2, \dots, k\}, r \in R, i \in I; \quad (8)$$

$$W_i(H_i) \in W(H) = \{w_i^{(s)}, s = 0, 1\}, i \in I_3; \quad (9)$$

$$Z_i(Q_i) \in Z(Q) = \{z_i^{(t)}, t = 0, 1\}, t \in J_4; \quad (10)$$

$$H_i \in \{0, H^{(l)}, \dots, H^{(u)}\}, \text{ при } s=1, i \in I_3. \quad (11)$$

Левая часть выражения (1) включает:

– затраты на сооружение и эксплуатацию трубопроводной системы СВС:

$$\Sigma \varphi_i(d_i, l_i), i \in I;$$

– затраты на сооружение и эксплуатацию насосных станций в зависимости от их характеристик:

$$\Sigma \zeta_i(q_i, H_i), i \in I_3;$$

– затраты на сооружение и эксплуатацию очистных сооружений в зависимости от их характеристик:

$$\Sigma \phi_j(q_j, h_j), j \in J_4;$$

– затраты на сооружение и эксплуатацию источников водоснабжения в зависимости от их производительности  $q_j$  и развиваемых напоров  $H_j$ :

$$\Sigma \chi_j(q_j, H_j), j \in J_2;$$

– затраты на электроэнергию, необходимую для перемещения воды по участкам сети:

$$\Sigma \psi_i(q_i, h_i), i \in I;$$

– затраты на электроэнергию, необходимую для создания требуемых расходов и напоров воды у потребителей:

$$\Sigma \xi_j(p_j, Q_j), j \in J_1.$$

Среди представленных выше условий выражения (2) и (3) представляют собой первый и второй законы Кирхгофа, описывающие в матрично-векторной форме условия материального и энергетического балансов в СВС. В этих выражениях  $A$  – матрица коэффициентов при компонентах вектора расходов на всех участках сети  $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ , где  $n$  – число участков сети;  $Q$  – это вектор нагрузок в линейно независимых узлах схемы  $m$ ,  $Q = (Q_1, \dots, Q_{m-1})^T$ ;  $B$  – это матрица коэффициентов при компонентах вектора потерь напора  $h = (h_1, \dots, h_n)^T$ .

В случае разветвленной водопроводной сети вместо двух выражений (2) и (3) может быть записано выражение

$$H_0 - \Sigma h_i \geq H_t, i \in I_t, t = 1, \dots, T, \quad (12)$$

которое описывает требования обеспечения баланса напоров в реконструируемой сети [8]. В данном выражении  $H_0$  – напор в основном источнике;  $H_t$  – требуемый свободный напор в конечном узле водопровода  $t$ .

Условие (4) представляет собой гидравлическую зависимость между напорами и расходами, которые определяются диаметрами и длинами трубопроводов на различных участках и, соответственно, могут различаться на разных участках.

Неравенство (5) определяет ограничения на величины давлений во всех узлах сети, которые должны быть не меньше минимальных значений  $p_{j\min}$  и не больше максимальных значений  $p_{j\max}$ .

Условие (6) накладывает ограничения на значения расходов на участках сети. Данные ограничения являются следствием ограничения на скорость движения воды по трубам или обусловлены минимальным  $D_{\min}$  и максимальным  $D_{\max}$  значениями диаметров трубопроводов.

Условие (7) позволяет выбирать значения диаметров укладываемых труб только из заданной дискретной области их стандартных значений  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ .

Выражение (8) определяет, какой вариант реконструкции  $i$ -го участка (узла) сети либо всей СВС из  $R$  возможных рассматривается в данный момент. Выражение (9) определяет целесообразна ( $s = 1$ ) или нет ( $s = 0$ ) повысительная насосная станция на  $i$ -м участке сети.

Аналогично выражение (10) определяет, целесообразны ( $t = 1$ ) или нет ( $t = 0$ ) очистные сооружения на  $i$ -м участке сети [7].

Выражение (11) определяет дискретную область значений напоров повысительных насосных станций, если по выражению (9) они целесообразны на  $i$ -м участке сети ( $s = 1$ ). Значения напоров определяются исходя из варианта реконструкции СВС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель совокупных затрат на реконструкцию СВС РКК, а также ограничения и граничные условия на заданные значения давлений воды на участках сети, дискретные значения диаметров труб, необходимость применения в составе СВС повысительных насосных станций, очистных сооружений позволяет решать оптимизационную задачу по выбору такой структуры и параметров системы, для которых совокупные затраты будут минимальны.

## Список используемых источников

1. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. – Новосибирск: Наука, 1983. – 236 с.
2. Хоружий П.Д., Шарков М.В. Реконструкция систем водоснабжения: Расчет и проектирование. – Киев: Будивельник, 1983. – 144 с.
3. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Системы распределения и подачи воды: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – Т. 3. – 356 с.
4. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 324 с.
5. Водоснабжение и водоотведение: учебник / В.С. Кедров, В.Н. Исаев, В.А. Орлов и др. – М: Стройиздат, 2002. – 321 с.
6. Водоснабжение наземных комплексов: учебник / А.В. Степанов, Б.А. Ревяков, Ю.Г. Рухленко и др. – МОРФ, 2005. – 560 с.
7. О водоснабжении и водоотведении: федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ (в ред. от 23.07.2013) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2011. – № 50. – 56 с.
8. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения актуализированная редакция. – URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200093820/> (дата обращения: 20.09.2019). – 138 с.

А.М. Барановский,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Е.А. Захарова

## **МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

В работе предложена и исследована модель оценивания комплексного показателя надежности (коэффициента готовности) с учетом показателей и программ диагностирования. Модель позволяет учитывать расширенный состав технических состояний и ошибки проверок.

Ключевые слова: коэффициент готовности, диагностирование, ошибки проверок, достоверность диагностирования, марковская модель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Правильное оценивание показателей надежности является одним из главных факторов повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем (СТС). Основным показателем, используемым для исследования надежности, является коэффициент готовности, под которым в соответствии с ГОСТ 27.002-15 [1] понимается вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. В настоящее время для расчета коэффициента готовности используются показатели, характеризующие безотказность СТС (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы) и показатели, характеризующие систему восстановления работоспособности СТС (интенсивность и среднее время восстановления).

Среднее время восстановления включает в себя время диагностирования и время выполнения работ по восстановлению работоспособности СТС (например, время замены неисправного блока, время переключения на резервный комплект). При вычислении коэффициента готовности не учитываются ошибки диагностирования, которые могут существенно повлиять на коэффициент готовности системы. Например, при неправильном определении неисправного блока выполняется комплекс работ по замене исправного блока на исправный, при этом СТС так и останется неисправной.

В работе [2] рассмотрено влияние ошибок контроля на коэффициент готовности с применением марковской модели. В развитие данного подхода в настоящей статье предлагается новая имитационная модель, позволяющая оценить влияние на коэффициент готовности СТС следующих факторов:

- программы диагностирования;
- интервалов времени между циклами выполнения программы диагностирования;
- характеристик проверок, входящих в программу диагностирования (длительности проверок, ошибок первого и второго рода).

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Современные СТС, как правило, являются системами управления и включают в себя три основных компонента: объект управления (ОУ), управляющий орган (УО) и систему обратной связи (СОС).

Объект управления представляет собой техническую систему, которая может находиться в работоспособном или в одном из неработоспособных состояний. В рамках исследования не рассматриваются самоустраняющиеся отказы, следовательно, ОУ может перейти из работоспособного в одно из неработоспособных состояний с заданной интенсивностью.

Управляющий орган предназначен для формирования и выдачи управляющих воздействий на ОУ в соответствии с целевым предназначением СТС. В задачу УО также входит восстановление работоспособности ОУ в случае возникновения отказов.

Система обратной связи в части, касающейся обеспечения надежности СТС, выполняет функции контроля и диагностирования ОУ. В ее задачу входит определение факта отказа ОУ (контроль) и места отказа (диагностирование). Процесс диагностирования характеризуется последовательностью проверок (программой диагностирования) и параметрами проверок: длительностью, ошибками первого и второго рода. Проблеме построения оптимальных по различным показателям (достоверности, продолжительности, информативности) программ диагностирования посвящено множество научных трудов [3–10], поэтому в рамках данной статьи программа диагностирования полагается построенной по одному из известных алгоритмов.

Следует отметить, что математические модели всех компонентов СТС в озвученной постановке достаточно хорошо изучены. В рамках исследования поставлена задача оценивания коэффициента готовности СТС при наличии системы контроля и диагностирования, функционирующей по заданной программе [11]. Таким образом, можно осуществить математическую постановку задачи.

*Дано:*

1. Модель объекта диагностирования:

$$M_0 = \langle S, \Pi, \hat{\Pi}, T, A, B, P^0, \Lambda, M, T_d, \chi \rangle,$$

- где  $S$  – множество технических состояний системы ( $S_0$  – работоспособное состояние;  $S_1, \dots, S_n$  – неработоспособные состояния, обусловленные одиночными отказами функционирования элементов),  $S = \{S_i \mid i = \overline{0, n}\}$ ;
- $\Pi$  – множество проверок диагностических параметров,  $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, m}\}$ ;
- $\hat{\Pi}$  – множество модельных исходов проверок диагностических параметров (0 – не норма, 1 – норма),  $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_{ij} \mid i = \overline{0, n}; j = \overline{1, m}\}$ ,  $\hat{\pi}_{ij} = \{0, 1\}$ , для которых задано множество длительностей проверок  $T_\pi = \{\tau_j \mid j = \overline{1, m}\}$ ;
- $A$  – множество вероятностей ошибок первого рода,  $A = \{\alpha_j \mid j = \overline{1, m}\}$ ;
- $B$  – множество вероятностей ошибок второго рода,  $B = \{\beta_j \mid j = \overline{1, m}\}$ ;
- $P^0$  – множество априорных вероятностей видов технических состояний в начальный момент времени ( $t = 0$ ),  $P^0 = \{p_i^0 \mid i = \overline{0, n}\}$ ;
- $\Lambda$  – множество интенсивностей переходов из состояния  $S_0$  в состояния  $S_i$  (интенсивности отказов),  $\Lambda = \{\lambda_i \mid i = \overline{1, n}\}$ ;
- $M$  – множество интенсивностей переходов из состояний  $S_i$  в состояние  $S_0$  (интенсивности восстановления) по результатам диагностирования,  $M = \{\mu_i \mid i = \overline{1, n}\}$ ;
- $T_d$  – интервал времени между циклами диагностирования (периодичность диагностирования);
- $\chi$  – отображение, ставящее в соответствие проверке  $\pi_j$  ее исход, если система находится в состоянии  $S_i$ ,  $\chi: S \times \Pi \rightarrow \hat{\Pi}$ .

## 2. Модель программы диагностирования:

$$M_{\Pi} = \langle M_0, \Omega, G, \Psi \rangle.$$

Здесь  $\Omega$  – множество информационных состояний программы диагностирования (информационное состояние представляет собой подмножество «подозреваемых» технических состояний, в одном из которых может находиться объект в текущей фазе процесса диагностирования),

$$\Omega = \{\omega_l \mid \omega_l \subseteq S\}; \quad l = \overline{1, W}, \quad W = \sum_{k=1}^{m+1} C_{n+1}^k = 2^{n+1} - 1;$$

$G$  – матрица переходов между информационными состояниями,

$$G = \{\langle \omega_l, \omega_k \rangle \mid \varphi(\omega_l, \omega_k)\},$$

( $\varphi(\omega_l, \omega_k) = 1$ , если процесс диагностирования может перейти из  $\omega_l$  в  $\omega_k$ ,  
 $\varphi(\omega_l, \omega_k) = 0$  – в противном случае);

$\Psi$  – отображение, устанавливающее связь между множеством проверок диагностических параметров и множеством модельных исходов проверок диагностических параметров,  $\Psi: G \rightarrow \Pi \times \hat{\Pi}$ .

Требуется оценить влияние показателей качества диагностирования программы диагностирования на коэффициент готовности СТС:

$$K_T = (P(S_0), \alpha, \beta, T_D, T_{\Pi}).$$

**Разработка модели оценивания готовности СТС.** Модель процесса отказов и восстановления системы, как правило, представляется в форме марковского процесса, граф состояний которого представлен на рис. 1,а. Данная модель позволяет определить коэффициент готовности, однако не учитывает характеристики процесса диагностирования. Для их учета в процессе восстановления введем дополнительное состояние  $S_D$ , обозначающее режим диагностирования (рис. 1,б.)

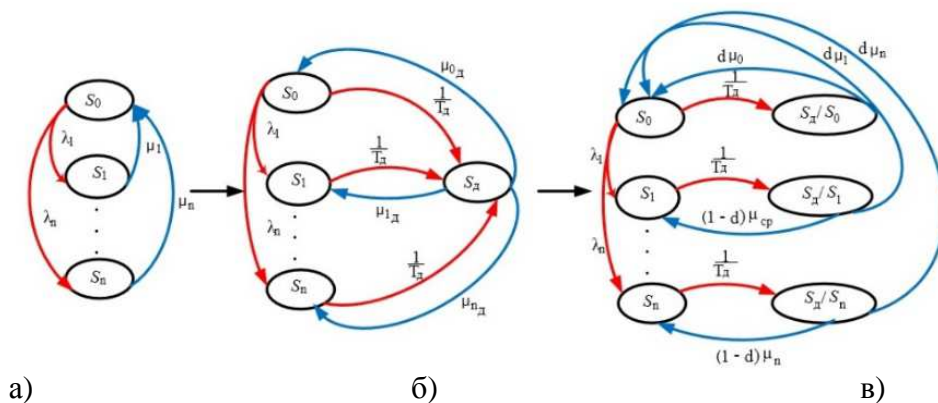


Рис. 1. Модель процесса отказов и восстановления системы

Интенсивность перехода в состояние  $S_D$  обратно пропорциональна интервалу между циклами диагностирования  $T_D$  (т.е. периодичности диагностирования). Из состояния  $S_D$  процесс диагностирования может перейти в состояние  $S_0$  при верном результате диагностирования и обратно в текущее техническое состояние  $S_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) в случае ошибки диагностирования. Очевидно, что рассматриваемый процесс не является марковским, поскольку переход из состояния  $S_D$  в состояние  $S_i$  зависит от предыдущего состояния.

Для того чтобы процесс диагностирования был марковским, введем вместо состояния  $S_D$  множество из  $(n+1)$  состояний  $\{S_D/S_i, i = \overline{0, n}\}$  (см. рис. 1, в).

Переход из состояния  $S_i$  в состояние  $\{S_D/S_i, i = \overline{0, n}\}$  осуществляется с интенсивностью  $1/T_D$  восстановления при ошибочном результате диагностирования. Интенсивности переходов определяются следующим образом: в состояние  $S_0$  – с помощью произведения  $d \cdot \mu$ , где  $d$  – достоверность программы диагностирования; в состояние  $S_i$  – с помощью выражения  $(1-d) \cdot \mu$ , где  $\mu$  – средняя интенсивность. Данная модель позволяет учитывать общую достоверность диагностирования, однако с ее помощью невозможно оценить влияние характеристик отдельной проверки на коэффициент готовности. Чтобы это сделать, заменим каждое состояние  $S_D/S_i$  графом, задающим программу диагностирования (рис. 2).

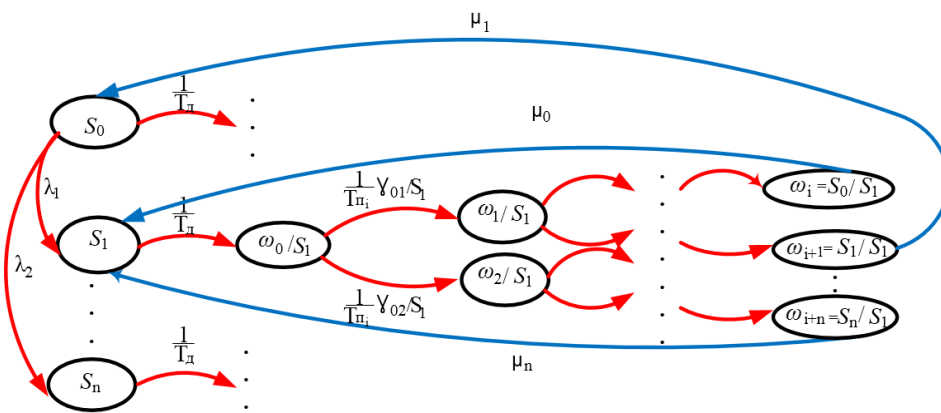


Рис. 2. Фрагмент графа, задающий программу диагностирования

Замена каждого состояния  $S_D/S_i$  графом, задающим программу диагностирования, позволяет оценить влияние каждого показателя качества диагностирования на коэффициент готовности.

**Модель оценивания готовности СТС.** Пусть объект диагностирования состоит из двух блоков (рис. 3). Диагностическую модель объекта можно представить в форме табл. 1.

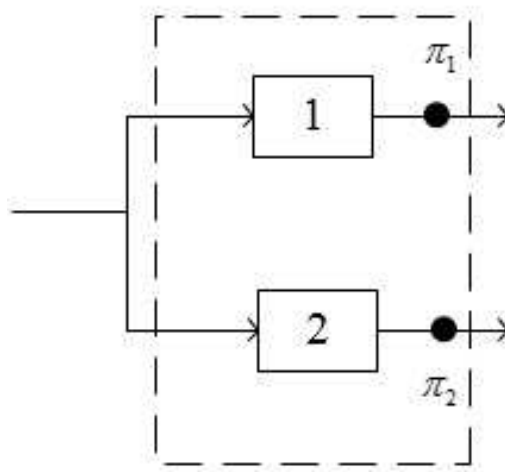


Рис. 3. Объект диагностирования

Таблица 1

**Общий вид диагностической модели**

Виды технического состояния и заданные ошибки диагностирования	$S_i$	$\pi_1$	$\pi_2$	$P^0$	$\Lambda$	$M$
Система исправна	$S_0$	1	1	$P_0^0$		
Неисправен блок №1	$S_1$	0	0	$P_1^0$	$\lambda_1$	$\mu_1$
Неисправен блок №2	$S_2$	0	1	$P_2^0$	$\lambda_2$	$\mu_2$
Ошибки 1-го рода	<b>A</b>	$\alpha_1$	$\alpha_2$			
Ошибки 2-го рода	<b>B</b>	$\beta_1$	$\beta_2$			

По исходным данным диагностической модели построим программу диагностирования (рис. 4). Для вывода аналитической зависимости коэффициента готовности от показателей диагностирования реализуем программу диагностирования (рис. 4,а) в виде марковской модели, представленной на рис. 5.

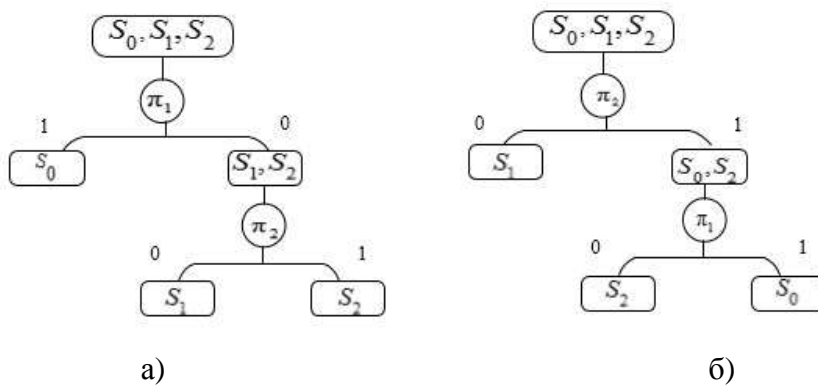


Рис. 4. Программы диагностирования с разной последовательностью проверок

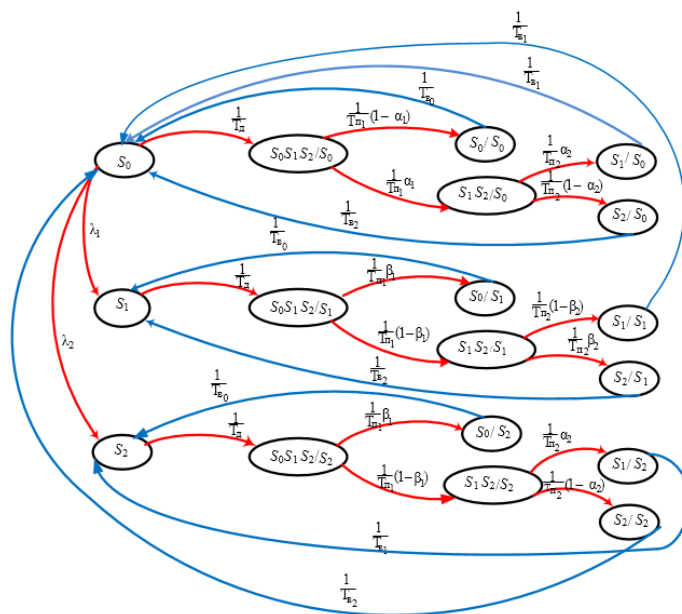


Рис. 5. Модель марковского процесса для программы диагностирования, изображенной на рис. 4,а



На рис. 5 введены следующие обозначения [12]:  $S_0$  – работоспособное состояние;  $S_1$  и  $S_2$  – неработоспособные технические состояния;  $S_0S_1S_2/S_0$  – режим диагностирования для состояния  $S_0$ ;  $S_0S_1S_2/S_1$  – режим диагностирования для состояния  $S_1$ ;  $S_0S_1S_2/S_2$  – режим диагностирования для состояния  $S_2$ ;  $S_0/S_0$  – фиксация работоспособного состояния  $S_0$ , при этом объект действительно работоспособен;  $S_1S_2/S_0$  – фиксация неработоспособного состояния  $S_1S_2$ , при этом объект находится в работоспособном состоянии;  $S_1/S_0$  – фиксация неработоспособного состояния  $S_1$ , при этом объект работоспособен;  $S_2/S_0$  – фиксация неработоспособного состояния  $S_2$ , при этом объект работоспособен;  $T_{B0}$  – среднее время восстановления (для тех состояний, в которых зафиксировано состояние  $S_0$ );  $T_{B1}$  – среднее время восстановления для технического состояния  $S_1$ ;  $T_{B2}$  – среднее время восстановления для технического состояния  $S_2$ ;  $\tau_1$  – длительность проверки  $\pi_1$ ;  $\tau_2$  – длительность проверки  $\pi_2$ ;  $T_d$  – интервал времени между циклами диагностирования;  $\alpha_1, \alpha_2$  – вероятности ошибок 1-го рода для проверок  $\pi_1$  и  $\pi_2$ ;  $\beta_1, \beta_2$  – вероятности ошибок 2-го рода для проверок  $\pi_1$  и  $\pi_2$  соответственно.

Модель, представленная на рис. 5, по сравнению с ранее известными имеет следующие преимущества:

- возможность рассмотрения расширенного состава технических состояний;
- возможность учета ошибок  $\alpha$  и  $\beta$  для всех проверок.

Вывод аналитического выражения для коэффициента готовности  $K_r$  представляет собой трудоемкую операцию. Трудоемкость возрастает с усложнением графа, т.е. при стремлении учесть большее количество технических состояний, факторов, влияющих на процесс диагностирования [13, 14]. В связи с этим решение задачи такого плана целесообразно проводить с помощью моделирования.

**Модель оценивания готовности сложной технической системы для программы диагностирования с учетом показателей диагностирования в среде моделирования Stateflow пакета Matlab.** С помощью инструмента моделирования Stateflow программного пакета Matlab разработана модель, которая позволяет моделировать дискретно-событийные модели. Модель СТС в среде Stateflow для оценивания коэффициента готовности при проведении диагностирования по программе №1 (рис. 4,а) представлена на рис. 6.

Исходными данными для моделирования являлись:  $T_{cp1}=1000$  ч;  $T_{cp2}=1500$  ч;  $T_{B1}=0,6$  ч;  $T_{B2}=0,8$  ч;  $T_n=0,05$  ч;  $\tau_1=0,02$  ч;  $\tau_2=0,01$  ч;  $T_d=48$  ч;  $\alpha_1=0,2$ ;  $\alpha_2=0,15$ ;  $\beta_1=0,15$ ;  $\beta_2=0,2$ . Здесь  $T_{cp1}, T_{cp2}$  – средняя продолжительность безотказной работы 1-го и 2-го элементов.

Средняя продолжительность безотказной работы находится по заданным параметрам  $\Lambda$ . Для программы диагностирования, изображенной на рис. 4,б, модель СТС строится аналогично, отличительной особенностью будет другой набор информационных состояний, так как различен порядок проверок.

Результатами моделирования являются значения коэффициента готовности при различных программах диагностирования –  $K_{r1}=0,88$  и  $K_{r2}=0,90$ , что позволяет сделать вывод о влиянии параметров программы диагностирования на значение коэффициента готовности.

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента готовности от периодичности диагностирования при различных программах диагностирования.

На рис. 8 представлены графики зависимости коэффициента готовности от вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода. Вероятности ошибок при этом варьировались в пределах от 0 до 1 и полагались равными:  $\alpha_1 = \alpha_2$  и  $\beta_1 = \beta_2$ , что вполне обосновано в случаях, когда проверки от-

личаются лишь местом измерения диагностического признака, а средства измерения при этом одинаковы.

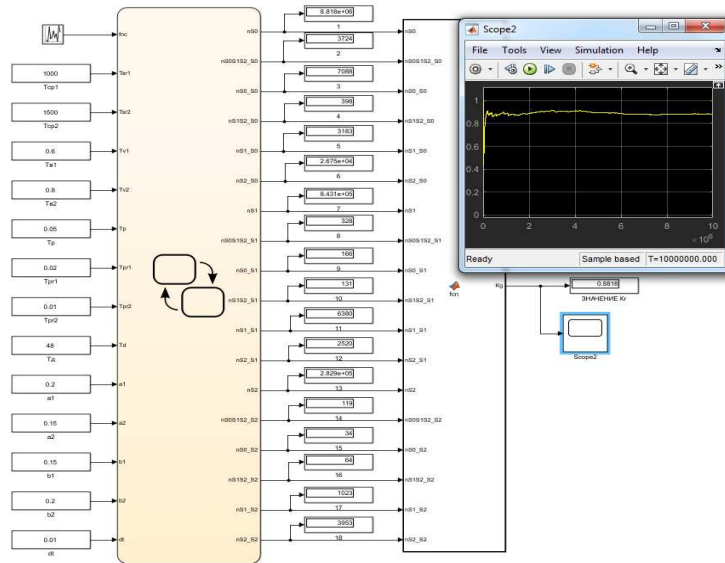


Рис. 6. Модель CTC в среде Matlab

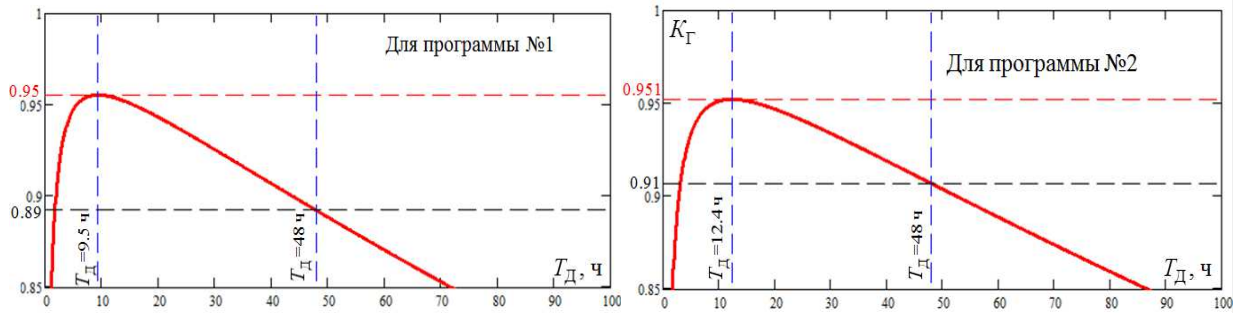


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента готовности от периодичности диагностирования при различных программах диагностирования

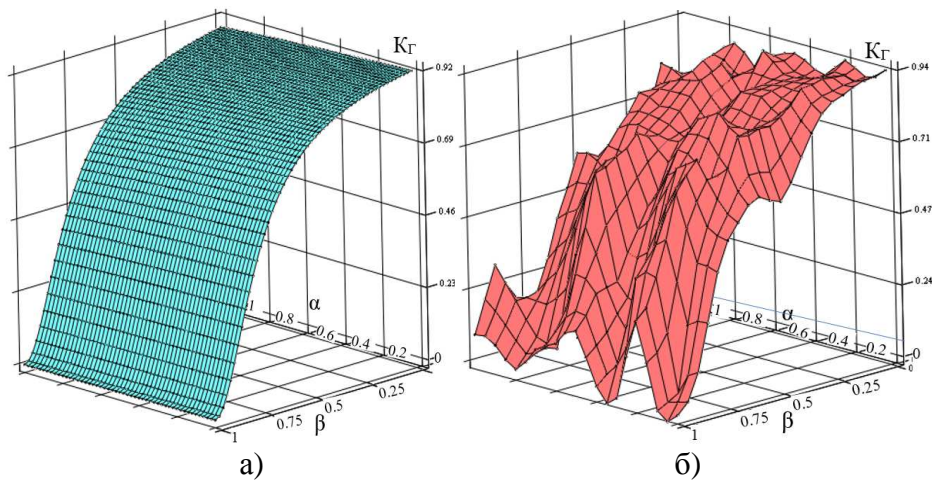


Рис. 8. Зависимости коэффициента готовности от вероятностей ошибок проверок, полученные в результате моделирования и аналитическим способом

Зависимости коэффициента готовности от вероятностей ошибок (рис. 8) позволяют сделать следующие выводы:

- 1) коэффициент готовности существенно зависит от вероятностей ошибок диагностирования;
- 2) результаты моделирования подтверждают адекватность предложенной аналитической модели;
- 3) коэффициент готовности более чувствителен к ошибке 2-го рода при заданных характеристиках процесса, поскольку ошибка 2-го рода приводит к увеличению времени нахождения системы в неработоспособном состоянии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель позволяет сделать вывод о необходимости учета влияния характеристик и показателей диагностирования на коэффициент готовности СТС [15]. Разработанная модель может быть использована для определения ориентировочных значений периодичности контроля и диагностирования СТС, а также для формирования последовательности и состава проверок с целью повышения коэффициента готовности.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с расширением состава видов технических состояний и состава характеристик качества проверок диагностических признаков, а также с рассмотрением других программ диагностирования, при которых коэффициент готовности чувствителен к вероятности ошибок 1-го рода.

## Список используемых источников

1. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.03.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
2. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем / И.В. Дорожко, И.А. Кочанов, Н.А. Осипов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652 – С. 137–146.
3. *Дмитриев А.К.* Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем: учеб. пособие. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 171 с.
4. *Дмитриев А.К., Копкин Е.В.* Оценивание достоверности проверок непрерывных признаков при диагностировании технического объекта // Изв. вузов. Приборостроение. – 1999. – Т. 42, № 9. – С. 3–10.
5. *Дмитриев А.К., Мальцев П.А.* Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1988. – 192 с.
6. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика: учебник для воен. вузов. – МО СССР, 1987. – 521 с.
7. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография / В.В. Мышко, А.Н. Кравцов, Е.В. Копкин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.
8. *Дмитриев А.К., Мальцев П.А.* Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1988. – 192 с.
9. *Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В.* Анализ технического состояния космических средств. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 189 с.
10. *Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В.* Контроль и диагностика космических средств: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 198 с.
11. *Гуменюк В.М.* Надежность и диагностика электротехнических систем: учеб. пособие для вузов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. – 218 с.

12. ГОСТ В 20.911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Введ. 01.01.1991. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 12 с.
13. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 241 с.
14. *Бочкарев С. В., Цаплин А.И.* Диагностика и надежность автоматизированных систем: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 485 с.
15. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования / Е.А. Захарова, А.Е. Привалов, И.В. Дорожко // Труды МАИ. – М., 2018. – Вып. 103.

А.В. Блинов\*,  
кандидат техн. наук, доцент;

В.А. Вакуненко\*,  
кандидат техн. наук;

В.И. Мусатов\*

\*Санкт-Петербург, ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНЦИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОБЪЕКТАХ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ГАРНИЗОНЕ**

Рассмотрены существующая и перспективная законодательные базы, регламентирующие выбросы сточных вод в гидросферу, требования, предъявляемые к станциям очистки сточных вод военных городков Санкт-Петербургского гарнизона. Приведены показатели выброса неочищенных сточных вод в акваторию водоема на примере военного городка с численностью личного состава пять тысяч человек, предложены наиболее надежные схемы очистки сточных вод.

Ключевые слова: очистка сточных вод, проектирование станций очистки, требования к очистке, показатели сточных вод.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Станции очистки бытовых сточных вод представляют собой важную составляющую инженерного оборудования военных городков и иных объектов Министерства обороны Российской Федерации. Вода при подаче на потребителя в процессе использования теряет свое качество, приобретает различные примеси, меняющие ее свойства и состав, превращается в сточную воду. В зависимости от источников выброса, сточные воды могут сильно различаться по своему составу. В преобладающем большинстве военных городков Министерства обороны Российской Федерации с малой численностью личного состава сточные воды загрязнены в основном физиологическими выделениями личного состава и хозяйственными отходами бытового происхождения. Доля поступающих в сети производственных сточных вод мала, в связи с чем поступающие на станции очистки сточные воды могут быть классифицированы как бытовые.

Бытовые сточные воды выбрасываются в почву и прилегающие к объекту водоемы, являющиеся важными составляющими элементами окружающей среды. Этот процесс приводит к их загрязнению сверх природного уровня. Сточные воды, поступающие в акваторию водоема, разбавляются его водой, поэтому в потоке смеси снижается концентрация загрязняющих веществ, однако возможности водоема ограничены. [1]

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНЦИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

В данной публикации рассмотрены меры, позволяющие снизить вероятность возникновения аварий на очистных сооружениях военных городков, расположенных в Санкт-Петербургском гарнизоне, рассмотрена законодательная база, регламентирующая сброс сточных вод в водоем, предложена схема очистки сточных вод, позволяющая производить очистку до требуемых параметров, а также рассчитаны показатели выброса вредных веществ в акваторию Финского залива на примере военного городка с населением пять тысяч человек.

Сточные воды содержат вещества, состоящие из органических соединений, в то же время они загрязнены бактериями, вирусами, простейшими организмами, среди которых могут присутствовать возбудители опасных заболеваний. Для решения задачи очистки сточных вод аналитическими способами определяют количество кислорода, расходуемого на окисление при проведении биохимического процесса – биохимическое потребление кислорода (БПК), а также химического процесса – химическое потребление кислорода (ХПК).

Военные городки Санкт-Петербургского гарнизона расположены преимущественно на берегу Финского залива, следовательно, при возникновении аварийных ситуаций и выходе из строя станций очистки сточных вод данных городков возникает угроза для ихтиофауны залива, для качества воды и для систем водоснабжения населенных пунктов [2]. Помимо возникновения аварий стоит отметить факторы, которые необходимо учитывать на стадии проектирования очистных сооружений. Так, ошибка в определении требуемой степени очистки от вредных веществ, содержащихся в сточной воде, или выборе сооружений станции очистки может повлечь за собой нарушение работы очистных сооружений при максимальной нагрузке, что увеличивает риск возникновения аварии. Также, говоря об очистных сооружениях малых военных городков, следует учитывать сезонность «пиковых» нагрузок, вызванную различными факторами.

Для оценки последствий возникновения таких аварий необходимо дать характеристику водоему, куда осуществляется выброс сточных вод, поступающих от данных военных городков.

Финский залив, являясь восточной частью Балтийского моря, омывает берега не только Российской Федерации, но и Эстонии, Финляндии. Выброс очищенных стоков производится непосредственно в акваторию Финского залива из расположенных на берегу станций очистки сточных вод военных городков и промышленных предприятий.

Финский залив – залив второго порядка Балтийского моря, относящийся, согласно приказу Федерального агентства по рыболовству Российской Федерации № 818 [2], к рыбохозяйственным водным объектам высшей категории. Видовой состав донных и планктонных сообществ залива формируется видами трех основных комплексов – пресноводного, солоноватоводного и морского. Ихтиофауна района включает до тридцати видов рыб из морского и пресноводного экологических комплексов. Стоит также отметить, что залив является источником водоснабжения многих населенных пунктов, расположенных на его берегу [4].

Финский залив – это водоем, попадающий под действие международного законодательства, а именно Рекомендации 28Е/5 Хельсинской конвенции от 15 ноября 2007 года [5], устанавливающей необходимую степень очистки сточных вод, поступающих в воды Финского залива.

Согласно существующему законодательству Российской Федерации, обеспечение безопасности гидротехнических сооружений является обязанностью собственника этого сооружения и эксплуатирующей организации. Требования к обеспечению безопасности станций очистки сточных вод, обязанности собственников и эксплуатирующих организаций содержатся в статьях Федерального закона № 117-ФЗ, требования к сооружениям по соответствию критериям безопасности и нормативным показателям определены в Федеральном законе «О безопасности гидротехнических сооружений» [8].

Акватория водоема, куда осуществляется сброс, должна находиться под постоянным наблюдением за экологическими показателями. Административная ответственность за нарушения при сбросах стоков с очистных сооружений предусмотрена в виде штрафов, налагаемых Министерством природы Российской Федерации. Стоит отметить, что данная мера не избавляет от необходимости устранения выявленных нарушений и возмещения нанесенного ущерба.

В случае, если налогоплательщик не ведет учета образования отходов, сумма налогов определяется исходя из максимальной налоговой ставки и единой налоговой базы, опреде-

ленной по всему объему образования отходов. Ставки платы за сбросы загрязняющих веществ в водные объекты приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Ставки платы за сбросы загрязняющих веществ в водные объекты

Наименование загрязняющих веществ	Ставки платы за 1 т загрязняющих веществ
БПК полн.	243
Взвешенные вещества	977,2
Нитрат-анион	14,9
Нитрит-анион	7439
Нефтепродукты	14711,7
Фосфаты (по фосфору)	3679,3
Хлор свободный, растворенный и хлорорганические соединения	73553403

Величина ущерба, нанесенного акватории водоема, вследствие возникновения аварии на очистных сооружениях рассматривалась на примере военного городка, расположенного в Курортном районе Ленинградской области на берегу Финского залива. Численность личного состава данного городка зависит от времени года, пиковая нагрузка на очистные сооружения приходится на летний период. Расходы сточных вод данного городка в (пиковый) летний и зимний периоды приведены в табл. 2 [6, 7].

Таблица 2

### Расчетные расходы сточных вод населенного пункта

Период	Время работы, ч	Численность населения, чел.	Норма водоотведения, л*чел/сут	Расход сточных вод	
				$Q_{сут. max}$ м <sup>3</sup> /сут	$Q_{ч. max}$ м <sup>3</sup> /ч
Зимний	24	1500	280	546	57,4
Летний	24	5000	280	1425	146,2

Для наглядности необходимости строительства очистных сооружений в малых населенных пунктах приведены нормы выделения загрязняющих веществ для объекта указанной категории в зимний период в табл. 3.

Таблица 3

### Нормы выделения загрязняющих веществ в зимний период

Загрязняющее вещество	Удельное количество на жителя, г/сутки*чел	Концентрации загрязняющих веществ в «пиковый» период, мг/дм <sup>3</sup>
Взвешенные вещества	65	228
БПК <sub>5</sub> неосветленной жидкости	60	210
Азот общий	13	45,6
Азот аммонийных солей	10,5	36,8
Фосфор общий	2,5	8,77
Фосфор фосфатов <b>P – P<sub>04</sub></b>	1,5	5,2

Согласно нормативной документации, хозяйственно-бытовые сточные воды, которые очищаются на станциях очистки сточных вод, с нагрузкой стоков, эквивалентной объему стоков до 10000 жителей, должны очищаться до достижения следующих показателей на сбросе:

- снижение БПК5 минимум на 80%;
- снижение  $P_{общ}$  минимум на 80%;
- снижение  $N_{общ}$  минимум на 30%.

Учитывая названные выше требования, показатели очистки сточных вод данного населенного пункта приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Необходимая степень очистки сточных вод

Наименование вещества	Содержание в водоеме, мг/л	Содержание в сточной воде, мг/л	Допустимое содержание на выходе, мг/л	Необходимая степень очистки, %
Взвешенные вещества	91	228	12	95
БПК <sub>полн</sub>	2	198	15	95
$N_{общ}$	1,11	37,6	35	23
$P_{общ}$	0,015	3,96	1	75

Полученные данные показывают необходимую степень очистки и значимость очистных сооружений для военного городка с населением в 5000 человек. Высокая степень очистки по большинству показателей показывает важность рассматриваемых в статье вопросов, связанных со снижением рисков возникновения аварий на очистных сооружениях населенных пунктов и недопущением попадания неочищенных стоков в акваторию водоемов.

Значительное влияние на качество очистки сточных вод оказывает суточная и сезонная неравномерности. Чем меньше численность личного состава и короче канализационная сеть, тем сильнее выражены суточные колебания притока сточных вод. На сезонную неравномерность влияют сезонные изменения численности личного состава объектов, а также резкие увеличения стоков в периоды ливней и снеготаяния.

Для малых военных городков (с численностью личного состава до 10000 человек) допустимо использование технологии СБР, отличающейся высокой мобильностью и использованием малых площадей, а также позволяющей произвести очистку сточной воды до требуемых показателей. Для возможности применения данной технологии поступающие на станцию сточные воды должны соответствовать показателям, приведенным в табл. 5.

Таблица 5

#### Допустимые значения сточных вод и эффективность очистки сточных вод

Наименование вещества	Допустимые значения исходной сточной воды, мг/л	Очищенные сточные воды, мг/л	Очищенные сточные воды после доочистки на фильтрах, мг/л
Взвешенные вещества	150–350	6,0	3,0
БПК <sub>полн</sub>	50–200	10–15	8–10
Аммонийный азот	7–40	1,0	0,4
Азот нитратов	0–30	10	9
Азот нитритов	0–0,1	0,1	0,02
Фосфор фосфатов	0,5–4,0	0,5	0,2



Технология очистки сточных вод СБР предусматривает осуществление в рамках одного сооружения процессов минерализации органических загрязняющих веществ, нитрификацию, денитрификацию и биологического удаления фосфора (дефосфатацию).

В основе работы данной установки предусмотрен метод аэробной биологической очистки сточных вод, который заключается в способности активного ила потреблять большинство органических соединений, присутствующих в хозяйственно-бытовых сточных водах. Развивающийся активный ил образует колонии, которые могут отделяться от очищенной воды после завершения процессов изъятия содержащихся в ней загрязнений.

Для повышения эффективности окисления загрязнений активным илом станции очистки сточных вод снабжаются системой периодической аэрации, что позволяет насытить сточные воды кислородом и препятствует появлению анаэробных условий, способствующих размножению бактерий. Для извлечения из сточных вод продуктов распада нитратов необходим процесс денитрификации, протекающий в условиях с пониженным содержанием кислорода. Поэтому для создания в системе анноксидных условий, благоприятных для процесса денитрификации, в работе системы предусмотрены паузы системы аэрации.

Установка представляет собой сооружение из трех биореакторов и технического блока. Бытовые сточные воды при помощи насосов, установленных в канализационной насосной станции, подаются по напорному трубопроводу на установку биологической очистки в биореакторы.

При выпуске очищенных сточных вод необходимо учитывать местные условия размещения, типы грунтов и уровень грунтовых вод.

При монтаже изделия в хорошо фильтрующих грунтах (пески, супеси, легкие суглинки) возможны следующие варианты отведения очищенной воды:

- в водоотводную канаву;
- при высоком уровне грунтовых вод – через фильтрующую насыпь;
- при невысоком уровне грунтовых вод – через фильтрующий колодец или поля подземной фильтрации.

Стоит отметить, что при пусконаладочных работах формирование биоценоза микроорганизмов происходит в течение 30 дней, вместе с тем эффективность станции достигает 90 %, 100 % эффективность очистки станции достигается по истечении 6 месяцев при условии, что поступающие на очистку сточные воды имеют допустимые значения концентраций по основным показателям.

Использование данной технологической схемы позволяет в кратчайшие сроки достичь требуемых показателей очистки, снижая угрозу, создаваемую для водоема при возникновении аварийной ситуации на очистных сооружениях в военном городке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены последствия сброса неочищенных сточных вод в водоемы и законодательная база, определяющая требования, предъявляемые к очистным сооружениям, и регламентирующая сброс стоков в акваторию водоемов.

2. Полученные показатели необходимой степени очистки сточных вод населенного городка с населением до пяти тысяч человек показывают важность строительства очистных сооружений в малых населенных пунктах.

3. С учетом требований законодательных актов и нормативных документов, а также мероприятий по снижению риска аварийности на очистных сооружениях разработаны схемы очистки сточных вод, в полной мере отвечающие требованиям.

### Список используемых источников

1. Последствия воздействий террористических групп на системы жизнеобеспечения населенных пунктов / В.Б. Коновалов, С.В. Саркисов, В.А. Вакуненко и др. // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2019. – №3-4 (129-130). – С. 78–82.
2. Об установлении категорий водных объектов рыбохозяйственного значения и особенностей добычи (вылова) водных биологических ресурсов, обитающих в них и отнесенных к объектам рыболовства: приказ Федерального агентства по рыболовству от 17 сентября 2009 года № 818, г. Москва. – URL:<https://legalasts.ru/doc/prikaz-rosrybolovstva-ot-17092009-n-8018-ob/> (дата обращения: 12.09.2019).
3. *Игнатчик В.С., Саркисов С.В., Обвинцев В.А.* Исследование коэффициентов часовой неравномерности водопотребления // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 2 (20). – С. 27–39.
4. *Анисимов Ю.П., Саркисов С.В.* Основные положения программы модернизации водопроводно-канализационного хозяйства министерства обороны российской федерации // Сборник докладов круглого стола «Современное состояние эксплуатационного содержания казарменно-жилищного фонда Министерства обороны России и инновационные пути перспектив его развития». – СПб.: СПбПУ Петра Великого, 2018. – С. 55–63.
5. Рекомендация №28E/5 Хельсинской конвенции от 15 ноября 2007 года. – URL:<https://kurs.znate.ru/docs/index-165337.html?page=2> (дата обращения: 12.09.2019).
6. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная версия СНиП 2.04.03-85. – URL:<https://hemkor.ru/images/files/documents/spravochnik/reglamety/5-sp-32.13330.2012.pdf> (дата обращения: 12.09.2019).
7. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная версия СНиП 2.04.03-84. – URL:<https://hemkor.ru/images/files/documents/spravochnik/reglamety/5-sp-31.13330.2012.pdf> (дата обращения: 12.09.2019).
8. Водный кодекс Российской Федерации: федеральный закон Российской Федерации № 74-ФЗ от 3 июня 2006 года (ред. от 27.12.2018). – URL:[http://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683/](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/) (дата обращения: 12.09.2019).

А.В. Бутырин,  
кандидат техн. наук;  
А.Г. Тарасов,  
доктор техн. наук;  
А.Ю. Цветков,  
кандидат техн. наук

## НЕЙРОНЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ШКАЛЫ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрен вариант построения нейронечеткой шкалы оценок параметров технического состояния и тенденций в их изменении. Предлагаемая шкала может быть использована при прогнозировании технического состояния автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения.

Ключевые слова: техническое состояние, искусственный интеллект, нечеткий временной ряд, нейросети.

В процессе эксплуатации автоматизированных систем подготовки и пуска (АСПП) накапливаются значительные объемы телеметрических данных, описывающие динамику их технических состояний (ТС). Анализ телеметрических данных позволяет определить текущее ТС, однако не позволяет учесть возможные тенденции в его изменении. В настоящее время недостаточно внимания уделяется построению моделей прогноза ТС [1, 4].

Применение методов искусственного интеллекта (ИИ) позволяет найти новые подходы к решению проблемы распознавания ТС компонентов АСПП ракет космического назначения (РКН), основанные на принятии решения при дефиците информации, применении теории распознавания образов, знаний и опыта экспертов, адаптации к изменяющимся внешним условиям, наличию шумов в измерениях. Нейросетевой базис позволяет уменьшить количество вычислительных процедур, выполняемых в процессе функционирования АСПП РКН в реальном масштабе времени с учетом управляющих и возмущающих воздействий.

В рамках исследований было выявлено, что существенное влияние на функционирование АСПП РКН оказывают следующие виды возмущающих воздействий [5]:

- 1) электромагнитное;
- 2) вибрационное;
- 3) тепловое;
- 4) целенаправленное воздействие персонала или диверсионных групп.

Для описания изменений нечетких параметров ТС целесообразно использовать понятие нечеткого временного ряда ТС как упорядоченной последовательности нечетких меток, зависящих от времени регистрации параметра ТС.

Кроме того, нечеткость в описании ТС также может использоваться для описания самих тенденций изменений, представляя собой в этом случае «нечеткость второго порядка». Под нечеткой тенденцией следует понимать и образы функций, таких как «рост», «падение», «стабилизация», и экспертные оценки тенденций: «колебания», «хаос». Таким образом, изменение технического состояния в процессе функционирования АСПП РКН в реальном масштабе времени возможно описать нечеткими тенденциями его параметров.

При выявлении тенденций изменения ТС АС ПП необходимо применять модификаторы «быстро», «существенно» и т.д., которые характеризуют скорость изменения ТС и в конечном счете определяют интервал времени на принятие решения для парирования отказа.

Важным этапом в обеспечении эффективности прогнозирования ТС является вычисление критерия эффективности для каждой альтернативы (варианта прогноза), которое может осуществляться только в шкале, допускающей требуемое преобразование. Каждая шкала имеет свою информативность и класс (множество) допустимых преобразований Фурье. Действительно, утверждение об измерениях имеет смысл только в том случае, если его истинность не изменяется после применения любого допустимого преобразования, а выход за пределы этих преобразований может привести к ошибочным результатам.

Для реализации процедуры прогноза ТС АС ПП на основе нечеткого временного ряда параметров ТС целесообразна разработка лингвистической шкалы ТС, причем такая шкала должна сочетать возможности как абсолютного, так и сравнительного нечеткого оценивания. Однако в такой шкале не учитываются изменения, вызванные функционированием АС ПП и опытом его эксплуатации. Накопленные данные могут быть использованы для компенсации этого недостатка путем настройки шкалы с использованием процедуры обучения нейронной сети [2, 3].

Структурная модель шкалы ТС  $S_x$  для определения абсолютных нечетких оценок параметров ТС представима в виде лингвистической переменной:

$$S_x = \langle Name\_S_x, \tilde{X}, X, G, P \rangle, \quad (1)$$

где  $Name\_S_x$  – имя шкалы ТС (или название критерия  $VK$ , по которому производится оценивание объектов  $x \in X$ );

$X$  – универсальное конечное множество векторов  $x$  параметров ТС, образующее область определения шкалы, имеющее точную нижнюю и верхнюю границы (левую минимальную и правую максимальную границы поля допуска):  $n_{\min} = \inf(X)$ ,  $n_{\max} = \sup(X)$ ;

$\tilde{X}$  – базовое конечное терм-множество абсолютных нечетких оценок (лингвистических названий градаций шкалы, порождающих оценки  $F\_Mr$ ),  $\tilde{x}_i \in \tilde{X}$ ,  $i \in [1, m]$ ;

$G$  – синтаксические правила вывода (порождения) цепочек оценочных высказываний (множеств производных термов  $\tilde{X}^*$ , не входящих в базовое терм-множество);

$P$  – семантические правила, определяющие функции принадлежности для каждого терма  $\tilde{x}_i \in \tilde{X} \cup \tilde{X}^*$ ,  $i \in [1, m^*]$ .

Отличительной особенностью предложенной сети является повторная фаззификация нечетких оценок  $\tilde{x}_i$  операцией  $\min$ -конъюнкции в первом слое сети:

$$\mu(x) = \min\{\mu(x), \mu(x)\}.$$

Структура нейронечеткой сети для реализации нечеткого отношения в виде трех продукционных правил представлена на рис. 1.

Данная сеть является пятислойной. Значения нечетких оценок параметров ТС  $\tilde{x}_i$  и  $\tilde{x}_j$  применяются к выбранным экспертно-сигмоидальным функциям принадлежности каждого из правил  $A_{ij}$ , где  $i$  – номер правила  $R_i$ ;  $j$  – номер функции принадлежности  $A_j$ .

Первый слой осуществляет *фаззификацию* входных переменных. В результате сопоставления нечетких оценок параметров ТС  $\tilde{x}_i$  и  $\tilde{x}_j$  с нечеткими числами  $A_{ij}$  получаем уровни значимости (степени истинности) условных частей  $\mu_i(x_{0j})$  (антецедентов) каждого правила. Второй слой (Т) осуществляет *нечеткую импликацию*  $R=A \rightarrow B$ , то есть выполняет агрегирование полученных степеней истинности  $\mu_i(x_{0j})$  путем применения к ним операций Т-нормы (конъюнкции). Третий слой (N) осуществляет операцию нормализации уровней  $\alpha_i$ . Четвертый слой осуществляет дефаззификацию путем применения двух операций: применения уровней  $\alpha_i$  к функциям принадлежности  $B_i$  консеквентов и приведения полученных результа-

тов к виду, удобному для вычисления выхода  $\tilde{v}$  нечеткой сети (нечеткой оценки тенденции). Пятый слой, состоящий из одного нейрона, вычисляет результирующий выход сети  $\tilde{v}_{ij}$  путем суммирования взвешенных выходов.

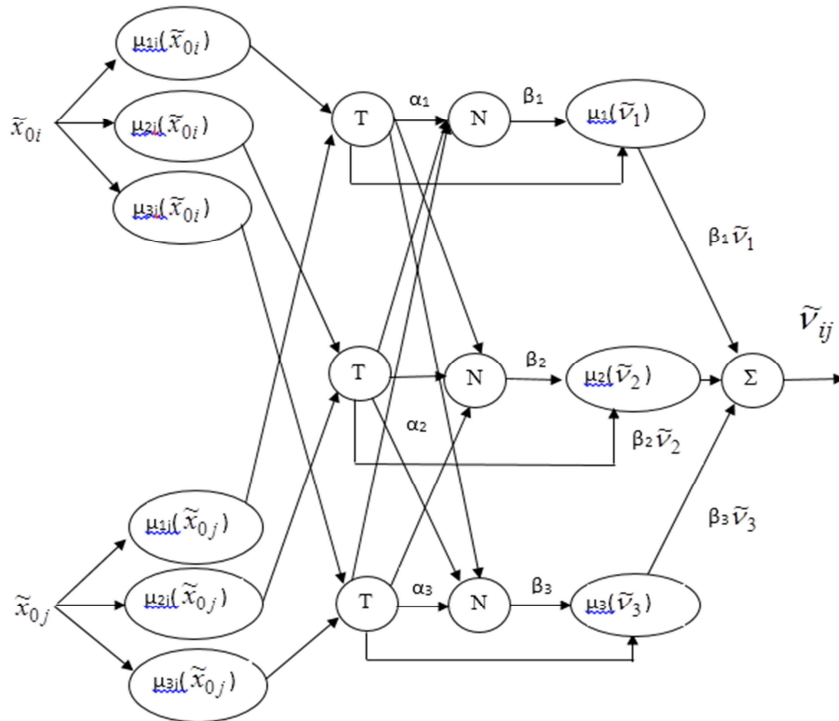


Рис. 1. Структура нейронечеткой сети

Параметрическими слоями данной сети, в которых параметры функций принадлежности  $\mu_{Aij}(x)$  и  $\mu_{Bij}(y)$  будут уточняться в процессе настройки сети, являются первый (настройка  $a_{ij}, b_{ij}$ ) и четвертый (настройка  $c_i, d_i$ ). Они реализуют операции фаззификации и дефаззификации. Совокупность всех возможных нечетких оценок  $\tilde{V}=\{\tilde{v}_{ij}\}$  образует нечеткую порядковую шкалу:

$$v = \langle Name\_TTend, \tilde{V}, \tilde{X}, X, G_v, P_v \rangle.$$

Для повышения достоверности прогноза изменения ТС АС ПП важным является определение интенсивности различия между двумя нечеткими оценками  $\tilde{x}_i, \tilde{x}_j$  шкалы. Поэтому целесообразно ввести бинарное лингвистическое отношение  $RTend(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j)$ , фиксирующее интенсивность различия, которое позволяет определить сравнительную нечеткую оценку  $\tilde{\alpha}_{ij}=RTend(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j)$ , характеризующую степень различия, например {БОЛЬШАЯ, СРЕДНЯЯ, МАЛАЯ, ОТСУТСТВУЕТ}.

Расширим шкалу ТС  $S_x$  вида (1), введя в нее нечеткие термы сравнительных оценок  $\tilde{V}$  и  $\tilde{A}$ , семантические правила которых  $P_v, P_a \in P$  определяются отношениями  $TTend$  и  $RTend$ . Полученная шкала позволяет определить не только абсолютные, но и сравнительные нечеткие оценки изменения параметров вектора ТС  $X$ . Структурная модель расширенной шкалы ТС  $S_x$  может быть представлена в виде лингвистической переменной

$$x = \langle Name\_S_x, \tilde{X}, X, G, P, \tilde{V}, \tilde{A} \rangle. \tag{2}$$

Полученная модель шкалы ТС фактически расширяет общепринятое понимание работоспособного и неработоспособного состояния, что в современных условиях отражает объективную действительность – широкое применение вычислительных средств разных

архитектур на всех уровнях АСПП РКН, а также продолжающееся усложнение состава и структуры часто показывает необходимость предупреждения перехода в состояние отказа.

На рис. 2 изображен график изменения температуры центрального процессора (ЦП) вычислительных средств (ВСр) АСПП [6] при наличии внешнего возмущающего воздействия и при нормальных условиях эксплуатации (штатный режим работы). Из графика видно, что при воздействии теплового возмущения температура ЦП постепенно поднимается до предельных значений около 100°C.



Рис. 2. Повышение температуры ЦП и активная работа функции Thermal Monitor1

При таком состоянии ухудшаются свойства полупроводников, возможно возникновение случайных сбоев и даже сгорание микросхем, после чего требуется замена компонентов. Также при ухудшении теплоотведения повышается и температура всех компонентов ВСр. Однако классический подход в определении вида ТС укажет на работоспособное состояние ВСр, так как центральный процессор все еще способен выполнять вычислительную задачу, хоть и с меньшей надежностью и более низким быстродействием.

В нижней части графика отображается 100% загрузка ЦП и постепенно увеличивающееся значение степени активности встроенной системы защиты ЦП от перегрева и повреждения. Алгоритм работы задается производителем ЦП (является скрытым от пользователя) и позволяет плавно регулировать тепловыделение ЦП за счет снижения быстродействия ЦП (пропуск тактов, снижение частоты работы ЦП, понижение питающего напряжения).

Общее снижение энергопотребления в результате работы встроенной системы защиты ЦП при воздействии теплового возмущающего фактора показывает снижение тепловыделения на 25–30% (рис. 3). Однако у данных алгоритмов регулирования есть свои ограничения, и температура ЦП будет продолжать свое увеличение пока не достигнет максимально допустимой (устанавливается производителем на этапе проектирования), после чего ВСр будет отключено от питания во избежание физического выхода из строя, выполнение задачи по предназначению будет прекращено [7].

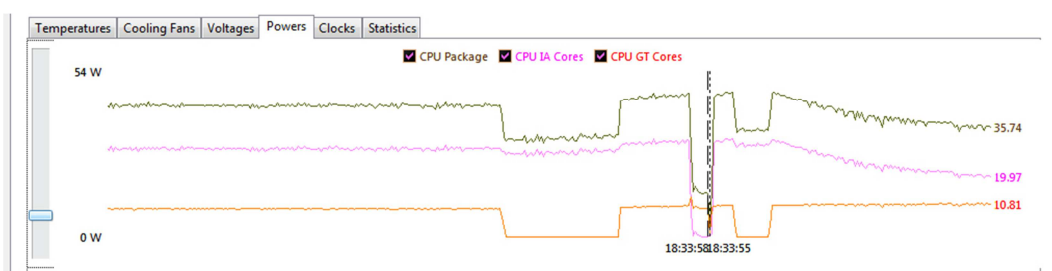


Рис. 3. Снижение потребляемой мощности

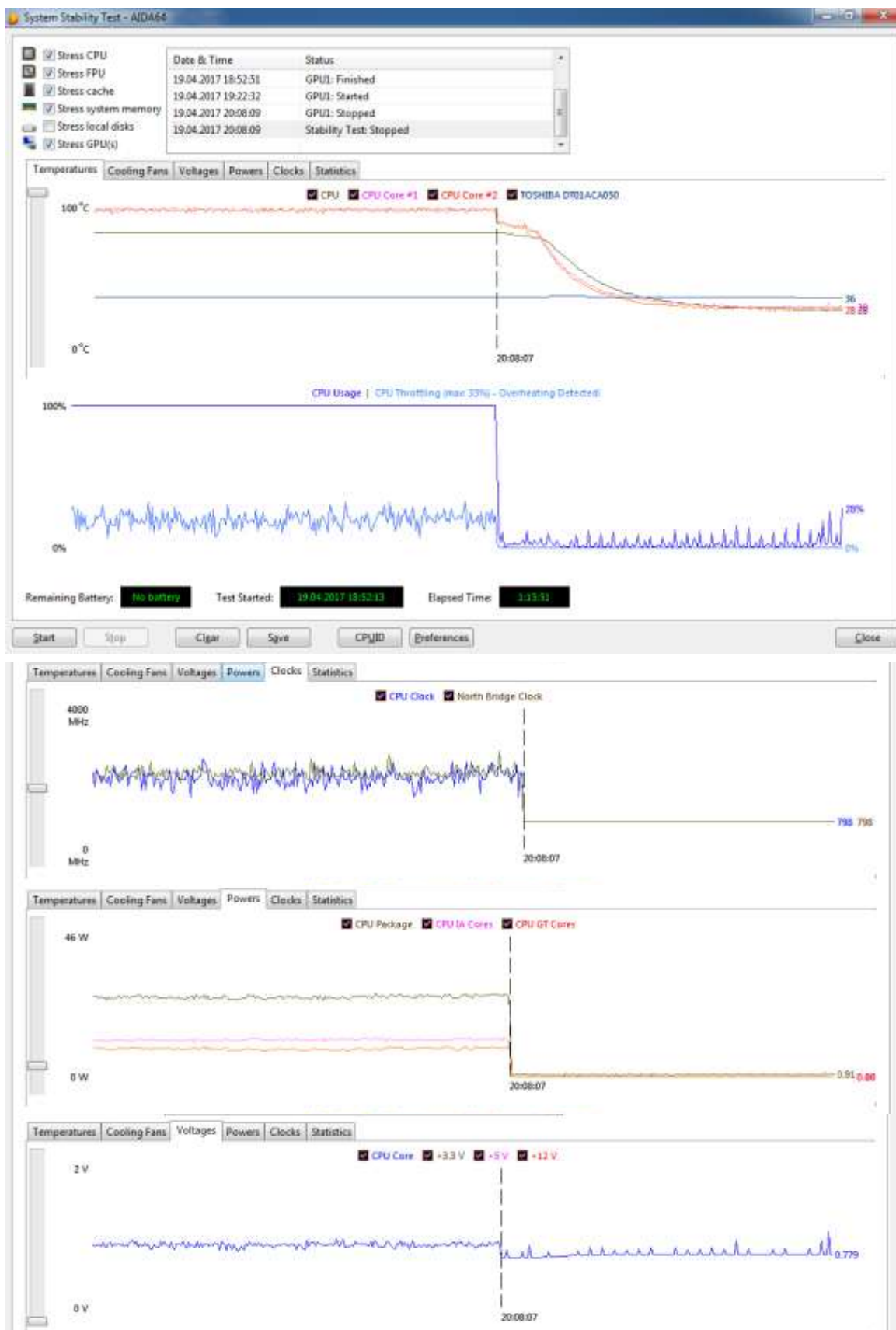


Рис. 4. Результаты парирования возмущающих воздействий

На основе полученных образов воздействия на ВСр АСПП тепловых возмущающих факторов была сформирована обучающая база для ННС.

Применение нейросетевой модели диагностирования с нечетким подходом позволило определить ухудшение параметров работы ВСр АСПП. Основываясь на анализе внутренних параметров работы ВСр и состояния среды функционирования, стало возможно принимать решение на парирование отказов. Данные решения могут быть как автоматическими, так и могут представляться оператору как рекомендованные действия в развитии нештатной ситуации.

На рис. 4 показан результат парирования отказа: остановлено вредоносное программное обеспечение, которое создавало большую вычислительную нагрузку и загружало ресурсы ВСр; снижена частота работы и питающее напряжение ЦП до минимальных значений; задействован резервный вентилятор в стойке с ВСр; снижена температура воздуха в помещении. Как видно, температура ЦП снижена, алгоритм встроенной системы защиты ЦП прекращает регулирование, ВСр продолжает выполнение задачи по предназначению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нейронечеткая шкала оценивания ТС  $S_x$  сочетает в себе возможности количественной и порядковой шкалы, кроме того, настройка параметров функций принадлежности компонентов шкалы позволяет повысить достоверность полученных оценок. На первом уровне иерархии шкалы ТС  $S_x$  нейронечеткая шкала позволяет определять абсолютные нечеткие оценки  $\tilde{x}_i$  для значений  $x \in X$ , а на втором уровне иерархии для значений  $\tilde{x}_i$  и  $\tilde{x}_j$  – нечеткие оценки их изменений  $(\tilde{v}_{ij}, \tilde{\alpha}_{ij})$ , характеризующие качественные аспекты различий или «разности первого порядка» по шкалам  $S_v, S_a$ . Такие нечеткие оценки относятся к сравнительным нечетким оценкам и могут быть рассмотрены как параметры нечетких тенденций при прогнозировании ТС АСПП. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили полученные теоретические результаты. Благодаря применению нейронечетких сетей стало возможным выявить пограничные ТС с учетом тенденций изменения измеряемых параметров объекта контроля. Своевременное выявление изменений ТС позволяет принять превентивные меры и сохранить общую работоспособность в условиях воздействия возмущающих факторов.

## Список используемых источников

1. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – СПб.: Наука и техника, 2003. – 384 с.
2. Афанасьева Т.В. Нечеткие временные ряды в системах управления сложными процессами // Информационные технологии: межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – С. 37–39.
3. Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В., Юнусов Т.Р. Нечеткие временные ряды как инструмент для оценки и измерения динамики процессов // Датчики и системы. – 2007. – № 12. – С. 46–51.
4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
5. Бутырин А.В. Диагностирование многоканальных распределенных вычислительных подсистем автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения с помощью интегральных показателей // Сборник статей III Молодежной конференции РУСНЦ РАН «Молодежь. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе». – Екатеринбург: АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова», 2016. – Ч. 2. – С. 267–275.



6. *Бутырин А.В., Тарасов А.Г., Минаков Е.П.* Применение робототехнических систем в автоматизированных системах подготовки и пуска ракет космического назначения для реализации органолептического контроля // *Инновационный арсенал молодежи: труды Седьмой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «КБ Арсенал».* – СПб.: Инфо-да, 2016. – С. 41–43.

7. *Бутырин А.В.* Методика диагностирования вычислительных подсистем в составе автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения // *Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники».* – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т.1. – С. 275–281.

С.Н. Буяков,  
*кандидат техн. наук;*  
А.Н. Миргородский,  
*кандидат техн. наук;*  
Д.А. Эльцофон

## **ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СООРУЖЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ**

В публикации рассматривается сооружение как средство эксплуатации изделий военной техники, предназначенное для создания требуемых условий эксплуатации. Оценивается готовность сооружения обеспечивать и поддерживать требуемую температуру в помещениях в зависимости от теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Представлены функциональные зависимости времени отказа изделий военной техники от температуры окружающей среды и уровня теплоизоляции ограждающих конструкций.

Ключевые слова: сооружение, средства эксплуатации, изделия военной техники, коэффициент готовности, время отказа, температурный режим, теплотехнические характеристики, теплоизоляция ограждающих конструкций, система отопления.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В рамках реализации госпрограммы вооружения ГПВ-2027 проводится совершенствование, модернизация и переоснащение Вооруженных сил РФ новыми образцами вооружений, а также средств их эксплуатации, к которым согласно [1] относятся в том числе здания и сооружения, основная задача которых – это обеспечение эксплуатации изделия военной техники (ИВТ), т.е. создание условий, отвечающих требованиям эксплуатационной документации ИВТ. Несоответствие условий эксплуатации ИВТ согласно [2] трактуется как «неработоспособное состояние», что в соответствии с [3] является «отказом». При эксплуатации ИВТ, в особенности тех, у которых коэффициент готовности применения по назначению  $K_g \rightarrow 1$  [4], наличие отказов недопустимо. Как правило, достижение такого уровня надежности достигается многократным резервированием ИВТ, однако в случае, когда все ИВТ, и основные, и резервные, эксплуатируются в одном сооружении и условия эксплуатации в данном сооружении не выполняются, то это приводит к отказу всех ИВТ и может привести к срыву выполнения боевой задачи [5].

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ СООРУЖЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ТРЕБУЕМОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА**

Обеспечение требуемых условий эксплуатации ИВТ в сооружениях возложено на технические системы. Поддержание температурного режима в помещениях сооружения осуществляется системой отопления (СО), функционирование которой определяется параметрами окружающей среды и величинами термических сопротивлений ограждающих конструкций сооружения, что позволяет рассматривать систему отопления и ограждающие конструкции сооружения как единую энергетическую систему [6–7]. На основании требований конструкторской документации к условиям эксплуатации ИВТ (температура, влажность) и требований к безотказности ИВТ необходимо оценить коэффициент готовности сооружения по обеспечению требуемого температурного режима в помещениях.

Исходя из определения, для сооружения как средства эксплуатации ИВТ коэффициент готовности представляет собой отношение времени исправной работы (наработки на отказ) к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев объекта (времени восстановления), взятых за один и тот же календарный срок:

$$K_{\Gamma} = \frac{t_{\text{но}}}{t_{\text{но}} + t_{\text{от}}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{но}}$  – время нормальной работы (наработки на отказ), ч;

$t_{\text{от}}$  – время отказа (когда  $T_{\text{п}} \leq T_{\text{кр}}$ ), ч.

При рассмотрении коэффициента готовности сооружения под наработкой на отказ понимается время  $t_{\text{но}}$ , в течение которого в помещениях сооружения обеспечивается необходимый температурный режим, обусловленный работой системы отопления ( $T_{\text{п}} \geq T_{\text{кр}}$ ),  $T_{\text{п}}$  – температура воздуха в помещениях,  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура воздуха в помещениях сооружения, при которой и ниже которой невозможно (затруднено) применение ИВТ и нормальная жизнедеятельность личного состава дежурных смен. Для электронной вычислительной аппаратуры, к которым относится большинство ИВТ, критической является температура точки росы, при достижении которой на элементах ИВТ будет конденсироваться влага, приводящая, как правило, к электрическому пробое и выходу из строя аппаратуры.

Время  $t_{\text{но}}$  – это сумма времени наработки на отказ (времени нормальной работы системы отопления, равной времени отопительного периода  $t_{\text{оп}}$ ) и времени остывания помещений  $t_{\text{o}}$  до критической температуры в случае аварии на системе теплоснабжения сооружения. Время остывания помещений обусловлено инерционностью тепловых процессов и во многом зависит от температуры окружающей среды и уровня теплоизоляции сооружения (коэффициента аккумуляции  $k_{\text{ак}}$ , принимаемого по табл. 2 [8]). Тепловая инерция в строительстве – это свойство ограждающих конструкций сохранять относительно постоянную температуру внутренней поверхности при периодических изменениях внешних тепловых воздействий.

На основании табл. 1 [8] были получены функциональные зависимости времени остывания  $t_{\text{oi}}$ , ч, от  $i$ -го значения температуры окружающей среды для всех возможных температур окружающей среды во время отопительного периода:

$$k_{\text{ак}} = \begin{pmatrix} 20 & 40 & 60 \\ a_i T_{\text{кр}} + b_i & k_i T_{\text{кр}} + l_i & m_i T_{\text{кр}} + n_i \\ a_{i+1} T_{\text{кр}} + b_{i+1} & k_{i+1} T_{\text{кр}} + l_{i+1} & m_{i+1} T_{\text{кр}} + n_{i+1} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{i+n} T_{\text{кр}} + b_{i+n} & k_{i+n} T_{\text{кр}} + l_{i+n} & m_{i+n} T_{\text{кр}} + n_{i+n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$t_{\text{oi}} = \begin{matrix} -35 \leq i \leq 8 \\ \text{ } \end{matrix} \text{ } ^{\circ}\text{C}$

Следовательно, наработка на отказ составит, ч

$$t_{\text{но}} = t_{\text{оп}} + t_{\text{oi}}. \quad (3)$$

Под временем отказа  $t_{\text{от}}$  сооружения с учетом температурного фактора понимается время, в течение которого сохраняется температура воздуха в помещениях ниже критической температуры ( $T_{\text{п}} \leq T_{\text{кр}}$ ). Оно определяется как сумма времени остывания от критической температуры до минимальной температуры, достигаемой за время проведения ремонта на сетях теплоснабжения и времени нагрева (натопы)  $t_{\text{нат}}$  от минимальной температуры, до которой остыло помещение, до достижения критической температуры помещения  $T_{\text{п}} \geq T_{\text{кр}}$ :

$$t_{\text{от}} = t_{\text{п}} - t_{\text{o}} + t_{\text{нат}}. \quad (4)$$

Здесь  $t_p$  – время ремонта на сетях теплоснабжения, зависящее от диаметра трубопровода (без учета времени на поиск места аварии), которое высчитывается по эмпирической формуле, ч [8],

$$t_p \approx 6 \cdot (1 + (0,5 + 1,5 \cdot l_{сз}) \cdot d_{тр}^{1,2}), \quad (5)$$

где  $l_{сз}$  – расстояние между секционирующими задвижками, км;

$d_{тр}$  – диаметр трубопровода, м.

На рис. 1 показано, как влияет коэффициент аккумуляции сооружения на время отказа при температуре окружающей среды  $-30^\circ\text{C}$ .

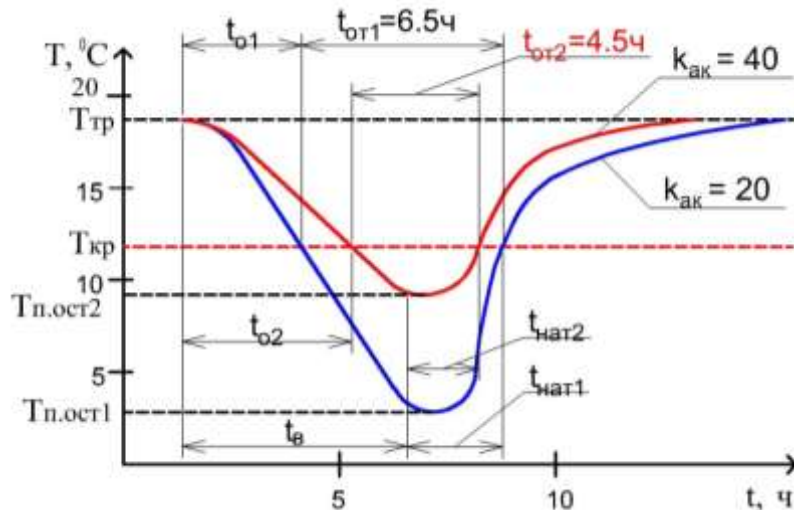


Рис. 1. Зависимость температуры помещений от времени отказа

Расчитав время ремонта, на основании полученных функциональных зависимостей (2) представляется возможным определить, до какой температуры  $T_{п.ост.i}$  остынет помещение в зависимости от температуры окружающей среды и коэффициента аккумуляции сооружения,  $^\circ\text{C}$ .

$$T_{п.ост.i} = \begin{pmatrix} k_{ак} = \begin{matrix} 20 & 40 & 60 \\ c_i t_p + d_i & f_i t_p + g_i & h_i t_p + p_i \\ c_{i+1} t_p + d_{i+1} & f_{i+1} t_p + g_{i+1} & h_{i+1} t_p + p_{i+1} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{i+n} t_p + d_{i+n} & f_{i+n} t_p + g_{i+n} & h_{i+n} t_p + p_{i+n} \end{matrix} \\ -35 \leq i \leq 8 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Время, необходимое на нагрев до критической температуры  $T_{кр}$  остывшего помещения после восстановления теплоснабжения, зависит от его температуры  $T_{п.ост.i}$  и скорости нагрева  $v_{нат.i}$ , Ч:

$$t_{нат.i} = \frac{T_{кр} - T_{п.ост.i}}{v_{нат.i}}. \quad (7)$$

Скорость нагрева помещения зависит от коэффициента аккумуляции сооружения и температуры окружающей среды и определяется на основании полученных функциональных зависимостей:

$$V_{\text{нат.}i} = \begin{pmatrix} 20 & 40 & 60 \\ q_i T_{\text{oc},i} + r_i & u_i T_{\text{oc},i} + s_i & y_i T_{\text{oc},i} + z_i \\ q_{i+1} T_{\text{oc},i+1} + r_{i+1} & u_{i+1} T_{\text{oc},i+1} + s_{i+1} & y_{i+1} T_{\text{oc},i+1} + z_{i+1} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{i+n} T_{\text{oc},i+n} + r_{i+n} & u_{i+n} T_{\text{oc},i+n} + s_{i+n} & y_{i+n} T_{\text{oc},i+n} + z_{i+n} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Таким образом, выражение (1) для коэффициента готовности сооружения по обеспечению требуемого температурного режима  $K_{ri}$  для  $i$ -й температуры окружающей среды записывается следующим образом:

$$K_{ri} = \frac{t_{\text{пр}} + t_{\text{oi}}}{t_{\text{оп}} + t_{\text{oi}} + t_{\text{оти}}} \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить коэффициент готовности по обеспечению требуемого температурного режима для сооружений с различным коэффициентом аккумуляции для всех значений температур окружающей среды за время отопительного периода.

Учитывая, что большинство сооружений, предназначенных для эксплуатации ИВТ, в настоящее время не соответствуют предъявляемым требованиям [9–13] и имеют коэффициент аккумуляции 20, то для сооружений, находящихся в средней полосе РФ, коэффициент готовности для рассматриваемого диапазона температур окружающей среды в течение отопительного периода выглядит следующим образом (рис. 2). Ниже указаны расчетные параметры климата:

- температура в помещениях  $T_{\text{п}}$ , °C .....18
- температура критическая (точка росы)  $T_{\text{кр}}$ , °C .....12
- время безотказной работы  
(продолжительность отопительного периода  $t_{\text{оп}}$ ), сут(ч)..... 212 (5088)
- коэффициент аккумуляции сооружения  $k_{\text{ак}}$  .....20
- расстояние между секционирующими задвижками  $l_{\text{сз}}$ , км .....1,1
- диаметр трубопровода теплоснабжения  $d_{\text{тр}}$ , м .....0,159
- расчетный диапазон изменения температуры  
окружающей среды за отопительный период  $T_{\text{oc}}$ , °C.....-35 ≤  $T_{\text{oc}}$  ≤ 8
- относительная влажность воздуха в помещениях  $\phi$ , % .....70

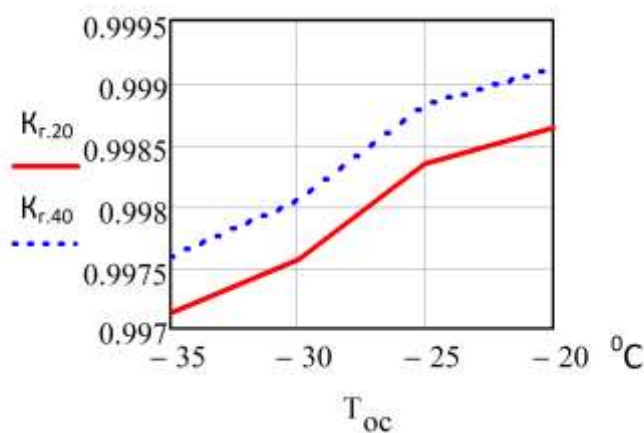


Рис. 2. Зависимость коэффициента готовности сооружения от температуры окружающей среды и коэффициента аккумуляции

Из рис. 2 видно, что для сооружений с коэффициентом аккумуляции 20 коэффициент готовности при температурах окружающей среды от 0<sup>0</sup>С и ниже не соответствует требуемому (нижняя кривая).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение коэффициента аккумуляции при модернизации существующих сооружений позволит повысить коэффициент готовности сооружения по обеспечению требуемого температурного режима как одной из составляющих требуемых условий эксплуатации ИВТ (рис. 2, верхняя кривая) и приведет к снижению теплотребования сооружением, что позволит снизить затраты на эксплуатацию сооружения и тем самым повысить его энергоэффективность.

## Список используемых источников

1. ГОСТ РВ 0101-001-2007. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения. – Введ. 01.01.2008. – М.: Стандартинформ, 2007. – 23 с.
2. ГОСТ РВ 52403—2005. Свойства и состояния систем, комплексов и образцов военной техники. Термины и определения. – Введ. 01.06.2007. – М.: Стандартинформ, 2006. – 16 с.
3. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения (взамен ГОСТ 27.002-89). – Введ. 01.03.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 25 с.
4. *Миргородский А.Н., Авсюкевич Д.А., Ниезова С.Е.* Повышение эффективности эксплуатации сооружений командного пункта на основе термозкономического метода. – Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 71–75.
5. Термозкономический метод обеспечения требуемых тепловых режимов эксплуатации специальных сооружений / Д.А. Авсюкевич, А.Н. Миргородский, С.Н. Буяков и др. // Специальные сооружения и объекты: актуальные проблемы изысканий, строительства и эксплуатации: сборник научных статей межвузовской научно-практической конференции – СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2017. – С. 117–121.
6. Оптимизация параметров функционирования системы отопления и теплозащиты зданий и сооружений на основе термозкономического метода / Д.А. Авсюкевич, С.Н. Буяков, А.В. Литвинюк и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 7–13.
7. *Табунщиков Ю.А., Бродач М.М.* Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
8. МДС 41-6.2000. Организационно-методические рекомендации по подготовке к проведению отопительного периода и повышению надежности систем коммунального теплоснабжения в городах и населенных пунктах Российской Федерации. – Введ. 06.09.2000. – М.: Госстрой России, 2000. – 14 с.
9. СП 131.13330.2012. Актуализированная версия СНиП 23-01-99\* Строительная климатология. – Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 109 с.
10. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 – Введ. 01.07.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 108 с.
11. СП 60.13330.2016 Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» (взамен СНиП 41-01-2003). – Введ. 17.06.2017. – М.: Минрегион России, 2012.

12. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – Введ. 13.11.2009.– М.: Минэнерго РФ, 2009. – 117 с.

13. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: закон Российской Федерации от 23.11.2009 № 261-ФЗ // Российская газета. – 2009. – 27 ноября.

Е.П. Вишняков,  
кандидат техн. наук; доцент;  
А.В. Ильин,  
кандидат техн. наук;  
М.А. Швайковский,  
кандидат техн. наук, доцент

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ, ШУНТИРУЮЩЕЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

Проведен анализ параметров шунта отключения индуктивной нагрузки постоянного тока, зависимости коммутационного напряжения от структуры и параметров шунта, характеристики процесса отключения индуктивной нагрузки методом шунтирования.

Установлено, что в процессе отключения, близком к оптимальному, выключатель должен вести себя как последовательная  $rC$ -цепь. Параметры шунтирующей цепи зависят как от параметров нагрузки  $r$  и  $L$ , так и от емкости конденсатора, установленного в цепи шунтирования. Подавление тока перед минимизацией коммутационного напряжения реализуется благодаря приоритету минимизации протекшего заряда.

Предложено вместо жестких ограничений на характеристики процесса отключения более мягкие, интегральные ограничения. Вид напряжения, найденного при этих условиях, позволяет определить структуру шунта и параметры его элементов.

Ключевые слова: отключение индуктивной нагрузки постоянного тока, коммутационное напряжение, метод шунтирования, параметры шунта, выключатель постоянного тока, характер переходного процесса.

Эффективным средством воздействия на процесс отключения индуктивной нагрузки постоянного тока является шунтирование выключателя. Структура шунта и параметры его элементов определяются требованиями, предъявляемыми к процессу отключения.

Основными требованиями являются уменьшение коммутационного напряжения [1, 4] и снижение величины электрического заряда, протекшего по цепи за время отключения [3].

Ниже изложен подход к определению структуры и выбору параметров шунта, обеспечивающего формирование процесса отключения в соответствии с перечисленными требованиями, основанный на построении математического описания переходного процесса, развивающегося после размыкания контактов и перехода тока в шунт, и исследовании его с помощью теории вариационного исчисления [5].

На рис. 1 показана схема отключения. Буквой  $B$  обозначен выключатель вместе с шунтом,  $u_B$  – коммутационное напряжение на выключателе.

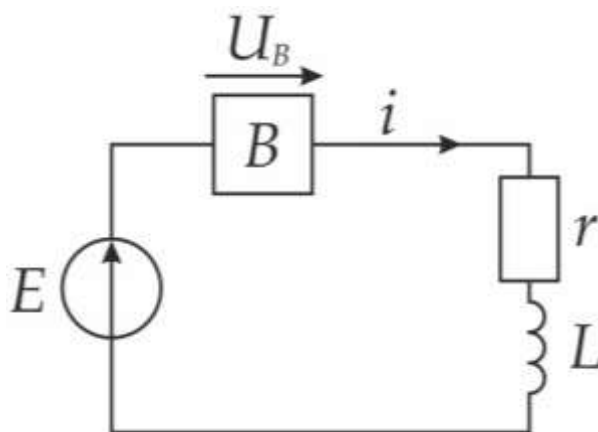


Рис. 1. Схема отключения выключателя постоянного тока индуктивной нагрузки



Уравнение процесса отключения имеет вид:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} + ri + u_B &= E; \\ \frac{dg}{dt} &= i; \\ i(0) &= \frac{E}{r}; \\ g(0) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $g$  – заряд, протекающий по цепи.

Коммутационное напряжение зависит от структуры и параметров шунта и, в свою очередь, является фактором, оказывающим определяющее воздействие на изменение тока в цепи и вид процесса отключения [6]. Для того чтобы охарактеризовать величины коммутационного напряжения и заряда в цепи за время  $T$  наблюдения процесса, необходимо ввести интегралы:

$$\begin{aligned} \int_0^T u_B^2(t) dt, \\ \int_0^T g_B^2(t) dt. \end{aligned}$$

В соответствии с принятыми требованиями к качеству процесса отключения, составим критерий:

$$J = k_1 \int_0^T u_B^2(t) dt + k_2 \int_0^T g_B^2(t) dt, \quad (2)$$

где  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты, показывающие долю каждого интеграла в критерии качества.

Задача состоит в определении такого закона изменения напряжения  $u_B$ , при котором за время  $T$  ток в цепи спадет как можно ближе к нулю, а критерий (2) примет минимальное значение.

Таким образом, особенность предлагаемого подхода в том, что вместо жестких ограничений на характеристики процесса отключения типа ограничений по модулю вводятся более мягкие, интегральные ограничения [5, 7]. Вид напряжения  $u_B$ , найденного при этих условиях, позволяет определить и структуру шунта, и параметры его элементов.

Пусть  $u_{B0}(t), i_0(t), g_0(t)$  – переменные, характеризующие оптимальный в смысле критерия (2) процесс отключения, а  $\tilde{u}_{B0}(t), \tilde{i}_0(t), \tilde{g}_0(t)$  – возможные отклонения от него. Сформируем переменные:

$$\begin{aligned} u_B &= u_{B0} + \varepsilon \tilde{u}_B, \\ i &= i_0 + \varepsilon \tilde{i}, \\ g &= g_0 + \varepsilon \tilde{g}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставив их в уравнение процесса (1), получим выражения для отклонений:

$$L \frac{d\tilde{i}}{dt} + r\tilde{i} + \tilde{u}_B = 0; \quad \frac{d\tilde{g}}{dt} = \tilde{i},$$

$$L \frac{d\tilde{i}}{dt} + r\tilde{i} + \tilde{u}_B = 0,$$

$$\frac{d\tilde{g}}{dt} = \tilde{i}$$

с нулевыми начальными условиями и с решением:

$$\tilde{i}(t) = \int_0^t \Phi_{11}(t, \tau) \left(-\frac{1}{L}\right) \tilde{u}_B(\tau) d\tau; \quad \tilde{g}(t) = \int_0^t \Phi_{21}(t, \tau) \left(-\frac{1}{L}\right) \tilde{u}_B(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $\Phi_{11}(t, \tau)$ ,  $\Phi_{21}(t, \tau)$  – фундаментальные решения системы уравнений для отклонений.

Подставив переменные (3) в выражение (2), установим, что критерий  $J$  теперь является функцией величины  $\varepsilon$ . Минимум критерия будет обеспечен приравнением к нулю производной при условии  $\varepsilon = 0$  [5]:

$$\frac{dJ}{d\varepsilon} = 0. \quad (5)$$

Выполняя дифференцирование по  $\varepsilon$  и подставляя  $\tilde{i}$  и  $\tilde{g}$  из (4), получим следующее выражение:

$$\int_0^T \int_0^t u_B(\tau) \left(-\frac{1}{L}\right) \Phi_{21}(t, \tau) k_2 g_0(t) d\tau dt + \tilde{u}_B(t) k_1 u_{B0}(t) = 0. \quad (6)$$

После изменения пределов интегрирования и замены переменных  $t$  и  $\tau$  обозначим

$$\int_t^T \Phi_{21}(\tau, t) k_2 g_0(\tau) d\tau = P(t). \quad (7)$$

Выражение (6) после этого примет вид

$$\int_0^T u_B(t) \left[ \left(-\frac{1}{L}\right) P(t) + k_1 u_{B0}(t) \right] dt = 0,$$

откуда

$$u_{B0}(t) = \frac{1}{k_1 L} P(t). \quad (8)$$

Дифференцируя выражение (7), можно обнаружить, что переменные  $i_0$ ,  $g_0$ ,  $P$  связаны между собой:

$$P(t) = p_{11}(t) i_0(t) + p_{12}(t) g_0(t). \quad (9)$$

где функции  $p_{11}(t)$  и  $p_{12}(t)$  представляют решение системы дифференциальных уравнений типа Риккати:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_{11} &= 2\frac{r}{L} p_{11} - 2p_{12} + p_{11}^2 \frac{1}{L^2 k_1}; \\ \dot{p}_{12} &= \frac{r}{L} p_{12} - p_{22} + p_{11} p_{12} \frac{1}{L^2 k_1}; \\ \dot{p}_{22} &= -k_2 + p_{12}^2 \frac{1}{L^2 k_1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

с начальными условиями на переменные  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{22}$  в момент  $T$ .

Анализ показывает, что решения уравнений (10) быстро устанавливаются при  $t < T$  к не зависящим от начальных условий значениям, а именно:

$$\left. \begin{aligned} p_{11} &= Lk_1 \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}; \\ p_{12} &= Lk_1 \left( -r + \sqrt{r^2 + 2L \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} \right); \\ p_{22} &= k_1 \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \sqrt{r^2 + 2L \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Следовательно, в выражении (9) можно заменить  $p_{11}(t)$ ,  $p_{12}(t)$  на их установившиеся значения (11). Подставив после этого (9) в соотношение (8), получим, что близкое к оптимальному напряжение на выключателе пропорционально току  $i_0(t)$  и заряду  $g_0(t)$ :

$$u_{в0}(t) \cong \left( -r + \sqrt{r^2 + 2L \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} \right) i_0(t) + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} g_0(t).$$

Поэтому можно считать, что в процессе отключения, близком к оптимальному, выключатель должен вести себя как последовательная цепь с параметрами:

$$C_0 = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}; \quad r_0 = \sqrt{r^2 + 2 \frac{L}{C_0}} - r. \quad (12)$$

Таким образом, структура и параметры шунта определены.

Как показывает соотношение (12), близкие к оптимальным в смысле критерия (2) параметры шунтирующей цепи зависят как от параметров нагрузки  $r$  и  $L$ , так и от весовых коэффициентов критерия  $k_1$ ,  $k_2$ . Выбор этих коэффициентов определяется желаемым весом соответствующих слагаемых в критерии и обычно сложен [7].

В рассматриваемом случае дело упрощается тем, что от весовых коэффициентов непосредственно зависит лишь емкость конденсатора  $C_0$ , причем она определяется их отношением. Величина емкости  $C_0$  здесь фактически является мерой предпочтения первого слагаемого в критерии перед вторым. Поэтому при данном подходе целесообразно назначать не весовые коэффициенты в критерии, а непосредственно емкость конденсатора.

Верхнюю границу значений емкости позволяет получить, например, требование близости характера переходного процесса к критическому.

Учитывая, что после размыкания контактов в цепи оказывается сопротивление

$$r + r_0 = \sqrt{r^2 + 2 \frac{L}{C_0}},$$

емкость  $C_0$  можно выбрать из следующего условия:

$$\sqrt{r^2 + 2 \frac{L}{C_0}} = r_{кр} = 2 \sqrt{\frac{L}{C_0}},$$

откуда

$$C_0 = 2 \frac{L}{r^2}.$$

Сопротивление шунта  $r_0$  в этом случае, согласно выражению (12), равно

$$r_0 = r\sqrt{2} - r = 0,414 r.$$

Нижнюю границу значений емкости можно выбрать с использованием известного [1] соотношения

$$C_0 = \frac{L}{r^2} \cdot \frac{1}{k^2},$$

где  $k$  – допустимый коэффициент перенапряжения на конденсаторе,

$$k = \frac{U_{сдоп}}{E}.$$

С учетом того, что  $k$  обычно больше единицы, из (12) получим для  $r_0$  следующее уравнение:

$$r_0 \cong r(k\sqrt{2} - 1).$$

Так как реально выбирается  $C_0 \ll 1$ , в критерии всегда реализуется гораздо бóльший приоритет минимизации протекшего заряда, а следовательно, быстрейшего подавления тока перед минимизацией коммутационного напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что шунт, обеспечивающий совместную минимизацию коммутационного напряжения и протекшего количества электричества, представляет собой последовательную цепь. В отличие от известного способа шунтирования контактов резистором [1, 2] здесь отпадает необходимость в отключении остаточного тока. С другой стороны, по сравнению с чисто конденсаторным шунтом, применение построенного шунта обеспечивает более демпфированный и быстро затухающий процесс отключения с приемлемыми перенапряжениями.

## Список используемых источников

1. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. – М.: Энергия, 1973. – 264 с.
2. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Академия, 2014.
3. Папков Б.В., Осокин В.Л. Вероятностные и статистические методы оценки надежности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры, задачи: учеб. пособие. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 423 с.
4. Вишняков Е.П., Швайковский М.А., Ильин А.В. Определение показателей надежности диагностируемого электрооборудования // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12, ч. 2. – С. 256–260 – URL:<http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41079>. – (дата обращения: 11.01.2017).
5. Васильев К.К. Теория автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд. – Ульяновск, 2001. – 98 с.
6. Сибикин Ю.Д. Основы расчета электрических сетей: учеб. пособие. – М.: РадиоСофт, 2018. – 365 с.
7. Лоханин Е.К. Методы моделирования, расчета и анализа стационарных и переходных режимов в энергосистемах. – СПб.: Знак, 2013 – 455 с.

А.Е. Воронин;  
Н.Е. Пешехонов,  
кандидат техн. наук, доцент

## **УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБЪЕКТА ПРИ НОРМИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Рассмотрены вопросы выбора показателя надежности для нормирования системы электроснабжения с учетом особенностей функционирования объекта. Проведен анализ оценки надежности систем электроснабжения (СЭС) с помощью различных показателей надежности за определенные промежутки времени. Выявлена зависимость коэффициента оперативной готовности от коэффициента готовности при изменении интенсивности восстановления.

Ключевые слова: признаки специального объекта, особенности функционирования, показатель надежности, восстанавливаемость систем объекта, коэффициент готовности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

С принятием государственной программы перевооружения осуществляются технологическая модернизация существующих объектов (СО) и ввод в эксплуатацию СО нового поколения, характеризующихся ростом энерговооруженности, внедрением непрерывных технологических процессов, автоматизированных систем управления и других электроприемников, при эксплуатации которых предъявляются повышенные требования к бесперебойности электроснабжения и качеству электроэнергии. Характерной особенностью таких потребителей является широкое применение радиоэлектронной аппаратуры, электронно-вычислительных машин, микропроцессорных систем управления технологическим процессом. С этим связаны, в первую очередь, увеличение уровня восприимчивости электроприемников СО к различного рода нарушениям электроснабжения, а также увеличение количества и суммарной мощности ответственных потребителей, которые предъявляют повышенные требования к надежности, бесперебойности электроснабжения.

Вследствие высоких требований технологических потребителей СО к качеству электроэнергии, бесперебойности и непрерывности электроснабжения в различных режимах функционирования, возникает необходимость анализа предъявляемых требований к надежности СЭС и путей их обеспечения.

### **ВЫБОР НОРМАТИВНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В настоящее время в тактико-техническом задании на создание специального объекта (СО) его надежность и, соответственно, надежность систем, обеспечивающих его работу, нормируются различными показателями надежности (ПН), такими как вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности. Для выбора того или иного показателя надежности, который достоверно охарактеризует степень соответствия СО заданным требованиям, необходимо учитывать основные особенности функционирования создаваемого объекта, такие как [1]:

– режим применения СО (непрерывного длительного применения, многократного циклического применения, однократного применения);

- восстанавливаемость СО (восстанавливаемым или невосстанавливаемым);
- вид назначения СО (конкретного или общего назначения) и т. д.

При выборе необходимого ПН одним из приоритетных признаков является режим применения объекта. От данного признака зависит, какой ПН целесообразно выбрать при нормировании не только для СО в целом, но и систем, входящих в его состав. Например, объекты противоракетной обороны должны характеризоваться таким ПН, как вероятность безотказной работы, так как данные объекты находятся в работе постоянно и только в короткие промежутки не применяются по назначению (техническое обслуживание, ремонтно-восстановительные работы и др.). Уровень надежности таких объектов, как стартовые комплексы, на которых время ожидания превышает время использования по назначению и они находятся в работе относительно небольшой промежуток времени (время подготовки и запуска ракеты космического назначения), необходимо задавать коэффициентом оперативной готовности. Нормировать показатель надежности СО только коэффициентом готовности нецелесообразно, потому что он в полной мере не позволяет оценить возможность СО по выполнению поставленной задачи.

Наряду с режимом применения необходимо учитывать также основной признак объекта – возможность восстановления работоспособного состояния образца после отказа на месте эксплуатации. В зависимости от возможности восстановления работоспособного состояния после отказа системы электроснабжения (СЭС), СО делятся на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. СЭС СО относится к группе восстанавливаемых, если проведение операций восстановления технически возможно и предусмотрено эксплуатационной документацией с учетом времени восстановления нормального процесса функционирования СО без ущерба для выходного эффекта.

Показатель надежности, который непосредственно учитывает восстанавливаемость, называется коэффициентом готовности. *Коэффициент готовности* ( $K_r$ ) – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени [2].

Если не учитывать признак восстанавливаемости, то надежность СЭС СО, как правило, задается вероятностью безотказной работы. *Вероятность безотказной работы* ( $P$ ) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет [2].

Наиболее комплексным ПН является коэффициент оперативной готовности, который включает в себя вышеприведенные показатели надежности. *Коэффициент оперативной готовности* ( $K_{op}$ ) – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени [2].

Авторами проведен анализ оценки надежности СЭС с помощью различных показателей надежности за определенные промежутки времени на примере схемы (рис. 1,а), состоящей из кабельной линии электропередач (КЛЭП) длиной 3 км; шин – 10 кВ; вакуумного выключателя – 10 кВ; силового трансформатора – 10/0,4 кВ; сборных шин – 0,4 кВ; автоматических выключателей.

Надежность данной СЭС рассчитана с помощью логико-вероятностного метода, основанного на построении дерева отказов. Этот метод получил распространение при исследованиях надежности технологических схем атомных электростанций, включая схемы гарантированного питания собственных нужд, где предъявляются чрезвычайно высокие требования по надежности, а принципы построения систем электроснабжения близки по содержанию к принципам построения систем электроснабжения СО [3].

Модель надежности электроснабжения в виде дерева отказов (рис. 1,б) представляет собой логико-вероятностную модель причинно-следственных связей отказа электроснабжения потребителей с отказами элементов СЭС и с другими событиями, которые могут вызвать отказ систем электроснабжения.

Учитывая, что система является восстанавливаемой, кроме вышесказанных ПН, необходимо определить интенсивность восстановления СЭС, которая является одним из показателей ремонтпригодности и восстанавливаемости.

*Интенсивность восстановления* ( $\mu$ ) – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено [1].

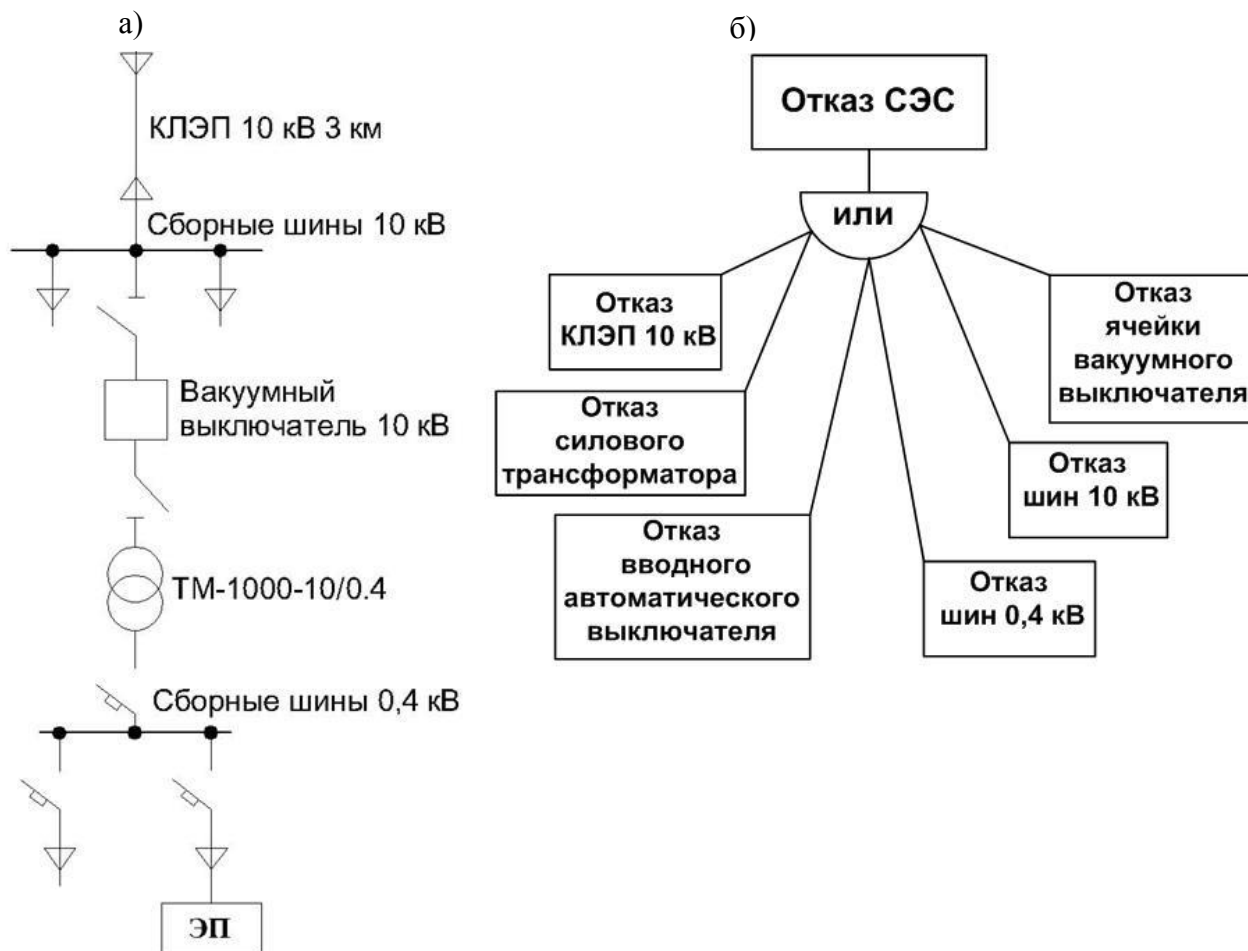


Рис. 1. Схема для расчета надежности СЭС (а) и дерево отказа СЭС (б)

При оценке показателя надежности СЭС принимается следующее условие: система считается восстанавливаемой и рассматривается во временном интервале, равном 720 ч (1 месяц). Исходные данные, необходимые для определения ПН, приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

#### Интенсивности отказов и восстановления элементов СЭС

Элемент	$\lambda$ , 1/месяц	$\mu$ , 1/месяц
КЛЭП (длина 3 км.)	0,2761	28,8
Шины 10 кВ	0,0045	180,1
Вакуумный выключатель	0,0041	90,2
Трансформатор 1000 кВ · А	0,0014	17,1
Автоматический выключатель	0,0523	180,3
Сборные шины 0,4 кВ	0,0073	180,1

В процессе оценки надежности СЭС проведен анализ зависимости коэффициента оперативной готовности  $K_{ор}$  от коэффициента готовности  $K_r$  путем изменения интенсивности восстановления. Результаты анализа сведены в табл. 2. Для проведения анализа интенсивность восстановления изменялась в пределах  $\pm 20\%$  с шагом 5%.

Таблица 2

**Результаты расчета коэффициента готовности и коэффициента оперативной готовности при изменении  $\mu \pm 20\%$**

$\Delta\mu, \%$	$\mu, 1/\text{месяц}$	$K_r$	$P(t)$	$K_{ор}$	$\Delta = (P(t) - K_{ор}) \cdot 100\%$
20%	34,84	0,99927	0,97491	0,97419	0,0729
15%	33,38	0,99924		0,97416	0,0761
10%	31,93	0,99920		0,97413	0,0795
5%	30,48	0,99917		0,97409	0,0833
0%	29,03	0,99913		0,97405	0,0875
-5%	27,58	0,99908		0,97401	0,0921
-10%	26,13	0,99903		0,97396	0,0972
-15%	24,68	0,99897		0,97390	0,1029
-20%	23,22	0,99891		0,97384	0,1093

Из анализа полученных результатов (табл. 2) видно, что изменение интенсивности восстановления  $\mu$  в пределах  $\pm 20\%$  оказывает влияние на изменение коэффициента готовности ( $K_r$ ) в пределах четвертого знака после запятой, и, следовательно, коэффициент оперативной готовности ( $K_{ор}$ ) меняется также в четвертом знаке после запятой, так как

$$K_{ор} = P(t) \cdot K_r, \text{ где} \quad (1)$$

$$K_r = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \quad (2)$$

Таким образом, на всем диапазоне изменения интенсивности восстановления коэффициент оперативной готовности и вероятность безотказной работы практически не отличаются по своим значениям.

При анализе надежности данной СЭС СО были рассмотрены и другие временные интервалы функционирования специального объекта, продолжительность которых была принята равной 168 ч (длительность – недели) и 8760 ч (год). Полученные данные сведены в таб. 3.

Таблица 3

**Результаты анализа надежности СЭС СО в разные временные интервалы функционирования СО**

Временной интервал	$\mu$	$K_r$	$P(t)$	$K_{ор}$	$\Delta = (P(t) - K_{ор}) \cdot 100\%$
Неделя	6,76	0,99919	0,99455	0,99375	0,081
Месяц	29,03	0,99913	0,97490	0,97405	0,087
Год	353,20	0,99914	0,73712	0,73649	0,086



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение интенсивности восстановления в пределах  $\pm 20\%$  практически не оказывает влияния на изменение коэффициента готовности и коэффициент оперативной готовности для СЭС. Изменение данных показателей надежности напрямую зависит от значений вероятности безотказной работы, принятых за конкретный временной интервал времени. Таким образом, вероятность безотказной работы является центральным, наиболее общим свойством надежности при нормировании СЭС.

По мнению авторов, в тактико-техническом задании на создание специального объекта требования к надежности СЭС для объектов непрерывного применения должны нормироваться вероятностью безотказной работы за определенный промежуток времени, а объекты, у которых периоды применения чередуются с длительными периодами ожидания, целесообразно нормировать коэффициентом оперативной готовности.

### Список используемых источников

1. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 19 с.
2. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 23 с.
3. Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А. Расчет схем электроснабжения. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 216 с.
4. Герасимова В.Г. Использование электрической энергии: электротехн. справочник. – 9-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – Т. 4. – 696 с.

А.Е. Воронин;  
Н.Е. Пешехонов,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
В.В. Рыбаков,  
*кандидат техн. наук*

## **К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ЗНАЧЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СОСТАВЕ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБЪЕКТА**

Представлена методика обоснования требований к надежности системы электроснабжения. Рассмотрены вопросы распределения требований к надежности объекта между его системами с целью обоснования требований к надежности системы электроснабжения. Описаны основные этапы определения значимости систем объекта адаптированным функционально-топологическим методом. Представлены математические модели определения требуемых значений показателей надежности систем электроснабжения, которые учитывают степени значимости составляющих объект систем и вероятностную функцию надежности объекта в целом.

Ключевые слова: нормирование надежности, распределение требований к надежности, показатель надежности, значимость систем объекта, функциональные исследования.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В составе современных объектов имеется большое количество высокотехнологического оборудования, электронно-вычислительных машин и других электроприемников, при эксплуатации которых предъявляются повышенные требования к надежности и качеству электроснабжения. Отказ системы электроснабжения (СЭС) означает отказ объекта в целом, и поэтому СЭС относится к одной из систем объекта, которые оказывают прямое влияние на выходной эффект. Эти обстоятельства делают требования к надежности электроснабжения одними из главных требований, предъявляемых к СЭС объекта.

К СЭС ряда объектов предъявляются требования к надежности, которые являются качественными и задаются в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» [1]. Данные требования не предусматривают количественной оценки уровня надежности СЭС и не дают возможности осуществить проверку соответствия показателя надежности СЭС значению, необходимому для надежного функционирования объекта.

В соответствии с нормативным документом [2] требования к надежности систем, составляющих объект, должны быть заданы показателем надежности, который учитывает основные признаки (режим функционирования, вид назначения и т. д.) и уровень надежности рассматриваемого объекта в целом.

Под показателем надежности понимается количественная характеристика свойств (безотказность, долговечность, сохраняемость, готовность, ремонтно-пригодности или восстанавливаемость), составляющих надежность [3].

Проведен анализ основных работ в области надежности СЭС, который показал, что их авторы рассматривали общие подходы к обеспечению требований к надежности СЭС с учетом уже заданного ПН для СЭС в целом. В этих работах не исследовались вопросы обоснования требуемых значений показателей надежности СЭС в составе объекта (СО).

Вследствие несовершенства научно-методического аппарата задания требований к надежности СЭС, возникла необходимость проведения научных исследований, направленных на разработку методики обоснования требований к значениям показателей надежности СЭС в составе СО.

## МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ЗНАЧЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В условиях, когда задан уровень надежности СО в целом, для задания требований к надежности СЭС необходимо рационально распределить требования к надежности объекта между его системами, причем так, чтобы общая надежность объекта была не менее заданной.

Решая задачу распределения ресурсов при обеспечении надежности функционирования отдельных систем в целях достижения заданной надежности объекта, необходимо знать значимость каждой ее системы, т. е. знать, какую степень влияния оказывает на функционирование объекта отказ той или иной ее системы.

В зависимости от имеющихся исходных данных существуют различные методы распределения заданных требований к надежности объекта между ее системами. Анализ основных методических подходов к распределению требований к надежности показал, что в большинстве случаев в их основе лежат либо данные о надежности объектов-аналогов, либо справочные данные по надежности составных частей систем объекта.

В настоящее время в эксплуатацию принимаются объекты, оснащенные современным высокотехнологичным оборудованием и системами нового поколения. В данной ситуации для распределения требований к надежности объекта между его системами использовать, например данные о надежности объектов-аналогов, не представляется возможным, ввиду их отсутствия или небольшого срока эксплуатации.

Следовательно, для распределения требований к надежности объекта в условиях ограниченных исходных данных необходимо применить другие методы, которые позволят обосновать требования к надежности систем по их значимости в составе объекта. Одним из таких методов является *функционально-топологический метод*, который был предложен В.И. Нечипоренко [4]. Данный метод применяется в области радиоэлектроники и позволяет определить значимость элементов в системе по числу функциональных связей между ними, на основе которых можно распределить нормативное значение показателя надежности (ПН).

В работе функционально-топологический метод был адаптирован к рассматриваемой задаче, связанной с оценкой значимости систем СО. Суть адаптированного метода заключается в следующем. На начальном этапе проводится детальный анализ процесса функционирования объекта. Из множества систем  $Y$ , участвующих в процессе функционирования объекта, выделяется подмножество систем  $X$ , которые оказывают влияние на выходной эффект:

$$X \subset Y, \text{ где } Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}, X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

В дальнейшем рассматриваются только элементы множества  $X$ , т. е. системы, оказывающие прямое влияние на выходной эффект.

По результатам детального анализа процесса функционирования объекта строятся функциональная схема (рис. 1,а) и ориентированный граф функциональной схемы рассматриваемого объекта (рис. 1,б).

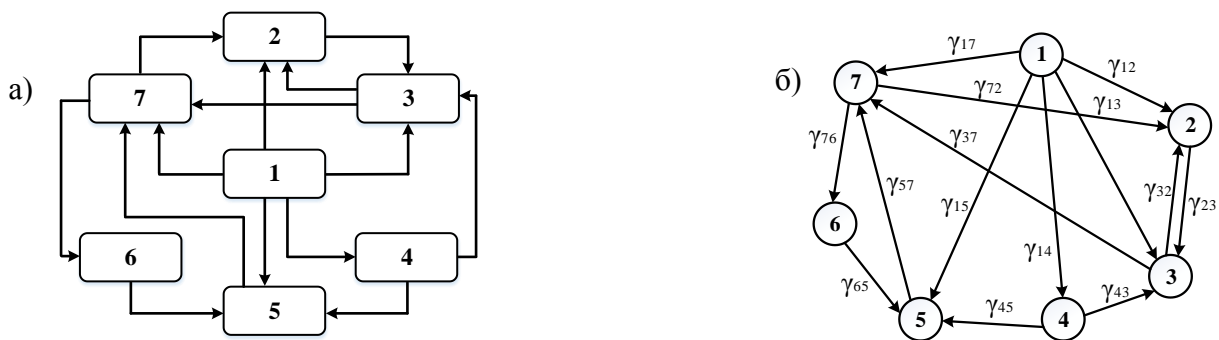


Рис. 1. Функциональная схема объекта (а)  
и ориентированный граф функциональной схемы объекта (б)

На рис. 1,б приняты следующие обозначения:  $\textcircled{i}$  – вершины графа;  $\gamma_{ij}$  – коэффициент влияния  $i$ -й системы на работоспособность  $j$ -й системы (ребра ориентированного графа).

На основе построенного графа (рис. 1,б) составляется матрица функциональных связей  $A$

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{3} & \mathbf{4} & \mathbf{5} & \mathbf{6} & \mathbf{7} \\ \left\| \begin{array}{ccccccc} 0 & \gamma_{12} & 0 & \gamma_{12} & \gamma_{15} & 0 & \gamma_{17} \\ 0 & 0 & \gamma_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{37} \\ 0 & 0 & \gamma_{43} & 0 & \gamma_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{65} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{72} & 0 & 0 & 0 & \gamma_{76} & 0 \end{array} \right\| \end{array} \\ \mathbf{1} \\ \mathbf{2} \\ \mathbf{3} \\ \mathbf{4} \\ \mathbf{5} \\ \mathbf{6} \\ \mathbf{7} \end{array} \quad (2)$$

Строки и столбцы матрицы  $A$  нумеруются в соответствии с номерами вершин графа. При оценке значимости систем объекта по функциональным свойствам на месте  $ij$ -го элемента матрицы ставится коэффициент влияния, который указывает степень влияния данной системы на функционирование систем объекта, с которыми она связана. Ноль означает отсутствие связи и, следовательно, влияния системы объекта на другие системы. Таким образом, коэффициент влияния может принимать значения от нуля до единицы:

$$0 \leq \gamma_{ij} \leq 1. \quad (3)$$

Так как этот метод применяется только в радиоэлектронике, то предлагаемые коэффициенты влияния связаны с этой предметной областью (качество передаваемого сигнала, ширина полосы пропускания, различные коэффициенты искажения сигналов и т. д.).

Авторами для адаптации данного метода к задаче, связанной с оценкой значимости систем СО, в работе предлагается в качестве коэффициента влияния использовать либо вероятность отказа системы ( $Q_i(t)$ ), либо коэффициент неготовности системы ( $K_{\text{нги}}$ ), значения которых могут быть определены на разных стадиях жизненного цикла объекта. В этом случае, если система обладает высокой степенью надежности, то значения  $Q_i(t)$  или  $K_{\text{нги}}$  будут стремиться к нулю. Следовательно, влияние рассматриваемой системы на другие системы, связанные с ней, будет очень мало. Если у системы будет низкий уровень надежности, то значения  $Q_i(t)$  или  $K_{\text{нги}}$  будут стремиться к единице и степень влияния будет возрастать.

Предложенный подход по замене коэффициента влияния на ПН позволит применять функционально-топологический метод к решению задачи по оценке значимости систем СО как в условиях ограниченных исходных данных, так и при наличии достоверной статистики отказов систем СО, собранной при реальных режимах и условиях эксплуатации объекта.

Следующий этап применения функционально-топологического метода заключается в определении количественной характеристики значимости каждой из систем СО – ранг системы ( $R_i$ ), который можно определить, используя характеристическое уравнение матрицы функциональных связей:

$$f(A) = |A - \omega E| = (-\omega)^n + L_1(-\omega)^{n-1} + L_2(-\omega)^{n-2} + \dots + L_{n-1}(-\omega) + L_n = 0, \quad (4)$$

где  $L_p$  – коэффициенты характеристического уравнения, определяемые через главные миноры матрицы  $A$ ,  $p = \overline{1, n}$ ;

$n$  – порядок характеристического уравнения матрицы  $A$ ;

$\omega$  – независимая переменная характеристического уравнения матрицы  $A$ ;

$E$  – единичная матрица.

Ранг каждой системы определяется следующим выражением:

$$R_i = \frac{\sum_{p=1}^n \omega_p \sum_{j=1}^{n-1} L_{pij}}{\sum_{p=1}^n \omega_p \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} L_{pij}}, \quad \sum_{i=1}^N R_i = 1, \quad (5)$$

где  $(n-1) \times (n-1)$  – размерность главного минора  $L_p$ ;

$n \times n$  – размерность матрицы  $A$ ;

$L_{pij}$  – элемент  $i$ -й строки  $j$ -го столбца матрицы  $L_p$ ;

$\omega_p$  – корень характеристического уравнения матрицы  $A$ ;

$N$  – число систем специального объекта.

После определения величины ранга каждой системы объекта, в том числе и СЭС, производится распределение нормативного значения показателя надежности объекта по  $i$ -м системам, с учетом их значимости (величины ранга).

Авторы предлагают использовать математическую модель определения требуемых значений ПН СЭС, применение которой позволит распределить требования к надежности объекта по ее системам, заданные не только единичными, но и комплексными показателями надежности [5]. В общем виде математическая модель определения требуемых значений ПН СЭС, независимо от номенклатуры распределяемого нормативного ПН, является функцией, которая зависит от нормативного значения ПН СО ( $ПН_{CO}$ ), величины ранга СЭС в составе СО ( $R_{CЭС}$ ), а также от функционала надежности СО ( $f(R)$ ):

$$F(ПН_{CO}, R_{CЭС}, f(R)). \quad (6)$$

Ранг СЭС определяется по выражению (5) исходя из числа функциональных связей СЭС с другими системами СО и ее уровня надежности. Функционал надежности СО является функцией, которая зависит от вида вероятностной функции надежности СО и выражается через ранги рассматриваемых систем СО. Функционал надежности СО определяется выражением

$$f(R) = \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{\sum_{\forall(z_i \in Z_j)} z_i^{-1}}, \quad Z_j = \{R_i\}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где  $Z_j$  – множество значений рангов систем, входящих в  $j$ -е слагаемое функционала надежности СО;

$z_i$  –  $i$ -й элемент множества  $Z_j$ ;

$a_j$  – коэффициент при  $j$ -м слагаемом функционала надежности СО;

$k$  – число слагаемых в функционале надежности СО;

$j$  – номер слагаемого в функционале надежности СО.

Используя известные аналитические зависимости между интенсивностью отказов, вероятностью безотказной работы и коэффициентом готовности, получены частные математические модели определения требуемых значений ПН СЭС, а именно:

– если нормативный ПН задан интенсивностью отказов ( $\Lambda_{CO}$ ), то

$$\lambda_{CЭС} = \Lambda_{CO} \cdot \frac{1}{R_{CЭС}} \cdot \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{\sum_{\forall(z_i \in Z_j)} z_i^{-1}}, \quad (8)$$

где  $\lambda_{CЭС}$  – требуемое значение интенсивности отказов СЭС;

$R_{CЭС}$  – ранг СЭС;

– если нормативный ПН задан вероятностью безотказной работы ( $P_{co}$ ), то

$$p_{cэс} = e^{(ln P_{co}) \cdot \frac{1}{R_{cэс}} \cdot \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{\sum_{\forall(z_i \in Z_j)} z_i^{-1}}}, \quad (9)$$

где  $p_{cэс}$  – требуемое значение вероятности безотказной работы СЭС;

– если нормативный ПН задан коэффициентом готовности ( $K_{гco}$ ), то

$$K_{гcэс} = \left( 1 + \frac{T_{вcэс} (1 - K_{гco}) \cdot \frac{1}{R_{cэс}} \cdot \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{\sum_{\forall(z_i \in Z_j)} z_i^{-1}}}{T_{вco} \cdot K_{гco}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где  $K_{гcэс}$  – требуемое значение коэффициента готовности СЭС;

$T_{вcэс}$  – среднее время восстановления СЭС;

$T_{вco}$  – нормативное среднее время восстановления СО.

Представленные частные математические модели определения требуемых значений ПН СЭС (8)–(10) и адаптированный к решению задачи по оценке значимости систем СО функционально-топологический метод использованы в методике обоснования требований к значениям ПН СЭС, блок-схема алгоритма которой представлена на рис. 2.

Блок-схема алгоритма методики обоснования требований к значениям показателей надежности СЭС СО (рис. 2) состоит из девятнадцати этапов, а именно:

1. Ввод исходных данных, который включает:

- номенклатуру нормативных ПН, заданных для СО, и их численные значения;
- значения ПН ( $Q_i(t)$  или  $K_{нги}$ ) каждой из систем СО, которые могут быть определены на разных стадиях жизненного цикла объекта.

2. Анализ процесса функционирования СО выполняется с привлечением экспертов в данной предметной области. По результатам проделанной работы определяются системы объекта, оказывающие прямое влияние на функционирование СО.

3. Построение функциональной схемы СО осуществляется на основе функциональных связей между системами, выбранных по результатам анализа процесса функционирования СО.

4. Построение ориентированного графа происходит на основе функциональной схемы СО. Вершинами графа являются системы СО, а его ребрами – функциональные связи между рассматриваемыми системами. Ребра ориентированного графа характеризуются степенью влияния ( $\gamma_{ij}$ ) конкретной системы на те системы, с которыми она функционально связана.

5. Составление матрицы функциональных связей заключается в преобразовании формализованной в графической форме функциональной зависимости систем СО (ориентированный граф) в матричный вид. Строки и столбцы матрицы функциональных связей нумеруются в соответствии с номерами вершин графа. На месте  $ij$ -го элемента матрицы функциональных связей ставятся значения ПН ( $Q_i(t)$  или  $K_{нги}$ ) соответствующих систем СО.

6. Задание начального условия ( $i = 1$ ) для организации итерационного процесса определения степени значимости (величины ранга) каждой рассматриваемой системы СО.

7. Расчет рангов систем СО, в том числе и СЭС, осуществляется с помощью выражения (5). Величина ранга систем  $R_i$  будет зависеть от числа функциональных связей и от ПН  $i$ -й системы.

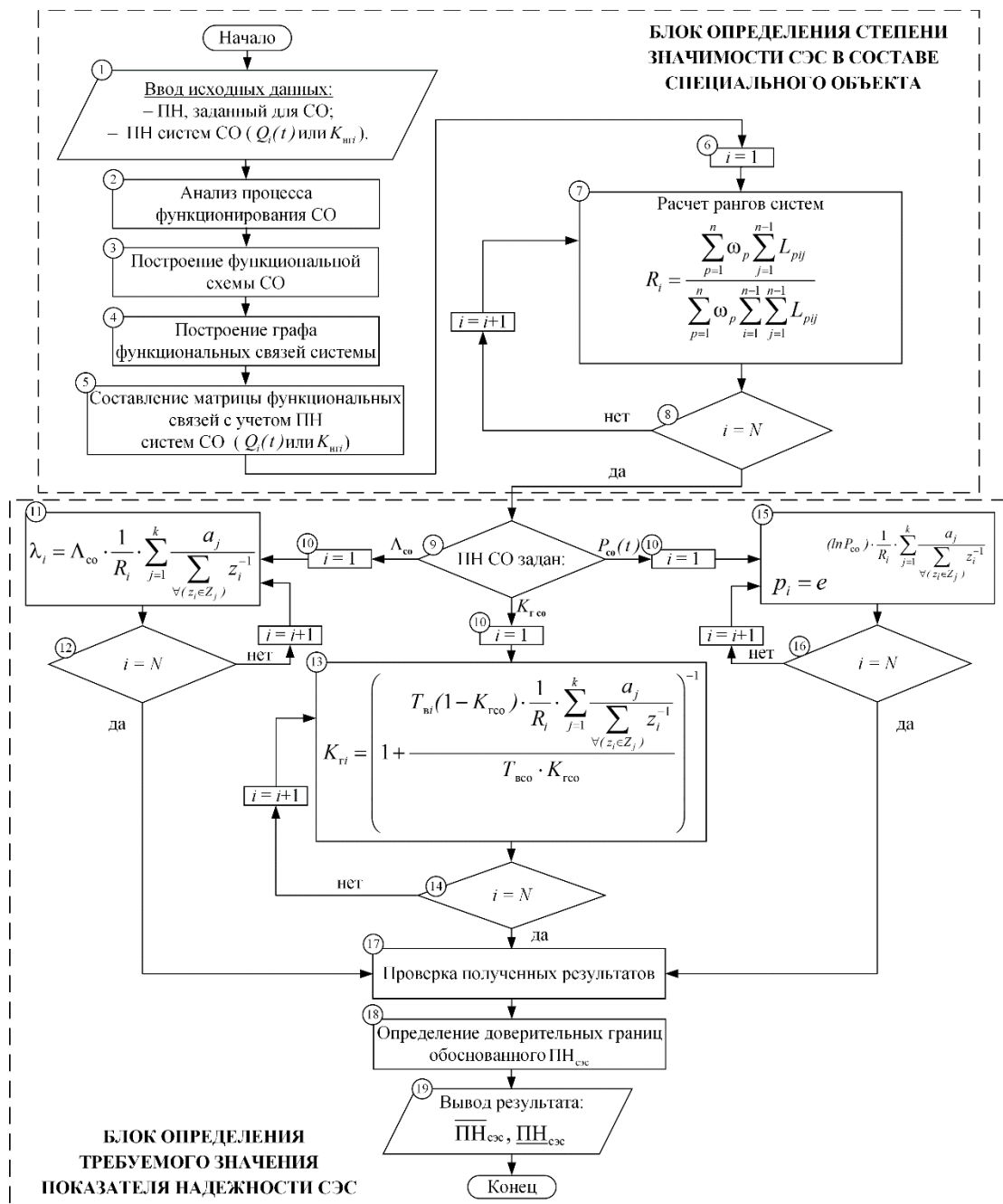


Рис. 2. Блок-схема алгоритма методики обоснования требований к значениям показателей надежности систем электроснабжения

8. Условие выхода из итерационного цикла определения степени значимости систем СО заключается в выполнении п. 7 для  $N$  систем СО.

9. Условие выбора математической модели определения требуемых значений показателей надежности СЭС по номенклатуре нормативных количественных требований к надежности объекта. Если требования к надежности СО заданы интенсивностью отказов, вероятностью безотказной работы или коэффициентом готовности, то распределение количественных требований осуществляется с помощью соответствующих частных математических моделей (8), (9), (10).

10. Задание начального условия ( $i = 1$ ) для организации итерационного процесса распределения количественных требований к надежности каждой рассматриваемой системы СО.

11, 13, 15. Распределение требований к надежности СО по составляющим его системам с учетом их значимости и вероятностной функции надежности рассматриваемого СО.

12, 14, 16. Условие выхода из итерационного цикла распределения требований к надежности СО заключается в выполнении п. 11, 13, 15 (исходя из номенклатуры нормативного показателя надежности СО) для  $N$  систем объекта.

17. Проверка полученного результата путем подстановки полученных значений ПН  $i$ -х систем в вероятностную функцию надежности СО. Общее значение обоснованных ПН всех систем должно быть не меньше нормативных требований к надежности для объекта в целом.

18. Определение доверительных границ обоснованного ПН СЭС, обеспечивающих наилучшую достоверность процедуры контроля ПН в процессе эксплуатации СО. Выбор того или иного метода определения доверительных границ зависит от наличия информации об отказах контролируемых составных систем СО [6].

19. Вывод результата в виде доверительных границ ПН СЭС. Такие количественные требования к надежности СЭС могут быть рекомендованы в качестве нормативных.

Практическая значимость данной методики состоит в том, что она доведена до уровня инженерных решений, а также в возможности ее применения в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях при обосновании исходных данных с целью проектирования и реконструкции СЭС СО. Полученная методика может быть использована организациями, эксплуатирующими СЭС, для уточнения требуемых значений показателей надежности СЭС в процессе всего срока эксплуатации, а также при формировании для вышестоящих органов военного управления предложений по реконструкции существующих объектов с целью обеспечения требуемого показателя надежности СЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика обоснования требований к значениям показателей надежности СЭС отличается от существующих тем, что в ней, наряду с учетом нормативных требований к надежности специального объекта в целом и уровня надежности составляющих его систем, также учитывается степень значимости СЭС в процессе функционирования специального объекта. Предложенная методика позволяет обосновать требуемые значения показателей надежности СЭС в составе объекта в виде доверительных интервалов и может быть применена в условиях ограниченного объема статистической информации при анализе малосерийных и высоконадежных специальных объектов.

## Список используемых источников

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2011. – 1168 с.
2. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 19 с.
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 23 с.
4. *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ систем (эффективность и надежность). – М.: Сов. радио, 1977. – 256 с.
5. *Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е.* Математическая модель задания требований к надежности системы электроснабжения специального объекта // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 146–152.
6. *Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е., Кретюк Д.А.* Определение доверительных границ нормативных показателей надежности специальных объектов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 36–41.



А.Е. Воронин;  
Н.Е. Пешехонов,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Д.В. Рыбаков,  
*кандидат техн. наук*

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРА МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В статье рассматривается решение задачи обеспечения заданного показателя надежности системы электроснабжения специального объекта на основе оптимизационной задачи. Сформированы три основные группы технических мероприятий, направленных на повышения надежности системы электроснабжения. Разработана математическая модель объекта оптимизации – сочетания мероприятий, направленных на повышение надежности системы электроснабжения специального объекта. Обоснован выбор критериев оптимальности, получены выражения для целевых функций, определены ограничения. Произведен выбор метода решения сформулированной оптимизационной задачи. В статье поставленная оптимизационная задача решена с помощью генетических алгоритмов.

Ключевые слова: надежность системы электроснабжения, оптимизационная задача, мероприятия повышения надежности, генетический алгоритм.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При оценке надежности систем электроснабжения (СЭС) специальных объектов (СО) в процессе эксплуатации могут возникать ситуации, когда значение показателя надежности (ПН) СЭС не соответствует заданным требованиям. В этом случае необходимо разработать перечень мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС. Данные мероприятия могут быть как техническими, так и организационными.

*К организационным мероприятиям по повышению надежности СЭС относятся [1]:*

- повышение требований к трудовой и производственной дисциплине персонала;
- создание условий повышения квалификации персонала;
- рациональная организация, планирование текущих и капитальных ремонтов, профилактических испытаний, а также аварийных работ;
- организация доработок и рекламационной практики и т. д.

Все *технические мероприятия*, направленные на повышение надежности СЭС СО, принципиально могут быть сведены к следующим [1]:

- резервирование;
- уменьшение интенсивности отказов элементов СЭС;
- сокращение времени непрерывной работы;
- уменьшение времени восстановления и т. д.

Реализовать представленные мероприятия можно на всех стадиях жизненного цикла СО как по отдельности, так и каким-либо их набором (сочетанием).

Как правило, большая часть организационных мероприятий реализуется на первых этапах жизненного цикла объекта либо активно реализуется в процессе его эксплуатации. Большая часть представленных технических мероприятий реализуется после выявления несоответствия уровня надежности существующей СЭС заданным требованиям в заданных режимах и условиях эксплуатации. В целях обеспечения требуемого ПН СЭС в работе рассмотрены различные сочетания технических мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС СО.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При разработке перечня мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС СО, были рассмотрены три основные группы технических мероприятий. Первая группа включает мероприятия, направленные на резервирование СЭС с помощью установки секционных коммутационных аппаратов (КА) с устройствами автоматического включения резерва (АВР). Вторая группа включает мероприятия, связанные с установкой в СЭС резервных источников электроснабжения (РИЭС). Третья группа включает мероприятия, направленные на повышение надежности существующих элементов СЭС путем замены их на более надежные элементы. Все мероприятия представленных трех групп можно задать множеством из  $n$  мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС СО:

$$M = \{m_g\}, \quad g = \overline{1, 2^n}, \quad (1)$$

где  $g$  – текущее сочетание мероприятий;  
 $n$  – общее число предложенных мероприятий.

Каждое предложенное мероприятие характеризуется ПН и экономическими затратами на его реализацию. Тогда множество, характеризующее экономические затраты на реализацию  $i$ -го мероприятия, выражается множеством  $C$ :

$$C = \{c_i\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Множество, характеризующее значение ПН  $i$ -го мероприятия – множеством  $R$ :

$$R = \{r_i\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Таким образом, для обеспечения требуемого ПН СЭС необходимо найти оптимальное сочетание мероприятий, у которого экономический показатель будет минимальным, а показатель надежности будет удовлетворять обоснованным требованиям. В этом случае необходимо решить оптимизационную задачу.

Чтобы оценить ПН СЭС после реализации каждого сочетания мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС СО, получена математическая модель оценки ПН СЭС на основе логико-вероятностного метода [2], которую в общем виде можно представить выражением

$$K_{г\text{ с\text{э}с}}(D_1 \vee D_2 \vee \dots \vee D_j \vee \dots \vee D_N) = \sum_{j=1}^N \prod_{\forall (K_{ri} \in D_j)} K_{ri} - \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=j+1}^N \prod_{\forall (K_{ri} \in D_{jl})} K_{ri} + \\ + \sum_{j=1}^{N-2} \sum_{l=j+1}^{N-1} \sum_{s=j+2}^N \prod_{\forall (K_{ri} \in D_{jls})} K_{ri} - \dots + (-1)^{N+1} \prod_{\forall (K_{ri} \in D_{j\dots d})} K_{ri}, \quad (4)$$

$$D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d} \subset D, \quad j = \overline{1, N},$$

где  $D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d}$  – комбинации кратчайших путей работоспособного состояния СЭС;

$j, l, s, d$  – номера комбинаций кратчайших путей работоспособного состояния СЭС;

$D$  – множество всех возможных кратчайших путей работоспособного состояния СЭС;

$K_{ri}$  – коэффициент готовности  $i$ -го элемента СЭС;

$N$  – конечное число кратчайших путей работоспособного состояния СЭС.

Учет выполнения того или иного мероприятия в целевых функциях осуществляется за счет принятых в отдельности для каждой группы мероприятий булевых переменных и формализованных их ограничений.

Переменные первой группы мероприятий:

$$a_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется мероприятие, которое заключается} \\ & \text{в установке } i\text{-го элемента } k\text{-го вида;} \\ 0, & \text{если не выполняется мероприятие.} \end{cases} \quad (5)$$

Ограничение для переменной первой группы мероприятий – возможна установка только одного вида секционного коммутационного аппарата между каждой секцией шин:

$$0 \leq \sum_{k=1}^{n_i} a_{ik} \leq 1, a_{ik} = \{0,1\}, \quad (6)$$

где  $n_i$  – конечное число видов  $i$ -го элемента СЭС.

Переменные второй группы мероприятий:

$$b'_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется мероприятие, которое заключается в установке} \\ & i\text{-го элемента, } k\text{-го вида на первую секцию шин;} \\ 0, & \text{если не выполняется мероприятие.} \end{cases} \quad (7)$$

$$b''_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется мероприятие, которое заключается в установке} \\ & i\text{-го элемента, } k\text{-го вида на вторую секцию шин;} \\ 0, & \text{если не выполняется мероприятие.} \end{cases} \quad (8)$$

Ограничение для переменной второй группы мероприятий – на каждой секции шин должен быть установлен только один вид РИЭС, обеспечивающий максимальную потребляемую мощность СО:

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{k=1}^{n_i} b'_{ik} \leq 1, b'_{ik} = \{0,1\}; \\ 0 \leq \sum_{k=1}^{n_i} b''_{ik} \leq 1, b''_{ik} = \{0,1\}; \\ \sum_{k=1}^{n_i} b'_{ik} + \sum_{k=1}^{n_i} b''_{ik} = \{0,2\}. \end{cases} \quad (9)$$

Переменные третьей группы мероприятий:

$$z_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется мероприятие, которое заключается} \\ & \text{в замене } i\text{-го элемента на альтернативный элемент } k\text{-го вида;} \\ 0, & \text{если не выполняется мероприятие.} \end{cases} \quad (10)$$

Ограничение для переменной третьей группы мероприятий – в структурной схеме СЭС должен остаться элемент только одного вида из предложенных альтернатив:

$$\sum_{k=1}^{n_i} z_{ik} = 1, z_{ik} = \{0,1\}.$$

При построении математической модели определения оптимального сочетания мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС, будем учитывать два главных показателя: в качестве показателя надежности  $R(X)$  – заданный показатель надежности для СЭС (вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и т. д.), а в качестве экономического показателя  $C(X)$  – затраты на реализацию сочетаний мероприятий.

Для получения достоверной оценки фактического уровня надежности СО или составляющих его систем нормативный ПН целесообразно задавать в виде интервала значений, ограниченного нижней ( $\underline{R}_{\text{норм.}}$ ) и верхней ( $\bar{R}_{\text{норм.}}$ ) доверительными границами [3]. Следовательно, для обеспечения заданного интервального значения надежности СЭС достаточно найти

только такое сочетание мероприятий, при котором экономический показатель будет минимальным, а показатель надежности будет максимальным в пределах интервальных требований. В этом случае показатель надежности СЭС, при реализации такого сочетания мероприятий, будет соответствовать заданным требованиям.

Но из множества всех возможных сочетаний мероприятий может быть найдено такое сочетание, значение ПН которого будет лежать за пределами верхней доверительной границы заданного значения. Причем его экономический показатель может быть меньше (равен) того сочетания, которое было выбрано в пределах интервальных требований. Реализация такого сочетания мероприятий позволит за меньшие экономические затраты обеспечить наибольший уровень надежности СЭС.

Следовательно, решение оптимизационной задачи основано на выполнении двух критериев оптимальности. Первый критерий оптимальности представляет собой максимальное значение коэффициента готовности СЭС  $CO$ , не выходящее за предел нижней доверительной границы обоснованного ПН ( $K_{г\text{ СЭС}}$ ). Второй критерий оптимальности – минимум экономических затрат на реализацию  $g$ -го сочетания мероприятий. Для согласования экстремума данных критериев оптимизации вместо коэффициента готовности СЭС рассматривается коэффициент неготовности. Используя принятые булевы переменные, получены целевые функции для каждого критерия оптимальности:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{нр СЭС}}(X) &= 1 - K_{г\text{ СЭС}}(X) = \\
 &= 1 - \left( \sum_{j=1}^N \prod_{\forall(K_{ri} \in D_j)} K_{ri} \cdot \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^a \in D_j) \\ \forall(a_{ik} \in M_j)}} K_{rik}^a a_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b'} \in D_j) \\ \forall(b'_{ik} \in M_j)}} K_{rik}^{b'} b'_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b''} \in D_j) \\ \forall(b''_{ik} \in M_j)}} K_{rik}^{b''} b''_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^z \in D_j) \\ \forall(z_{ik} \in M_j)}} K_{rik}^z z_{ik} \right) \right) - \\
 &- \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=j+1}^N \prod_{\forall(K_{ri} \in D_{jl})} K_{ri} \cdot \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^a \in D_{jl}) \\ \forall(a_{ik} \in M_{jl})}} K_{rik}^a a_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b'} \in D_{jl}) \\ \forall(b'_{ik} \in M_{jl})}} K_{rik}^{b'} b'_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b''} \in D_{jl}) \\ \forall(b''_{ik} \in M_{jl})}} K_{rik}^{b''} b''_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^z \in D_{jl}) \\ \forall(z_{ik} \in M_{jl})}} K_{rik}^z z_{ik} \right) + \\
 &+ \sum_{j=1}^{N-2} \sum_{l=j+1}^{N-1} \sum_{s=j+2}^N \prod_{\forall(K_{ri} \in D_{jls})} K_{ri} \cdot \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^a \in D_{jls}) \\ \forall(a_{ik} \in M_{jls})}} K_{rik}^a a_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b'} \in D_{jls}) \\ \forall(b'_{ik} \in M_{jls})}} K_{rik}^{b'} b'_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b''} \in D_{jls}) \\ \forall(b''_{ik} \in M_{jls})}} K_{rik}^{b''} b''_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^z \in D_{jls}) \\ \forall(z_{ik} \in M_{jls})}} K_{rik}^z z_{ik} \right) - \dots \\
 &\dots + (-1)^{N+1} \prod_{\forall(K_{ri} \in D_{j\dots d})} K_{ri} \cdot \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^a \in D_{j\dots d}) \\ \forall(a_{ik} \in M_{j\dots d})}} K_{rik}^a a_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b'} \in D_{j\dots d}) \\ \forall(b'_{ik} \in M_{j\dots d})}} K_{rik}^{b'} b'_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^{b''} \in D_{j\dots d}) \\ \forall(b''_{ik} \in M_{j\dots d})}} K_{rik}^{b''} b''_{ik} \right) \left( \sum_{\substack{\forall(K_{rik}^z \in D_{j\dots d}) \\ \forall(z_{ik} \in M_{j\dots d})}} K_{rik}^z z_{ik} \right) \rightarrow \min_{X \in M},
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$C_{\text{СЭС}}(X) = \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall(a_{ik} \in A)} a_{ik} c_{ik}^a + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall(b'_{ik} \in B)} b'_{ik} c_{ik}^{b'} + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall(b''_{ik} \in B)} b''_{ik} c_{ik}^{b''} + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall(z_{ik} \in Z)} z_{ik} c_{ik}^z \rightarrow \min_{X \in M}, \tag{12}$$

где  $M_j, M_{jl}, M_{jls}, M_{j\dots d} \subset M$ ;

$D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d} \subset D$ ;

$D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d}$  – комбинации кратчайших путей работоспособного состояния СЭС;

$M_j, M_{jl}, M_{jls}, M_{j\dots d}$  – множества сочетаний мероприятий в каждой из соответствующих комбинаций кратчайших путей работоспособного состояния СЭС;

$K_{rik}^a, K_{rik}^{b'}, K_{rik}^{b''}, K_{rik}^z$  – коэффициент готовности  $i$ -го элемента СЭС  $k$ -го вида, кото-

- рый участвует в мероприятиях соответственно первой, второй или третьей группы;
- $K_{г\text{сэс}}(X)$  – коэффициент готовности СЭС при реализации  $g$ -го сочетания мероприятий;
- $X$  – множество варьируемых переменных целевых функций,  $X \in M$ ;
- $K_{гi}$  – коэффициент готовности  $i$ -го элемента СЭС, который не участвует в мероприятиях.

Для нахождения оптимального решения сформулированной задачи необходимо выбрать математический метод, который приводил бы к конечному результату с наименьшими затратами на вычисления или же давал возможность получить наибольший объем информации об искомом решении.

## ВЫБОР МЕТОДА РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Учитывая, что поставленная задача является задачей дискретной (булевой) оптимизации (а значит, множество решений конечно), может показаться, что метод полного прямого перебора возможных вариантов позволит найти оптимальное решение. На самом деле, решение поставленной задачи даже относительно небольшой размерности требует огромного объема вычислений, так как количество вариантов показательно зависит от количества предложенных мероприятий.

В самом общем случае при определенном наборе мероприятий, количество их сочетаний, обеспечивающих требуемый уровень надежности СЭС, может быть значительным. При этом необходимо проводить расчеты по оценке показателей надежности СЭС и экономических затрат при реализации каждого сочетания мероприятий.

Например, если предложено тридцать мероприятий, то общее число рассматриваемых вариантов можно определить по известному выражению

$$\sum_{k=0}^n C_n^k = 2^n = 2^{30} = 1\,073\,741\,824, \quad (13)$$

где  $k$  – число мероприятий, из которых составлено  $g$ -е сочетание.

Общее число всех возможных комбинаций, которые необходимо рассмотреть, будет более триллиона. Выполнить за приемлемое время такое количество математических операций даже современным вычислительным средствам не всегда под силу.

Другим наиболее естественным путем решения данной задачи дискретной оптимизации является попытка использования обычных, но несколько измененных методов линейного программирования. То есть решить поставленную задачу любым из известных методов линейного программирования, например симплекс-методом, без требования целочисленности или бинарности переменных и, затем округлив компоненты ее оптимального вектора, получить оптимальное решение. Однако даже простые примеры показывают несостоятельность такого подхода. Этот путь в большинстве случаев не только уводит от оптимума, но даже приводит иногда к недопустимому решению задачи.

В настоящее время в математическом программировании для решения задач дискретной оптимизации помимо методов линейного программирования также разработаны другие специальные методы. Эти методы условно можно разделить на комбинаторные (переборные) и приближенные.

При выборе подходящего метода решения поставленной оптимизационной задачи помимо экспоненциального роста объема вычислений также следует учитывать, что если реализация  $i$ -го мероприятия по повышению надежности СЭС дает определенное приращение к показателю надежности СЭС, а реализация  $i+1$ -го мероприятия дает другое прираще-

ние к показателю надежности СЭС, то совместная реализация двух этих мероприятий не приведет к сумме приращений к показателю надежности  $i$ -го и  $i+1$ -го мероприятий. Таким образом, одно и то же мероприятие может давать различные приращения к показателю надежности СЭС в зависимости от того, в каком из сочетаний всех возможных мероприятий оно рассматривается. В этом случае применение традиционных методов решения оптимизационных задач, основанных, как правило, на принципе последовательности нахождения требуемого решения, может опять же привести к нахождению локального экстремума.

Итак, опираясь на изложенные выше соображения, можно сделать вывод, что традиционные методы поиска оптимальных решений не вполне подходят для решения сформулированной задачи нахождения оптимального сочетания мероприятий, направленных на обеспечение заданного показателя надежности СЭС СО.

Рассматриваемая оптимизационная задача была решена с помощью генетических алгоритмов, применение которых позволило учесть все ее особенности.

Генетические алгоритмы – это класс алгоритмов поисковой оптимизации, основанных на математическом моделировании биологических механизмов и процессов в живой природе с помощью принципов популяционной генетики, которые позволяют находить оптимальные или близкие к ним (субоптимальные) решения. В применении генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач по сравнению с большинством традиционных методов можно выделить основные отличительные особенности:

- генетические алгоритмы работают с кодами, в которых зашифрован набор параметров, а не с самими параметрами;
- для поиска оптимального решения генетические алгоритмы используют некоторое множество точек поискового пространства, а не осуществляют последовательный переход от точки к точке;
- генетические алгоритмы используют как вероятностные правила для порождения новых точек, так детерминированные правила для перехода от одного множества точек к другому.

## РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Известно, что результат решения задачи многокритериальной оптимизации не позволяет однозначно ответить на вопрос, получен ли оптимальный вариант, так как результатом ее решения является несколько приемлемых вариантов. Исходя из этого, в качестве оператора селекции, применяемого в генетических алгоритмах, был применен принцип недоминируемой сортировки по Парето, использование которого позволяет из всех возможных вариантов выбрать и предложить лицу, принимающему решение, варианты с учетом заданных ограничений, из которых он должен выбрать наиболее предпочтительный.

Решение представленной задачи с помощью генетических алгоритмов было реализовано в программном продукте на ЭВМ в среде Matlab [4], применение которого позволяет найти оптимальные по Парето сочетания мероприятий одновременно по двум критериям (минимизация экономических затрат и максимизация коэффициента готовности) и предложить их лицу, принимающему решения, в виде фронта Парето.

Предположим, что СЭС СО имеет схему, представленную на рис.1, а требуемый уровень ее надежности должен соответствовать коэффициенту готовности, равному 0,9994361. Тогда с учетом структурных особенностей принятой схемы СЭС СО был разработан перечень мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС (табл. 1). Данные мероприятия указаны штрихованной линией на рис. 1.

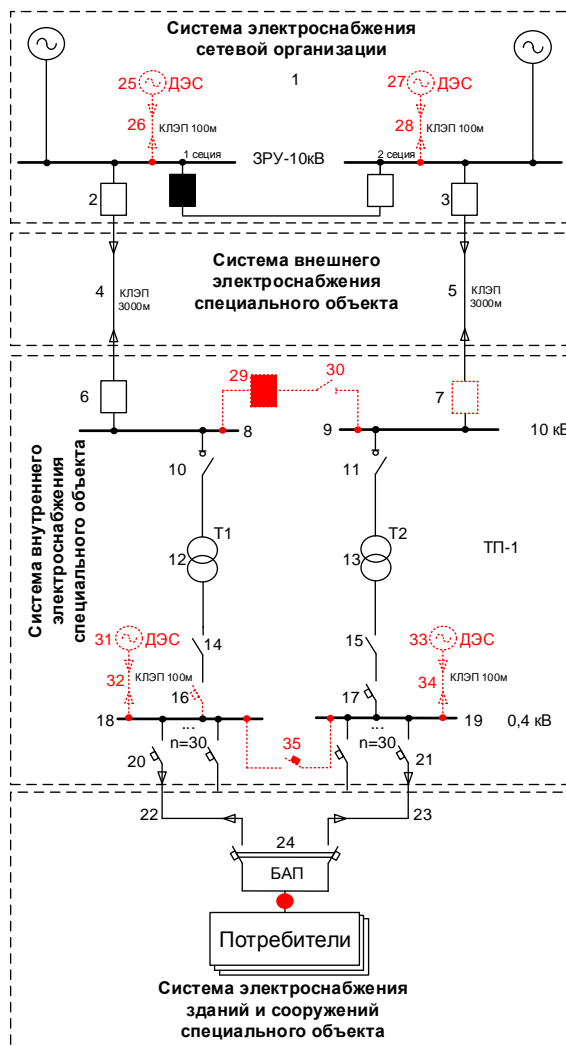


Рис. 1. Схема СЭС специального объекта

Таблица 1

**Перечень мероприятий, направленных на повышение надежности системы электроснабжения специального объекта**

Наименование мероприятия	
Условное обозначение на схеме	Наименование элемента СЭС
1) Установка устройства АВР на секции шин в РУ – 10 кВ	
29	Высоковольтный выключатель 10 кВ
30	Разъединитель 10 кВ
2) Подключение ДЭС к секциям шин в ЗРУ – 10 кВ (в пределах СЭС сетевой организации)	
25, 26, 27, 28	Дизельная электростанция 10 кВ
3) Подключение ДЭС к секциям шин в РУ – 0,4 кВ	
31, 32, 33, 34	Дизельная электростанция 0,4 кВ
4) Установка секционного КА с устройством АВР на секции шин в РУ – 0,4 кВ	
35	Устройство АВР 0,4 кВ
5) Замена высоковольтного выключателя в РУ – 10 кВ	
7	Высоковольтный выключатель 10 кВ
6) Замена автоматического выключателя в РУ – 0,4 кВ	
16	Автоматический выключатель 0,4 кВ

Основные структурные элементы генетических алгоритмов были заменены на структурные элементы, коррелирующие с поставленной задачей, а именно: гены – на  $i$ -е мероприятие по повышению надежности СЭС СО; характеристики генов – на коэффициент готовности и экономические затраты – на реализацию данных мероприятий; хромосомы особей – на  $g$ -е сочетание мероприятий; функции приспособленности – на целевые функции определения коэффициента готовности СЭС и суммарные экономические затраты – на реализацию  $g$ -го сочетания мероприятий. Таким образом, все возможные сочетания мероприятий, указанные в табл. 1, можно представить в виде генетического кода особи (рис. 2).

7			16			25			27			29			...
7.1	7.2	7.3	16.1	16.2	16.3	25.1	25.2	25.3	27.1	27.2	27.3	29.1	29.2	29.3	
0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	
$z_{7k}$			$z_{16k}$			$b'_{25k}$			$b''_{27k}$			$a_{29k}$			
...			30			31			33			35			...
...			30.3	30.1	30.2	31.1	31.2	31.3	33.1	33.2	33.3	35.1	35.2	35.3	
...			0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	
...			$a_{30k}$			$b'_{31k}$			$b''_{33k}$			$a_{35k}$			

Рис. 2. Пример генетического кода  $g$ -го сочетания мероприятий

При формировании исходных данных были рассмотрены по три альтернативных вида каждого элемента, которые входят в перечень мероприятий. Рассмотренные виды того или иного элемента СЭС отличаются друг от друга по производителям, конструктивным особенностям, а самое главное различаются между собой по надежности и стоимости. Показатели надежности элементов СЭС взяты из справочной литературы.

Результат решения данной оптимизационной задачи представлен в табл. 2, где указаны двенадцать наилучших сочетаний мероприятий, из которых, лицу принимающему решение, необходимо выбрать наиболее приемлемый.

Таблица 2

### Результаты решения оптимизационной задачи

Номер $g$ -го сочетания мероприятия	Условное обозначение элемента на схеме СЭС специального объекта										Коэффициент готовности $K_{гik}$	Стоимость $c_{ik}$ , у. е.
	7	16	25	27	29	30	31	33	35			
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0,999436382559918	0,16	
2	2	2	0	0	2	1	0	0	2	0,999438334813889	1,31	
3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0,999989752073269	30,00	
4	2	2	2	1	1	1	0	0	1	0,999989822975911	33,24	
5	2	2	1	2	2	2	0	0	2	0,999989822976069	33,33	
6	2	2	2	2	2	2	0	0	1	0,999989823052840	35,31	
7	2	2	2	2	2	2	0	0	2	0,999989823052840	35,33	
8	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0,999989950945509	40,00	
9	1	2	0	0	1	1	1	1	1	0,999989951022173	40,76	
10	1	2	0	0	1	1	2	2	1	0,999989951022469	44,76	
11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0,999989951022704	70,16	
12	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0,999989951022781	75,24	

В табл. 2 столбцы с номерами условных обозначений элементов схемы СЭС содержат информацию об участии данного элемента в том или ином сочетании мероприятий. Любое отличное от нуля число указывает на номер вида элемента, который участвует в сочетании



мероприятий (в представленной задаче рассматривается по три альтернативных вида каждого элемента).

Так как в ГА селекция сочетаний мероприятий реализована на основе принципа недоминированной сортировки по Парето, то результат решения так же представлен в виде фронта Парето (рис. 3).

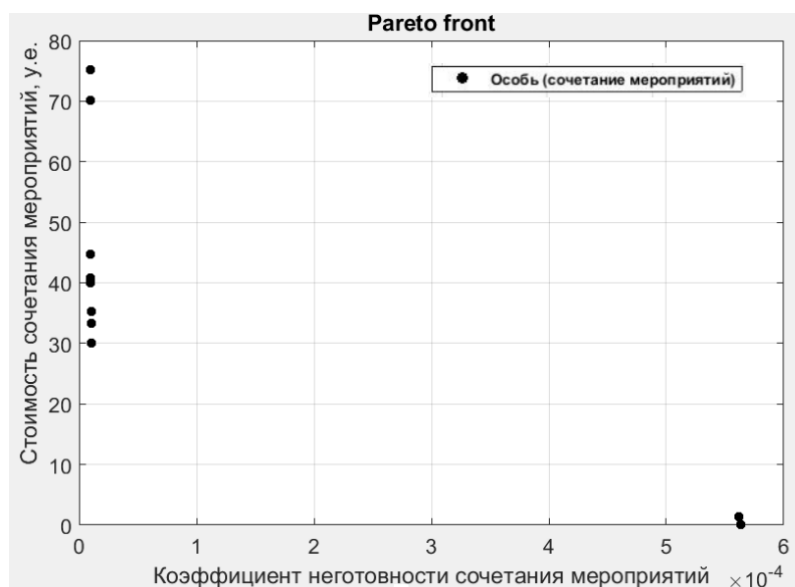


Рис. 3. Фронт Парето

По результатам решения данной задачи можно сделать вывод, что для достижения заданного показателя надежности СЭС (0,9994361) достаточно в схему СЭС СО (см. рис. 1) установить на секциях шин 0,4 кВ секционный автоматический выключатель серии «Электрон» с устройством АВР (элемент 35 на рис. 1). Данное мероприятие удовлетворяет заданным требованиям к надежности СЭС и имеет наименьшие затраты на его реализацию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация представленной оптимизационной задачи позволит на любом из этапов жизненного цикла объекта определить рациональный состав практических рекомендаций по повышению надежности СЭС с целью обеспечения заданных требований к ее надежности. Дальнейшее усовершенствование данной математической модели оптимизации позволит формировать решения на основе перечня мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС, в состав которого будут входить не только технические, но и организационные мероприятия.

Применение генетических алгоритмов для решения сформулированной оптимизационной задачи позволяет учесть все ее особенности и предложить наилучшее решение, значение которого стремится к глобальному экстремуму.

## Список используемых источников

1. Аполлонский С.М., Куклев Ю.В. Надежность и эффективность электрических аппаратов – СПб.: Лань, 2011. – 448 с.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

3. Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е., Кретюк Д.А. Определение доверительных границ нормативных показателей надежности специальных объектов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 36–41.

4. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018662504 . Программа определения оптимального сочетания мероприятий, направленных на повышение надежности системы внутреннего электроснабжения объекта / Н.Е. Пешехонов, А.Е. Воронин. – Заявл. 11.09.2018; опубл. 09.10.2018.

А.А. Гордеев;  
И.Н. Некрасов,  
*кандидат техн. наук;*  
В.И. Сеньченков,  
*доктор техн. наук, профессор*

## **ПОВЫШЕНИЕ СХОДИМОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА**

Предлагается система гибкого управления техническим состоянием теплоэнергетического оборудования наземных комплексов космических войск, рассматривается один из вариантов построения такой системы. Развиваются теоретические основы диагностирования теплоэнергетического оборудования как необходимого условия внедрения гибкого управления техническим состоянием.

Исследуются методы обучения при построении диагностических моделей технических систем. С новых позиций раскрыта топология множества наблюдаемых состояний и связанные с этим вопросы построения изображений – формализованного представления отказов теплоэнергетического оборудования. Разработана процедура ранжирования обучающих образов, которая позволяет существенно ускорить сходимость процесса обучения. Данная процедура базируется на анализе метрических соотношений в кластерах обучающих образов и задании на данной основе очередности их применения в процессе обучения. При этом используются свойства и метрика конечномерных евклидовых пространств.

Ключевые слова: кластерный анализ, теплоэнергетическое оборудование, диагностическая модель, обучающий образ, изображение отказа, рекуррентное соотношение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для достижения высокого уровня функциональной пригодности оборудования наземных комплексов космических войск, в частности теплоэнергетического оборудования (ТЭО), экспертным сообществом признается необходимым разработка системы гибкого управления его техническим состоянием. Под таким управлением понимается получение информации о техническом состоянии, а также планирование и реализация на ее основе комплекса работ по техническому обслуживанию и ремонту, направленных на поддержание или восстановление пригодности ТЭО к применению по назначению.

Один из возможных вариантов построения системы гибкого управления техническим состоянием представлен на рис.1. В данной системе можно выделить две взаимосвязанные подсистемы – информационную и организационную.

Первая подсистема обеспечивает получение сведений о техническом состоянии ТЭО, а вторая – предназначена для планирования и реализации ремонтно-профилактических работ с целью восстановления исходного технического состояния на основе данных сведений.

То, что на рисунке указано как «измерение информативных параметров», позволяет иметь первичную информацию о состоянии ТЭО. Затем данная информация обрабатывается с помощью заранее синтезированного математического и алгоритмического обеспечения. На основе результатов обработки принимается заключение о техническом состоянии ТЭО, следовательно, объективно планируются объемы и сроки работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Таким образом, информационная подсистема есть не что иное, как система диагностирования. При этом высокая достоверность заключения о техническом состоянии – одно из главных условий правильности выбора ремонтно-профилактических работ, в результате – и достижения требуемого уровня пригодности ТЭО.

В материалах настоящей статьи выявляются пути повышения сходимости обучения при построении изображений отказов ТЭО, что прямо влияет на достоверность диагностирования. Под изображением отказа [1, 2] понимается его формализованное представление как элемента диагностической модели. Предлагается один из способов повышения сходимости – на основе анализа и учета кластерных свойств технических состояний ТЭО.



Рис.1. Система управления техническим состоянием

## ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТКАЗОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Комплексной характеристикой ТЭО является наблюдаемое состояние

$$F_{\langle v \rangle} = (f_1, f_2, \dots, f_v)^T, \quad \mathbf{F}_{\langle v \rangle} \in F, \quad (1)$$

где  $F$  – множество возможных наблюдаемых состояний.

Компоненты  $f_j(t)$ ,  $j = \overline{1, \nu}$  вектора (1) – траектории физических величин, зарегистрированные в контрольных точках ( $t \in T$ , где  $T$  – временной интервал наблюдения состояния системы). Для ТЭО такими величинами являются как характеристики основных рабочих процессов – температуры, давления, расходы, уровни рабочих тел, так и характеристики сопутствующих процессов – виброперемещения, виброскорости подвижных узлов и т. д. В диагностической модели каждая траектория должна быть представлена совокупностью числовых значений, которые однозначно задают ее поведение на множестве  $T$  и применяются как контролируемые параметры.

Результатом преобразования всех траекторий выражения (1) является вектор нормированного состояния

$$\mathbf{Y}_{\langle n \rangle} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, \quad \mathbf{Y}_{\langle n \rangle} \in Y, \quad (2)$$

где  $y_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  – контролируемые параметры ( $n > \nu$ );

$Y$  – множество нормированных состояний.

Методические подходы к заданию отображения

$$\Phi: F \rightarrow Y \quad (3)$$

рассматриваются в работе [3]. Они базируются на разложении каждой траектории вектора (1) по множеству взаимно ортогональных направлений. При отображении (3) каждому элементу множества  $F$  сопоставляется единственный элемент из  $Y$ :

$$\Phi: \mathbf{F}_{\langle \nu \rangle} \rightarrow \mathbf{Y}_{\langle n \rangle}.$$

Формирование множества  $Y$  в результате реализации отображения (3) дает возможность строить изображения с опорой на свойства евклидовых пространств [4]. Для этого на  $Y$  задается структура  $n$ -мерного евклидова пространства, в нем выделяются области  $Y^i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , каждая из которых соответствует  $i$ -му отказу ТЭО. Сложность и многообразие процессов преобразования материальных и энергетических потоков в ТЭО могут приводить к взаимному пересечению данных областей, поэтому каждую область  $Y^i$  необходимо заменить одним элементом – изображением  $i$ -го отказа

$$\mathbf{E}_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})^T, \quad i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

которое интегрально описывает свойства всей области.

Каждая координата  $e_{ij}$  вектора (4) показывает степень подобия состояний (2), принадлежащих  $i$ -му отказу ТЭО, по  $j$ -му контролируемому параметру.

При разработке диагностической модели требуется построить множество

$$E = \{\mathbf{E}_i / i = \overline{1, m}\}$$

изображений (4) всех рассматриваемых отказов ТЭО. Для этого формируется обучающая выборка из векторов вида (2):

$$\begin{aligned}\bar{Y}^1 &= \left\{ \mathbf{Y}_k^1 / k = \overline{1, N^1} \right\} \subset Y^1; \\ \bar{Y}^2 &= \left\{ \mathbf{Y}_k^2 / k = \overline{1, N^2} \right\} \subset Y^2; \\ &\dots\dots\dots \\ \bar{Y}^m &= \left\{ \mathbf{Y}_k^m / k = \overline{1, N^m} \right\} \subset Y^m,\end{aligned}\tag{5}$$

где  $N^i$  – мощность множества обучающих образов, принадлежащих области  $Y^i$ .

При построении изображений (4) нашли применение процедуры обучения, базирующиеся на методе стохастической аппроксимации [1]. Они представляются следующими рекуррентными соотношениями:

$$\mathbf{E}_i(k) = \mathbf{E}_i(k-1) - \frac{1}{k} [\mathbf{E}_i(k-1) - G(\mathbf{Y}^i(k))], \quad i = \overline{1, m},\tag{6}$$

где  $\mathbf{E}_i(k-1), \mathbf{E}_i(k)$  – изображение на  $(k-1)$ -м и  $k$ -м шагах обучения соответственно;

$\mathbf{Y}^i(k)$  – обучающий образ из выборки (5);

$$G(\mathbf{Y}) = (g_1(\mathbf{Y}), g_2(\mathbf{Y}), \dots, g_n(\mathbf{Y}))^T\tag{7}$$

– ортогональная система функций (называется  $G$ -преобразованием вектора  $\mathbf{Y}$ ).

В работе [3] обосновано преимущество задания функций системы (7) посредством ортогонального тригонометрического базиса. Очевидно, что применение соотношений (6) порождает замкнутое евклидово пространство  $G(Y)$ , координаты которого ограничиваются интервалами  $[-1; 1]$ .

При возрастании числа шагов ( $k \rightarrow \infty$ ) процесс обучения сходится к оптимальному изображению  $\mathbf{E}_i^*$  выглядит следующим образом:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \rho(\mathbf{E}_i(k), \mathbf{E}_i^*) = 0,\tag{8}$$

где  $\rho(\mathbf{E}_i(k), \mathbf{E}_i^*)$  – расстояние по метрике пространства  $G(Y)$  между векторами  $\mathbf{E}_i(k)$  и  $\mathbf{E}_i^*$ .

На практике предельное соотношение (8) заменяется приближенным условием

$$\rho(\mathbf{E}_i(k), \mathbf{E}_i(k+1)) \leq a, \quad a \in R^+, \quad i = \overline{1, m}\tag{9}$$

в силу ограниченности обучающей выборки (5) по отказам ТЭО (где  $R^+$  – множество неотрицательных вещественных чисел).

Чем ближе к нулю величина  $a$ , тем выше адекватность описания отказов ТЭО. При выполнении условия (9) принимается

$$\mathbf{E}_i^* = \mathbf{E}_i(k+1).$$

Процедура группировки обучающих образов и ранжирования групп, предложенная в [3], позволяет ускорить сходимость процесса обучения на основе соотношений (6). Ускорение достигается за счет формирования из выборки (5) упорядоченного множества

$$Y^i = \{Y_1^i, Y_2^i, \dots, Y_p^i\}, \quad i = \overline{1, m}\tag{10}$$

и применения групп  $Y_l^i, l = \overline{1, p}$  в последовательности, совпадающей с их номерами в выражении (10). При этом изображением  $\mathbf{E}_i(1)$  на первом шаге обучения является произвольный элемент первой группы ( $Y_1^i$ ) после его  $G$ -преобразования:

$$\mathbf{E}_i(1) = G(Y_1^i(1)), i = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Рекуррентное соотношение (6) применяется со второго шага.

В качестве показателя изменения скорости сходимости процесса обучения в работе [5] обоснована относительная величина

$$\varphi = 100 \left( 1 - \frac{N^i - \bar{N}^i}{N^i} \right), \quad (12)$$

где  $\bar{N}^i$  – количество элементов выборки, не использованных при обучении (из общего числа  $N^i$ ). Применение выражения (12) показывает увеличение скорости сходимости на 17% в сравнении с произвольным порядком использования обучающих образов.

### РАНЖИРОВАНИЕ ОБУЧАЮЩИХ ОБРАЗОВ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

В рамках упомянутой выше процедуры группировки и ранжирования считается, что обучающие образы одной группы  $Y_l^i$  эквивалентны между собой, следовательно, порядок их применения не оказывает влияния на скорость сходимости процесса обучения к оптимальному вектору  $\mathbf{E}_i^*$ . Образы считаются эквивалентными, если расстояние между ними по метрике евклидова пространства  $Y$  не превышает погрешности  $\delta$  регистрации соответствующих траекторий в контрольных точках ТЭО:

$$\forall \mathbf{Y}_k^i, \mathbf{Y}_r^i \in \bar{Y}^i: d(\mathbf{Y}_k^i, \mathbf{Y}_r^i) \leq \delta. \quad (13)$$

Однако в действительности все обучающие образы различны. Из условия (13) следует, что различие обучающих образов  $\mathbf{Y}_k^i$  и  $\mathbf{Y}_r^i$  может быть сопоставимо с погрешностями средств регистрации траекторий в контрольных точках, поэтому оно не фиксируется. Если физическая природа выходных параметров системы позволяет регистрировать траектории с достаточно высокой точностью ( $\delta \rightarrow 0$ ), то мощность любой группы  $Y_l^i$  эквивалентных обучающих образов снижается и в пределе становится равной единице:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} Y_l^i = \mathbf{Y}. \quad (14)$$

Соотношение (14) показывает, что ранжированию могут подвергаться отдельные элементы выборки, и это обеспечивает более тонкий учет влияния каждого образа на скорость сходимости процесса обучения.

Если найти два элемента выборки (5) по  $i$ -му отказу ТЭО, которые характеризуются наименьшим расстоянием между собой по метрике пространства  $Y$ , они образуют центр кластера [6, 7] наиболее типичных обучающих образов для данного отказа (это кластер внутри области  $Y^i$ ). Указанные элементы должны использоваться на первом и втором шагах про-

цесса обучения, когда значимость каждого образа максимальная. Затем находятся обучающие образы с последовательно возрастающим расстоянием от указанного центра. Номер шага, на котором каждый из образов используется в обучающей процедуре, увеличивается по мере повышения отдаленности данного элемента от центра кластера. Таким образом, скорость сходимости процесса обучения к оптимальному вектору возрастает посредством учета положения каждого элемента выборки в кластере и области  $Y^i$  в целом. Иначе повышение скорости достигается индивидуальным заданием очередности использования каждого обучающего образа. Причем скорость сходимости выше по сравнению с тем, что обеспечивает процедура группировки обучающих образов и ранжирования групп, на 15%. Данная оценка получена с помощью выражения (12).

Описанная схема ранжирования обучающих образов формализуется следующим образом.

Рассматривается выборка по  $i$ -му отказу ТЭО [см. формулу (5)]:

$$\bar{Y}^i = \left\{ \mathbf{Y}_{<n>k}^i / k = \overline{1, N^i} \right\} \text{ или } \bar{Y}^i = \left\{ \mathbf{Y}_{<n>k}^i / k \in J \right\}. \quad (15)$$

где  $J$  – индексное множество, мощность которого составляет  $N^i$  ( $|J| = N^i$ ).

Вначале определяются попарные расстояния по метрике евклидова пространства  $Y$  между всеми элементами обучающей выборки (15):

$$\forall \mathbf{Y}_k^i, \mathbf{Y}_r^i \in \bar{Y}^i, k \neq r: d_s(\mathbf{Y}_k^i, \mathbf{Y}_r^i) = d_s. \quad (16)$$

Количество величин вида (16) находится из комбинаторного выражения [8]

$$\mathbf{C}_{N^i}^2 = \frac{N^i!}{2!(N^i - 2)!}, \quad (17)$$

где  $\mathbf{C}_{N^i}^2$  – число сочетаний из  $N^i$  элементов по 2;

$N^i!$  – факториал числа  $N^i$ .

В последующих выражениях величина (17) обозначается как  $\mathbf{C}$ , тогда

$$\mathbf{C}_{N^i}^2 = \mathbf{C}. \quad (18)$$

Имея в виду выражение (18), расстояния (16) индексируются следующим образом:

$$d_s, \quad s = \overline{1, \mathbf{C}}. \quad (19)$$

Величины (19) ранжируются по неубыванию:

$$d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_s \leq \dots \leq d_{\mathbf{C}}. \quad (20)$$

Пусть расстояние между элементами  $\mathbf{Y}_{k_1}$  и  $\mathbf{Y}_{r_1}$  является минимальным:

$$d_1(\mathbf{Y}_{k_1}, \mathbf{Y}_{r_1}) = d_1 \text{ или } d(\mathbf{Y}_{k_1}, \mathbf{Y}_{r_1}) = \min_{s \in \mathbf{C}} \{ d_s(\mathbf{Y}_{k_1}, \mathbf{Y}_{r_1}) \}, \quad (21)$$

где  $\mathcal{J}\{k_1\}$  – разность индексного множества  $J$  и одноэлементного множества  $\{k_1\}$ :  $|\mathcal{J}\{k_1\}| = N^i - 1$ . Данные элементы используются на начальных шагах процесса обучения:

$$\mathbf{Y}(1) = \mathbf{Y}_{k_1} \Rightarrow G(\mathbf{Y}_{k_1}) = \mathbf{E}_i(1), \quad \mathbf{Y}(2) = \mathbf{Y}_{r_1}. \quad (22)$$

В этом заключается отличие первого шага от того, когда реализуется процедура группировки обучающих образов и ранжирования групп [выражение (11)].



Далее в последовательности (20) выбирается минимально возможное расстояние между элементами, одним из которых является  $\mathbf{Y}_{k_1}$ :

$$d(\mathbf{Y}_{k_1}, \mathbf{Y}_{r_2}) = \min_{s \in \mathbf{C}} \{d_s(\mathbf{Y}_{k_1}, \mathbf{Y}_r)_{r \in \mathcal{J}\{k_1, r_1\}}\}, \quad (23)$$

где  $\mathcal{J}\{k_1, r_1\}$  – разность индексного множества  $J$  и двухэлементного множества  $\{k_1, r_1\}$ :  
 $|\mathcal{J}\{k_1, r_1\}| = N^i - 2$ .

Таким образом, на третьем шаге процесса обучения используется элемент  $\mathbf{Y}_{r_2}$ :

$$\mathbf{Y}(3) = \mathbf{Y}_{r_2}. \quad (24)$$

Затем в выражении (20) выбирается минимально возможное расстояние между элементами, одним из которых является  $\mathbf{Y}_{r_1}$ :

$$d(\mathbf{Y}_{k_2}, \mathbf{Y}_{r_1}) = \min_{s \in \mathbf{C}} \{d_s(\mathbf{Y}_k, \mathbf{Y}_{r_1})_{k \in \mathcal{J}\{k_1, r_1, r_2\}}\}. \quad (25)$$

На четвертом шаге процесса обучения используется элемент  $\mathbf{Y}_{k_2}$ :

$$\mathbf{Y}(4) = \mathbf{Y}_{k_2}. \quad (26)$$

Потом в последовательности (20) выбирается минимально возможное расстояние между элементами, одним из которых является  $\mathbf{Y}_{r_2}$ :

$$d(\mathbf{Y}_{k_3}, \mathbf{Y}_{r_2}) = \min_{s \in \mathbf{C}} \{d_s(\mathbf{Y}_k, \mathbf{Y}_{r_2})_{k \in \mathcal{J}\{k_1, r_1, r_2, k_2\}}\}. \quad (27)$$

На пятом шаге процесса обучения используется элемент  $\mathbf{Y}_{k_3}$ :

$$\mathbf{Y}(5) = \mathbf{Y}_{k_3}. \quad (28)$$

Процесс выбора расстояний продолжается, и в результате выстраивается последовательность обучающих образов (22), (24), (26), (28) и т. д. Данную последовательность можно представить как

$$\mathbf{Y}(1), \mathbf{Y}(2), \mathbf{Y}(3), \mathbf{Y}(4), \mathbf{Y}(5), \dots, \mathbf{Y}(k). \quad (29)$$

Количество элементов в формуле (29) должно быть достаточным для выполнения условия (9).

**Вывод.** Кластерный анализ технических состояний позволяет находить наиболее рациональные приемы обработки статистической информации об отказах ТЭО, что обеспечивает повышение достоверности диагностирования, следовательно, обоснованное планирование и реализацию работ по техническому обслуживанию и ремонту.

#### Список используемых источников

1. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
2. Guoliang Lu, Yiqi Zhou, Changhou Lu, Xueyong Li. A novel framework of change-point detection for machine monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. – Vol. 83. – P. 533–548.

3. *Сеньченков В.И.* Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. – 377 с.
4. *Muscat Jo.* Functional Analysis: An Introduction to Metric Spaces, Hilbert Spaces, and Banach Algebras. Springer, 2014. – 420 p.
5. *Сеньченков В.И., Некрасов И.Н.* Повышение сходимости процессов обучения в диагностических моделях систем на основе процедур ранжирования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – №6. – С. 14–21.
6. *Вен Райзин Дж.* Классификация и кластер / пер. с англ. под ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1980. – 389 с.
7. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / пер с англ. под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
8. *Виленкин Н.Я.* Комбинаторика. – М.: Наука, 1969. – 323 с.

А.П. Гринев,

*кандидат техн. наук*

ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулева;

Н.Б. Литвинова,

*доктор педагогических наук*

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского;

С.В. Саркисов,

*доктор техн. наук, доцент*

ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулева

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯ РАСХОДА СТОЧНЫХ ВОД ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ЗАПАДНОГО ВОЕННОГО ОКРУГА**

На примере одной из КНС Западного военного округа показано практическое применение, разработанной методики определения графиков колебания расхода сточных вод, поступающих на канализационные и дренажные насосные станции. Получены график и коэффициенты неравномерности притока сточных вод на КНС, значения которых позволяют определять расчетные общие максимальные и минимальные расходы сточных вод.

Ключевые слова: объекты военной инфраструктуры, сточные воды, учет сточных вод, насос, коэффициенты неравномерности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

До настоящего времени требования федеральных законов [1, 2] и приказа Минстроя России № 437 «Об утверждении Требований к проведению технического обследования централизованных систем горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения...» в общей системе учета водных потоков водоснабжения и водоотведения объектов военной инфраструктуры Минобороны РФ выполнялись не в полной мере, так как приборным учетом не были охвачены потоки сточных вод. Такое положение обусловлено различными причинами, основными из которых являются: несовершенство разработанных ранее методик определения притока сточных вод к сооружениям системы водоотведения, стоимость устанавливаемого оборудования и недостатки, присущие этому оборудованию.

Для учета отводимых от объектов военной инфраструктуры сточных вод при проектировании канализационных сетей и сооружений систем водоотведения требуется знать не только нормы, но и режим водоотведения, определяемый коэффициентами неравномерности. Известно, что от величины коэффициентов неравномерности зависит величина расчетного расхода, а от этого расхода – размеры сечения каналов, объем приемных резервуаров, подача насосных станций и, следовательно, стоимость строительства.

Так, в соответствии со сводом правил [3] расчетные общие максимальные и минимальные расходы сточных вод с учетом суточной, часовой и внутрисуточной неравномерности следует определять по результатам математического моделирования систем водоотведения, учитывающего графики притока сточных вод от зданий, жилых массивов, промпредприятий, протяженность и конфигурацию сетей, наличие насосных станций и т. д., либо по данным фактического графика водоподдачи при эксплуатации аналогичных объектов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Основной целью проведенных исследований являлись изучение притока сточных вод на канализационные и дренажные насосные станции объектов военной инфраструктуры и оборонного назначения, а также получение максимальных и минимальных коэффициентов неравномерности.

Экспериментальные исследования расходов, объемов и неравномерности притока сточных вод проводились на 118 канализационных насосных станциях (КНС) Западного военного округа и Санкт-Петербургского гарнизона с применением устройства для диагностики насосов [4], разработанных методик [5, 6] и включали в себя:

- диагностирование состояния и режима работы насосов;
- определение фактического графика притока сточных вод на КНС;
- нахождение коэффициентов неравномерности притока сточных вод на КНС.

Ввиду большого объема проводимых исследований, в качестве примера в статье приведены результаты, полученные на одной из КНС Санкт-Петербургского гарнизона.

Учитывая то, что на исследуемой насосной станции невозможно было измерить приток сточных вод на подводящем коллекторе без дополнительных финансовых затрат, была применена методика определения графиков колебания расхода сточных вод, поступающих на канализационные и дренажные насосные станции [5, 6], позволяющая определять изменяющиеся во времени графики притока и объема сточных вод.

Исследуемая КНС относится к насосным станциям хозяйственно-бытового назначения. Общий вид КНС показан на рис. 1. Состав исследуемого оборудования насосной станции представлен в табл. 1.



*Рис. 1. Общий вид машинного зала исследуемой канализационной насосной станции*

В момент, когда проводились измерения, в работе находился один насос НН 50/25. Измерения расхода поступающих сточных вод проводились с помощью портативного расходомера ВЗЛЕТ ПР, информация с которого впоследствии переносилась в программу MicrosoftExcel и обрабатывалась. Результаты измерения расхода на КНС и их обработка в программе MicrosoftExcel представлены на рис. 2.

Относительные предельные погрешности результатов измерения определялись согласно ГОСТ 6134-2007 по формуле

$$\Delta Q = \sqrt{(\delta Q)^2 + (\delta n)^2},$$

где  $\delta Q$  и  $\delta n$  – относительные предельные погрешности измерения подачи и частоты вращения вала насоса.

Одновременно с измерениями расхода портативный расходомер фиксировал время полного заполнения рабочего объема приемного резервуара ( $t_k^{\text{заполнения}}$ ) и время его полной откачки насосами ( $t_k^{\text{откачки}}$ ) за каждый конкретный цикл работы КНС( $k$ ), что также необходимо для дальнейшего расчета.

Таблица 1

### Оборудование исследуемой канализационной насосной станции

Параметры	Значения		
Марка насоса	ФГ 57,5/9,5	ФГ 57,5/9,5	НН 50/25
Расход, м <sup>3</sup> /ч	57,5	57,5	50
Напор, м.в.с.	9,5	9,5	25
Марка электродвигателя	I ПЭДВ-1-93	I ПЭДВ-1-93	A02-42-4 УЗ

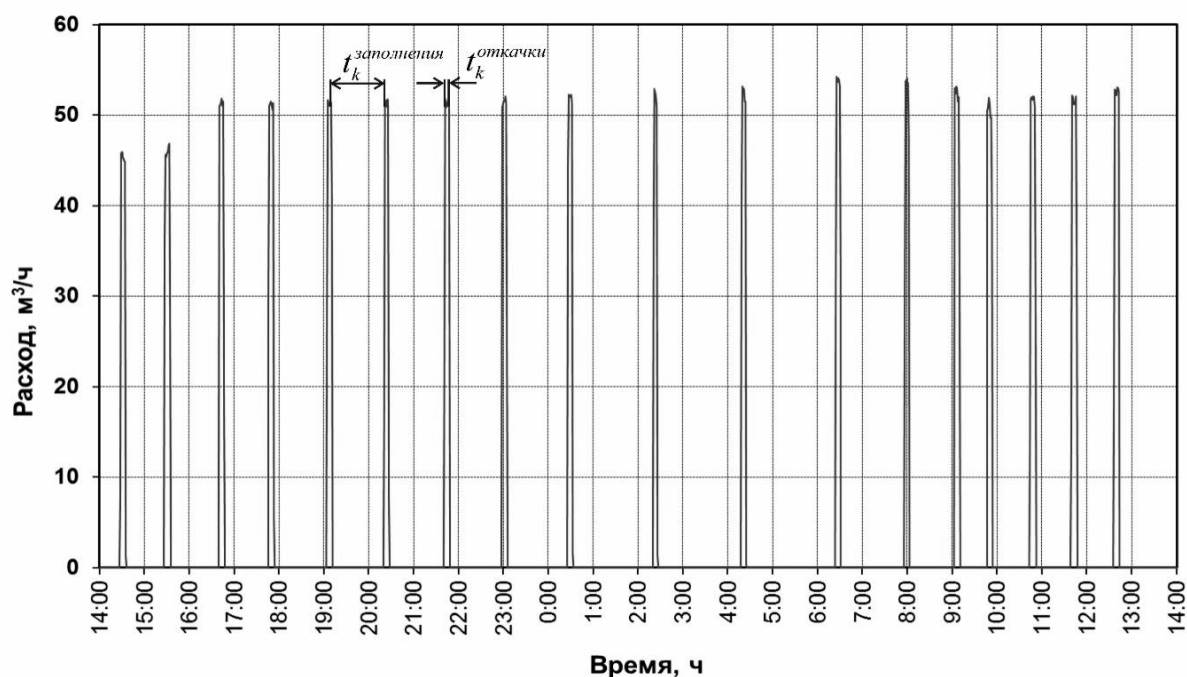


Рис. 2. График откачки сточных вод насосом на КНС

Из рис. 2 видно, что количество циклов  $k$  равно 18.

При  $k = 1$ ,  $t_1^{\text{заполнения}} = 27$  мин, а  $t_1^{\text{откачки}} = 9$  мин.

При  $k = 2$ ,  $t_2^{\text{заполнения}} = 27$  мин, а  $t_2^{\text{откачки}} = 8$  мин и т. д.

Значения для всех  $k$  циклов приведены в табл. 2.

Объем откаченных сточных вод ( $V(t)$ ) за требуемый промежуток времени  $t$  определялся по формуле

$$V(t) = \int_{t_0=0}^t Q(t) dt = Q(t_1) + Q(t_2) + Q(t_3) + \dots + Q(t_{1440}) = 101,1 \text{ м}^3.$$

В соответствии с разработанной методикой формировались пары значений объемов  $V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_{18})$  и соответствующих им аргументов, в качестве которых принималось время  $t_1, t_2, \dots, t_{18}$  соответственно:

$$V(t_1) = 0 \text{ м}^3, t_1 = t_1^{\text{заполнения}} = 27 \text{ мин};$$

$$V(t_2) = 5,781 \text{ м}^3, t_2 = (t_2^{\text{откачки}} + t_1^{\text{заполнения}}) + t_2^{\text{заполнения}} = (9 + 27) + 50 = 86 \text{ мин};$$

$$V(t_3) = 11,416 \text{ м}^3,$$

$$t_3 = (t_1^{\text{откачки}} + t_1^{\text{заполнения}}) + (t_2^{\text{откачки}} + t_2^{\text{заполнения}}) + t_3^{\text{заполнения}} = (9 + 27) + (9 + 50) + 64 = 159 \text{ мин}.$$

Значения для всех  $k$  циклов соответствующих пар приведены в табл. 3.

Таблица 2

**Определение времени полного заполнения рабочего объема приемного резервуара ( $t_k^{\text{заполнения}}$ ) и времени его полной откачки насосами ( $t_k^{\text{откачки}}$ ) за каждый конкретный цикл работы  $k$**

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$t_k^{\text{заполнения}}$	27	50	64	59	71	69	74	69	80	107	110	119	85	59	36	50	47	49	77
$t_k^{\text{откачки}}$	9	9	8	7	7	7	7	8	8	7	8	7	7	8	8	8	8	7	-

Таблица 3

**Пары значений объемов  $V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_{18})$  и соответствующих им аргументов  $t_1, t_2, \dots, t_{18}$  для всех  $k$  циклов работы КНС**

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$t_k$ , МИН	27	86	159	226	304	380	461	537	625	740	857	984	1076	1142	1176	1244	1299	1356
$V(t_k)$ , $\text{м}^3$	0	5,781	11,416	16,862	22,569	28,034	33,590	39,092	44,636	50,100	55,445	60,857	66,400	72,159	77,946	83,659	89,537	95,500

На рис. 3 графически показаны пары значений объемов  $V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_{18})$  и соответствующих им аргументов времени.

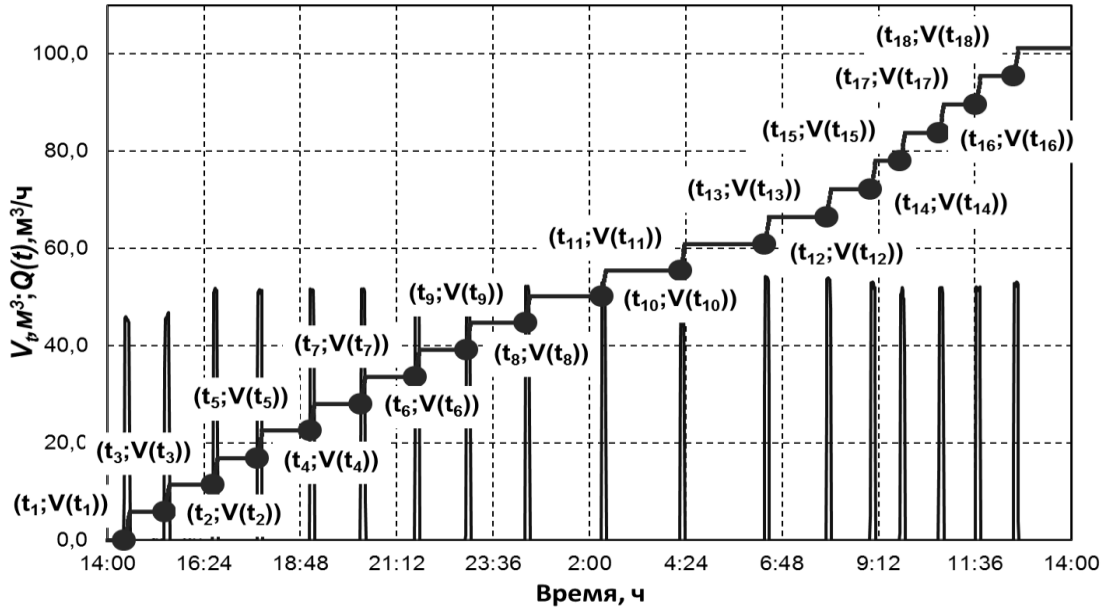


Рис. 3. Пары значений объемов  $V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_{18})$  и соответствующих им аргументов времени КНС

Определяем интегральный график притока сточных вод в виде функции  $W = f(t)$ , которая в точках  $t_1, t_2, \dots, t_{18}$  принимает значения, равные значениям  $V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_{18})$ , интерполируя функцию кубическим полиномом между соседними узлами.

Интерполяция кубическими полиномами (сплайнами) [7] при решении данной задачи выбрана не случайно, так как полиномиальная интерполяция не обеспечивает непрерывность производных функции  $W_i(t)$  и может давать значительные погрешности в промежутках между узлами. Кроме того, она плохо приспособлена для экстраполяции и, как правило, не обеспечивает правильное асимптотическое поведение функции  $W_i(t)$  при изменении аргумента  $t$  за пределами интервала интерполяции. Нередко с увеличением числа узлов погрешность такой интерполяции не только уменьшается, но и начинает расти.

В качестве примера покажем кубический полином  $W_i(t)$  на интервале от  $(t_1; V(t_1))$  до  $(t_2; V(t_2))$ . Функция  $W_i(t)$  записывается в виде

$$W_i(t) = a_i + b_i + \frac{c_i}{2} (t - t_i)^2 + \frac{d_i}{6} (t - t_i)^3.$$

В результате упрощений в соответствии с [7] получаем систему относительно значений только  $c_1, \dots, c_{n-1}$

$$\begin{aligned} 2c_1 &+ \frac{h_2}{h_1 + h_2} c_2 &= 6v(t_0, t_1, t_2) \\ &\vdots & \\ \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}} c_{i-1} &+ 2c_i &+ \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} c_{i+1} &= 6v(t_{i-1}, t_i, t_{i+1}) \\ &\vdots & \\ &\frac{h_{n-1}}{h_{n-1} + h_n} c_{n-2} &+ 2c_{n-1} &= 6v(t_{n-2}, t_{n-1}, t_n). \end{aligned}$$

Система данного вида решается любым доступным методом (матричным методом, методом Крамера, методом Гаусса и т. п.).

Учитывая трудоемкость вычислений коэффициентов кубического сплайна, алгоритм их нахождения описан в разработанном программном комплексе, выполненном в программной среде *VisualBasic*. Полученные коэффициенты функций для каждого отрезка приведены в табл. 4.

График притока сточных вод определялся в виде функции  $q(t)$  на всем промежутке времени  $t$ , где  $t \leq t_n$  (при  $t = 1440$  мин) по формуле

$$q(t) = W(t) = \frac{W(t + \Delta t) - W(t)}{\Delta t},$$

где  $\Delta t = 1$  мин.

Результаты исследований притока на КНС представлены в графическом виде на рис. 4, где позицией 5 показан искомый график притока сточных вод, поступающих на КНС.

На завершающем этапе найдены коэффициенты неравномерности поступления сточных вод (максимальный и минимальный) [8]. Для этого находили среднечасовой приток сточных вод (рис. 4), поступающих на КНС, по формуле

$$Q_{\text{ср.час}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{24} = \frac{101,1}{24} = 4,21 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 4

#### Коэффициенты функции кубического сплайна

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$a$	-3967,2	5016	-3636,5	1949,2	-1119,2	1349,7	-1527,2	-477,41	1096,6	-603,16	1335,7	-534,36	9956,3	-33145	18228	-7909	1928,7
$b$	7149,2	-10162	7809,9	-4571,8	2728,5	-3536,5	4249,2	1239,8	-3560,9	2027	-4823,5	2274,8	-39557	138235	-78385	34982	-8815,9
$c$	-4148,9	6971,3	-5471,9	3676,9	-2112,8	3186,4	-3837	-961,29	3919,5	-2204	5864,4	-3117	52484	-191980	112492	-51418	13580
$d$	772,42	-1608,6	1263,1	-990,21	540,28	-953,8	1158,1	242,15	1411,9	824,88	-2342,7	1445,3	-23189	88857	-53794	25202	-6951,1



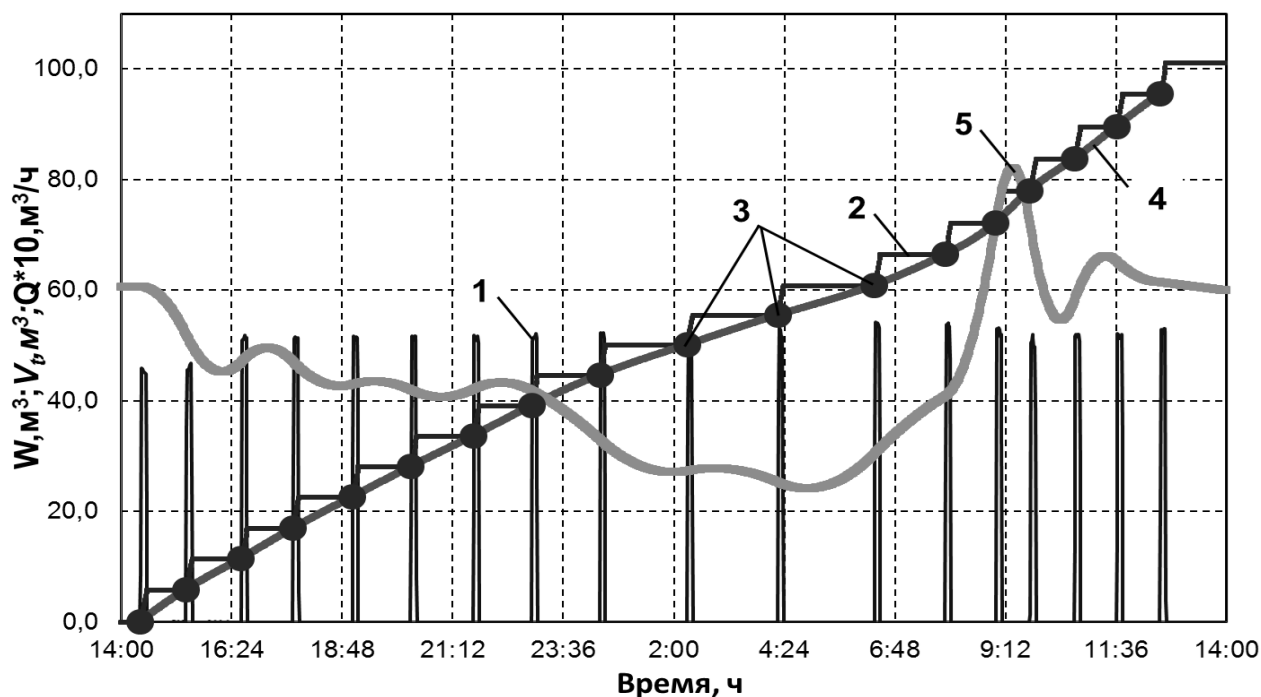


Рис. 4. Результаты исследования на КНС:  
 1 — общая производительность насоса НН 50/25; 2 — объем откаченных сточных вод; 3 — парные значения  $V(t_k)$  и  $t_k$ ; 4 — интегральный график притока сточных вод; 5 — график притока сточных вод

На рис. 5 максимальный и минимальный часовой приток сточных вод КНС составляет  $8,21 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $2,42 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно, что соответствует максимальному коэффициенту неравномерности

$$(k_{\max}^{\text{час}} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{ср}}} = \frac{8,21}{4,21} = 1,95)$$

и минимальному коэффициенту неравномерности

$$(k_{\min}^{\text{час}} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{ср}}} = \frac{2,42}{4,21} = 0,57).$$

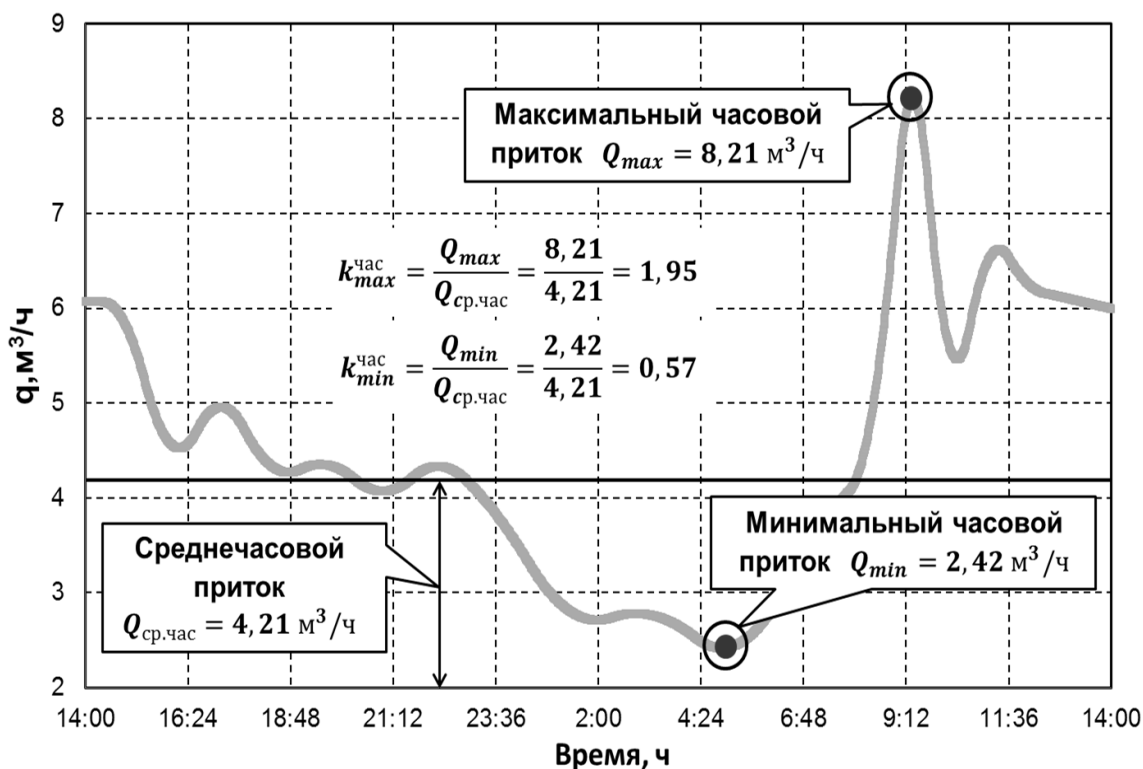


Рис. 5. График притока сточных вод КНС

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведенного анализа, установлено, что в системе учета водных потоков водоснабжения и водоотведения объектов военной инфраструктуры Минобороны РФ приборным учетом не охвачены потоки сточных вод.

2. При помощи разработанной методики определения притока сточных вод, поступающих на канализационные и дренажные насосные станции [5, 6], проведены исследования на 118 КНС Западного военного округа и Санкт-Петербургского гарнизона.

3. На примере одной из КНС Санкт-Петербургского гарнизона показано практическое применение разработанной авторами методики определения графиков колебания расхода сточных вод, поступающих на канализационные и дренажные насосные станции.

4. Получен график и коэффициенты неравномерности притока сточных вод на КНС, значения которых позволяют определить расчетные общие максимальные и минимальные расходы сточных вод с учетом суточной, часовой и внутрисуточной неравномерности.

## Список используемых источников

1. О водоснабжении и водоотведении: федеральный закон РФ от 07.12.2011 (в редакции 28.11.2015) № 416-ФЗ. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_122867](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867) (дата обращения: 15.05.2019).

2. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон РФ от 25.12.2009 (в редакции от 13.07.2015) №261-ФЗ. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978) (дата обращения: 18.05.2019).

3. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. – М.: М-во регионального развития Российской Федерации, 2012. – 74 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094155> (дата обращения: 17.04.2019).

4. *Игнатчик С.Ю., Игнатчик Н.В.* Методика обследования и оптимизации решений при реконструкции канализационных насосных станций // Водочистка. – СПб., 2014. – №1. – С. 43–48.

5. *Игнатчик В.С., Саркисов С.В., Гринев А.П.* Графоаналитический способ определения расхода воды // Вестник ТюмГАСУ. – Тюмень, 2015. – №2. – С. 49–52.

6. Способ определения расхода воды: пат. 2566419 Российской Федерация: МПК G01F 1/00 (2006.01) / А.П. Гринев, В.С. Игнатчик, С.Ю. Игнатчик, Н.В. Игнатчик, Ю.А. Ильин. – № 2014125666/28; заявл. 24.06.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. №30 – 9 с.

7. *Волков Е.А.* Гл. 1. Приближение функций многочленами [§ 11. Сплаины] // *Волков Е.А.* Численные методы: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1987. – С. 63–68.

8. *Игнатчик В.С., Седых Н.А., Гринев А.П.* Экспериментальное исследование неравномерности притока сточных вод // Военный инженер. – СПб., 2017. – № 4 (6). – С. 22–28.

Д.В. Гуков,  
 доктор техн. наук, профессор;  
 С.Д. Загуляев  
 «23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПСС»;  
 С.М. Иваньков

## УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА ПОД НАГРУЗКОЙ

В статье рассматривается возможность определения тока намагничивания силового трансформатора под нагрузкой. Применение уточненной математической модели позволит учесть влияние на намагничивающий ток факторов, действие которых не фиксируется при оригинальном методе расчета по Т-образной схеме замещения, что позволит повысить точность расчета.

Ключевые слова: трансформатор под нагрузкой, схемы замещения, снижение намагничивающего тока, аппроксимация кривой намагничивания, моделирование трансформатора.

### ВВЕДЕНИЕ

Намагничивающий ток в силовых трансформаторах вызывает потери в стали, поэтому целесообразно поддерживать его минимальным. На величину тока намагничивания под нагрузкой действуют различные факторы. С их учетом разработана математическая модель силового трансформатора, позволяющая с достаточной точностью рассчитывать намагничивающий ток под нагрузкой. Показания математического аппарата сравнивались с реальными значениями намагничивающего тока, которые определялись под нагрузкой оригинальным способом.

Уточненная модель позволила выявить дополнительные факторы, влияющие на снижение намагничивающего тока силовых трансформаторов при их работе под нагрузкой.

Силовые трансформаторы широко применяются в электроэнергетике для преобразования электрической энергии. Электрический ток, потребляемый трансформатором, условно делится на нагрузочный ток и ток намагничивания. Причем намагничивающий ток необходим для функционирования трансформатора, но дает потери в стали (магнитные потери), поэтому целесообразно его поддерживать на минимальном уровне.

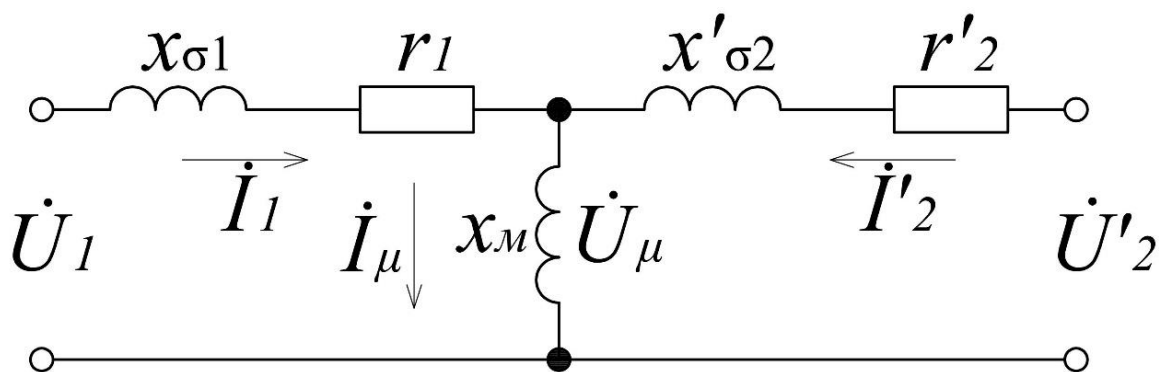


Рис.1. Т-образная схема замещения силового трансформатора

Нередко процессы в силовых трансформаторах анализируются на основе Т-образной схемы замещения (рис. 1). Из схемы видно, что с ростом нагрузки за счет увеличения тока  $I_1$  падение напряжения на первичной обмотке будет расти и напряжение  $U_\mu$ , приложенное к намагничивающей ветви, будет снижаться. Это, в свою очередь, приведет и к уменьшению тока намагничивания  $I_\mu$  по отношению к току холостого хода [1].

Однако под нагрузкой можно добиться большего снижения намагничивающего тока. Исследования [2, 3] показали, что на величину намагничивающего тока действуют различные факторы: насыщение сердечника на холостом ходу, размеры обмоток, величина нагрузки, нелинейная магнитная характеристика стали магнитопровода и др.

Расчет намагничивающего тока силового трансформатора по Т-образной схеме не позволяет учесть данные факторы. Поэтому целью настоящей работы являлась разработка уточненной математической модели трансформатора для точного расчета намагничивающего тока под нагрузкой и выявления дополнительных факторов, влияющих на его снижение.

Определим схемы замещения. На электрической схеме представим обмотки трансформатора в виде индуктивно связанных цепей (рис. 2). Следует отметить, что основное индуктивное сопротивление здесь не отражено, оно определяется схемой замещения магнитной цепи.

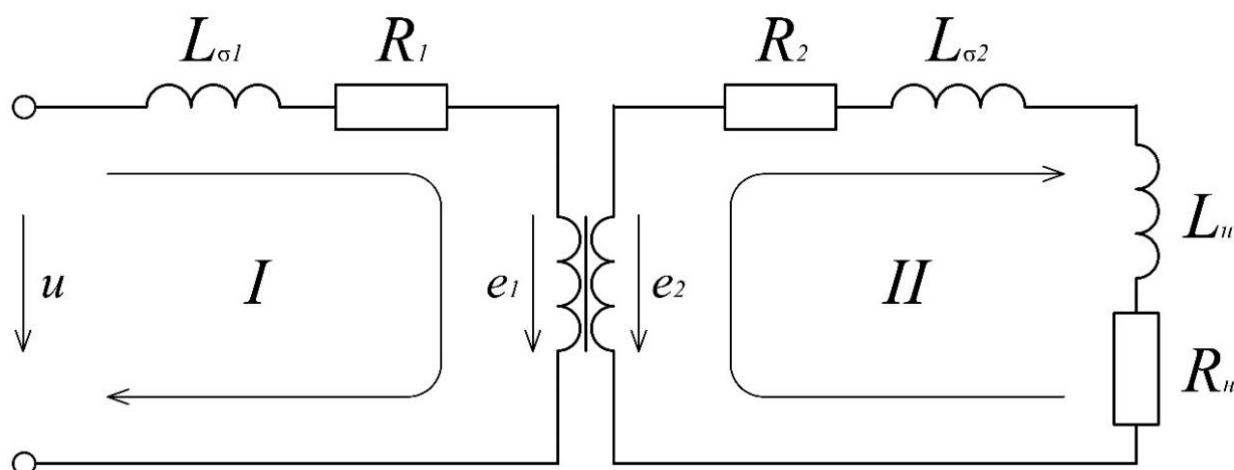


Рис. 2. Электрическая схема замещения силового трансформатора

На схеме показаны активные сопротивления обмоток  $R_1$  и  $R_2$ , ЭДС обмоток  $e_1$  и  $e_2$ , индуктивности рассеяния по воздуху (без прохождения магнитного потока по стали)  $L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$ . Кроме того, здесь представлены параметры  $R_n$  и  $L_n$ , которые характеризуют нагрузку на трансформатор. Индуктивности  $L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$  не насыщаются, вследствие чего представлены на схеме отдельно.

На рис. 3 представлена Т-образная схема замещения магнитной цепи трансформатора. На схеме введены следующие обозначения: МДС обмоток  $F_1$  и  $F_2$ , магнитные потоки обмоток  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , магнитные сопротивления участков стали магнитопровода в местах размещения первичной обмотки  $R_{\mu 1}$  и вторичной обмотки  $R_{\mu 2}$ , а также линейное сопротивление магнитному потоку по воздуху  $R_\sigma$ .

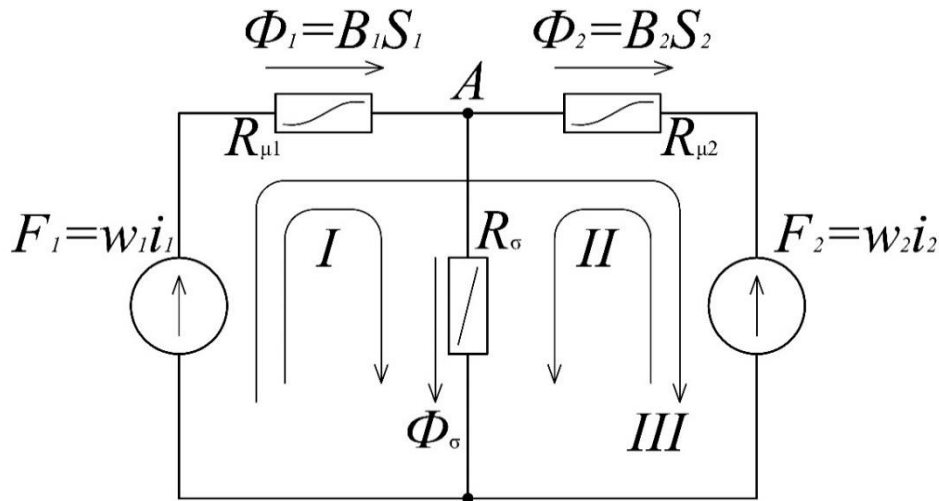


Рис.3. Магнитная схема замещения силового трансформатора

Основную кривую намагничивания магнитопровода аппроксимируем функцией гиперболического синуса [5] по двум выбранным точкам на кривой:

$$H_1 = H_0 \frac{e^{\frac{B_1}{B_0}} - e^{-\frac{B_1}{B_0}}}{2} = H_0 \operatorname{sh} \frac{B_1}{B_0}; \quad (1)$$

$$H_2 = H_0 \frac{e^{\frac{B_2}{B_0}} - e^{-\frac{B_2}{B_0}}}{2} = H_0 \operatorname{sh} \frac{B_2}{B_0} \quad (2)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – магнитные индукции первой и второй выбранных точек, Тл;

$H_1$  и  $H_2$  – напряженности полей в первой и второй выбранных точках, А/м;

$B_0, H_0$  – коэффициенты аппроксимации.

Аппроксимация кривой намагничивания по заданным точкам позволяет построить кривую намагничивания, близкую к реальной, и обеспечивает точное совпадение реальной и расчетной кривых только в этих точках.

Для определения коэффициентов аппроксимации необходимо решить трансцендентное уравнение, которое является отношением уравнений (1) и (2):

$$\frac{H_2}{H_1} = \operatorname{sh} \frac{\frac{B_2}{B_0}}{\frac{B_1}{B_0}}$$

На схеме замещения электрической цепи (рис. 2) определим направления обходов токов  $i_1$  и  $i_2$ , ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , напряжения  $u$ , и запишем по второму закону Кирхгофа уравнения:

$$u_m \sin \omega t = w_1 S_1 \frac{dB_1}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1; \quad (3)$$

$$w_2 S_2 \frac{dB_2}{dt} + i_2 (R_2 + R_{\mu}) + (L_{\sigma 1} + L_{\mu}) \frac{di_2}{dt}. \quad (4)$$

На магнитной схеме замещения аналогично определим направления обхода контуров и запишем уравнение для третьего направления, продифференцируем его и получим третье дифференциальное уравнение:

$$l_1 H_0 \operatorname{sh} \frac{B_1}{B_0} + l_2 H_0 \operatorname{sh} \frac{B_2}{B_0} = w_1 i_1 - w_2 i_2;$$

$$\frac{l_1 H_0}{B_0} \frac{dB_1}{dt} \operatorname{ch} \frac{B_1}{B_0} + \frac{l_2 H_0}{B_0} \frac{dB_2}{dt} \operatorname{ch} \frac{B_2}{B_0} = w_1 \frac{di_1}{dt} - w_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (5)$$

По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи составим уравнения для первого и второго контуров обхода (см. рис. 2), сложим их и выразим магнитный поток:

$$\begin{cases} w_1 i_1 = \Phi_1 R_{\mu 1} + \Phi_{\sigma} R_{\sigma} \\ w_2 i_2 = -\Phi_2 R_{\mu 2} + \Phi_{\sigma} R_{\sigma} \end{cases};$$

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 = \Phi_1 R_{\mu 1} - \Phi_2 R_{\mu 2} + 2\Phi_{\sigma} R_{\sigma};$$

$$\Phi_{\sigma} = \frac{i_1 w_1 - \Phi_1 R_{\mu 1} + i_2 w_2 + \Phi_2 R_{\mu 2}}{2R_{\sigma}} \quad (6)$$

Определим выражения для магнитных сопротивлений с учетом аппроксимации и подставим их в выражение (6):

$$R_{\mu 1} = \frac{l_1 H_0 \operatorname{sh} \frac{B_1}{B_0}}{B_1 S_1};$$

$$R_{\mu 2} = \frac{l_2 H_0 \operatorname{sh} \frac{B_2}{B_0}}{B_2 S_2};$$

$$\Phi_{\sigma} = \frac{i_1 w_1 - B_1 S_1 \frac{l_1 H_0 \operatorname{sh} \frac{B_1}{B_0}}{B_1 S_1} + i_2 w_2 + B_2 S_2 \frac{l_2 H_0 \operatorname{sh} \frac{B_2}{B_0}}{B_2 S_2}}{2R_{\sigma}}. \quad (7)$$

По первому закону Кирхгофа для точки «А» на схеме (см. рис. 3)  $\Phi_1 - \Phi_{\sigma} = \Phi_2$ . С учетом этого разделим уравнение (7) на слагаемые, продифференцируем, сгруппируем и получим четвертое дифференциальное уравнение:

$$B_1 S_1 - \frac{i_1 w_1}{2R_{\sigma}} - \frac{i_2 w_2}{2R_{\sigma}} + \frac{l_1 H_0}{2R_{\sigma}} \operatorname{sh} \frac{B_1}{B_0} - \frac{l_2 H_0}{2R_{\sigma}} \operatorname{sh} \frac{B_2}{B_0} - B_2 S_2 = 0,$$

$$S_1 \frac{dB_1}{dt} - \frac{w_1}{2R_{\sigma}} \frac{di_1}{dt} - \frac{w_2}{2R_{\sigma}} \frac{di_2}{dt} + \frac{l_1 H_0}{2R_{\sigma} B_0} \operatorname{ch} \frac{B_1}{B_0} \frac{dB_1}{dt} - \frac{l_2 H_0}{2R_{\sigma} B_0} \operatorname{ch} \frac{B_2}{B_0} \frac{dB_2}{dt} - S_2 \frac{dB_2}{dt} = 0,$$

$$\frac{dB_1}{dt} (S_1 + \frac{l_1 H_0}{2R_{\sigma} B_0} \operatorname{ch} \frac{B_1}{B_0}) - \frac{di_1}{dt} \frac{w_1}{2R_{\sigma}} - \frac{di_2}{dt} \frac{w_2}{2R_{\sigma}} - \frac{dB_2}{dt} (\frac{l_2 H_0}{2R_{\sigma} B_0} \operatorname{ch} \frac{B_2}{B_0} + S_2) = 0. \quad (8)$$

В итоге составлена система исходных уравнений (3), (4), (5), (8):

$$\begin{cases} u_m \sin \omega t = w_1 S_1 \frac{dB_1}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 \\ w_2 S_2 \frac{dB_2}{dt} + i_2 (R_2 + R_n) + (L_{\sigma 1} + L_n) \frac{di_2}{dt} \\ \frac{l_1 H_0}{B_0} \frac{dB_1}{dt} ch \frac{B_1}{B_0} + \frac{l_2 H_0}{B_0} \frac{dB_2}{dt} ch \frac{B_2}{B_0} = w_1 \frac{di_1}{dt} - w_2 \frac{di_2}{dt} \\ \frac{dB_1}{dt} (S_1 + \frac{l_1 H_0}{2R_{\sigma} B_0} ch \frac{B_1}{B_0}) - \frac{di_1}{dt} \frac{w_1}{2R_{\sigma}} - \frac{di_2}{dt} \frac{w_2}{2R_{\sigma}} - \frac{dB_2}{dt} (\frac{l_2 H_0}{2R_{\sigma} B_0} ch \frac{B_2}{B_0} + S_2) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Расчет, для большей точности, делится на 2500 шагов. Для каждого шага времени в периоде определяются мгновенные значения токов и индукций методом Рунге – Кутты, в котором приближенное значение в последующих точках вычисляется по формуле

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

При этом определение следующего значения происходит в четыре этапа:

$$k_1 = h \cdot f(x_n; y_n) \frac{1}{2};$$

$$k_2 = h \cdot f(x_n + \frac{h}{2}; y_n + \frac{1}{2} k_1);$$

$$k_3 = h \cdot f(x_n + \frac{h}{2}; y_n + \frac{1}{2} k_2);$$

$$k_4 = h \cdot f(x_n + h; y_n + k_3),$$

где  $y_n$  – значение параметра в точке  $n$ ;

$x_n$  – значение времени в периоде в точке  $n$ , с;

$h$  – величина шага по  $x$ , с.

Начальные условия выбираются нулевыми. Мгновенное значение намагничивающего тока определяется разницей между мгновенными значениями первичного  $i_1(t)$  и приведенного вторичного  $i_2'(t)$  токов. Значения численных параметров определяются на основании данных производителей силовых трансформаторов.

На блок-схеме уточненной модели трансформатора (рис. 4) обозначены переменные:  $E$  – счетчик периодов питающего напряжения,  $t_m$  – период питающего напряжения,  $t$  – значение времени в периоде.

Данная математическая модель была реализована в программной среде *QuickBasic*. В ходе моделирования на экране отображается область для построения кривых напряжения, индукций и токов для одного периода напряжения. Мгновенные значения отображаются на области построения точками. Для построения кривых в последующих периодах экран очищается. Расчет переходного процесса, в среднем, длится 30–50 периодов напряжения питания до установившегося режима, когда все расчетные значения в текущем периоде меняются по сравнению с предыдущим на величину менее 1-2%. Пример построений приведен на рис. 5.



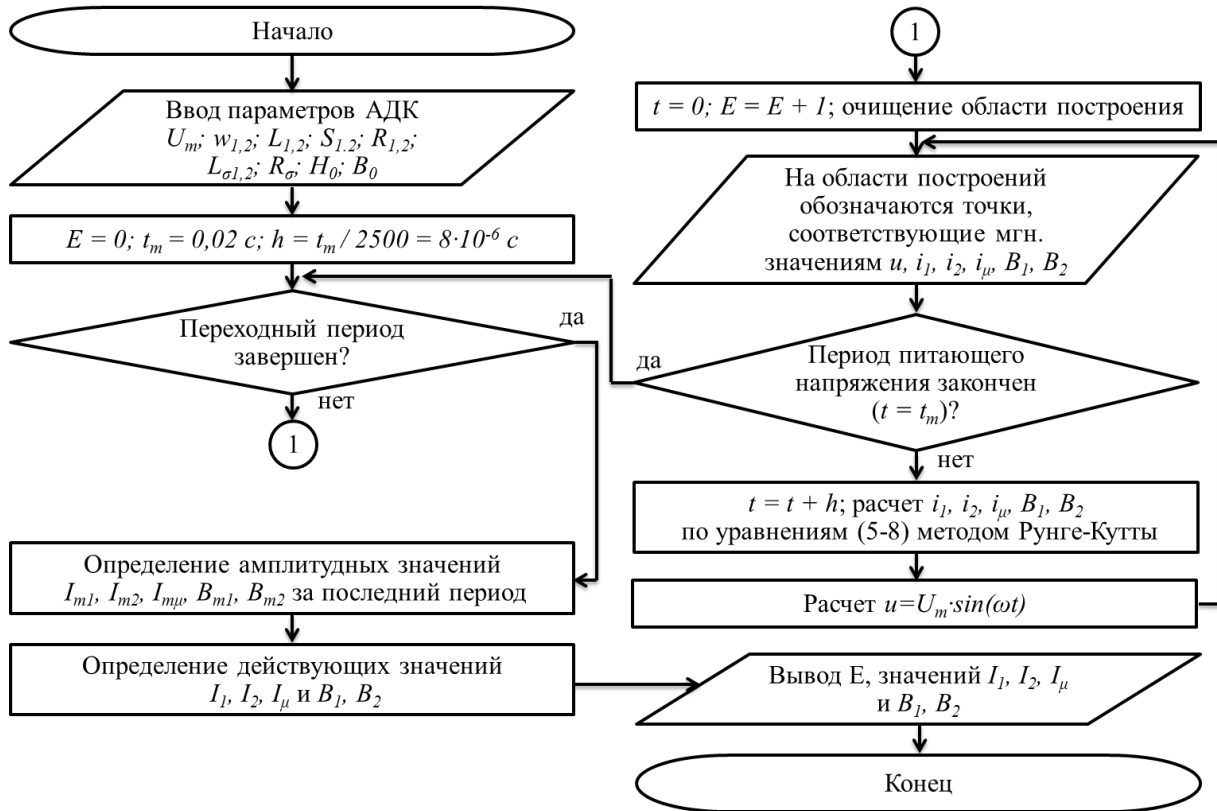


Рис.4. Блок-схема уточненной математической модели

Показания математической модели сравнивались с реальными данными, измеренными с помощью нового способа измерения намагничивающего тока трансформатора под нагрузкой [6]. Ранее такая возможность отсутствовала. Способ заключается в том, что в цепи обеих обмоток трансформатора последовательно включаются шунты. Подключенный к шунтам осциллограф покажет на экране мгновенное значение тока намагничивания.

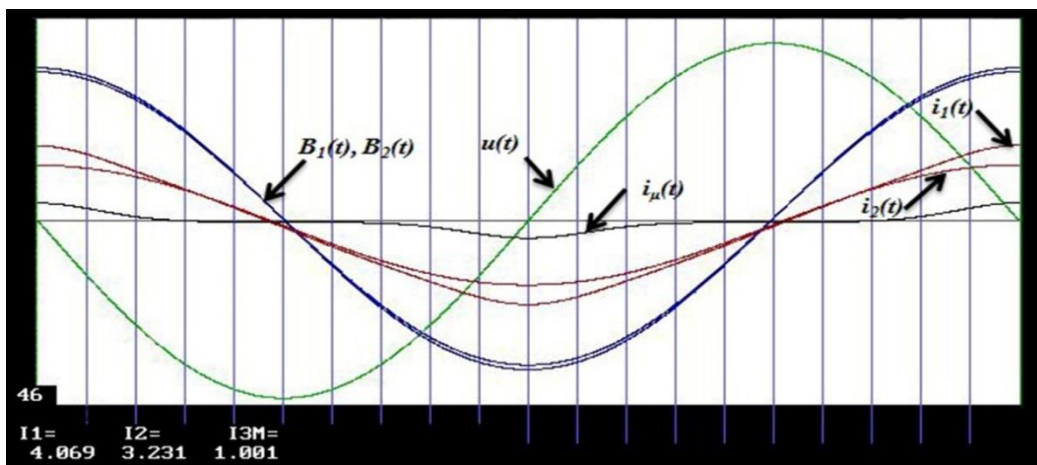


Рис. 5. Моделирование трансформатора ОСМ 1 кВА (индуктивная нагрузка)

Модель показала хорошую сходимость с опытными данными. Среднеквадратичное отклонение действующего значения тока составило 6,3%. Максимальная погрешность по мгновенному значению не превышает 12%.

С помощью данной модели удалось выявить дополнительные факторы, влияющие на снижение намагничивающего тока силовых трансформаторов, такие как индуктивный ток нагрузки, который совпадает по фазе с намагничивающим; расположение отдельных обмоток, потоки рассеяния которых вызывают дополнительное насыщение участков стали магнитопровода; наибольшее отношение числа витков в первичной обмотке к сечению магнитопровода.

**Вывод.** Разработанную математическую модель силового трансформатора возможно использовать для достаточно точного расчета намагничивающего тока под нагрузкой и исследования факторов, влияющих на него.

### Список используемых источников

1. *Копылов И.П.* Электрические машины: учебник для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
2. *Гуков Д.В., Загуляев С.Д., Прищепина Д.Н.* Повышение энергоэффективности силовых трансформаторов за счет снижения магнитных потерь // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 65–70.
3. *Гуков Д.В., Загуляев С.Д.* Снижение магнитных потерь трехфазного трансформатора с помощью дискового исполнения обмоток и делением вторичной пополам // Промышленная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 33–37.
4. *Прудник А.М., Гончарик Е.В.* Энергосбережение в системах освещения: метод. пособие к практ. занятиям по курсу «Основы экологии энергосбережения». – Минск: БГУИР, 2008. – 28 с.
5. *Касьяненко М.Г., Матюхов В.Ф., Ваганов М.А.* Аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей при проектировании электрических машин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – №9. – С. 69–75.
6. Пат. РФ №2328749 МПК G01R 19/00 Способ измерения намагничивающего тока трансформатора, работающего под нагрузкой / Д.В. Гуков, А.Д. Гуков и др. – Бюл. №19 от 10.07.2008.

Д.В. Гуков,

доктор техн. наук, профессор

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского;

С.Д. Загуляев

«23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПСС»;

В.М. Куприенко,

доктор техн. наук

«23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПСС»

## ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА СНИЖЕННУЮ НАГРУЗКУ

Асинхронные двигатели зачастую работают на нагрузку ниже номинальной. Такой режим работы вызывает рост индуктивной составляющей тока статора. Это сопровождается снижением коэффициентом мощности, повышением потерь в электродвигателе и дополнительной нагрузки на питающую сеть. В статье предложено снижать питающее напряжение асинхронного двигателя относительно номинального значения настолько, чтобы магнитная индукция была постоянной и равной магнитной индукции при номинальном режиме. При этом индуктивный намагничивающий ток при любой нагрузке будет минимален и равен намагничивающему току в номинальном режиме.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, коэффициент мощности, ток намагничивания, холостой ход.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДК) широко распространены как на объектах военной инфраструктуры, так и на гражданских объектах. Вместе с тем они имеют невысокий коэффициент мощности, который отражает повышенные потери в двигателе и дополнительную нагрузку на сеть питания. В большей степени это связано с высоким значением индуктивного намагничивающего тока. На холостом ходу он имеет наибольшее значение и составляет 25–50% от номинального тока.

С ростом нагрузки ток намагничивания снижается и достигает минимального значения при номинальной нагрузке. Однако часто в расчетах ток намагничивания принимают неизменным и равным току холостого хода. Например, при составлении векторной диаграммы АДК.

В работах [1, 2], связанных с исследованием влияния различных факторов на величину тока намагничивания трансформаторов и АДК, показано, что ток с ростом нагрузки заметно снижется. Из схемы на рис. 1 видно, что к намагничивающей ветви приложено напряжение  $U_\mu$ , равное сетевому  $U_1$  за вычетом падения напряжения от тока  $I_1$  на активном сопротивлении  $r_1$  и в первую очередь на сопротивлении рассеяния  $x_{\sigma 1}$ . Это обуславливает определенное снижение тока намагничивания  $I_\mu$  АДК с увеличением нагрузки.

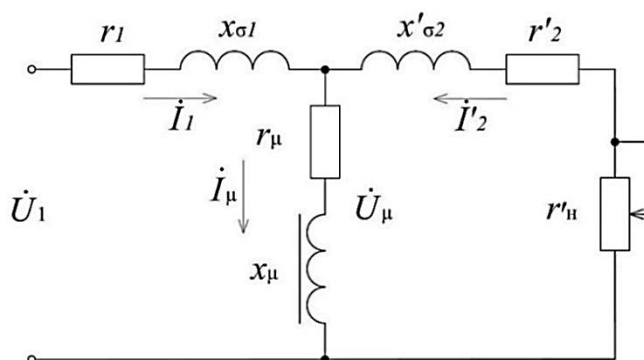


Рис. 1. T-образная схема замещения АДК

Нередко, по различным причинам, АДК работают недогруженными. В целях повышения коэффициента мощности в режимах частичной нагрузки, в технической и научной литературе приводятся рекомендации по снижению питающего напряжения [3–5].

Так, при небольших нагрузках применяют переключение соединения обмоток с треугольника на звезду, фазное напряжение и индуктивная составляющая тока статора уменьшаются. В случае частотного регулирования скорости вращения АДК в электроприводах с вентиляторной механической характеристикой прибегают к использованию квадратичной функции  $U/f^2$ , снижая потери энергии.

Тем не менее данные рекомендации только частично способствуют повышению коэффициента мощности. Конкретных зависимостей питающего напряжения от величины нагрузки на АДК в научной и технической литературе найти не удалось. Определение подобных зависимостей может повысить коэффициент мощности при любом значении нагрузки на АДК, улучшить энергетическую эффективность. Поэтому цель настоящей работы – определить возможности повышения коэффициента мощности конкретного АДК с помощью изменения питающего напряжения в зависимости от величины нагрузки.

АДК разрабатывается для режима номинальной нагрузки, поэтому степень насыщения магнитопровода в данном режиме соответствует точке изгиба основной кривой намагничивания. Индуктивный ток намагничивания при этом минимален (сталь еще не насыщена). Дальнейшее увеличение магнитной индукции приводит к резкому нелинейному росту тока намагничивания. Если снизить напряжение, то величина магнитной индукции будет ниже, чем в номинальном режиме. Пропорционально квадрату снижения питающего напряжения уменьшится максимальный вращающий момент, ухудшится устойчивость АДК.

Поэтому необходимо иметь на зажимах АДК такое значение напряжения, которое обеспечивает такую же магнитную индукцию, как и в номинальном режиме работы. Тогда при частичной нагрузке на намагничивающей ветви (рис. 1) будут такие же напряжение и намагничивающий ток, как и при номинальной нагрузке. Коэффициент мощности увеличится.

В работе исследуется АДК типа 4АМ 100L4. Для достижения цели составим зависимость питающего напряжения на АДК от нагрузки  $U_{\phi} = f(P_1/P_{ном})$  при минимальном и неизменном намагничивающем токе.

Расчет выполним в соответствии со схемой (см. рис. 1) и справочными данными по параметрам схемы замещения. Параметры намагничивающей ветви приводятся для номинального режима и не могут быть использованы для текущей задачи. Поэтому перед расчетом была опытным способом определена вольтамперная характеристика (ВАХ) намагничивающей ветви, снята характеристика идеального холостого хода (ИХХ). Так можно определить параметры намагничивающей ветви. Схема опытной установки представлена на рис. 2.

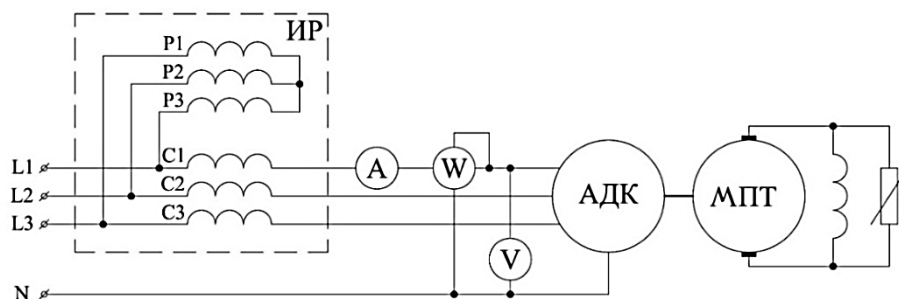


Рис. 2. Схема опытной установки

АДК соединяется с машиной постоянного тока МПТ. Для регулирования питающего напряжения АДК питается от потенциал-регулятора ИР. Контроль параметров двигателя выполняется для одной фазы. МПТ используем как двигатель для вращения ротора АДК со скоростью вращения магнитного поля статора, добиваясь отсутствия механических потерь.

Устанавливаем питающее фазное напряжение 240 В, увеличиваем скорость вращения МПТ до 1500 об/мин и поддерживаем ее постоянной, фиксируем фазные ток  $I_\phi$ , напряжение  $U_\phi$  и активную мощность  $P_\phi$ . Такие же исследования выполним для меньших напряжений до 140 В с шагом 20 В. В заключение испытаем АДК в номинальном режиме.

На ИХХ первичный ток является намагничивающим ( $I_\phi = I_\mu$ ). По опытным данным, по схеме (см. рис. 1), вычислим напряжение  $U_\mu$  (по справочным данным  $r_1 = 2,48 \text{ Ом}$ ,  $x_{\sigma 1} = 3,44 \text{ Ом}$ ):

$$z_\mu = \sqrt{r_\mu^2 + x_\mu^2} = \sqrt{\left(\frac{P_\phi}{I_\phi^2} - r_1\right)^2 + \left(\frac{Q_\phi}{I_\phi^2} - x_1\right)^2}, [\text{Ом}]$$

$$U_\mu = I_\mu z_\mu, [\text{В}]$$

Результаты опыта и расчетов приведены в табл. 1. Для математического представления  $U_\mu = f(I_\mu)$  аппроксимируем ее функцией гиперболического синуса (1) (здесь  $U_{\mu 0}$  и  $I_{\mu 0}$  – коэффициенты аппроксимации). Зависимость  $U_\mu = f(I_\mu)$  и ее аппроксимация представлены на рис. 3.

$$I_\mu = I_{\mu 0} \operatorname{sh} \frac{U_\mu}{U_{\mu 0}}, \tag{1}$$

Таблица 1

Результаты опыта ИХХ

Параметры	Значения параметров					
$U_\phi, \text{ В}$	140	160	180	200	220	240
$I_\mu = I_\phi, \text{ А}$	2,0	2,3	2,7	3,3	4,0	5,4
$P_\phi, \text{ Вт}$	25	33	45	68	100	181
$S_\phi, \text{ ВА}$	280	368	486	660	880	1296
$Q_\phi, \text{ Вар}$	278,87	366,51	483,90	656,50	874,31	1283,29
$x_\mu, \text{ Ом}$	66,28	65,84	62,92	56,84	51,18	40,55
$U_\mu, \text{ В}$	132,74	151,65	170,19	187,97	205,33	219,63

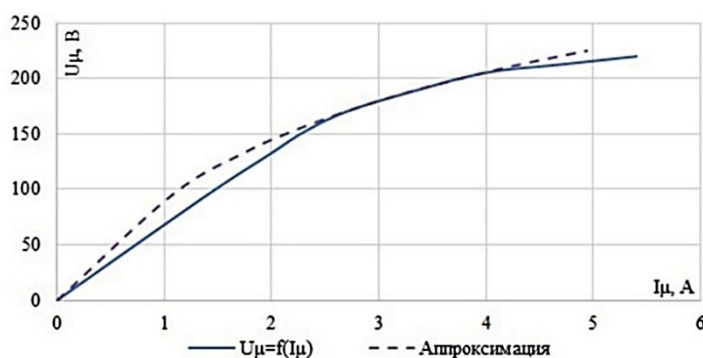


Рис. 3. Зависимость  $U_\mu = f(I_\mu)$  и ее аппроксимация

С учетом нелинейной ВАХ ветви намагничивания рассчитаем по схеме (рис. 1) напряжения питания при различной нагрузке на АДК. Исходные параметры АДК по справочным данным  $r'_2 = 1,90 \text{ Ом}$ ,  $x'_{\sigma 2} = 2,60 \text{ Ом}$ , по опыту ИХХ  $r_\mu = 3,75 \text{ Ом}$ . Номинальное скольжение  $s_n = 6\%$ .

Напряжение питания АДК будем определять по схеме (см. рис. 1) с учетом правил построения векторной диаграммы при заданном значении  $U_\mu$ . Запишем выражения для угла сдвига  $\phi_\mu$  между  $U_\mu$  и  $I_\mu$ , приведенного тока  $I'_2$  и угла сдвига  $\phi_2$  между  $U_\mu$  и  $I'_2$ :

$$\varphi_\mu = \arccos \frac{r_\mu}{z_\mu},$$

$$I'_2 = \frac{U_\mu}{z_2} = \frac{U_\mu}{\sqrt{(r'_2 + r'_n)^2 + x_{\sigma 2}^2}},$$

$$\varphi_2 = \arccos \frac{(r'_2 + r'_n)}{z_2}.$$

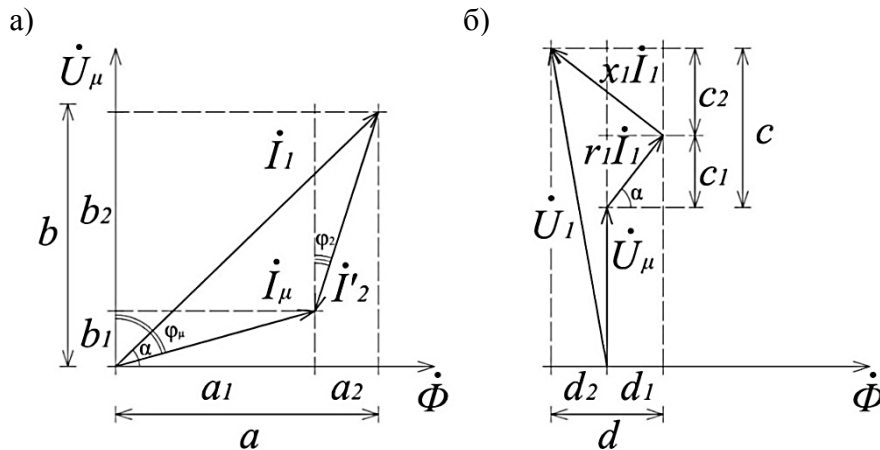


Рис. 4. Векторные диаграммы для определения тока  $I_1$  (а) и напряжения  $U_1$  (б). Масштаб токов и напряжений для наглядности не соблюден

По векторной диаграмме (рис. 4,а) определим ток  $I_1$  и угол  $\alpha$ , по векторной диаграмме (рис. 4,б) рассчитаем питающее напряжение  $U_1$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ :

$$b = b_1 + b_2 = I_\mu \cos \varphi_\mu + I'_2 \cos \varphi_2,$$

$$a = a_1 + a_2 = I_\mu \sin \varphi_\mu + I'_2 \sin \varphi_2,$$

$$\alpha = \arccos \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}},$$

$$d_2 = d - d_1 = x_1 I_1 \cos(90^\circ - \alpha) - r_1 I_1 \cos \alpha,$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(90^\circ - \alpha + \arccos \frac{d_2}{\sqrt{d_2^2 + (U_\mu + c)^2}}).$$

Используем значения  $r_1$ ,  $r'_2$ ,  $x_{\sigma 1}$ ,  $x'_{\sigma 2}$ ,  $r_\mu$ ,  $s_n$ ,  $U_\phi$  для определения  $U_\mu$  путем его подбора. Расчет показал, что в номинальном режиме  $U_\mu$  составляет 190,8 В, а  $I_\mu$  при этом 3,4 А. Составим зависимость  $U_\phi = f(P_1/P_{\text{ном}})$  при  $U_\mu = 190,8$  В, определим коэффициенты мощности  $\cos\varphi_1$ . Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 2

Напряжения  $U_\phi$  и соответствующие  $\cos\varphi_1$  в зависимости от нагрузки

$P/P_{\text{ном}}, \%$	10	25	40	55	70	85	100
$U_\phi, \text{В}$	203,95	206,48	209,05	211,72	214,41	217,18	220
$\cos\varphi_1$	0,19	0,42	0,59	0,69	0,74	0,79	0,82

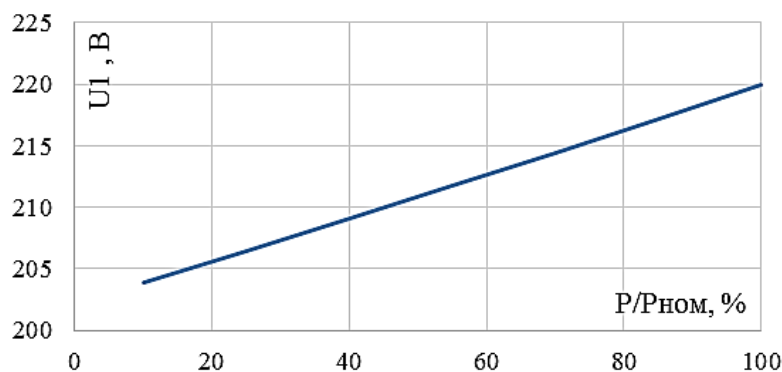


Рис. 5. Зависимость оптимального напряжения питания АДК от нагрузки

Зависимость на рис. 5 построена при минимальном и неизменном значении реактивного  $I_{\mu}$ . На рис. 6 показаны сравнительные графики коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  рассматриваемого АДК для исходного состояния и для работы с минимальным  $I_{\mu}$ .

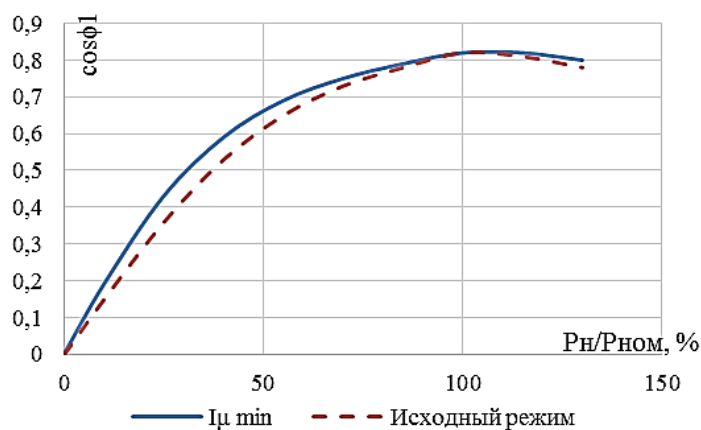


Рис. 6. Графики коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для АДК типа 4АМ 100L4 расчетным путем с экспериментальным определением параметров намагничивающей ветви получена зависимость напряжения питания от нагрузки при минимальном токе намагничивания. Так, при 55%-ной нагрузке напряжение, подаваемое на АДК, должно быть снижено с 220 В до 211 В, при 25%-ной нагрузке – до 206 В.

Работа АДК с учетом полученных данных позволит повысить коэффициент мощности при работе на частичных нагрузках на 9–18%. Наибольший эффект достигается при нагрузке АДК в диапазоне 16–62% от номинальной. При этом максимальный вращающий момент двигателя будет практически одинаковым как в номинальном режиме, так и при сниженной нагрузке.

## Список используемых источников

1. Гуков Д.В., Загуляев С.Д. Снижение магнитных потерь трехфазного трансформатора с помощью дискового исполнения обмоток и деления вторичной обмотки пополам // Промышленная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 33–37;
2. Гуков Д.В., Загуляев С.Д. Определение намагничивающего тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при помощи регистратора показателей качества электрической энергии // Промышленная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 29–36;

3. *Токочакова Н.В., Колесник Ю.Н.* Оптимизация уровней напряжения промышленных потребителей с целью снижения энергозатрат // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3-4. – С. 23–29;

4. *Брославский И.Я., Ииматов З.Ш., Поляков В.Н.* Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.



И.А. Дема;  
В.М. Низовцев,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Е.Н. Семенов

## **РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТОКА ГАЗА С ПРИНУДИТЕЛЬНО ОХЛАЖДАЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ТУРБИН ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Рассматривается обтекание поверхности рабочей лопатки турбины газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок (ЭУ) летательных аппаратов (ЛА) и наземных объектов (НО) высокотемпературным потоком разогретого, теплопроводного, вязкого газа при местном выдуве холодного газа из внутренней полости лопатки в пространство между лопатками турбины. Интегрирование уравнений движения вязкого газа осуществляется конечноразностным методом. Выполнено расчетно-теоретическое исследование влияния характерных параметров основного потока и выпускаемого холодного газа на распределение трения и давления вдоль поверхности лопатки и на изменение скорости в потоке. Установлено, что в этих условиях на лопатке могут возникать область высокого давления, позволяющая в 1,6–2,9 раза увеличить нормальное усилие, действующее на поверхность рабочей лопатки, и крутящий момент на валу турбинного агрегата. Поэтому может быть уменьшен расход топлива (генераторного газа), или увеличена мощность турбинного агрегата.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, энергетическая установка, турбинный агрегат, газовый поток, расчетно-теоретическое исследование.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Конструктивные элементы двигателя и ЭУ ЛА, такие как лопатки и диски турбины, выходные сопла и переходные модули функционируют в высокотемпературном газовом потоке. Вследствие этого возникает необходимость охлаждения данных элементов [1–6].

В состав ГТД ЛА и ЭУ НО входят: камера сгорания, компрессор и турбина с рабочими лопатками. Причем в камере сгорания формируется источник высокотемпературного газа. Энергетические установки и ГТД имеют систему подачи и отбора холодного газа. Охлаждение турбинных лопаток осуществляется газом, который поступает от компрессора. Газ может поступать также и от других источников [1–3]. Рабочие лопатки имеют отверстия и каналы для подвода и выдува охлажденного газа в пространство между лопатками турбины [3, 5, 6]. Следует учесть, что часть отверстий для выдува газа, которые находятся на нижней поверхности рабочей лопатки, может изготавливаться в виде участков, формирующих упорядоченную струю. Общий расход газа в такой струе достаточно мал и составляет не более 0,8% от массового расхода потока разогретого газа.

Следовательно, в ГТД ЛА и ЭУ создаются высокоскоростной поток разогретого газа и движущийся с небольшой скоростью через поверхность лопатки поток охлаждающего газа. Это позволяет в итоге снизить расход топлива или увеличить мощность турбинного агрегата, что и делает исследование процессов формирования зон повышенного давления на поверхностях лопаток турбинных агрегатов таким актуальным. Создание подобных областей необходимо для увеличения нормальной силы, приложенной к рабочей лопатке, и вращающего момента на турбинном валу, что подтверждает новизну проведенного исследования. Газодинамические и тепловые процессы, которые имеют место в этом случае, зависят от скорости, температуры и свойств выпускаемого газа, чисел Рейнольдса  $Re$  и Маха  $M_\infty$  высокоскоростного потока и других факторов [2, 5].

Полученные ранее экспериментальные данные свидетельствуют о том, что аэродинамические силы, возникающие при выдуве газа в высокоскоростной, высокотемпературный поток при их взаимодействии, существенно превышают реактивную силу выпускаемого газа [7–10]. В статье приведены результаты расчетно-теоретического исследования дозвукового высокоскоростного ламинарного течения сжимаемого, теплопроводного, вязкого газа на нижней поверхности рабочей лопатки турбины при местном выдуве охлаждающего газа в разогретый поток пространства турбины между лопатками. Задача решалась в двухмерной постановке.

На рис. 1 и 2 представлена физическая модель (расчетная схема) процесса. Скорость выдува и температура выдуваемого газа изменялись по заданному закону или оставались постоянными. При формировании физической модели использовались основные допущения: 1) торцевые и нижняя поверхности стенки лопатки теплоизолированы; 2) выпускаемый газ не вступает в химические реакции с разогретым газом основного потока; 3) физические свойства взаимодействующих газов отличаются несущественно; 4) температура стенки отличается от температур холодного газа и основного потока.

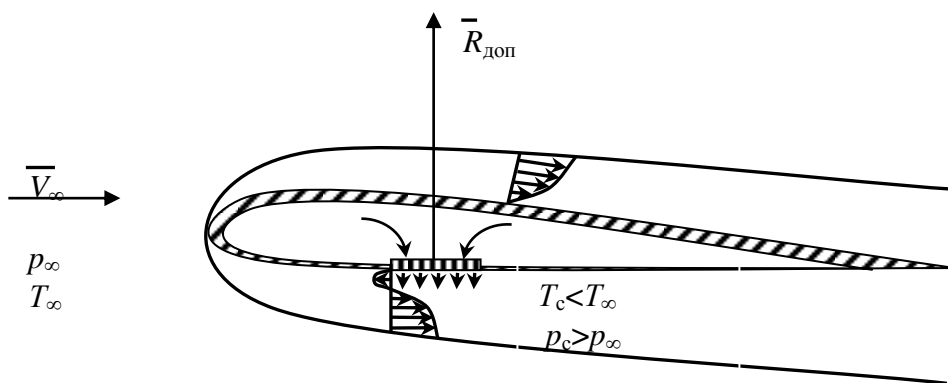


Рис. 1. Расчетная схема охлаждаемой лопатки с выдувом газа

Математическая модель процесса, учитывающая принятые допущения, включает следующие дифференциальные уравнения и алгебраические соотношения [11]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \bar{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \bar{V} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \Phi; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{V}) = 0; \quad (4)$$

$$p = \rho RT; \quad (5)$$

Начальные условия при  $t = 0$ :

$$T(x, y, t) = T(x, y); T_c(x, t) = T_{c0}; u(x, y, t) = u(x, y); v(x, y, t) = v(x, y); p(x, y, t) = p_0 \quad (6)$$

Граничные условия:

– при  $x = 0$

$$T(x, y, t) = f_1(y); u(x, y, t) = f_2(y); v(x, y, t) = f_3(y); p = p_x; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial x} = 0;$$

– при  $x = l_n$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0; \quad (8)$$

– при  $y = 0$

$$u(x, y, t) = 0; v(x, y, t) = 0; T(x, y, t) = T_c(x, t); 0 \leq x < l_n \text{ и } (l_n + l_x) < x \leq l_n; \quad (9)$$

$$u(x, y, t) = 0; v(x, y, t) = f_1(x); T(x, y, t) = T_c(x) = f_2(x); l_n \leq x \leq (l_n + l_x);$$

– при  $y = h$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

В представленной математической модели использованы следующие обозначения:  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  – поля проекций вектора скорости на оси координат  $ox$ ,  $oy$  (рис. 2);  $T(x, y, t)$  – поле температуры газа;  $p(x, y, t)$  – поле давления газа;  $\rho(x, y, t)$  – поле плотности газа;  $T_c(x, t)$  – одномерное поле температуры стенки лопатки;  $R$  – газовая постоянная;  $c_p$  – теплоемкость газа;  $q_c$  – плотность внутренних источников тепла в стенке;  $c_c$ ,  $\rho_c$  – удельная теплоемкость и плотность материала стенки;  $l_n$  – продольный размер рассматриваемой области;  $h$  – поперечный размер рассматриваемой области;  $t$  – время.

Из рис. 2 видно, что  $l_p$  – расстояние от передней кромки рабочей лопатки до исследуемой области взаимодействия потока газа с поверхностью.

Математическая модель включает: уравнения сохранения импульса газа в проекции на оси  $ox$  и  $oy$  – (1) и (2); уравнение сохранения энергии для основного потока – (3); уравнение, выражающее закон сохранения массы, – (4); уравнение состояния – (5). В математическую модель также входят уравнение теплопроводности для материала стенки рабочей лопатки и выражения, учитывающие взаимосвязь коэффициента теплопроводности газа  $\lambda$  и коэффициента вязкости  $\mu$  с температурой газа [11].

Неизвестные параметры  $u$ ,  $v$ ,  $T$  определялись из дифференциальных уравнений (1)–(3) с использованием конечноразностного метода [12–14]. Для расчета давления  $p$  применялось специальное уравнение типа уравнения Пуассона [12]. Система уравнений (1)–(5) с начальными и граничными условиями (6)–(10) и с учетом выполненных преобразований решалась численно. Для интегрирования дифференциальных уравнений применялись неявные разностные схемы переменных направлений и метод прогонки [12, 15].

Значения неизвестных величин на границах области рассчитывались по их значениям в узлах разностной сетки и с помощью граничных условий (7)–(10) [13].

Для решения разностных уравнений применялась сетка с переменными шагами по осям координат и со сгущением в направлении к области местного выдува газа.

Временной шаг рассчитывался с использованием критерия Куранта и более жестких критериев [12, 13]. Для обеспечения устойчивости вычислительного алгоритма применялись схема пересчета и локальное сглаживание полей определяемых параметров [8, 14]. Выполнен

контроль точности полученного приближенного решения с использованием методики, изложенной в [11, 15].

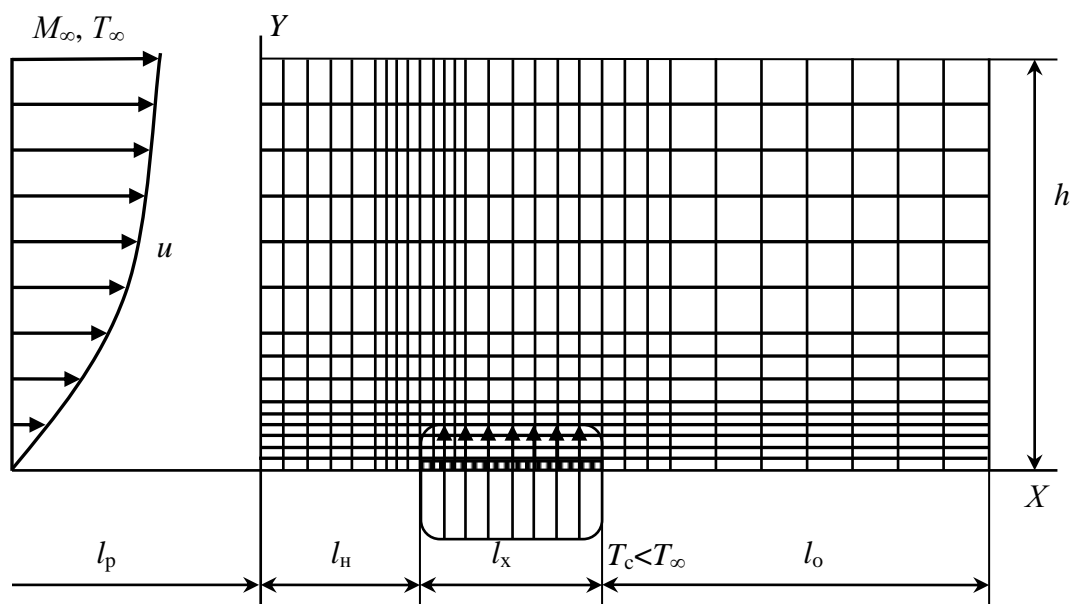


Рис. 2. Схема разностной сетки при численном решении задачи

Проведены численные расчеты на персональном компьютере. Были сформированы следующие исходные данные. Температура участка выпуска охлаждающего газа составила 280–470 К. Расход выпускаемого газа не превышал 0,7% от расхода основного потока горячего газа. Длины участка местного выдува газа и поверхности рабочей лопатки относились как 1:7. Расстояние  $l_p$  составляло несколько сантиметров. Размер расчетной области  $h$  в направлении оси  $oy$  в 7–14 раз превышал толщину приповерхностного слоя. Величины параметров основного потока разогретого газа составляли: скорость движения  $u_\infty = 420 \div 600$  м/с (число Маха  $M_\infty = 0,67 \div 0,85$ ); температура  $T_\infty = 950 \div 1180$  К; давление  $p_\infty = (6 \div 8,5) \cdot 10^5$  Па. Физические свойства газа незначительно отличаются от свойств продуктов сгорания ГТД и ЭУ [1–3]. Результаты расчетов представлены на рис. 3–6. Анализ результатов дает возможность отметить следующее.

В соответствии с законом обращения воздействия [7] вблизи участка выпуска охлаждающего газа имеет место торможение основного дозвукового потока разогретого газа и местное повышение давления. Вследствие этого возникает область возвратного течения, обусловленная возрастанием давления в направлении течения газа (рис. 3 и 4). Скорости возвратного течения достигают 110–130 м/с. Поперечный размер этой области составляет 15–25% от толщины пограничного слоя.

Максимальная величина относительного избыточного давления на нижней поверхности рабочей лопатки превышает величину, равную 1,4, что связано также с образованием местной сверхзвуковой зоны. Область повышенного давления распространяется по приповерхностному слою в направлении задней и передней поверхностей (кромки) лопатки. В окрестности участка местного выпуска газа возникают поперечные градиенты давления (рис. 6). При возрастании числа Маха потока  $M_\infty$  и постоянных температуре и скорости выпускаемого газа максимальное давление на поверхности лопатки увеличивается.

Отрицательные напряжения трения в возвратном течении по абсолютной величине превышают их значения на большей части обтекаемой поверхности лопатки (рис. 5).

Расчитанные профили скоростей  $u$ ,  $v$  и напряжения трения на обтекаемой поверхности согласуются с известными точными решениями [11, 15].

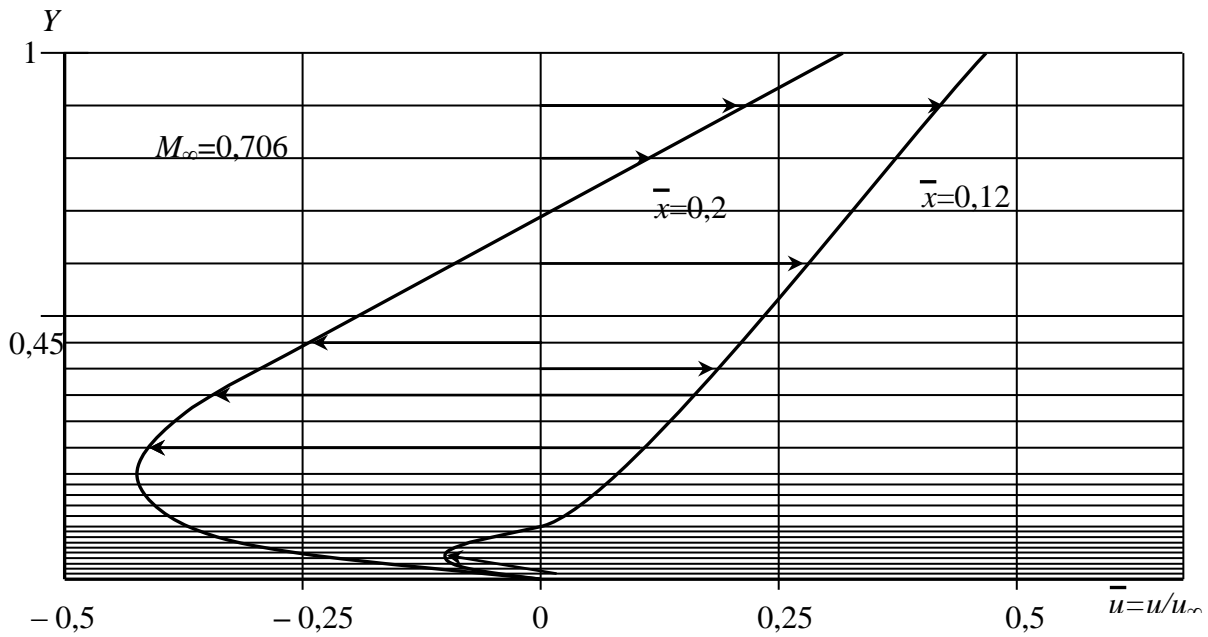


Рис. 3. Изменение относительной скорости по нормали к стенке

Образование области возвратного течения на поверхности лопатки приводит также к усилению вытесняющего воздействия на основной высокотемпературный газовый поток, дополнительному повышению давления и к увеличению длительности процесса охлаждения основного потока. Поэтому интенсивность замедления потока возрастает. Силовое воздействие на поверхность увеличивается.

Кроме того, возникающая дополнительная нормальная сила, действующая на нижнюю поверхность рабочей лопатки, при неизменной силе давления на ее верхнюю поверхность может в 1,6–2,7 раза превышать силу давления на поверхность при отсутствии местного выпуска струи холодного газа. Это увеличение нормальной силы приводит к росту вращающего момента на валу турбинного агрегата в 1,4–2,4 раза и соответствующему увеличению ее мощности [1–3].

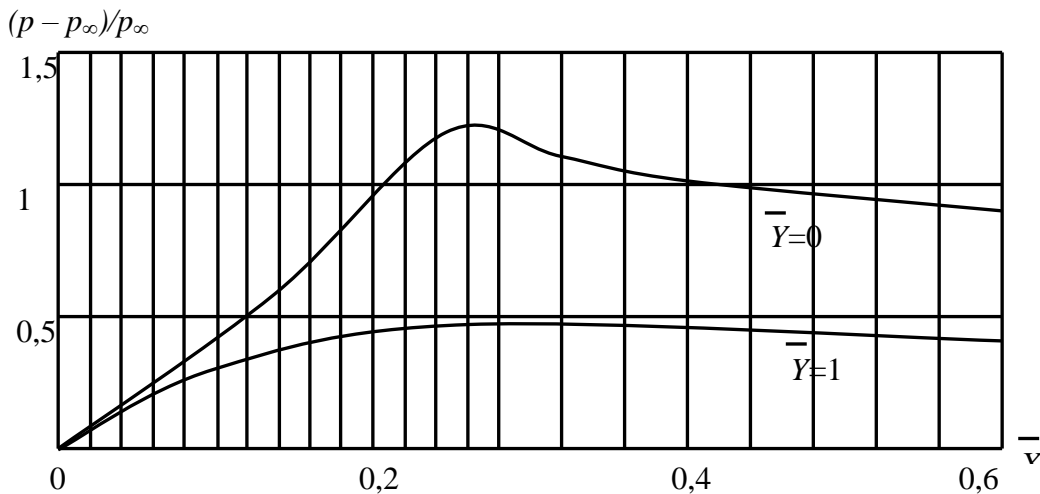


Рис. 4. Распределение относительного избыточного давления вдоль поверхности

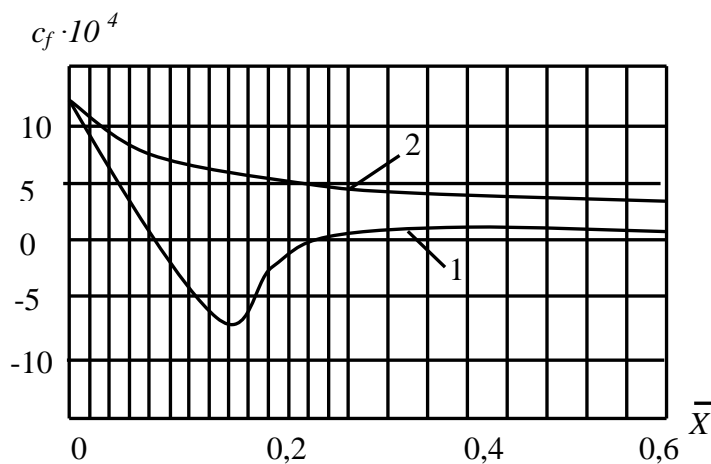


Рис. 5. Распределение коэффициента трения вдоль поверхности:  
1 – с выдувом газа; 2 – без выдува газа

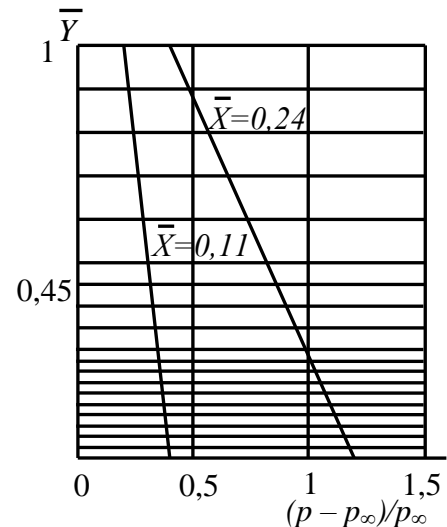


Рис. 6. Изменение относительного избыточного давления по нормали к поверхности стенки

Так как нормальная сила, создающая вращающий момент, зависит от силы давления на нижнюю поверхность лопатки, то перепад давлений на входе и выходе из турбины возможно увеличить, а температуру газа на входе в турбину снизить что означает появление возможности соответствующего уменьшения расхода газа (топлива). Это означает, что может быть уменьшен расход топлива на 20–25% или генераторного газа. При неизменной мощности турбины в этом случае повышается экономичность и КПД ГТД ЛА или ЭУ стационарных объектов [1–3].

Одним из параметров, который определяет величину нормальной силы, действующей на рабочую лопатку, является скорость выпускаемого холодного газа. При этом увеличение указанной скорости приводит к росту нормальной силы практически пропорционально.

Как показали расчеты, другим необходимым параметром воздействия оказывается разность температур основного потока разогретого газа и выпускаемого охлаждающего газа. При возрастании этой разности увеличивается дополнительная нормальная сила. Установлено, что снижение температуры выдуваемого газа на 31–37% может привести к увеличению поперечной силы на 19–25% при неизменной скорости выдува. Для снижения указанной температуры выпускаемого газа целесообразно использовать вихревые трубы и компактные жидкостно-газовые теплообменные аппараты ГТД ЛА и ЭУ [1, 2, 4].

Увеличению КПД турбины, ГТД и ЭУ в целом способствует также снижение напряжений трения на поверхности при выпуске холодного газа через рабочую лопатку (рис. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетно-теоретического исследования, полученные на основе разработанных математической модели и численного метода, дали возможность установить влияние температуры и скорости упорядоченно, принудительно выпускаемого холодного газа, а также параметров основного высокотемпературного потока газа на распределение давления и трения вдоль поверхности лопатки турбины, на изменение скорости в основном потоке.

Показано, что при некоторых значениях параметров выпускаемого газа и высокоскоростного потока на поверхности лопатки образуется область дополнительного повышения давления, что приводит к увеличению в 1,6–2,7 раза нормальной силы, действующей на лопатку, и соответствующего крутящего момента на валу. Это дает возможность увеличить мощность

турбинного агрегата или при неизменной мощности – уменьшить расход топлива на 16–26%. В результате может быть увеличен КПД ГТД ЛА и ЭУ стационарных объектов.

Установлено приемлемое соответствие полученных результатов существующим частным точным аналитическим и приближенным решениям [8, 11, 15], а также опытными данными, представленным в [7, 9, 15].

### Список используемых источников

1. *Казанджан П.К., Тихонов Н.Д., Янко А.К.* Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин: учебник / под ред. П.К. Казанджана. – М.: Машиностроение, 1983. – 217 с.
2. *Швец И.Т., Дыбан Е.П.* Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. – Киев: Наукова думка, 1974. – 488 с.
3. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 461 с.
4. Математическое моделирование тепловых и газодинамических процессов при проектировании летательных аппаратов / В.В. Горский, Е.В. Ватолина, А.В. Братчев и др.; под ред. В.В. Горского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 212 с.
5. *Сенучи З., Бенамед М.* Численное моделирование влияния тангенциальной щели вдува на эффективность пленочного охлаждения для асимметричной лопатки турбины // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 5. – С. 749–763.
6. *Гюлайлиа А., Харси А., Хамиду М.К.* Моделирование эффективности пленочного охлаждения передней кромки лопатки через профилированные сужающиеся отверстия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 33–44.
7. *Коваленко Н.Д.* Возмущения сверхзвукового потока при массотеплоподводе. – Киев: Наукова думка, 1980. – 224 с.
8. Взаимодействие газокапельной турбулентной струи и спутного скоростного высокотемпературного потока газа / Д.В. Садин, А.Н. Добролюбов, В.П. Зюзликов и др. // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 85–94.
9. *Довгаль А.В., Занин Б.Ю., Сорокин А.М.* Реакция осесимметричного отрывного течения на пространственно локализованное возмущение потока // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6. – С. 835–841.
10. *Низовцев В.М., Никитин К.В.* Численное моделирование процессов теплового и силового нагружения элементов поверхностей сопел реактивных двигателей при локальном массотеплоподводе к потоку // Сб. статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники», 14–15 дек. 2016 г. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 2. – С. 205–210.
11. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
12. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 421 с.
13. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / под ред. В.Н. Емельянова, К.Н. Волкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 416 с.
14. *Садин Д.В.* О жесткости систем уравнений в частных производных, описывающих движения гетерогенных сред // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 11. – С. 43–53.
15. *Волков К.Н., Емельянов В.Н.* Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 464 с.

И.В. Дорожко,  
кандидат техн. наук;  
Е.А. Захарова;  
Н.А. Осипов,  
кандидат техн. наук, доцент

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ

В статье предлагается новый подход к оценке вероятности безотказной работы сложного технического комплекса, основанный на аппарате байесовских сетей. Разработанная модель учитывает априорную информацию о надежности составных частей и блоков, деревья отказов, диагностические модели и позволяет оценивать вероятность безотказной работы комплекса в текущий момент времени и прогнозировать значение вероятности безотказной работы в ходе эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, байесовская сеть, автоматизированная система управления.

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании сложных технических комплексов (СТК) в соответствии с принятым вариантом схемно-конструкторского решения производится расчет показателей надежности комплекса, результаты которого позволяют сделать вывод о принципиальной возможности достижения требуемого уровня надежности, указанного в техническом задании, и о возможности перехода к стадиям производства и испытаний СТК. При этом не вызывает сомнений необходимость актуализации и корректировки значений показателей надежности по результатам испытаний и экспериментальной отработки на последующих стадиях жизненного цикла СТК.

В процессе эксплуатации комплексов могут происходить отказы отдельных элементов, в связи с чем эксплуатирующему персоналу необходимо иметь актуальную информацию о показателях надежности – в частности о значении вероятности безотказной работы (ВБР) – комплекса и составных его частей не только в настоящий момент времени, но и на определенный прогнозный период для определения возможности и целесообразности продолжения эксплуатации или приостановления эксплуатации, организации технического обслуживания и т. д.

На основе аппарата динамических байесовских сетей доверия (ДБСД) [7–9] была разработана представленная в статье модель, позволяющая:

- оценивать ВБР СТК по начальной информации (справочным данным о ВБР составных элементов, структурно-логическим схемам надежности, сведениям об изделиях-аналогах, имеющих в своем составе аналогичные элементы и блоки) и при поступлении новых данных о значениях диагностических признаков (параметров) и свидетельствах об отказах компонентов;
- прогнозировать значение ВБР СТК на последующий период времени;
- осуществлять поддержку принятия решений при поиске причины отказа.

Математическая модель для определения ВБР СТК с помощью аппарата динамических байесовских сетей доверия можно описать в следующем виде:

$$\langle G, PAR \rangle, \quad (1)$$



где  $G$  – структура ДБСД, т. е. множество вершин-переменных и связей, образующих ациклический направленный граф;

$PAR$  – множество параметров (безусловных и условных вероятностей) байесовской сети.

Вершинами-переменными графа сети являются элементы (модули) СТК с учетом иерархии и диагностические признаки, связанные с видами технических состояний блоков:

$$\mathbf{B} = \{b_i^{<j>} \mid i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\} \text{ и } \mathbf{Pr} = \{pr_k \mid k = \overline{1, l}\}, \quad (2)$$

где  $b$  – наименование элемента;  
 $j$  – номер уровня;  
 $i$  – номер элемента;  
 $n$  – число элементов;  
 $m$  – число уровней;  
 $pr_k$  – диагностический признак;  
 $k$  – номер диагностического признака;  
 $l$  – число диагностических признаков.

Параметрами  $PAR$  ДБСД являются:

1. Для элементов первого уровня иерархии, не имеющих в своем составе элементов более низкого уровня иерархии, а следовательно, и родительских переменных ( $\forall b_i^{<j>} : \neg(\exists b_i^{<j-1>} = \text{parent}(b_i^{<j>}))$ ):

– безусловные вероятности в начальный момент времени, а именно, ВБР  $P_i^{<j>}(0) = 1$  (предполагается, что в  $t = 0$  прошел полный контроль и элемент работоспособен), и вероятности отказов  $Q_i^{<j>}(0) = 1 - P_i^{<j>}(0) = 0$ ;

– условная вероятность работоспособности элемента в текущий момент времени при его работоспособности в предыдущий момент времени

$$P_i^{<j>}(\text{работоспособен}_t / \text{работоспособен}_{t-1}) = \frac{e^{-\lambda_i^{<j>} t}}{e^{-\lambda_i^{<j>} (t-1)}} = e^{-\lambda_i^{<j>}},$$

предполагая экспоненциальный закон распределения наработку на отказ;

– условная вероятность отказа элемента в текущий момент времени при его работоспособности в предыдущий момент

$$P_i^{<j>}(\text{отказ}_t / \text{работоспособен}_{t-1}) = 1 - e^{-\lambda_i^{<j>}};$$

– условная вероятность работоспособности элемента в текущий момент времени при его отказе в предыдущий момент времени

$$P_i^{<j>}(\text{работоспособен}_t / \text{отказ}_{t-1}) = 1 - e^{-\mu_i^{<j>}},$$

где  $\mu_i^j$  – интенсивность восстановления  $i$ -го элемента  $j$ -го уровня иерархии. Если элемент не восстанавливается, то

$$P_i^{<j>}(\text{работоспособен}_t / \text{отказ}_{t-1}) = 0;$$

– условная вероятность отказа элемента в текущий момент времени при его отказе в предыдущий момент времени

$$P(\text{отказ}_t / \text{отказ}_{t-1}) = e^{-\mu_i^{<j>}}.$$

Если элемент не восстанавливается, то  $P(\text{отказ}_t / \text{отказ}_{t-1}) = 1$ . Пример представлен на рис. 1.

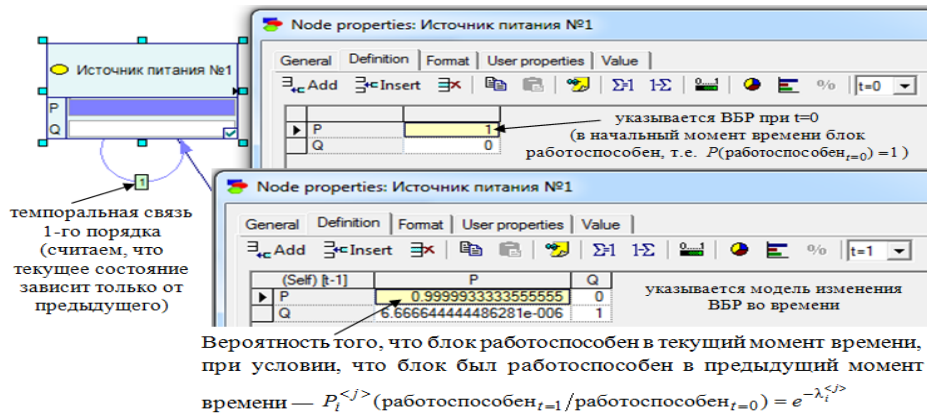


Рис. 1. Параметры элемента нижнего уровня детализации

2. Для элементов (блоков, модулей), имеющих в своем составе другие элементы и блоки, т. е. имеющих родительские переменные ( $\forall b_i^{<j>} : \exists b_i^{<j-1>} = \text{parent}(b_i^{<j>})$ ), указываются условные вероятности исходя из деревьев отказов или структурно-логических схем надежности [1]. Например, если блок (модуль)  $b_i^{<j>}$  содержит в своем составе соединенные параллельно элементы более низкого иерархического уровня  $b_i^{<j-1>}$ , то условная вероятность того, что блок (модуль) более высокого иерархического уровня  $b_i^{<j>}$  будет работоспособен при условии работоспособности хотя бы одного блока более низкого уровня  $b_i^{<j-1>}$ , равна 1 и обратится в 0 только лишь при условии отказа всех элементов более низкого иерархического уровня  $b_i^{<j-1>}$ .

Если же блок (модуль)  $b_i^{<j>}$  содержит в своем составе соединенные последовательно элементы более низкого иерархического уровня  $b_i^{<j-1>}$ , то условная вероятность того, что блок (модуль) более высокого иерархического уровня  $b_i^{<j>}$  работоспособен при условии работоспособности всех блоков более низкого уровня  $b_i^{<j-1>}$ , равна 1, а условная вероятность того, что блок более высокого иерархического уровня  $b_i^{<j>}$  работоспособен при условии отказа хотя бы одного из блоков более низкого уровня  $b_i^{<j-1>}$ , составит 0 [1]. Пример представлен на рис. 2.



Рис. 2. Модель канала №1 питания контроллера:  
 а – дерево отказов канала №1 питания контроллера;  
 б – эквивалентная байесовская сеть

3. Для диагностических признаков задаются распределения условных вероятностей, связывающих значения диагностических признаков и виды технических состояний блоков –  $P(\tilde{pr}_j / \tilde{S}_i)$  (где знак «~» означает положительное или отрицательное присвоение знака переменной). В данных распределениях вероятностей есть возможность учесть достоверность проверок диагностических признаков, что повышает адекватность модели.

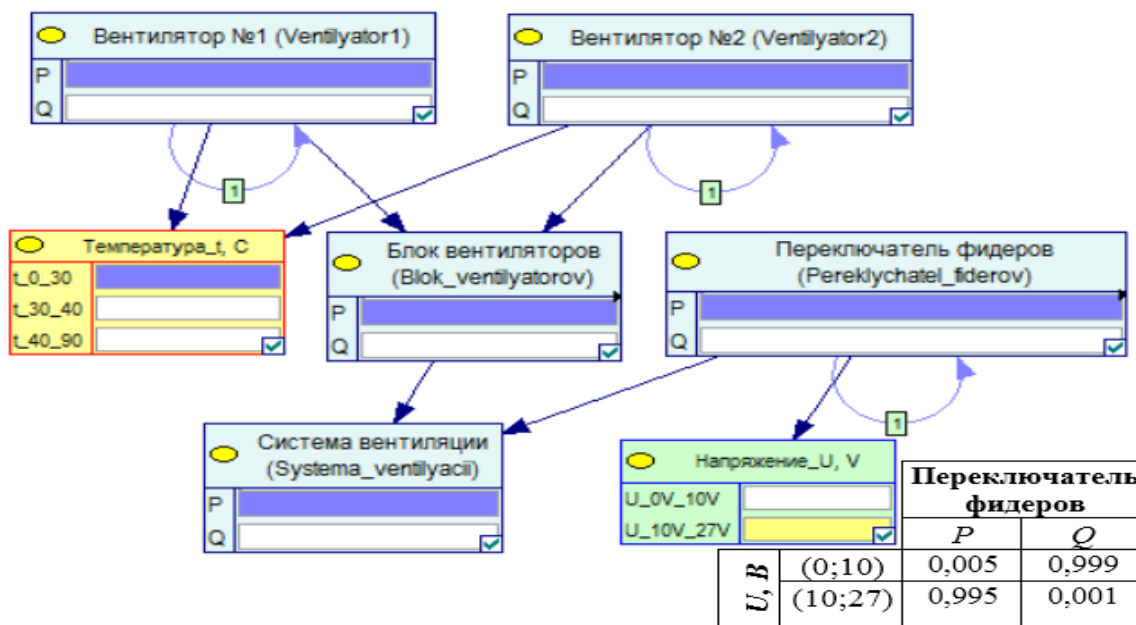


Рис. 3. Вид модели с диагностическими признаками

Продemonстрируем работу модели ДБСД для оценивания вероятности безотказной работы на примере одной из подсистем управления автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) – подсистеме руководителя работ (ПСУ РР), функциями которой является контроль и координация работ, а также диспетчерское управление.

На рис. 4 представлена в «свернутом» виде динамическая байесовская сеть доверия ПСУ РР для расчета ВБР. В правой части окна можно раскрыть иерархический список всех блоков ПСУ РР.

Для построения динамических байесовских сетей доверия ПСУ РР используется следующая априорная информация:

- деревья отказов и структурно-логические схемы надежности ПСУ РР;
- алгоритмы и принципы работы ПСУ РР;
- среднее время безотказной работы и среднее время восстановления (либо интенсивности отказов и восстановлений), полученные из паспортных данных, сертификатов или справочников.

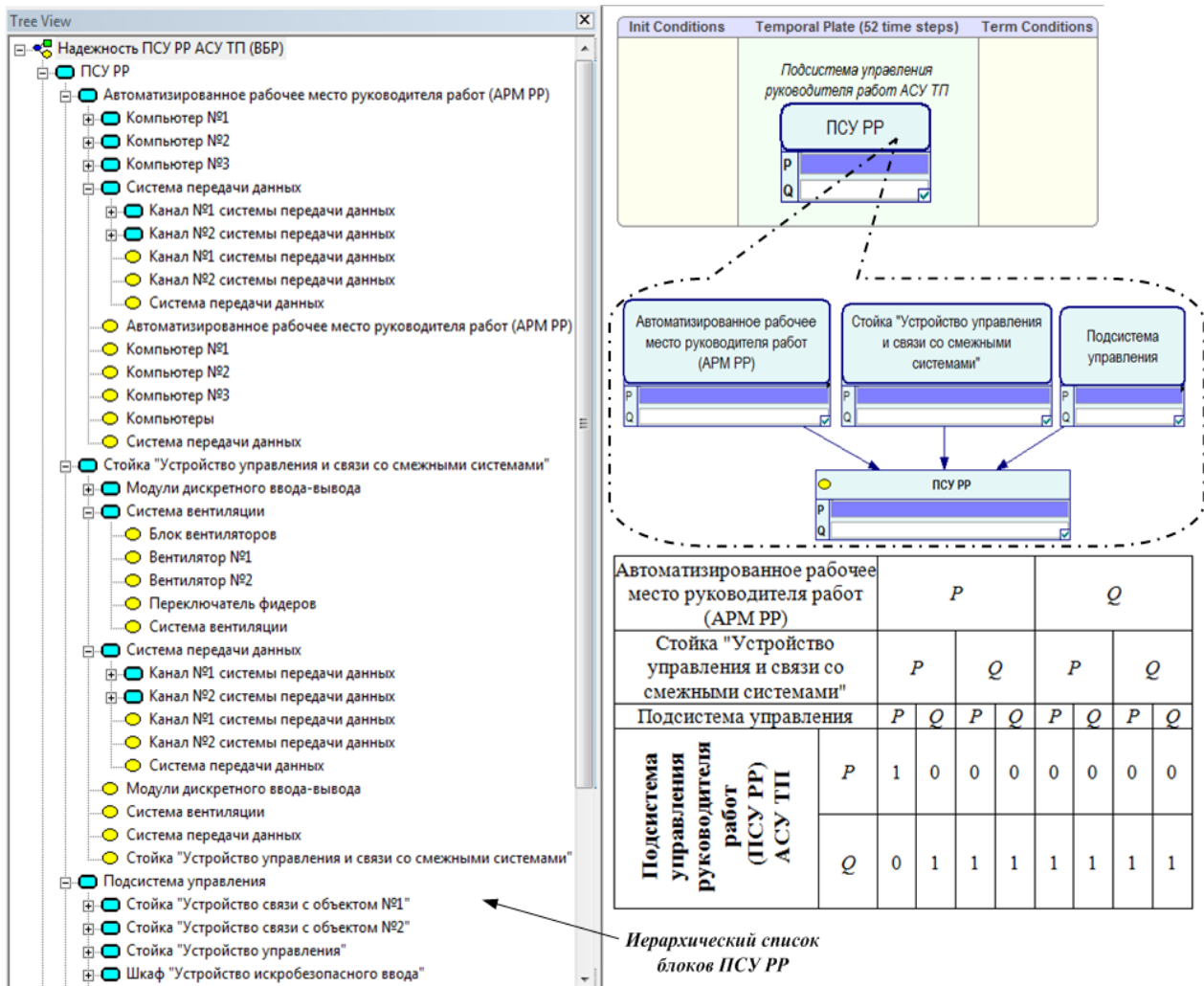


Рис. 4. Динамическая байесовская сеть доверия ПСУ РР

Принятые упрощения и ограничения при моделировании:

- элементы (блоки, модули) ПСУ РР могут находиться только в одном из двух видов технического состояния: работоспособном или отказ;
- времена отказов элементов нижнего уровня детализации имеют экспоненциальный закон распределения;
- ВБР ПСУ РР и всех составных элементов равна единице в начальный момент времени;
- время дискретное с шагом 1 час (при необходимости шаг дискретизации можно изменить (уменьшить или увеличить) в зависимости от поставленной задачи).

В модель ПСУ РР входят:

- более 300 элементов (блоков, модулей) с около 700 состояниями и  $10^5$  параметров;
- более 600 связей;
- более 100 субмоделей.

Основная цель байесовских сетей доверия – это объединение априорной информации и новых данных, т. е. апостериорный вывод, суть которого в том, что при появлении новых данных (свидетельств) обнуляются все несовместимые с этими данными (свидетельствами) вероятности исходов и нормируются оставшиеся вероятности, учитывая априорные данные, чтобы сумма вероятностей оставшихся исходов была равна единице [7–9].

Например, апостериорный вывод при поступлении значения диагностического признака можно описать следующим выражением:

$$P(S_i(t)/pr_k(t)) = \frac{P(pr_k(t)/S_i(t)) \cdot (P(S_i(t)))}{P(pr_k(t)/S_i(t)) \cdot (P(S_i(t))) + P(pr_k(t)/\bar{S}_i(t)) \cdot (P(\bar{S}_i(t)))}, \quad (3)$$

Далее апостериорная оценка становится уже опять априорной информацией в случае поступления новой информации для следующих этапов. Под свидетельством в данном случае понимается информация о значениях диагностических признаков, а также об отказе или работоспособности элементов (модулей, блоков) СТК.

**ПРИМЕР РАБОТЫ МОДЕЛИ ПСУ РР, ОСНОВАННОЙ НА ДБСД**

Рассмотрим пример работы модели ПСУ РР в виде ДБСД, когда в различные моменты времени поступают данные о значениях диагностических признаков и информация об отказах блоков ПСУ РР (табл. 1).

Таблица 1

**Поступающая информация о значениях диагностических признаков и отказах блоков ПСУ РР**

Свидетельства	Момент поступления, ч
Отказ блока № 2 комплекта № 1 стойки «Устройство связи с объектом №2»	5
Температура стойки «Устройство управления» равна 50 °С	9
Отказ канала № 1 питания контроллера № 2 стойки «Устройство управления»	10
Отказ блока № 1 комплекта № 1 стойки «Устройство связи с объектом №1»	10
Отказ модуля № 1 дискретного ввода-вывода	12
Отказ канала № 2 системы передачи данных	20
Не горит индикатор питания системы передачи данных	23
Напряжение фидеров питания равно 3 В	29

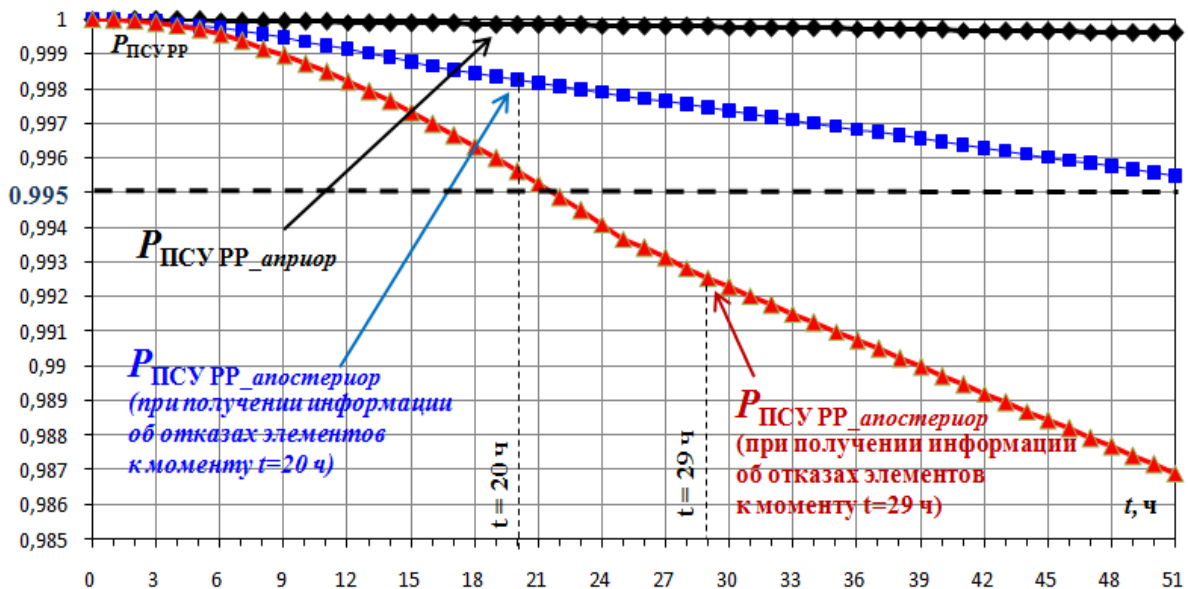


Рис. 5. ВБР ПСУ РР с учетом данных о значениях диагностических признаков и информации об отказах части оборудования

С учетом информации (табл. 1) получены апостериорные оценки ВБР ПСУ РР (рис. 5). На рис. 5 представлены графики изменения ВБР ПСУ РР от времени, полученные по априорной информации и при поступлении новой информации о значениях диагности-

ческих признаков и отказах блоков в различные моменты времени. В техническом задании указаны требования к вероятности безотказной работы АСУ ТП и ПСУ РР – не ниже 0,995.

Анализ графиков, изображенных на рис. 5, позволяет сформулировать следующие выводы:

- на момент времени одного расчетного цикла  $t = 51$  ч значение ВБР ПСУ РР, вычисленное по априорным данным о надежности элементов, равно 0,9995, что обеспечивает выполнение требований технического задания;

- используя апостериорный вывод в байесовской сети, получено значение ВБР ПСУ РР с учетом данных о значениях диагностических признаков и информации об отказах на момент  $t = 20$  ч (см. табл. 1), равное 0,998. Прогнозное значение ВБР на момент времени  $t = 51$  ч равно 0,9954, что также удовлетворяет требованиям технического задания;

- далее при поступлении новой информации о значениях диагностических признаков и отказах (см. табл. 1) вероятности в байесовской сети пересчитываются, и значение ВБР на момент времени  $t = 29$  ч будет около 0,993. Прогнозирование значения ВБР на момент времени  $t = 51$  ч даст значение 0,987, что ниже значения ВБР, установленного требованиями ТЗ. Таким образом, требуется принятие мер и организация мероприятий для повышения надежности ПСУ РР, например, техническое обслуживание и восстановление отказавшего оборудования.

Таким образом, разработанная динамическая байесовская сеть позволяет вычислять ВБР ПСУ РР в текущий и будущий моменты времени при поступлении новой информации о значениях диагностических признаков и ВБР составных элементов. Результаты прогнозирования вероятности безотказной работы СТК можно использовать для выбора оптимального варианта и программы восстановления СТК.

Также было выявлено, что при поступлении новой информации происходит пересчет значения ВБР не только в текущий и будущий моменты времени, но и в прошедший (см. рис. 5), что является решением задачи ретроспективного анализа. Ретроспективный анализ позволяет получать более точную оценку информации о состоянии, которая была доступна к тому времени, так как включает больше информации в виде свидетельств [1].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена модель динамической байесовской сети, с помощью которой можно оценивать ВБР структурно-сложных иерархических комплексов. Разработанная модель позволяет эксплуатирующему персоналу:

- получать информацию о надежности (ВБР) СТК при поступлении новой информации о значениях диагностических признаков и отказах элементов;
- прогнозировать значение ВБР на некоторый период времени для определения процедур и программ восстановления СТК;
- осуществлять поиск причины отказа комплекса и поддержку принятия решений при возникновении нештатных ситуаций и аварий.

## Список используемых источников

1. Дорожко И.В., Тарасов А.Г., Барановский А.М. Оценка надежности структурно-сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe // Интеллектуальные технологии на транспорте (Intellectual Technologies on Transport). – 2015. – № 3 – С.36–45.

2. Кочанов И.А., Кубуша А.В. Прогнозирование интенсивности появления ошибок в программном обеспечении вычислительных систем реального времени на период

эксплуатации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Вып. 637, ч. 2. – С.92–97.

3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: введ. 1990-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 39 с.

4. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: введ. 2017-03-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

5. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

6. *Привалов А.Е., Кочанов И.А., Бугайченко П.Ю.* Онтологический подход к формированию ситуационной осведомленности при управлении эксплуатацией ракетно-космических комплексов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – Вып. 639. – С.93–98.

7. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.

8. *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Байесовские сети: логико-вероятностный подход. – СПб.: Наука, 2006. – 607 с.

9. *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Основы теории байесовских сетей: учебник. – СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 2019. – 399 с.

М.В. Егоричев;  
В.М. Моторин,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Е.М. Росляков,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССУ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Предложен методический подход к разработке программ оптимальной организации комплекса ремонтно-восстановительных мероприятий на системах жизнеобеспечения объектов наземной космической инфраструктуры.

Для планирования ремонтно-восстановительных мероприятий разработана имитационная модель. Эта модель использует метод анализа видов, последствий и критичности отказов, что позволяет обеспечить требуемый уровень эффективности функционирования систем в условиях ограниченного финансирования и ограничений по срокам вывода объектов космических войск из эксплуатации.

Ключевые слова: системы жизнеобеспечения объектов наземной космической инфраструктуры, имитационная модель, алгоритм выбора программы ремонтно-восстановительных мероприятий.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы жизнеобеспечения (СЖО) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) – это комплекс технических средств, предназначенных для создания и поддержания условий нормального функционирования технологического оборудования и жизнедеятельности обслуживающего персонала. Объектами СЖО выступают позиционные районы наземной инфраструктуры и отдельные сооружения ракетно-космических комплексов. В первом случае состав СЖО включает в себя инженерные сети, к которым относятся системы теплоснабжения, водоснабжения, водоотведения и канализации и т. д. Во втором – технические системы, обеспечивающие микроклимат в помещениях сооружений наземных комплексов [1].

Для СЖО объектов наземной инфраструктуры характерны следующие свойства:

- системы выполняют обеспечивающие функции по отношению к целевому объекту;
- системы обладают значительной временной избыточностью;
- элементная база систем характеризуется большим разнообразием типоразмеров, широким диапазоном значений параметров и характеристик, большим числом производителей;
- системы отличаются высоким уровнем энергопотребления;
- они характеризуются длительными сроками эксплуатации;
- в качестве эксплуатирующего персонала выступает личный состав воинских частей, имеющий относительно низкую профессиональную подготовку;
- планирование эксплуатации обеспечивается силами структурных подразделений частей и соединений.

Эти особенности следует учитывать на всем протяжении жизненного цикла систем, в частности, при планировании мероприятий по управлению состоянием СЖО.

Сложившаяся ситуация в сфере эксплуатации СЖО характеризуется как критическая. Большая часть оборудования СЖО выработала свой ресурс, а его износ составляет более 60%. Особенно тяжелое положение сложилось в теплоснабжении объектов. Около 50% объектов теплоснабжения требуют замены, не менее 15% находятся в аварийном состоянии. На каждые 100 км тепловых сетей ежегодно регистрируются в среднем 70 повреждений.



Потери тепла в тепловых сетях достигают 30%; капитального ремонта или полной замены требуют 80% тепловых сетей.

Для выхода из сложившейся ситуации необходимо проведение комплекса ремонтно-восстановительных мероприятий (РВМ) на СЖО объектов наземной космической инфраструктуры.

## ОБЩИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММ ОПТИМАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ

Действующие нормативные требования предполагают разработку комплекта документов по организации и проведению РВМ, таких как ремонт, реконструкция, техническое перевооружение и др. Опуская содержательную сторону указанных организационно-планирующих документов, сосредоточим внимание на выработке общих методологических подходов к разработке программ оптимальной организации работ.

В общем случае проблема состоит в том, что, с одной стороны, требуется обеспечить требуемый уровень эффективности функционирования СЖО ОНКИ, а с другой стороны, его необходимо достичь в условиях ограниченного финансирования и ограничений по срокам вывода объектов космических войск из эксплуатации. При разрешении проблемы возникают задачи обоснования номенклатуры объектов систем жизнеобеспечения, подвергаемых реконструкции, определения видов и объемов мероприятий по восстановлению при наличии ограничений на выделяемые ресурсы.

Выполненный анализ методов решения подобных задач позволил выделить методы системного анализа, имитационного моделирования, а также метод *FMECA* – анализа, известного в нашей стране как метод анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) [2, 3]. Разработка имитационной модели, выступающей в качестве основы методики планирования РВМ, строится на основе следующих исходных предпосылок.

Рассматриваемый объект наземной космической инфраструктуры  $A$  состоит из совокупности комплексов

$$A = \{a_m\}, \quad (1)$$

каждый из которых включает совокупность СЖО различного назначения:

$$a_m = \{a_{mn}\}, n = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Комплексы, образующие ОНКИ, выполняют однородные функции, что обеспечивает взаимозаменяемость комплексов в процессе их эксплуатации.

Качество функционирования комплекса характеризуется его состоянием  $S_m$ , которое определяется состоянием систем, входящих в состав данного комплекса  $S_{mn}$ :

$$S_m = \bigcap_{n=1}^N S_{mn}. \quad (3)$$

Параметр состояния отдельной СЖО  $S_{mn}$  должен удовлетворять требованию

$$S_{mn} \in S_{mn}^{\text{треб}}. \quad (4)$$

В том случае, если условие (4) не выполняется, состояние данной СЖО характеризуется величиной возможного потенциального ущерба  $V_{mn}$ .

Потенциальный ущерб  $n$ -й системы обусловлен реализацией событий

$$U_{mni} = p_{ni} \cdot R_{ni}, \quad (5)$$

где  $p_{ni}$  – вероятность  $i$ -го события в  $n$ -й системе;

$R_{ni}$  – величина потенциального ущерба в случае реализации  $i$ -го события.

Величина ущерба для всей системы при ее данном состоянии определяется выражением

$$U_{mn} = \sum_{i=1}^l U_{mni}. \quad (6)$$

Полагаем, что состояние системы характеризуется показателем возможного ущерба  $U_{mn}$ . Содержание показателя  $U$  состоит в том, что он отражает критичность данной системы в

достижении цели функционирования комплекса: чем больше значение  $U$ , тем больше может быть нанесен ущерб при реализации  $i$ -го события.

Выполнение комплекса РВМ на системе приводит к снижению величины потенциального ущерба со стороны тех элементов системы, которые подвергнуты РВМ.

Тогда степень снижения величины потенциального ущерба можно представить в виде

$$Z_{mn} = U_{mn}^{(-)} - U_{mn}^{(+)} \quad (7)$$

где  $U_{mn}^{(-)}$  и  $U_{mn}^{(+)}$  – величина потенциального ущерба до и после проведения РВМ соответственно.

Значение степени снижения потенциального ущерба определяется программой выполнения комплекса РВМ. Содержание РВМ характеризуется, во-первых, перечнем объектов, подвергаемых РВМ; во-вторых, видом мероприятий  $\nu$ , выполняемых на системах; в-третьих, объемом восстановительных мероприятий  $w_{mn}^{\nu}$ .

Совокупность РВМ для комплекса СЖО ОНКИ может быть представлена матрицей  $W$ , элементами которой являются объемы расходования ресурсов для максимально полного устранения потенциального ущерба  $w_{mn}^{\nu}$ .

В качестве характеристики объемов РВМ можно предложить балльную шкалу оценивания видов РВМ (техническое обслуживание, текущий ремонт, средний ремонт и т. д.), которая отражает степень восстановления объекта после проведения соответствующего вида РВМ и которая может быть сведена к соответствующим относительным оценкам, отражаемым показателем  $\delta_{mn}^{\nu}$ . Причем вводимый показатель ограничен пределами  $0 < \delta_{mn}^{\nu} < 1$ .

Совокупность элементарных решений  $\delta_{mn}^{\nu}$  образует  $\mu$ -ю реализацию матрицы решения по выбору комплекса РВМ

$$\Delta_{\mu} = |\delta_{mn}^{\nu}| \quad (8)$$

Процедура формирования содержания матрицы (8) может быть осуществлена либо эвристическими методами, либо методами математического программирования.

Полученные значения объемов планируемых РВМ позволят определить значения размеров потенциального ущерба после проведения РВМ, т. е.  $U_{mn}^{(+)}$ .

Для каждого комплекса необходимо определить возможный суммарный ущерб

$$U_m = \sum_{n=1}^N U_{mn} \quad (9)$$

При этом следует установить предел допустимого значения ущерба  $U_m^{\text{доп}}$ .

Исходя из приведенных предпосылок, можно сформулировать задачу формирования рационального плана РВМ.

Задача в формализованном виде представляется следующим образом: найти такое управленческое решение  $\Delta_{\text{opt}}$ , чтобы

$$\Theta = Z(\Delta_{\mu})/C(\Delta_{\mu}) \rightarrow \max, \quad (10)$$

где  $Z(\Delta_{\mu})$  – степень снижения потенциального ущерба после проведения РВМ, в соответствии с выбранным решением при условии  $Z > Z_{\text{min}}$ ;

$C(\Delta_{\mu})$  – стоимость ресурсов, расходуемых на проведение комплекса  $\mu$ -го варианта РВМ, причем выделяемый объем ресурсов ограничен, т. е.  $C \leq C^{\text{доп}}$ .

Для определения стоимости проведения РВМ предлагается воспользоваться ресурсным методом оценки прямых затрат  $C_{\text{пз}}$  на проведение РВМ [4].

Алгоритм выбора рациональной программы РВМ с помощью имитационной модели представлен на рис. 1.

Процедуры, представленные в (5)–(9), образуют цикл, который позволяет сформировать заданное множество вариантов РВМ с целью выбора наиболее рациональной программы.

Эффективность проводимых мероприятий предлагается осуществить с помощью известного показателя, отражающего стоимость достижения единицы результата [4]:

$$\mathcal{E}_K = \frac{Z_\phi}{C_\phi}, \quad (11)$$

где  $Z_\phi$ ,  $C_\phi$  – фактические значения соответствующих показателей результата и издержек в натуральных и денежных единицах. В этом случае на значения  $Z$  и  $C$  накладываются ограничения, и они должны отвечать условиям  $Z > Z_{\min}$ ,  $C < C_{\text{доп}}$ .

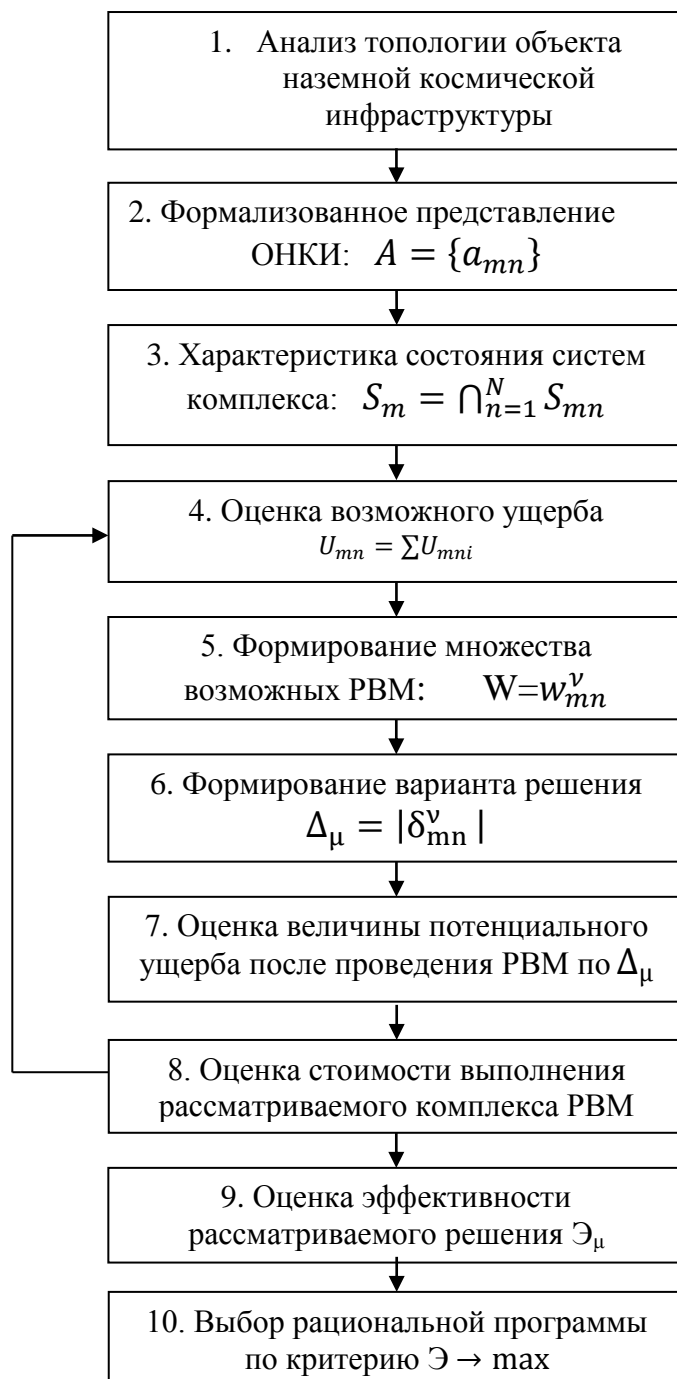


Рис.1. Имитационная модель формирования программы РВМ

На основании полученного управленческого решения формируется проект организации работ (ПОР), а также проект производства работ (ППР).

**Вывод.** Предложенный методический подход к разработке имитационной модели для планирования ремонтно-восстановительных мероприятий на системах жизнеобеспечения объектов наземной космической инфраструктуры позволяет решить задачу обоснования номенклатуры элементов систем жизнеобеспечения, определения видов и объемов работ при наличии ограничений на выделяемые ресурсы.

#### **Список используемых источников**

1. Основы эксплуатации космических средств / под ред. В.А. Никитина. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2000. – 499 с.
2. *Зверев А.В., Росляков Е.М., Некрасов И.Н.* Модель процесса формирования программы ремонтно-восстановительных мероприятий на инженерных системах // *Фундаментальные исследования.* – 2016. – №3 (3). – С. 509–513.
3. ГОСТ 27.310–95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Минск. – 13 с.
4. *Козин П.А.* Экономика специальных технических систем военно-строительных комплексов. – МО РФ, 2001. – 110 с.

Е.И. Жабровец;  
В.В. Пудиков,  
кандидат техн. наук;

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРЯМОТОЧНО-РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Приводятся особенности управления прямоточно-рециркуляционными системами кондиционирования воздуха при реализации энергосберегающих режимов обработки воздуха. Приводится концептуальный и функциональный алгоритм управления подсистемой транспортировки воздуха.

Ключевые слова: прямоточно-рециркуляционные системы кондиционирования воздуха, энергосберегающие режимы обработки воздуха.

### ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации типовых систем вентиляции и кондиционирования воздуха (СКВ) показал их высокое энерго- и ресурсопотребление, необоснованно увеличенные габариты, недостаточную стабильность в поддержании заданных параметров регулирования и неспособность системы оптимизировать режимы работы систем кондиционирования для повышения экономической эффективности работы оборудования.

Вследствие несовершенства систем автоматического управления (САУ) СКВ возникает ситуация, при которой имеют место значительные перерасходы энергоресурсов, что приводит к необоснованному увеличению стоимости эксплуатации зданий и сооружений [1, 2].

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА В ПРЯМОТОЧНО-РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

#### ТДМ приточно-рециркуляционных СКВ для I класса нагрузок.

При параметрах воздуха в помещении, заданных точкой У (рис. 1), и параметрах приточного воздуха в точке П можно создать расчетную схему, представленную на рис. 1,в (максимальный расход наружного воздуха может быть равен приточному). Принято, что для максимально-расчетных величин тепловыделения  $Q_{\text{П}}$ , влаговыведения  $W_{\text{П}}$  минимально-неизбежный расход воздуха  $G_{\text{Н}}$  и границы зон модели показаны сплошными линиями.

Штриховыми линиями обозначены границы зон, относящихся к меньшим значениям  $Q_{\text{П}}^*$ ,  $W_{\text{П}}^*$ ,  $G_{\text{Н}}^*$ , для которых новое положение точки  $\check{H}^*$  определяется соотношениями:  $\frac{Q_{\text{П}}^*}{G_{\text{Н}}}$  и  $\frac{W_{\text{П}}^*}{G_{\text{Н}}}$ .

При сохранении воздухообмена точка П должна «перемещаться» в точку П\*. При этом  $I_{\text{У}} - I_{\text{П}^*} = \frac{Q_{\text{П}}^*}{G_{\text{П}}}$ , где  $G_{\text{П}} = \frac{Q_{\text{П}}}{(I_{\text{У}} - I_{\text{П}})}$  или  $I_{\text{П}^*} = I_{\text{У}} - \left[ \frac{Q_{\text{П}}^* (I_{\text{У}} - I_{\text{П}})}{Q_{\text{П}}} \right]$ . Изменение режимов при этом показано номерами в числителе и знаменателе (режим 8 в данном случае не используется).

Нетрудно заметить, что совместив точку  $\Pi^*$  с точкой  $\check{H}^*$  можно сократить воздухообмен, доведя его до значения  $G_{\check{H}}$ . Независимо от положения точки  $\Pi^*$  с изменением  $Q_{\Pi}$ ,  $W_{\Pi}$  увеличивается потребление теплоты, а для некоторых режимов уменьшается потребление холода. Для вычисления моментных изменений  $Q_T$  и  $W_T$  нетрудно составить расчетные уравнения, которые имеют следующий вид при параметрах наружного воздуха в любой точке зоны соответствующего режима:

– для потребления теплоты (режим 1)

$$\Delta Q_T = Q_T^* - Q_T = Q_{\Pi} - Q_{\Pi}^*; \quad Q_T^* \text{ увеличивается};$$

– для потребления холода (режим 10)

$$\Delta Q_X = Q_X^* - Q_X = Q_{\Pi}^* - Q_{\Pi}; \quad Q_X^* \text{ уменьшается}.$$

Для режима 12 потребление холода и теплоты увеличивается. Эти тенденции сохраняются независимо от воздухообмена. Количество воздуха, обрабатываемого в кондиционере, целесообразно принять равным  $G_{\check{H}}$ , используя 2-ю рециркуляцию для обеспечения необходимой кратности или температуры воздуха на притоке. Такое же или подобное изменение положения точек  $\check{H}^*$  может произойти за счет изменения всех трех величин:  $Q_{\Pi}^*$ ,  $W_{\Pi}^*$ ,  $G_{\check{H}}^*$ . Если  $G_{\check{H}}^*$  окажется меньше требуемого воздухообмена, то необходимо использовать 2-ю рециркуляцию. Однако при этом видоизменяются расчетные уравнения, характеризующие моментные значения технологических параметров. Уравнения для них получают аналогичными способами, указанными выше.

### Приточно-рециркуляционные системы для III класса нагрузок.

Совмещенная расчетная схема модели для случая, когда параметры заданы линией (областью) показана на рис. 1,2. Положения векторных точек  $\check{H}$ ,  $\hat{H}$  при расчетных величинах  $Q_{\Pi}$ ,  $W_{\Pi}$ ,  $G_{\check{H}}$  определили границы, которые изображены сплошными утолщенными линиями. Точки  $\hat{H}$  совмещены с точками  $\check{\Pi}$ .

При уменьшении тепловлажностных нагрузок векторные точки  $\check{H}$  обозначены звездочкой, а соответствующие границы – штриховыми линиями. Векторные точки  $\hat{H}$  определяются либо по технико-экономическим расчетам, либо совмещаются с точками  $\check{\Pi}$ , характеризующими параметры приточного воздуха.

Для положения точки  $\check{\Pi}$  могут существовать ограничения, которые зависят от минимально-допустимого воздухообмена  $G_{\check{\Pi min}}$ , определяемого по допустимой кратности или температуре приточного воздуха. Координаты точки  $\check{\Pi min}$  при этом определяются по уравнениям:

$$I_{\check{\Pi min}} = I_y - \left( \frac{Q_{\check{\Pi}}}{G_{\check{\Pi min}}} \right);$$

$$d_{\check{\Pi min}} = d_y - \left( \frac{Q_{\check{\Pi}}}{G_{\check{\Pi min}}} \right).$$

Если точка  $\check{\Pi min}$  располагается ниже  $\varphi_{рас}$ , она «перемещается» на линию  $\varphi_{рас}$ , и тогда воздухообмен  $G_{\check{\Pi}}$  будет больше  $G_{\check{\Pi min}}$ . Однако он является минимально-неизбежным исходя из устойчивого термодинамического состояния  $\varphi > 1$ .

В случае расположения точки  $\check{\Pi}$  выше  $\varphi_{рас}$  эти точки обозначаются буквами  $\check{\Pi}$  без принятых выше значков, или  $\check{\Pi}^*$  при неполной нагрузке  $Q_{\check{\Pi}}^*$  и  $W_{\check{\Pi}}^*$ .

Рассмотрим возникающие особенности функционирования подсистем транспортировки воздуха при характерных положениях точки  $\check{\Pi min}$ .

**I случай.** Точка  $\check{\Pi min}$  располагается ниже  $\varphi=1$  или  $\varphi_{рас}(\varphi_{\check{\Pi min}} < \varphi_{рас})$ . Для расчетных условий, представленных на рис. 1,2, положение точки  $\check{\Pi min}$  определяется как на линии процесса в помещении  $Y_1\check{H}_1$ , так и на линии  $Y_2\check{H}_2$ .

Если точка  $\Pi_{\min 1}$  на линии процесса  $Y_1 \ddot{H}_1$  располагается ниже  $\varphi=1(\varphi_{\text{рас}})$ , необходимо обеспечить минимально-неизбежный воздухообмен  $G_{\Pi}$ , который определяется по уравнению:

$$G_{\Pi} = Q_{\Pi} / (I_{Y_1} - I_{\Pi}),$$

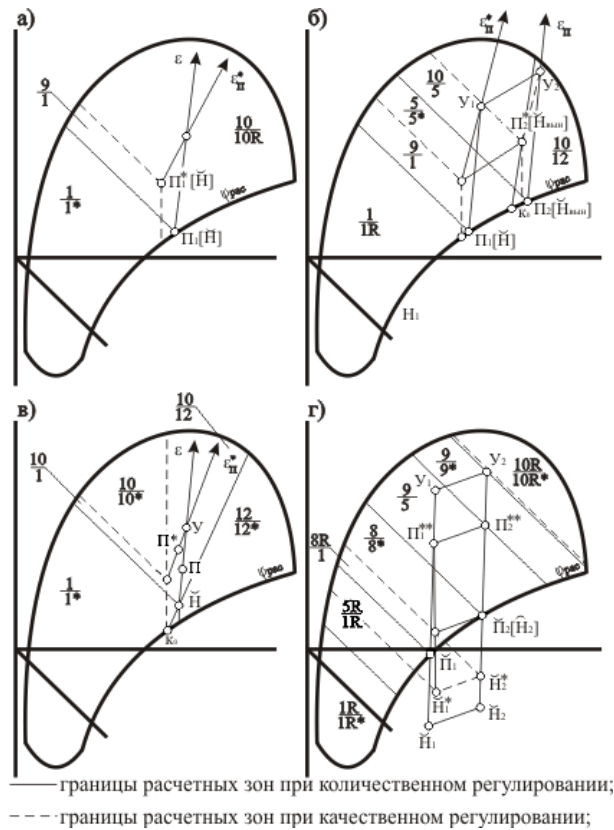


Рис. 1. Расчетные схемы ТДМ СКВ для оценки функционирования подсистемы транспортировки воздуха

Координаты точек  $Y$  и  $\ddot{H}$  изменяют свое значение, так как точки  $\ddot{H}$  для разных режимов «перемещаются» по линии  $\varphi_{\text{рас}}$  от точки  $\ddot{H}_1$  до  $(\cdot)\ddot{H}_2$ . Отсюда следует, что даже при постоянных нагрузках расход приточного воздуха должен быть переменным.

При снижении  $Q_{\Pi}$  и  $W_{\Pi}$  до величин  $Q_{\Pi}^*$  и  $W_{\Pi}^*$  соответственно положение векторных точек  $\ddot{H}$  может быть таким, как показано на рисунке (см. точки  $\ddot{H}_1^*$  и  $\ddot{H}_2^*$ ), когда сохраняется III класс нагрузок, или с переходом в I и IV классы нагрузок, когда эти точки будут выше  $\varphi_{\text{рас}}$  или изотермы  $t_{\gamma}$ .

Минимально-неизбежный воздухообмен при этом определяется по уравнению

$$G_{\Pi}^* = Q_{\Pi}^* / (I_{Y_1} - I_{\Pi_1}).$$

Если  $G_{\Pi}^* \geq G_{\Pi \min}$ , параметры приточного воздуха остаются на  $\varphi_{\text{рас}}$ , расход приточного воздуха  $G_{\Pi}^*$ , как и в предыдущем случае, для различных режимов изменяется от  $G_{\Pi 1}^*$  до  $G_{\Pi 2}^*$  из-за «перемещения» точки  $\ddot{H}^*$  по линии  $\varphi_{\text{рас}}$ .

Если  $G_{\Pi}^* < G_{\Pi \min}$ , то параметры приточного воздуха необходимо «поднять» так, чтобы их координаты соответствовали уравнениям:

$$I_{\Pi_1^*} = I_{y1} - \frac{Q_{\Pi}^*}{G_{\Pi \min}} ;$$

$$d_{I_1^*} = d_{y1} - \frac{Q_{\Pi}^*}{G_{\Pi \min}} .$$

При этом могут возникать различные законы фактического изменения расходов воздуха. Например, параметры приточного воздуха расположены на линии  $\Pi_1^* \check{\Pi}_2$  (случай, когда разность энтальпий  $(I_{y2} - I_{\Pi_1^*})$  может быть больше допустимой разности из-за ограничения  $\varphi_{\check{\Pi}_2}$ ). Тогда закон изменения расходов приточного и рециркуляционного воздуха характеризуется его переменными значениями, но отличающимися от того, когда точки  $\check{\Pi}$  перемещаются по  $\varphi_{\text{рас}}$ .

Если  $G_{\Pi}^* < G_{\Pi \min}$ , то необходимо параметры приточного воздуха «поднять» так, чтобы их координаты соответствовали уравнениям:

$$I_{\Pi_1^*} = I_{y1} - \frac{Q_{\Pi}^*}{G_{\Pi \min}} ;$$

$$d_{I_1^*} = d_{y1} - \frac{Q_{\Pi}^*}{G_{\Pi \min}} .$$

При этом могут возникать различные законы фактического изменения расходов воздуха. Например, параметры приточного воздуха расположены на линии  $\Pi_1^* \check{\Pi}_2$  (случай, когда разность энтальпий  $(I_{y2} - I_{\check{\Pi}_2})$  может быть больше допустимой разности  $(I_{y1} - I_{\Pi_1^*})$  из-за ограничения  $\varphi_{\check{\Pi}_2}$ ). Тогда закон изменения расходов приточного и рециркуляционного воздуха характеризуется его переменными значениями, но отличающимися от того, когда точки  $\check{\Pi}$  «перемещаются» по  $\varphi_{\text{рас}}$ .

Если из условия  $G_{\Pi}^* < G_{\Pi \min}$  точки  $\Pi$  располагаются существенно выше  $\varphi_{\text{рас}}$  (см. линию  $\Pi_1^{**} \Pi_2^{**}$ ), то воздухообмен при различных режимах остается постоянным и равным  $G_{\Pi \min}$ . При этом он определяется как сумма расходов наружного воздуха  $G_H$  и расхода 1-й рециркуляции  $G_{R1}$  или расходов наружного воздуха 1-й и 2-й рециркуляций  $G_{R2}$ . Минимально-неизбежная рециркуляция определяется по выражению

$$G_{R1} = G_{\Pi}^* \frac{I_{y1} - I_{\Pi_1^{**}}}{I_{y1} - I_{H_1^*}} ,$$

и тогда вторая рециркуляция составит

$$G_{R2} = G_{\Pi \min} - G_{R1} .$$

Отсюда следует, что закон изменения  $G_{R1}$  и  $G_{R2}$  зависит от характера изменения  $Q_{\Pi}^*$  и  $W_{\Pi}^*$ , а в более общем случае – и от  $G_H^*$ .

**2-й случай.** Точки  $\Pi_{\min}$  располагаются выше  $\varphi=1$  или  $\varphi_{\text{рас}}$ . Здесь исключается возможное многообразие функционирования подсистемы транспортировки воздуха. Расчетными остаются только те особенности, которые были рассмотрены последними для 1-го случая.

Заметим, что режимы функционирования других подсистем, определяемые расходами теплоты, холода и воды, полностью зависят от положения векторных точек  $\check{H}$  и  $\hat{H}$ , а не от положения точек  $\Pi$ .

Показанные особенности функционирования подсистемы транспортировки воздуха свидетельствуют о сложных связях расходов воздуха в зависимости от исходных условий, их изменений в период годового цикла эксплуатации систем. Даже если расход приточного воз-



духа для упрощения решений САУ можно оставить постоянным, то расходы наружного воздуха требуют обязательного управления, подчиненного оптимальным режимам СКВ.

Реализовать оптимальные режимы при регулировании параметров по отклонению от нормируемых значений практически невозможно. В основу должен быть принят принцип управления по возмущению, предполагая при этом, что в любой момент времени известны величины  $Q_{П}$ ,  $W_{П}$ ,  $G_{П}$ . Тогда структуру алгоритма управления можно для рассматриваемой подсистемы конкретизировать так, как это показано на рис. 2. Описательное содержание алгоритма основано на принципе управления по возмущениям. По этой причине каждому текущему состоянию наружного воздуха необходимо знать значение первичных факторов. Определение этих факторов имеет свой алгоритм, который здесь не рассматривается.

Единственное необходимое разъяснение связано с подтверждением обязательности выполнения операций групп Б, В и Г с использованием ЭВМ. Некоторые изменения алгоритма могут произойти при использовании логических схем управления СКВ [3].

Формализация рассматриваемого алгоритма с использованием перечисленных уравнений может быть произведена в последующем.

Важно подчеркнуть, что выполнение операций групп Б, В, Г ради управления подсистемой транспортировки воздуха приводит к созданию альтернативных вариантов решений САУ других подсистем СКВ.

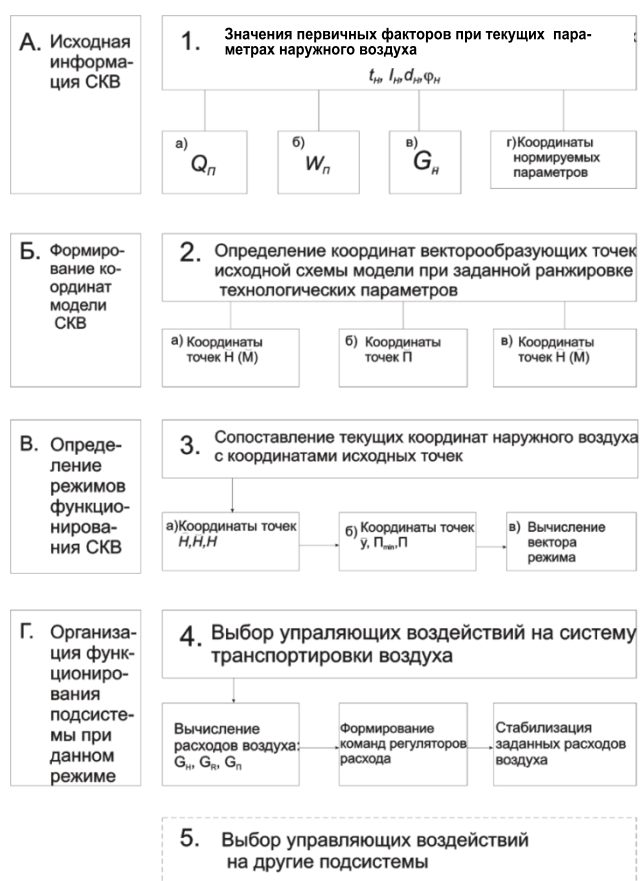


Рис. 2. Концептуальный и функциональный алгоритм управления подсистемой транспортировки воздуха

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены технологические схемы СКВ, функционирование их подсистем в режимах, обеспечивающих минимизацию энергопотребления. Функционирование за годовой цикл эксплуатации системы изучалось как при постоянных, так и при переменных значениях остаточных тепловлагодоступлений, и минимально-неизбежного расхода наружного воздуха.

2. Принятая детализация алгоритмов САУ отдельных подсистем обеспечивает возможность их формализации на основе уравнений термодинамической модели СКВ, тепло-массообмена и характеристик регуляторов, состав необходимых программ с последующим выбором структурной схемы машинных команд.

## Список используемых источников

1. *Рымкевич А.А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб.: Арктика, 2003. – 272 с.

2. *Коченков Н.В.* Энергосберегающие режимы систем кондиционирования воздуха: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 399 с.

3. *Пудиков В.В.* Система автоматического управления системами кондиционирования воздуха для первого класса нагрузок специальных объектов наземной космической инфраструктуры // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С.202–206.

В.С. Иванов;  
М.М. Сапожников;  
В.Б. Шароглазов

## **СПОСОБ ОБОСНОВАНИЯ КОМПЛЕКТА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ, ИНСТРУМЕНТОВ И ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК С УЧЕТОМ СОСТАВА И РАЗМЕЩЕНИЯ**

Современные образцы вооружения являются сложными техническими комплексами, которые имеют, как правило, длительные сроки эксплуатации, высокую стоимость и трудоемкость обслуживания. На эффективность применения подобных образцов оказывает влияние принятая система эксплуатации. В качестве факторов, характеризующих эффективность системы эксплуатации, можно выделить требования к составу и квалификации обслуживающего персонала, а также номенклатуру и объем запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП), расходуемых в процессе эксплуатации.

В данной статье рассмотрен способ обоснования комплекта ЗИП вооружения и военной техники (ВВТ) космических войск (КВ) с учетом состава и размещения. Предлагаемый способ позволяет определить показатели длительности восстановления и величины затрат на транспортировку, хранение, обслуживание элементов ЗИП, а также служит обоснованием при принятии решения о местах размещения ЗИП.

Ключевые слова: запасные части, инструменты и принадлежности, система обеспечения, восстановления.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ современных подходов к проектированию системы обеспечения ЗИП позволил выявить, что традиционно при определении номенклатуры и объема ЗИП в качестве исходных данных используются только справочные показатели надежности, в недостаточной степени учитываются эксплуатационная (ремонтная) технологичность и величина затрат на изготовление и последующую эксплуатацию.

В современных условиях технического обслуживания ВВТ КВ система эксплуатации позволяет определить их фактическое состояние, сделать прогноз его изменения. Для получения прогнозных оценок используются методы на статистических и физико-статистических моделях. Их достоверность и точность определяются длительностью, объемом наблюдений за прогнозируемыми параметрами объекта (аналогичных по структуре объектах). Сложность прогнозирования фактического состояния ВВТ КВ заключается в уникальности значительной части оборудования, неидентичности типового оборудования (вследствие многочисленных изменений за продолжительный период эксплуатации). Соответственно, прогнозирование на основе статистических методов может привести к существенным погрешностям.

Целесообразно при проектировании вновь создаваемых образцов ВВТ КВ основные эксплуатационно-технические показатели определять путем применения экспертного оценивания. Подобный подход вполне оправдан, так как среди всего спектра ВВТ КВ затруднительно найти такой образец, объем серийного выпуска которого позволит сформировать представительную статистическую выборку. Основными условиями получения достоверных результатов экспертом являются полнота учета наиболее важных факторов, влияющих на эксплуатацию ВВТ, и нахождение баланса между взаимоисключающими показателями.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Определим факторы, которые оказывают наибольшее влияние при оценивании эффективности вооружения КВ. Очевидно, комплект ЗИП может быть спроектирован в объеме, перекрывающем номенклатуру составных частей агрегата от 0 до 100%. В первом случае обеспечивается минимум затрат, но и вероятность восстановления агрегата после отказа стремится к нулю. Во втором случае в составе ЗИП агрегата фактически будет состоять второй такой же агрегат, что несомненно повышает надежность и, как следствие, вероятность выполнения целевой задачи, но одновременно увеличивает стоимость жизненного цикла

В подобных случаях увеличивается не только стоимость изготовления, но и происходит увеличение будущих эксплуатационных затрат, обусловленное необходимостью хранения, транспортирования, обслуживания избыточных элементов ЗИП, которые с высокой вероятностью не будут применены по назначению в течение всего срока эксплуатации, что отрицательно сказывается на эффективности образца вооружения. Тогда вступают в противоречие необходимость обеспечения высокого показателя вероятности выполнения целевой задачи  $P_{цз}$  и желание минимизировать величину затрат  $C$ . Как правило, к решению подобных задач подходят при помощи ограничения значения  $P_{цз}$  задачи снизу и нахождения оптимального значения затрат  $C$ . Однако моделирование эксплуатационных процессов с учетом двух названных показателей не в полной мере отражает особенности эксплуатации вооружения КВ. Образцы вооружения КВ, как правило, в период применения по назначению не имеют резерва, при этом крайне важна интенсивность восстановления после отказа. В представленной статье предложен способ обоснования комплекта ЗИП, учитывающий эксплуатационные затраты и длительность восстановления  $T_v$ .

Обозначим:

$\overline{p} = 1, P$ , где  $P$  – количество наименований элементов ЗИП;

$\overline{i} = 1, I$ , где  $I$  – количество элементов каждого наименования;

$\overline{j} = 1, J$ , где  $J$  – варианты размещения элементов  $i$ -го наименования.

Найти: вектор  $\vec{x}$ , определяющий номенклатуру, количество и схему размещения элементов ЗИП, при котором обеспечиваются требуемые показатели вероятности выполнения задачи и интенсивность восстановления, а величина затрат минимальна:

$$\vec{x} = \arg \min_{\vec{x} \in \Delta} S(\vec{x}), \quad (1)$$

$$\Delta = \left\{ \vec{x} \in \Delta \left| P_{вз}(\vec{x}) \geq P_{вз, \text{треб}}, T_v(\vec{x}) \leq T_{в, \text{треб}} \right. \right\}. \quad (2)$$

При оценивании вероятности выполнения задачи предпочтительно использовать общепринятый подход расчета потребного количества элементов каждого наименования на основании имеющейся информации о надежности проектируемых элементов. Для расчета длительности и величины затрат на восстановление работоспособного состояния с учетом мест размещения ЗИП предлагается использовать представленный ниже подход.

Любые суждения экспертов и их оценки всегда субъективны, а значит, нечетки. В связи с этим логично при экспертном определении показателей и анализе его результатов использовать разработанную Л. Заде математическую теорию нечетких множеств. Многочисленные примеры применения этой теории в различных сферах науки и техники доказывают ее плодотворность.

Каждому элементу ставятся в соответствие лингвистические переменные  $L_p (p = \overline{1, P})$  и  $N_p (p = \overline{1, P})$ , значениями которых будут варианты длительности восстановления и величины соответствующих затрат для каждого  $j$ -го варианта размещения  $L_{pj} = (j = \overline{1, J^p})$  и  $N_{pj} = (j = \overline{1, J^p})$  где  $J^p$  – количество вариантов размещения  $p$ -го элемента.

Обозначим  $S$  возможных вариантов длительности восстановления и соответствующих величин затрат. Каждый из конструкторов-проектировщиков оценивает показатели  $L_{pj}$  и  $N_{pj}$  по каждому варианту размещения, которые заносятся в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Оценка показателей длительности восстановления**

Вариант размещения ЗИП	Длительность восстановления $T_{в\,pj}$						
	1 ч	2 ч	4 ч	8 ч	14 ч	24 ч	48 ч
А	0,8	1					
Б			0,5	0,8	1		
В						0,9	1

Таблица 2

**Оценка показателей затрат**

Вариант размещения ЗИП	Величина затрат $S_{pj}^*$						
	1 у. е.	2 у. е.	3 у. е.	4 у. е.	5 у. е.	6 у. е.	7 у. е.
А		0,8	1				
Б				0,9	1		
В					0,7	0,8	1

\* Величина затрат формируется из затрат на хранение и стоимости обслуживания элементов ЗИП в процессе хранения.

Каждое значение нечетких переменных является нечетким, и для их описания используются нечеткие множества. Эти множества задаются на базовом (четком) множестве  $U_{pj}^L = \{u_{pjs}^L, s = \overline{1, S^p}\}$  действительных чисел, включающем полное множество значений переменной  $L_{pj}$ , и множестве  $U_{pj}^N = \{u_{pjs}^N, s = \overline{1, S^p}\}$  действительных чисел, включающем значения  $N_{pj}$ . Пусть для  $p$ -го элемента множество задано в виде  $U_p = \{u_{p1} = 1; u_{p2} = 2; u_{p3} = 4; u_{p4} = 8; u_{p5} = 14; u_{p6} = 24; u_{p7} = 48\}$ .

Эксперт-конструктор сопоставляет каждую оценку этого множества с количественным показателем степени уверенности в том, что именно она будет иметь место. Этот показатель обозначим  ${}^M L_{pj} = (u_{pjs})$  [ ${}^M N_{pj} = (u_{pjs})$  соответственно] и будем его называть значением

функции принадлежности, где  $p = \overline{1, P}, j = \overline{1, J^P}, s = \overline{1, S^P}$ . Число  $m_{L_{pj}} = (u_{pjs})$  характеризует степень уверенности эксперта-конструктора, в том, что для каждого  $p$ -го элемента при каждом  $j$ -м варианте размещения количественная оценка  $s$ -го значения лингвистической переменной может принять значение  $u_{pjs}$ . Функции принадлежности  $m_{L_{pj}} = (u_{pj})$ ,  $u_{pj}^L \in U_{pj}^L, j = \overline{1, J}$  и  $m_{N_{pj}} = (u_{pj})$ ,  $u_{pj}^N \in U_{pj}^N, j = \overline{1, J}$  элементов базовых множеств  $U_{pj}^L$  и  $U_{pj}^N$ , нечетких множеств  $L_{pj}$  и  $N_{pj}$  задаются векторами-строками:

$$\mu_{L_{pj}}(u_{pj}) = [\mu_{L_{pj}}(u_{pj1}); \mu_{L_{pj}}(u_{pj2}); \dots; \mu_{L_{pj}}(u_{pjs^p})],$$

$$\mu_{N_{pj}}(u_{pj}) = [\mu_{N_{pj}}(u_{pj1}); \mu_{N_{pj}}(u_{pj2}); \dots; \mu_{N_{pj}}(u_{pjs^p})].$$

Например, исходя из табл. 1 эксперт-проектировщик для первого элемента ЗИП выбрал значения показателей  $L_p$  для каждого варианта  $j$ -го размещения:

$$\text{вариант размещения А} - \mu_{L_{pj}}(u_{pj}) = [0, 8; 1; 0; 0; 0; 0; 0], p=1, j=A;$$

$$\text{вариант размещения Б} - \mu_{L_{pj}}(u_{pj}) = [0; 0; 0, 5; 0, 8; 1; 0; 0], p=1, j=B;$$

$$\text{вариант размещения В} - \mu_{L_{pj}}(u_{pj}) = [0; 0; 0; 0; 0; 0, 9; 1], p=1, j=B,$$

и соответствующие значения  $N_p$ :

$$\text{вариант размещения А} - \mu_{N_{pj}}(u_{pj}) = [0; 0, 8; 1; 0; 0; 0; 0], p=1, j=A;$$

$$\text{вариант размещения Б} - \mu_{N_{pj}}(u_{pj}) = [0; 0; 0; 0, 9; 1; 0; 0], p=1, j=B;$$

$$\text{вариант размещения В} - \mu_{N_{pj}}(u_{pj}) = [0; 0; 0; 0; 0, 7; 0, 8; 1], p=1, j=B.$$

Значения лингвистических переменных  $L_{pj}$  и  $N_{pj}$  формально могут быть записаны в виде нечетких множеств  $L_{pj} = \bigcup_s \mu_{L_{pj}}(u_{pjs}) / u_{pjs}$ . Применительно к рассмотренному примеру для варианта размещения А получим:

$$L_{1A} = \bigcup_{s=1}^7 \mu_{L_{1A}}(u_{1As}) / u_{1As} = 0,8 / 1 + 1 / 2 + 0 / 4 + 0 / 8 + 0 / 14 + 0 / 24 + 0 / 48;$$

$$N_{1A} = \bigcup_{s=1}^7 \mu_{N_{1A}}(u_{1As}) / u_{1As} = 0 / 1 + 0,8 / 2 + 1 / 3 + 0 / 4 + 0 / 5 + 0 / 6 + 0 / 7.$$

Символы  $\bigcup$  и «+» обозначают операцию объединения.

Значения функций принадлежности, полученных опросом экспертов-проектировщиков, для каждого варианта размещения элементов  $j$  поместим в табл. 3 и 4.

Таблица 3

## Значения длительности восстановления

Номер эксперта-конструктора, $Q$	Длительность восстановления $T_{вpj}$						
	1 ч	2 ч	4 ч	8 ч	14 ч	24 ч	48 ч
1	0,8	1					
2	0,5	0,9	1				
:							
$q$	0,8	1					
:							
$Q$	0,8	1					

Таблица 4

## Значения затрат

Номер эксперта-конструктора, $Q$	Величина затрат $S_{pj}$						
	1 у. е.	2 у. е.	3 у. е.	4 у. е.	5 у. е.	6 у. е.	7 у. е.
1	0,6	1					
2	0,5	0,8	1				
:							
$q$	0,8	0,85	1				
:							
$Q$	0,7	1					

В представленной задаче эксперты-конструкторы имеют одинаковый уровень компетентности, поэтому функции принадлежности длительности восстановления и величины затрат для каждого варианта размещения найдем в соответствии с правилом выполнения операции пересечения нечетких множеств:

$$\tilde{\mu}_{\mathcal{E}_{pj}}(u_{pj}) = \min_q \left\{ \tilde{\mu}_q(u_{pj}) \right\}, q = \overline{1, Q}, p = \overline{1, P}, j = \{A, B, B\}.$$

Представим решение в виде однозначного количественного результата, который состоит из максимальной функции принадлежности

$$u_{pj}^* = \arg \max_{u_{pj}} \tilde{\mu}_{\mathcal{E}_q}(u_{pj}), u_{pj} \in U_j,$$

и соответствующего числового значения элемента базового множества, которому принадлежит полученная функция принадлежности.

Полученные в виде нечетких значений результаты позволяют сформировать множество значений длительности восстановления и величин затрат (табл. 5) и служат обоснованием при принятии решения о местах размещения ЗИП с учетом требований к интенсивности восстановления работоспособного состояния и величины эксплуатационных затрат.

Таблица 5

### Значения показателей длительности восстановления и величины затрат

Вариант размещения ЗИП	Показатели длительности восстановления $T_{вpj}$ и величины затрат $S_{pj}$			
	1-й элемент ЗИП, $\tilde{\mu}_{\mathcal{E}1j} / T_{в1j};$ $\tilde{\mu}_{\mathcal{E}1j}^s / s_{1j}$	2-й элемент ЗИП, $\tilde{\mu}_{\mathcal{E}2j} / T_{в2j};$ $\tilde{\mu}_{\mathcal{E}2j}^s / s_{2j}$	...	P-й элемент ЗИП, $\tilde{\mu}_{\mathcal{E}Pj} / T_{вPj};$ $\tilde{\mu}_{\mathcal{E}Pj}^s / s_{Pj}$
	А	0,9/2 ч; 0,8/2 у. е.	0,8/4 ч; 0,7/3 у. е.	...
Б	0,8/14 ч; 0,7/5 у. е.	0,7/14 ч; 0,65/5 у. е.	...	...
В	0,8/48 ч; 0,9/7 у. е.	0,9/48 ч; 0,8/7 у. е.	...	...

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход позволяет обосновать состав и место размещения комплекта ЗИП, при которых обеспечивается требуемое значение вероятности достижения цели, учитывается длительность восстановления работоспособного состояния и величина эксплуатационных затрат. В результате обеспечивается получение исходной информации для проектирования рациональной системы эксплуатации.

### Список используемых источников

- ГОСТ РВ 27.3.03–2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – М.: Стандартинформ, 2005. – 38 с.
- Борисов Ю.И. Основные направления развития вооружения, военной и специальной техники // Оборонно-промышленный комплекс России: федеральный справочник. – 2014. – Т. 10. – С. 211–216. – URL: <http://federalbook.ru/files/opk/Soderjanie/OPK-10III/Borisov.pdf> (дата обращения: 04.02.2019).



О.В. Капитонов;  
В.М. Сальников,  
*кандидат техн. наук, старший научный сотрудник;*  
Е.В. Шишкин,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ, СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПОЛУЧЕНИЯ, ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИЯХ И РЕЖИМАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Представлен анализ особенностей функционирования систем жизнеобеспечения (СЖО) защитных сооружений космических войск, в том числе системы автоматизированного управления, контроля и диагностирования. Разработаны предложения по развитию и применению методов и средств контроля и диагностирования СЖО в интересах космических войск. Разработан способ обеспечения живучести и надежности защитных сооружений в период воздействия природных и техногенных факторов с использованием интеллектуальных систем диагностики состояния технического оборудования,

Ключевые слова: защитные сооружения, системы жизнеобеспечения и специальные технические системы, системы автоматизированного управления, контроля и диагностирования, математическая модель объекта.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Защитные сооружения (ЗС) космических войск предназначены для управления и координации войсковых подразделений. Основная задача ЗС – защита личного состава, прием и обработка информации, принятие и передача принятых решений. Эта задача выполняется с помощью различных средств связи и управления, а также компьютерной техники и технологий.

Особенностью ЗС является то, что системы связи, управления и компьютерная техника, являясь основным элементом, занимают максимально до 20% объема и потребляют до 20% энергии по отношению ко всему сооружению [1].

### **ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Основной дорогостоящий объем защитного сооружения и максимальное количество энергии, вырабатываемой в сооружении, занимают и потребляют системы, обеспечивающие функционирование средств связи, компьютерной техники, жизнедеятельность личного состава группы управления и координации.

*Обеспечивающие системы* – это так называемые системы жизнеобеспечения и специальные технические системы (СЖО и СТС).

В состав СЖО и СТС входят системы (устройства): защиты и герметизации; воздухообеспечения, вентиляции, кондиционирования воздуха и холодоснабжения; поддержания подпора воздуха в сооружении; водоснабжения и водоотведения; автономного электроснабжения; отведения выхлопных газов энергоисточника; автоматического пожаротушения, пожарной сигнализации.

Система автоматизированного управления и контроля (САУК) предназначена для автоматического, дистанционного и местного управления и контроля СЖО и СТС. Современные САУК позволяют выполнять еще и диагностику (САУКД).

Основной предмет технической диагностики – это организация эффективной проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования технических объектов (деталей, элементов, узлов, блоков, устройств, изделий, агрегатов, систем, а также процессов передачи, обработки и хранения материи, энергии и информации).

Современные САУКД используют информационные технологии в области инженерно-технических систем с применением специально разработанных математических моделей.

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

*Математическая модель объекта диагностирования, контроля и управления* – описание объекта в исправном и в неисправном его состояниях в виде формальных зависимостей между возможными воздействиями на объект и его реакциями на эти воздействия.

В основе построения современных систем диагностики лежат «интеллектуальные датчики», которые в моноблоке вместе с аналоговой частью подключаются к чувствительному элементу. Кроме того, используется и цифровая часть на базе сигнальных микропроцессоров и микроконтроллеров.

Для обеспечения безопасного функционирования защитных сооружений необходимо осуществлять постоянный контроль их состояния, т. е. измерять изгибы, напряжения, деформации, температуру, вибрации, трещинообразование, однородность конструктивных элементов и т. д. Полученная информация о контролируемых параметрах вместе со значениями температуры позволяет рассчитать осадки фундаментов и внутренние напряжения в конструкциях сооружений, получить представление о перемещении элементов конструкций с учетом углов поворота, а также на основе численного моделирования и сопоставления измеренных данных с эталонными – сделать вывод о степени безопасности эксплуатации сооружений.

На сегодняшний день нормы проектирования, строительства и эксплуатации защитных сооружений Министерства обороны Российской Федерации, инженерно-технических систем ЗС, а также систем диагностирования, информационно-измерительных систем с датчиками предусматривают автоматизированное управление техническими системами, а именно:

- системами вентиляции, водоснабжения и канализации, а также системами управления дверями на границах пожарных отсеков, проходами и санпропусками;
- системами электроснабжения, автоматической защиты холодоснабжения и кондиционирования воздуха (центральные кондиционеры);
- стационарными установками пожаротушения и пожарной сигнализации.

Системы автоматизированного управления и контроля (САУК) должны обеспечивать надежную работу технических систем во всех режимах функционирования ЗС.

В САУК применяются следующие виды управления техническими средствами: автоматическое, дистанционное и местное. Автоматическое управление осуществляется без участия дежурной смены автоматическими средствами и приборами. Вместе с тем отмечено, что в технических системах, управляемых САУК, основные операции (включение, отключение, изменение режима работы и т. п.) осуществляются дежурной сменой.

На сегодняшний день системы диагностирования, контроля и управления различными технологическими процессами хорошо изучены, широко применяются и постоянно совершенствуются. Необходимое аппаратное и программное обеспечение разработано, производится и постоянно развивается.

Существующие и эксплуатируемые защитные сооружения в основном введены в эксплуатацию в 60-е, 70-е годы прошлого века. При этом элементная база как самих инженерно-технических систем, так и систем автоматизированного управления и контроля значительно устарела. Программное обеспечение также далеко от совершенства.

Нормативное обеспечение в настоящее время еще актуально.

Для совершенствования СЖО и ТС необходимо разработать математические модели инженерных систем и адаптировать их к существующему аппаратному и программному обеспечению. При этом, на наш взгляд, разрабатывать математические модели необходимо совместно с АО «31 ГПИ СС».

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИРОВАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ**

Основным направлением совершенствования инженерно-технических комплексов является повышение их живучести и надежности. Последнее обстоятельство должно учитываться при разработке математических моделей инженерных систем.

В Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского разработаны *предложения* по развитию и применению методов и средств контроля и диагностирования СЖО и ТС в интересах Министерства обороны РФ.

В качестве первого этапа необходимо выполнить анализ предприятий российской промышленности, производящих элементы измерительных систем и системы в целом.

В дальнейшем следует определить возможность адаптации существующих в России информационных технологий в области инженерно-технических систем и системного проектирования для использования их в области фортификационного строительства по следующим направлениям:

- методы и средства технической диагностики;
- интеллектуальные системы диагностики технического состояния технологического оборудования, основанные на применении искусственных нейронных сетей, позволяющих распознавать дефекты оборудования и определять остаточный ресурс;
- применение в измерительной системе вычислительной техники, что делает возможным не только хранение информации, но и применение алгоритмов идентификации, теории искусственного интеллекта, адаптации, а также алгоритмов обучения и организации структуры измерительной системы для обработки прямых измерений.
- применение программируемых логических контроллеров – ПЛК, которые наряду с осуществлением контроля и управления сегодня часто применяют и для других задач, таких как сигнализация, отображение регистрации данных и т. д.;
- использование многофункциональных и интеллектуальных датчиков с метрологическим самоконтролем;
- объединение датчиков, исполнительных механизмов, ПЛК в локальные сети;
- использование закрытого сегмента сети *Ethernet* для связи отдельного оборудования в отдельной инженерно-технической системе, а также объединения всех систем объекта или объектов в единый комплекс с высокой надежностью функционирования и создания единой системы сбора информации, диагностирования, информирования, контроля и управления;
- совершенствование нормативно-технического обеспечения.

В Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского выполнен значительный объем работ по рассматриваемому направлению.

НИР шифр «Морж-46» на тему «Разработка принципов и методов эксплуатации технических систем сооружений наземных комплексов (ТС СНК) в условиях увеличения объема информации, повышения значения временного, надежностного и стоимостного факторов». Первый этап работы «Разработка принципов управления эксплуатацией ТС СНК на основе интеллектуальных систем» содержит результаты исследований, выполненных в соответствии с техническим заданием войсковой части 26180-К в период с января по декабрь 2000 года.

Доктор технических наук, профессор В.И. Сеньченков [2, 4, 5] – основоположник научной школы «Прогнозирование технического состояния технических систем» Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Одна из последних его работ – «Контроль и техническая диагностика. Методы оптимизации в задачах распознавания технических состояний». Валентином Ивановичем Сеньченковым предложены подходы к получению информации о состоянии сложных технических систем, при этом основное внимание акцентируется на математическом и алгоритмическом обеспечении указанных подходов. Вопросы контроля и диагностирования раскрываются с позиций теории распознавания образов – важнейшего системно-кибернетического направления, которое занимается проблемами классификации и непосредственно распознавания объектов (процессов, ситуаций) любой природы.

Под руководством Валентина Ивановича выполнены диссертационные работы:

– «Повышение достоверности контроля и диагностирования систем холодоснабжения специальных сооружений КВ на этапе эксплуатации» – П.А. Грушковский;

– «Повышение достоверности определения технического состояния систем вентиляции и кондиционирования воздуха на этапе эксплуатации посредством разработки методики контроля и диагностирования по параметрам основных рабочих процессов» – И.Н. Некрасов.

В настоящее время выполняется НИР «Развитие методов и средств контроля и диагностирования систем жизнеобеспечения и технических систем специальных фортификационных сооружений». В результате выполнения первого этапа данной НИР показана возможность получить *синергетический эффект*, заключающийся не только в повышении уровня автоматизации управления работой СТС, но и в обеспечении необходимой живучести и надежности защитных сооружений в целом, особенно в периоды воздействия природных и техногенных факторов.

## СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Специалистами академии разработан *способ обеспечения живучести и надежности защитных сооружений* в период воздействия природных и техногенных факторов. При его использовании применяются интеллектуальные системы диагностики технического состояния технологического оборудования, позволяющие распознавать дефекты и определять остаточный ресурс оборудования; вычислительная техника для хранения информации, для применения алгоритмов идентификации, теории искусственного интеллекта, адаптации, а также алгоритмов обучения и организации структуры измерительной системы для обработки прямых измерений; программируемые логические контроллеры для контроля, управления, сигнализации, отображения, регистрации данных; многофункциональные и интеллектуальные датчики с метрологическим самоконтролем; закрытый сегмент сети *Ethernet* для связи отдельного оборудования в отдельной инженерно-технической системе.

В периоды штатного функционирования, и особенно в период функционирования при воздействии природных и техногенных факторов, автоматизированная система управления с помощью специального программного, нормативно-технического и информационного комплекса обеспечивает надежную работу технических систем во всех режимах функционирования защитного сооружения и выполняет следующие функции [3]:

- автоматического управления оборудованием технической системы;
- автоматического регулирования параметров технологических процессов;
- приема и выполнения команд на изменение режимов работы;
- оперативного контроля работоспособности оборудования;
- формирования, передачи, накопления и обработки информации;

- технологической защиты оборудования в аварийных режимах;
- локализации аварий;
- включения, отключения резервных и рабочих агрегатов, оборудования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Дальнейшие направления исследований состоят в следующем:

1. Анализ существующих цифровых моделей технических систем, в первую очередь в академии, и определение возможности их синхронизации в единый комплекс управления.
2. Разработка отсутствующих цифровых моделей инженерно-технических систем в интересах СФС.
3. Разработка цифровых моделей защитных устройств входных комплексов, газовоздушных трактов и устройств ввода инженерных коммуникаций.
4. Подготовка предложений по контролю состояния и целостности ограждающих, строительных конструкций, организации системы контроля и интеграции системы в цифровую модель сооружения.
5. Интеграция всех моделей элементов, отдельных технических систем, защитных устройств в единый цифровой комплекс, описывающий функционирование СФС в целом во всех режимах повседневного и боевого функционирования.

## **Список используемых источников**

1. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов / В.А. Зеленцов, А.П. Ковалев, М.Ю. Охтилев и др. – СПб.: Изд-во СПИИРАН, 2010. – 175 с.
2. *Сеньченков В.И.* Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния: моногр. – Saarbrücken: LapLambert, 2013. – 377 с.
3. Руководство по эксплуатации вооружения Космических войск (РЭВ КВ-2002). – М.: МО РФ, 2002. – 132 с.
4. *Сеньченков В.И.* Статистические методы обработки экспериментальных данных. – СПб.: ГУАП, 2006. – 243 с.
5. *Сеньченков В.И.* Математическое обеспечение контроля технического состояния мехатронных комплексов // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – №10. – С. 27–32.

В.В. Карагодин,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
К.А. Полянский,  
*кандидат техн. наук;*  
Б.А. Ревяков,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК И ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ В СИСТЕМАХ ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Рассматриваются вопросы совместной работы основных элементов системы гарантированного электроснабжения, предназначенной для обеспечения возрастающих требований ответственных потребителей специальных объектов к надежности, бесперебойности и качеству электрической энергии. Предложена математическая постановка задачи оптимизации параметров дизель-генераторных установок и источников бесперебойного питания в форме задачи дискретного программирования.

Ключевые слова: оптимизация, система гарантированного электроснабжения, дизель-генераторная установка, источник бесперебойного питания, электромагнитная совместимость.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время развитие объектов наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения характеризуется интенсивным внедрением и распространением информационных технологий. Вычислительная техника и электронные средства, как потребители электрической энергии, наиболее чувствительны к показателям ее качества. Проблема обеспечения требуемого качества электрической энергии, надежности и бесперебойности электроснабжения ответственных потребителей в настоящее время обостряется вследствие снижения надежности систем внешнего электроснабжения, которые не способны в полной мере эти требования удовлетворить [1]. В этих условиях возрастает роль систем гарантированного электроснабжения (СГЭ) и появляется объективная потребность в развитии подходов к их построению с учетом последних тенденций развития техники, а также экономических аспектов.

СГЭ предназначена для автономного электроснабжения ответственных потребителей в случаях исчезновения питания от основных источников или отклонения показателей качества электрической энергии, поступающей от них, за пределы допустимых значений. В качестве подсистемы современной СГЭ выступает система бесперебойного электроснабжения (СБЭ), которая способна обеспечивать электроснабжение ответственных потребителей в случаях возникновения сбоев в электрической сети (прерываний, провалов напряжений и т. д.) на время, определяемое количеством запасенной накопителем энергии.

Основными структурными элементами современных СБЭ, предопределяющими ее эксплуатационные показатели, являются чаще всего статические источники бесперебойного питания (ИБП) двойного преобразования.

Ненормируемые по длительности и частоте повторений отключения в сетях внешнего электроснабжения вынуждают включать в состав СГЭ автономные электростанции, которые обеспечивают необходимое время автономной работы (сверх времени, ограниченного емкостью аккумуляторных батарей ИБП). Кроме того, использование автономных источников в комплексе с ИБП позволяет уменьшить время поддержки сети аккумуляторными батареями (АБ) до нескольких минут, т. е. уменьшить их емкость, а следовательно, уменьшить и стои-

мость ИБП. Применяемые совместно с СБЭ автономные источники электроэнергии в совокупности составляют СГЭ.

В качестве автономных источников электроэнергии для СГЭ специальных объектов используют дизель-генераторные установки (ДГУ) [2]. При работе ДГУ на ИБП двойного преобразования могут возникать существенные проблемы [3]. К наиболее серьезным из них относят: недопустимое отклонение показателей качества электрической энергии, получаемой от синхронного генератора, в момент перевода СБЭ на работу от ДГУ, а также возможность электромагнитной несовместимости этих элементов СГЭ. Необходимость разработки такого похода к построению СГЭ, который позволит эти проблемы исключить, обуславливает актуальность настоящего исследования.

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ДГУ В СОСТАВЕ СГЭ

Рассматриваемые ниже особенности совместной работы ДГУ и ИБП в составе СГЭ обусловлены характером процессов энергообмена в системах, содержащих устройства силовой электроники, вызывающие в силу дискретного характера работы значительные искажения в гармонической форме токов и напряжений. Вопросы взаимодействия ДГУ и СБЭ, функционирующих в составе СГЭ, должны быть рассмотрены как в переходных режимах, например, во время переключения СБЭ на питание от ДГУ, так и в установившихся режимах работы.

1. *Переходный режим*, а именно режим подключения нагрузки, отрицательно влияет на работу ДГУ [4]. Это влияние может приводить, в частности, к снижению напряжения генератора. Зависимости изменения напряжения на выходе генератора от нагрузки, подключаемой одномоментно, предоставляются производителями для конкретных моделей ДГУ.

В СГЭ, включающей СБЭ и ДГУ, параметры которых, прежде всего номинальные мощности, выбраны без учета рассматриваемых особенностей, напряжение синхронного генератора в момент подключения нагрузки может достигнуть минимально допустимого значения напряжения, при котором СБЭ переходит в режим питания от аккумуляторных батарей ИБП. Генератор без нагрузки переходит в режим холостого хода, и через некоторое время выходное напряжение восстановится до номинального. Поэтому СБЭ вновь переключится на питание от генератора. Подключение нагрузки опять вызовет снижение напряжения генератора – и цикл снова повторится. Данный процесс представлен на рис. 1.

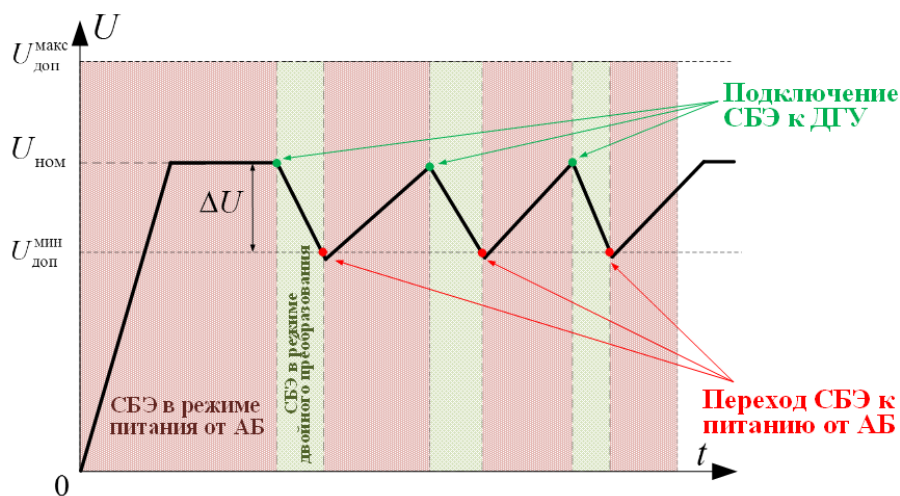


Рис. 1. График изменения напряжения генератора при подключении СБЭ к ДГУ в СГЭ с несогласованными параметрами элементов

Такой автоколебательный режим (так называемый режим «качелей» при набросе нагрузки) чередования переключений в конечном итоге приведет к разряду аккумуляторных батарей и нарушению электроснабжения ответственных потребителей.

Очевидно, что рассмотренная особенность совместной работы ДГУ и ИБП в составе СГЭ требует согласования мощности ДГУ и ИБП.

2. В *установившемся режиме* работы СГЭ, как было отмечено ранее, проявляется проблема электромагнитной совместимости ее основных функциональных элементов. Она возникает вследствие наличия высокочастотных гармоник входного тока ИБП, которые потребляют несинусоидальный ток, что приводит к значительному увеличению уровня кондуктивных электромагнитных помех.

Искажаемые выпрямительным блоком ИБП токи (рис. 2) [5] оказывают влияние на величину и форму выходного напряжения генератора. Его форма становится несинусоидальной. Это может стать причиной некорректной работы электрооборудования, подключенного к выходу синхронного генератора (СГ), и даже его отказов, а также вызывать ложные срабатывания аварийных защит СГ, опасные перегревы обмоток и сердечников, приводить к некорректной работе автоматического регулятора напряжения генератора и т. п. Поэтому допущение о синусоидальности фазных токов СГ, работающего на мощный источник бесперебойного питания, которое принимается при его проектировании, оказывается несправедливым.

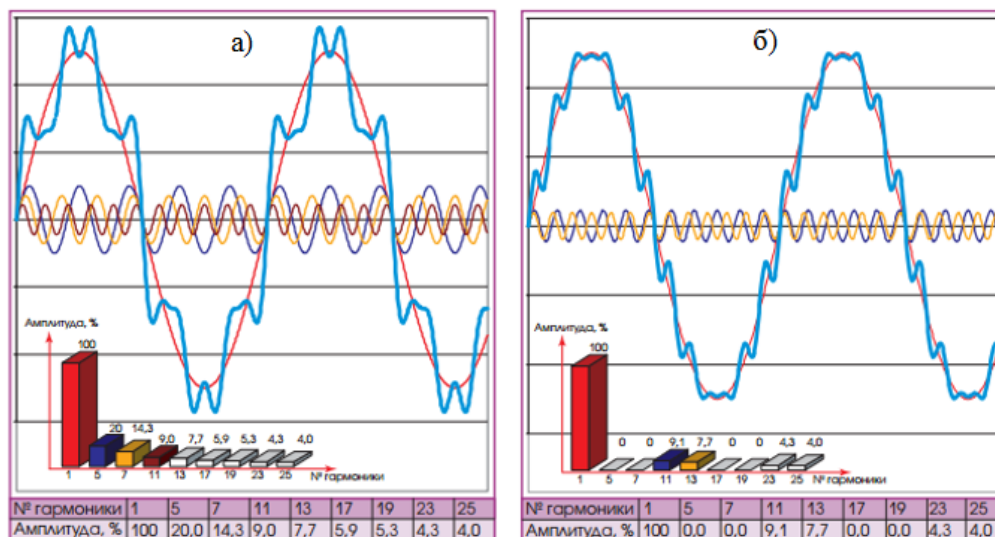


Рис. 2. Форма входных токов, характерная для тиристорных выпрямителей:  
а – 6-импульсных; б – 12-импульсных

Устранить указанные выше проблемы, возникающие при совместной работе ИБП и ДГУ, возможно путем:

- существенного завышения номинальной мощности ДГУ относительно мощности нагрузки. По некоторым оценкам [6] при 6-импульсной схеме выпрямителей ИБП кратность мощности ДГУ по отношению к мощности СБЭ достигает 3, при 12-импульсной схеме выпрямителей ИБП – до 1,9;

- применение СБЭ с более дорогостоящей конфигурацией, под которой понимается тип, определяемый применяемыми переключающими элементами (тиристоры или IGBT-модули), и схема (6-импульсная или 12-импульсная) выпрямителей ИБП, входящих в ее состав, а также наличие дополнительных устройств, например фильтров высших гармоник и устройств нормированного подключения нагрузки (УНПН).



Тиристорные выпрямители, применяемые в статических ИБП, генерируют высшие гармоники, порядок которых определяется выражением [7]

$$n = k\rho \pm 1,$$

где  $k$  – числа натурального ряда,  $k=1,2,3\dots$ ;

$\rho$  – количество импульсов выпрямителя.

Поэтому 6-импульсный выпрямитель ( $\rho=6$ ) является источником гармоник с номерами: 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 и т. д., а для 12-импульсного выпрямителя ( $\rho=12$ ) характерны гармоники с номерами: 11, 13, 23, 25 и т. д.

Как видно из рис. 2, форма входного тока у ИБП с 12-импульсным выпрямителем ближе к синусоиде, коэффициент нелинейных искажений имеет меньшее значение, а значит, негативное влияние на ДГУ будет слабее.

Современные ИБП могут оборудоваться УНПН с плавным или ступенчатым вводом в работу. Данное устройство позволяет путем постепенного переключения нагрузки с аккумуляторных батарей на ДГУ избежать недопустимого снижения напряжения генератора в переходном режиме, а значит, и необходимости значительного увеличения мощности ДГУ по сравнению с входной мощностью СБЭ.

Как отмечалось выше, решение проблем, возникающих при совместной работе ДГУ и ИБП в СГЭ, возможно путем завышения номинальной мощности ДГУ и/или использованием ИБП с более дорогостоящей конфигурацией. Техно-экономический анализ этих решений показал, что выбор ИБП с более совершенной конфигурацией ведет к возрастанию экономических затрат на СБЭ при снижении затрат на ДГУ. Завышение номинальной мощности генератора приведет к увеличению затрат на ДГУ, но позволит использовать более простые и менее дорогостоящие СБЭ.

Таким образом, решение задачи оптимизации параметров ДГУ и ИБП в СГЭ ответственных потребителей, обеспечивающей требуемые высокие показатели надежности, возможно только с учетом особенностей совместной работы ДГУ и СБЭ во всех режимах (как в установившихся, так и в переходных). А учитывая, что СБЭ могут быть различных конфигураций и в зависимости от этого оказывать различное влияние на работу ДГУ, причем степень этого влияния также зависит от номинальной мощности ДГУ, данная задача может быть рассмотрена как оптимизационная. Для ее решения требуется разработка математической модели, позволяющей выразить некоторый показатель эффективности системы через параметры (переменные) и учесть все существенные условия (ограничения).

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Математическая постановка оптимизационной задачи включает: введение переменных, выбор критерия оптимальности, составление целевой функции, а также ограничений, накладываемых на переменные.

Введем *переменные*, значения которых подлежат определению в ходе решения задачи:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ДГУ } i\text{-й номинальной мощности питает СБЭ } j\text{-й конфигурации;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

*Целевая функция* представляет собой экономическую оценку искомого решения:

$$F_{\text{СГЭ}} = \sum_i \sum_j w_{ij} (F_{\text{ДГУ}_i} + F_{\text{СБЭ}_j}), \quad (2)$$

где  $F_{\text{СГЭ}}$  – экономические затраты на СГЭ;

$F_{\text{ДГУ}_i}$  – экономические затраты на ДГУ  $i$ -й номинальной мощности;

$F_{\text{СБЭ}_j}$  – экономические затраты на СБЭ  $j$ -й конфигурации.

В зависимости от специфики конкретной задачи и располагаемых исходных данных в качестве *критерия оптимальности* может приниматься минимум капитальных затрат или минимум годовых приведенных затрат, учитывающих затраты на последующую эксплуатацию. В первом случае целевая функция принимает следующий вид:

$$F_{\text{СГЭ}} = K_{\text{СГЭ}} = \sum_u \sum_v w_{uv} (c_{\text{ДГУ}_v} + K_{\text{СБЭ}_u}), \quad (3)$$

где  $c_{\text{ДГУ}_i}$  – стоимость ДГУ  $i$ -й номинальной мощности, руб.;  
 $K_{\text{СБЭ}_j}$  – капитальные затраты на СБЭ  $j$ -й конфигурации, руб.  
 Во втором –

$$F_{\text{СГЭ}} = Z_{\text{СГЭ}} = \sum_i \sum_j w_{ij} (p_{\Sigma} c_{\text{ДГУ}_i} + Z_{\text{СБЭ}_j}), \quad (4)$$

где  $p_{\Sigma}$  – суммарный расчетный коэффициент отчислений (для ДГУ до 500 об./мин –  $p_{\Sigma} = 0,212$ , свыше 500 об./мин –  $p_{\Sigma} = 0,252$  [8, с.21]);  
 $Z_{\text{СБЭ}_j}$  – годовые приведенные затраты на СБЭ  $j$ -й конфигурации, руб./год.

Учесть наиболее существенные математические и технические условия, получив множество допустимых решений задачи оптимизации параметров основных элементов СГЭ, позволяют следующие *ограничения*:

1. Ограничение на значения переменных

$$w_{ij} = \{0, 1\}. \quad (5)$$

2. Ограничение по отклонению напряжения на клеммах генератора при подключении нагрузки

$$\sum_i w_{ij} (P_{\text{ДГУ}_i} - k_{\text{изб}_j}^{\text{пр}} P_{\text{СБЭ}_j}^{\text{вх}}) \geq 0, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ДГУ}_i}$  – номинальная активная мощность  $i$ -го ДГУ, кВт;  
 $k_{\text{изб}_j}^{\text{пр}}$  – коэффициент избыточности мощности ДГУ над мощностью СБЭ  $j$ -й конфигурации, о. е.;  
 $P_{\text{СБЭ}_j}^{\text{вх}}$  – входная потребляемая мощность СБЭ  $j$ -й конфигурации, кВт.

При использовании ИБП, не оборудованных УНПН, коэффициент избыточности мощности ДГУ над мощностью СБЭ может быть вычислен по следующей формуле [9]:

$$k_{\text{изб}}^{\text{пр}} = \frac{100k_{\text{зап}}}{q_{\text{доп}}},$$

где  $k_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса (для дизелей с газотурбинным наддувом принимается равным 1,3–1,4, без него – 1,1–1,2), о. е.;  
 $q_{\text{доп}}$  – допустимый мгновенный наброс нагрузки, в процентах от номинальной выходной мощности ДГУ (принимается по технической документации для конкретного ДГУ или в соответствии с [10]).

Для ИБП, имеющих УНПН, коэффициент  $k_{\text{изб}}^{\text{пр}}$  определяется по данным завода-изготовителя, или принимается равным 1,2–1,3 для ДГУ с дизелями, оборудованными газотурбинным наддувом, и – 1,05–1,1 с дизелями без наддува.

Входная мощность СБЭ может значительно превышать мощность подключенной нагрузки (в зависимости от загрузки ИБП) и определяется расходом электроэнергии на заряд АБ и внутренними потерями в ИБП.

Для случая, когда ответственную нагрузку питают  $z$  параллельно работающих ИБП, входная мощность может быть определена по формуле

$$P_{СБЭ}^{вх} = \sum_z P_{ИБП_z}^{вх} = \sum_z \frac{100P_{рас_z}}{\eta_z(k_{зар_z})} + \sum_z P_{зар_z},$$

- где  $P_{ИБП_z}^{вх}$  – входная мощность, потребляемая  $z$ -м ИБП, кВт;  
 $P_{рас_z}$  – расчетная мощность нагрузки подключенной к  $z$ -му ИБП, кВт;  
 $\eta_z$  – коэффициент полезного действия  $z$ -го ИБП, %;  
 $k_{зар_z}$  – коэффициент загрузки  $z$ -го ИБП, %;  
 $P_{зар_z}$  – мощность, необходимая для заряда аккумуляторных батарей, кВт.

3. Ограничение на минимальную загрузку ДГУ в установившемся режиме:

$$\sum_i w_{ij} (k_{мин}^{yp} P_{ДГУ_i} - P_{СБЭ_j}^{вх}) \leq 0. \quad (7)$$

Здесь  $k_{мин}^{yp}$  – коэффициент минимальной загрузки ДГУ в установившемся режиме, о. е.

4. Ограничение, обеспечивающие единственность варианта построения СГЭ,

$$\sum_i \sum_j w_{ij} = 1. \quad (8)$$

5. Ограничение по электромагнитной совместимости СБЭ и ДГУ

$$\sum_i w_{ij} (P_{ДГУ_i} - k_{изб}^{yp} P_{СБЭ_j}^{вх}) \geq 0. \quad (9)$$

Коэффициент избыточности  $k_{изб}^{yp}$  в выражении (9) может быть вычислен как отношение потерь мощности в синхронном генераторе при питании нелинейной нагрузки  $\Delta P$  к потерям мощности при работе ДГУ на линейную нагрузку  $\Delta P_1$  [6]:

$$k_{изб}^{yp} = \frac{\Delta P}{\Delta P_1} = 1 + \frac{\sum_{n \geq 1} \Delta P_n}{\Delta P_1} = 1 + \sum_{n \geq 1} \Delta P_n^* = 1 + \sum_{n \geq 1} (K_{I(n)}^2 + K_{U(n)}^2 (2n^{1,3} + 1)),$$

- где  $\Delta P_n$  – потери в синхронном генераторе на  $n$ -й гармонике, Вт;  
 $\Delta P_n^*$  – относительное значение потерь на  $n$ -й гармонике, о. е.;  
 $K_{I(n)}$  – коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей тока, о. е.;  
 $K_{U(n)}$  – коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, о. е.

Расчет уровней высших гармоник напряжения производится на основании схемы замещения, справедливой для каждой гармоники в отдельности (рис. 3). Нелинейные нагрузки (ИБП) на схеме представляются в виде источников тока [11].

При пренебрежении углами коммутации выпрямителей ИБП

$$I_n = \sum_z I_{z(n)},$$

- где  $I_n$  – эквивалентное значение тока  $n$ -й гармоники;  
 $I_{z(n)}$  – ток  $n$ -й гармоники  $z$ -го ИБП.

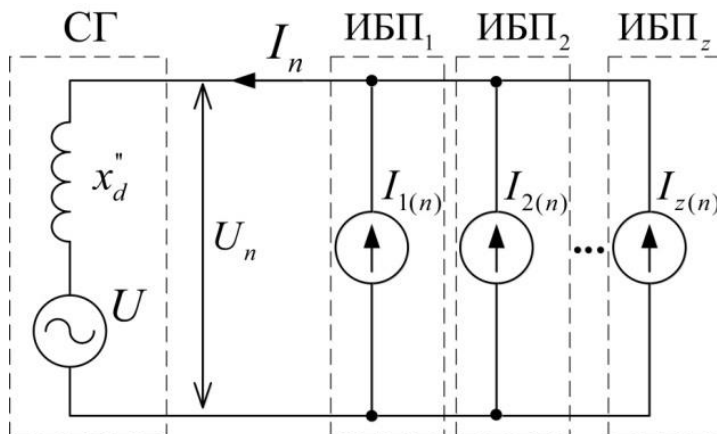


Рис. 3. Схема замещения СГЭ для расчета высших гармоник

Тогда коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  может быть вычислен по следующей формуле:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} = \frac{nx_d'' I_n}{x_r I_1} = nx_d'' K_{I(n)},$$

где  $x_d''$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, Ом;

$x_r$  – сопротивление генератора, Ом;

$x_d''^{ns}$  – относительное сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси для  $n$ -й гармоники, о. е.;

$K_{I(n)}$  – коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей тока статора.

Окончательно выражение (9) примет следующий вид:

$$\sum_i w_{ij} \left( P_{ДГУ_i} - P_{СБЭ_j}^{вх} - P_{СБЭ_j}^{вх} \sum_{n>1} K_{I(n)_j}^2 (1 + x_{d_i}''^{ns} (2n^{3.3} + n^2)) \right) \geq 0. \quad (10)$$

Таким образом, получена математическая модель задачи оптимизации, которая включает: переменные (1), целевую функцию (2), которая в зависимости от выбора экономического показателя может быть выражена (3) или (4), и ограничения: (5)–(8), (10).

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения задачи оптимизации параметров ДГУ и ИБП в СГЭ с использованием представленной математической модели применяется комбинаторный метод решения задач линейного программирования с булевыми переменными (модификация метода «ветвей и границ»). Алгоритм решения реализован в разработанной для этого программе [12].

Адекватность разработанного математического подхода подтверждается решением большого количества практических задач для различных исходных данных с последующей проверкой справедливости полученных решений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение СГЭ, обеспечивающей высокие показатели надежности, бесперебойности и качества электрической энергии, не представляется возможным без учета особенностей совместной работы ее основных функциональных элементов.

Постановка и решение указанной задачи в оптимизационной форме позволит избежать необоснованных экономических затрат, а также возможных проблем, возникающих при несогласованных параметрах ДГУ и ИБП.

### Список используемых источников

1. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалёв, Ю.Н. Кучеров и др. – М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. – 212 с.
2. *Пешехонов Н.Е.* Электроснабжение специальных комплексов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 187 с.
3. *Карагодин В.В., Полянский К.А., Рыбаков Д.В.* Учет особенностей совместной работы дизель-генераторных установок и статических источников бесперебойного питания при построении систем гарантированного электроснабжения // Актуальные вопросы развития систем автономного электроснабжения объектов МО РФ: сб. докладов круглого стола, проведенного в рамках научно-деловой программы Международного научно-техн. форума «АРМИЯ-2017», г. Кубинка Московской обл. 24 авг. 2017 года. – СПб.: Изд-во Политехн. унта, 2017. – С. 226–231.
4. *Гарганеев А.Г.* Системы аварийного электроснабжения ответственных потребителей переменного тока: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 190 с.
5. *Кузьмина О.А.* О совместной работе ДГУ и ИБП // Сети и бизнес. – 2002. – №2(3) – С. 18–21.
6. *Облакевич С.В.* К расчету мощности ДЭС, работающей совместно с АБП // Промышленная электроэнергетика и электротехника. – 2005. – №2. – С. 35–40.
7. *Куско А., Томсон М.* Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / пер. с англ. А.Н. Рабодзея. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 336 с.
8. *Ревяков Б.А., Карагодин В.В., Пешехонов Н.Е.* Проектирование систем электроснабжения объектов специального назначения: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Ч. 2.: Сети выше 1000 В. – 124 с.
9. Статические и дизельные агрегаты резервного электропитания / А.Я. Гольдинер, М.И. Цыркин, С.В. Соколов, В.В. Головкин. – СПб.: Галеев Принт, 2006. – 115 с.
10. ГОСТ Р 55231–2012. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 14 с.
11. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
12. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016663288 от 02.12.16. Программа для ЭВМ «Программа определения мощности ДГУ для СБЭ» / К.А. Полянский, В.В. Карагодин.

В.В. Карагодин,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
Н.В. Рыжий;  
С.В. Смирнов,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассмотрено воздействие тепловых процессов на потери электроэнергии в кабельных линиях систем электроснабжения специальных объектов. Используя метод однородных тел, разработана математическая модель нагрева силового кабеля, учитывающая температуру окружающей среды и ток нагрузки. На основе разработанной модели проведена оценка воздействия тепловых процессов на потери электроэнергии в силовом кабеле.

Ключевые слова: энергоэффективность, потери электроэнергии, нагрев силового кабеля, анализ нестационарных тепловых процессов, метод однородных тел.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в соответствии с руководящими документами по организации мероприятий энергосбережения и повышения энергоэффективности функционирования специальных объектов<sup>1</sup> (СО) Министерства обороны [1, 2] предъявляются жесткие требования к системе учета поставляемых топливозапасных ресурсов (ТЭР). Учет потерь электроэнергии (ЭЭ) при ее передаче к потребителям СО является важной составляющей системы учета ТЭР. В системах электроснабжения СО для передачи электроэнергии используются, главным образом, силовые кабельные линии напряжением 6(10)–0,4 кВ, которые являются одним из основных источников (очагов) потерь ЭЭ в системах электроснабжения (СЭС) СО. Это требует повышения точности расчета потерь в таких сетях с целью повышения достоверности их прогнозирования в распределительных сетях СЭС СО.

В процессе эксплуатации в силовом кабеле выделяется значительное количество тепла, которое может оказывать существенное влияние на потери электроэнергии в нем. Тепло выделяется в токопроводящих жилах при прохождении электрического тока нагрузки, а также в изоляции, защитных оболочках и броне, что приводит к необходимости оценки влияния тепловых режимов силового кабеля на потери электроэнергии в нем. При этом целесообразно определить, в каких диапазонах значений тока нагрузки и температуры окружающей среды влияние тепловых процессов следует учитывать, а в каких – им можно пренебречь.

Для решения поставленной задачи в статье проведена оценка влияния тепловых процессов на потери ЭЭ в силовом кабеле на основе его математической тепловой модели, разработанной с помощью метода однородных тел [3]. Для упрощения расчетов данный силовой кабель рассматривается как система из двух тел цилиндрической формы, представляющих жилу и изоляцию кабеля, без учета его защитных оболочек и брони. При этом окружающая среда представляется полым цилиндром с бесконечно большим внешним диаметром.

---

<sup>1</sup>*Специальный объект* – комплекс технологически и технически связанных между собой зданий, сооружений, систем, линейных объектов и иных объектов производственного и непромышленного назначения, предназначенных для выполнения задач в интересах Министерства обороны РФ.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В СИЛОВОМ КАБЕЛЕ

В качестве оценки влияния тепловых процессов на потери ЭЭ в силовом кабеле используется значение методической относительной погрешности расчета потерь мощности в силовом кабеле из-за неучета температуры нагрева его токоведущих жил  $\theta_{ж}$  в соответствии с выражением

$$\delta(\theta_{ж}) = \frac{\Delta P_{ж}(\theta_{ж}) - \Delta P_{ж}}{\Delta P_{ж}(\theta_{ж})} \times 100\% = \frac{\Delta P_{ж}(\theta_{ж}) - R_{20} I^2}{\Delta P_{ж}(\theta_{ж})} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{ж}(\theta_{ж})$  – потери мощности, вычисленные с помощью метода расчета потерь, который учитывает их зависимость от температуры нагрева силового кабеля, Вт;

$\Delta P_{ж}$  – потери мощности, вычисленные с помощью метода расчета потерь, который эту зависимость не учитывает и в котором значения активного сопротивления кабеля определены при температуре жилы 20 °С, Вт;

$R_{20}$  – сопротивление жилы кабеля при температуре 20 °С, Ом;

$I$  – ток нагрузки, А.

Потери мощности в силовом кабеле, зависящие от температуры нагрева жилы, определяются по формуле

$$\Delta P_{ж}(\theta_{ж}) = R(\theta_{ж}) I^2 = R_{20} I^2 (1 + \alpha_{ж}(\theta_{ж} - 20)), \quad (2)$$

где  $\alpha_{ж}$  – температурный коэффициент сопротивления жилы кабеля, 1/°С.

Используя выражения (1) и (2), несложно получить зависимость относительной методической погрешности расчета потерь ЭЭ из-за неучета температуры нагрева  $\theta_{ж}$  жилы силового кабеля

$$\delta(\theta_{ж}) = \frac{\alpha_{ж}(\theta_{ж} - 20)}{1 + \alpha_{ж}(\theta_{ж} - 20)} \times 100\%. \quad (3)$$

В качестве примера на рис. 1 представлены зависимости  $\delta(\theta_{ж})$  для силового кабеля с алюминиевыми и медными жилами сечением 120 мм<sup>2</sup> в диапазоне рабочих температур кабеля от 0 до 70 °С.

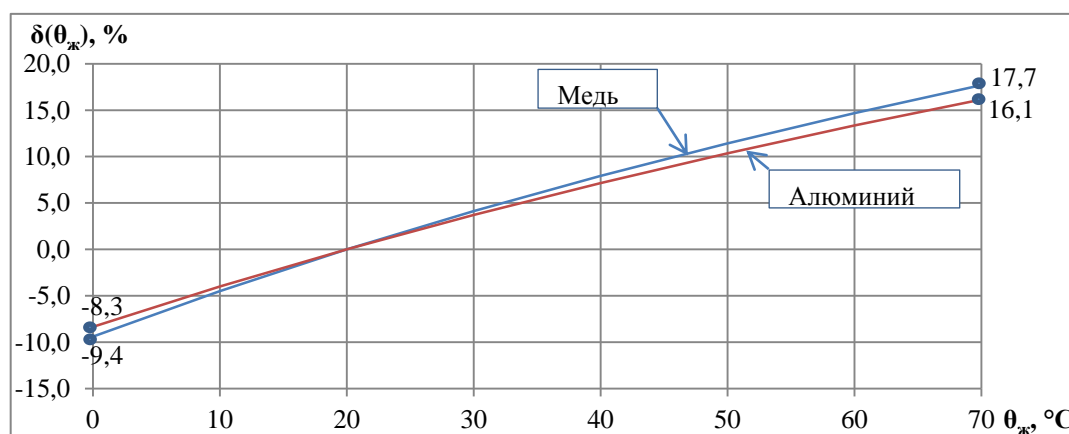


Рис. 1. Зависимость методической относительной погрешности расчета потерь ЭЭ из-за неучета нагрева силового кабеля с алюминиевыми и медными жилами

Анализ графиков на рисунке показывает, что расчетные значения потерь мощности в кабеле, полученные без учета температуры нагрева жилы, содержат методическую относительную погрешность расчета, находящуюся в диапазоне от -9,4 до +17,7% для кабеля с алюминиевой жилой и в диапазоне от -8,3 до +16,1% для кабеля с медной жилой.

Приведенную оценку учета влияния температуры токопроводящей жилы кабеля при расчете потерь мощности можно рассматривать как предварительную, так как она не учитывает температуру окружающей среды, взаимовлияние нагрева жилы и изоляции.

Нагрев жилы силового кабеля при передаче ЭЭ – это нестационарный тепловой процесс, характеризующийся одновременным влиянием тока нагрузки на температуру жилы, температуры окружающей среды на температуру изоляции, температуры жилы и изоляции друг на друга. Температура жилы кабеля, в свою очередь, изменяет ее активное сопротивление, что приводит к изменению величины потерь мощности в жиле кабеля.

Взаимовлияние элементов рассматриваемого силового кабеля (учитываются только токопроводящая жила, изоляция и окружающая среда) при протекании тепловых процессов можно представить в виде функциональной схемы, показанной на рис. 2.

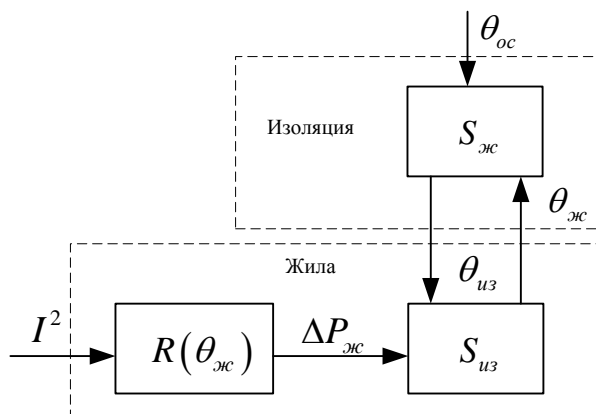


Рис. 2. Функциональная схема элементов силового кабеля при протекании тепловых процессов

На рис. 2 приняты обозначения:  $\theta_{oc}$  – температура окружающей среды;  $I$  – ток нагрузки на потери токопроводящей жилы  $\Delta P_{ж}$  при нагреве силового кабеля, где  $S_{из}$  и  $S_{ж}$  – температурные сопротивления материалов жилы и изоляции кабеля ( $^{\circ}C/Вт$ ).

Анализ приведенной функциональной схемы показывает, что для решения поставленной задачи целесообразно использовать математическую тепловую модель силового кабеля, учитывающую зависимость температуры жилы от тока нагрузки и температуры окружающей среды.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ОДНОЖИЛЬНОГО СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

Одним из наиболее простых и к тому же эффективных методов расчета тепловых процессов в кабеле является *метод однородных тел* [3], согласно которому кабель представляется в виде тела, состоящего из нескольких слоев однородного теплопроводящего материала, взаимодействующего с независимой от его нагрева окружающей средой. Представление рассматриваемого одножильного силового кабеля как системы тепловых однородных тел показано на рис. 3,а.

Слои жилы и изоляции кабеля являются однородными и имеют неизменные тепловые сопротивления  $S_{ж}$  и  $S_{из}$ , зависящие от геометрических параметров кабеля: радиуса жилы  $r_{ж}$ , толщины слоя изоляции  $h_{из}$  и от его длины  $l$ . Обладая определенными значениями  $S_{ж}$  и  $S_{из}$ , слои равномерно по всей длине препятствуют распространению тепла от их внутренних до внешних поверхностей. Значение температуры жилы  $\theta_{ж}$  устанавливается на ее поверхности 1 в результате воздействия на нее мощности нагрева  $\Delta P_{ж}$ , которая представляет собой потери



мощности в жиле кабеля при протекания тока нагрузки. Тепло, выделяемое жилой при протекании тока нагрузки, передается через слой изоляции к поверхности кабеля 2, где в результате устанавливается температура изоляции  $\theta_{из}$ . Одновременно на внешнюю поверхность изоляции воздействует температура окружающей среды  $\theta_{oc}$ , которая не зависит от нагрева силового кабеля ( $\theta_{oc} = const$ ) и через слой изоляции 2 воздействует на температуру его жилы  $\theta_{ж}$ .

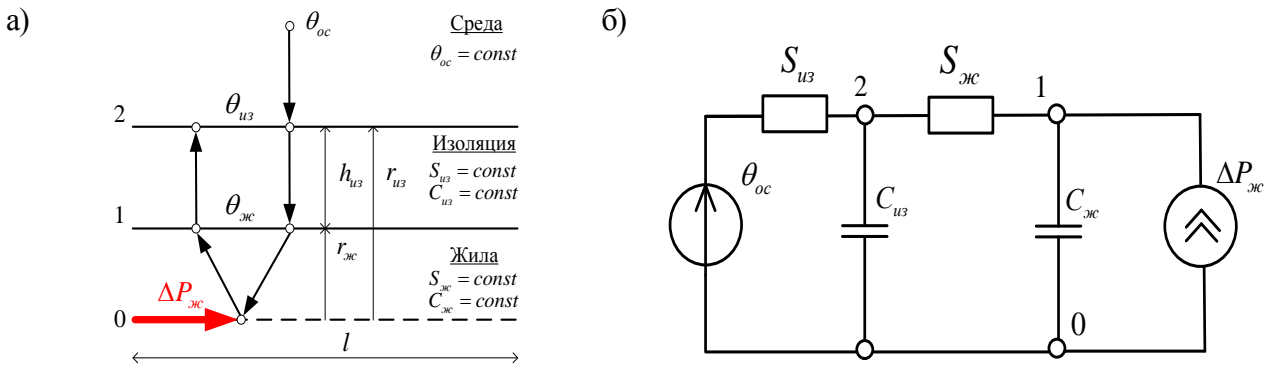


Рис.3. Представление одножильного силового кабеля как системы тепловых однородных тел (а) и тепловая схема замещения силового кабеля (б)

Кроме теплового сопротивления каждый слой кабеля характеризуется теплоемкостью  $C$  (Дж/1°С) – количеством энергии, поглощаемой телом в процессе его нагрева на 1 °С. Значения теплового сопротивления и теплоемкости определяют время нагрева слоя кабеля, при этом постоянная времени нагрева определяется по формуле

$$T = SC. \tag{4}$$

Математическое описание тепловых нестационарных процессов в однородном теплопроводящем слое аналогично математическому описанию электромагнитных переходных процессов в  $RC$ -цепи постоянного тока, где активное сопротивление резистора аналогично тепловому сопротивлению теплопроводящего слоя  $S$ , а емкость конденсатора – его теплоемкости  $C$ . Данная аналогия позволяет составить тепловую схему замещения силового кабеля, которая представлена на рис. 3,б.

На основе схемы замещения в соответствии с аналогом первого закона Кирхгофа составлены дифференциальные уравнения теплового равновесия, описывающие тепловые процессы в рассматриваемом кабеле:

$$\begin{cases} C_{ж} \frac{d\theta_{ж}}{dt} - \frac{\theta_{из} - \theta_{ж}}{S_{ж}} = \Delta P_{ж}; \\ C_{из} \frac{d\theta_{из}}{dt} + \frac{\theta_{из} - \theta_{ж}}{S_{ж}} - \frac{\theta_{oc} - \theta_{из}}{S_{из}} = 0, \end{cases} \tag{5}$$

или в операторной форме

$$\begin{cases} \theta_{ж} = \Delta P_{ж} \frac{S_{ж}}{(T_{ж} p + 1)} + \theta_{из} \frac{1}{(T_{ж} p + 1)}; \\ \theta_{из} = \Delta P_{ж} \frac{S_{из}}{(T_{из} p + 1)} + \theta_{oc} \frac{1}{(T_{из} p + 1)} - \theta_{ж} \frac{T p}{(T_{из} p + 1)}, \end{cases} \tag{6}$$

где  $T_{ж} = S_{ж} C_{ж}$  – постоянная времени нагрева жилы силового кабеля, с;  
 $T_{из} = S_{из} C_{из}$  – постоянная времени нагрева изоляции силового кабеля, с;  
 $T = S_{из} C_{ж}$  – постоянная времени нагрева гибкой отрицательной обратной связи, с.

На основе выражений (6) составлена структурная схема (рис. 4), описывающая процесс нагрева силового кабеля.

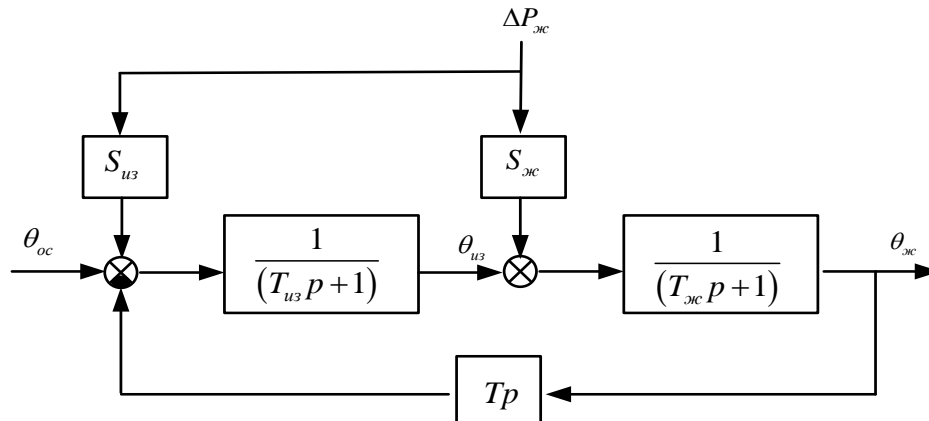


Рис. 4. Структурная схема нагрева силового кабеля

Тепловые сопротивления жилы и изоляции вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} S_{ж} = \sigma_{ж} \frac{1}{2\pi l}; \\ S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi l} \ln \frac{r_{из}}{r_{ж}}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\sigma_{ж}$ ,  $\sigma_{из}$  – удельное тепловое сопротивление материала жилы и изоляции, (м °С) /Вт.

Теплоемкости материала жилы и изоляции вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} C_{ж} = c_{ж} \beta_{ж} \pi r_{ж}^2 l; \\ C_{из} = c_{из} \beta_{из} \pi (r_{из}^2 - r_{ж}^2) l, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\beta_{ж}$ ,  $\beta_{из}$  – плотности материала жилы и изоляции кабеля, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{ж}$ ,  $c_{из}$  – удельные теплоемкости материала жилы и изоляции кабеля, (Дж)/(°С кг).

На рис. 5 представлены зависимости изменения температуры жилы кабеля во времени, характеризующие протекание теплового переходного процесса в одножильном силовом кабеле с медной жилой с сечением 120 мм<sup>2</sup> и изоляцией из сшитого полиэтилена.

Из рис. 5 видно, что тепловые переходные процессы в силовом кабеле характеризуются более значительным временем протекания, чем например, электромагнитные. Однако время протекания тепловых переходных процессов в кабеле, которое может варьироваться от 30 до 30 мин, для расчета потерь ЭЭ в месячных и годовых интервалах времени не является существенным фактором. Поэтому для оценки влияния тепловых процессов на потери в силовом кабеле целесообразно использовать установившиеся значения температур. Учитывая уравнения (6), выражения для расчета установившихся значений температуры жилы  $\theta_{ж}$  и температуры изоляции кабеля  $\theta_{из}$  имеют вид:

$$\begin{cases} \theta_{ж} = \theta_{oc} + S_{из} \Delta P_{ж}; \\ \theta_{из} = \theta_{oc} + \Delta P_{ж} (S_{ж} + S_{из}). \end{cases} \quad (9)$$

Отсюда установившееся значение температуры жилы в зависимости от температуры окружающей среды и тока нагрузки определяется зависимостью

$$\theta_{ж} = \theta_{oc} + S_{из} I^2 R (\theta_{ж}) = \frac{\theta_{oc} + S_{из} I^2 R_{20} (1 - 20\alpha_{ж})}{1 - \alpha_{ж} S_{из} I^2 R_{20}}. \quad (10)$$

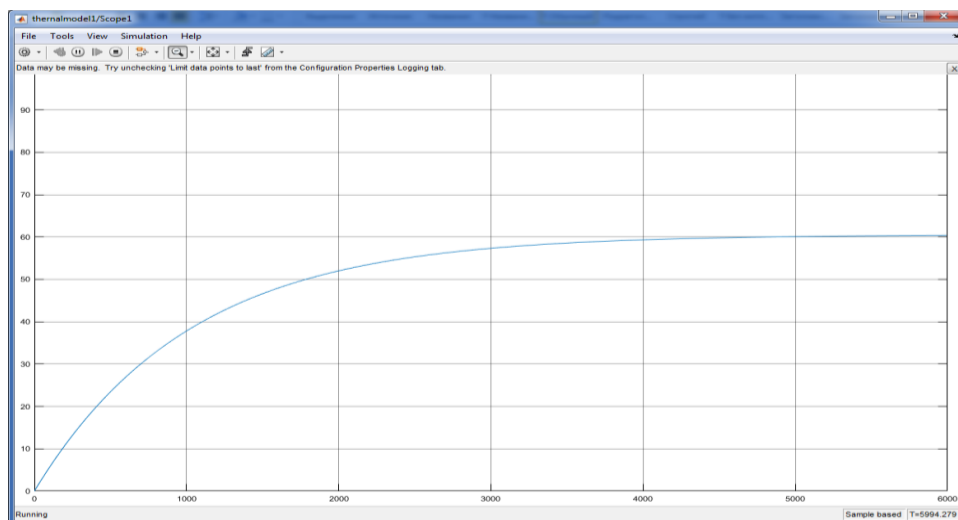


Рис. 5. График изменения температуры жилы одножильного силового кабеля с медной жилой с сечением  $120 \text{ мм}^2$  и изоляцией из сшитого полиэтилена

Принятое представление силового кабеля системой, состоящей из двух тел цилиндрической формы, представляющих жилу и изоляцию кабеля, и неучет тепловых процессов в защитных оболочках и в броне силового кабеля, очевидно, могут привести к погрешности расчета температуры жилы  $\theta_{\text{ж}}$  по выражению (10), что поставит под сомнение возможность ее использования для проведения дальнейших исследований.

В целях проверки адекватности полученного выражения (10) проведено сравнение установившихся значений температур нагрева жилы кабеля, полученных с помощью выражения (10), с результатами экспериментальных исследований тепловых процессов в кабеле N2XSY-120, представленными в работе [5]. Силовой кабель N2XSY-120 – одножильный кабель с медной жилой сечением  $120 \text{ мм}^2$ , основной изоляцией из сшитого полиэтилена, защитной оболочкой из ПВХ – пластиката и медным экраном. Допустимый длительный ток для данного кабеля составляет 295 А, допустимая температура нагрева изоляции –  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . В ходе проведения эксперимента при нагреве кабеля током нагрузки 550 А при температуре окружающей среды  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  установившееся значение температуры жилы составило  $\theta_{\text{ж.эксп}} = 72,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рассчитанное по выражению (10) значение температуры кабеля с медной жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена (без учета защитной оболочкой и экрана) составляет  $68 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сравнение этих значений позволяет сделать вывод о допустимой погрешности расчетов (около 6,1%), выполняемых с использованием выражения (10).

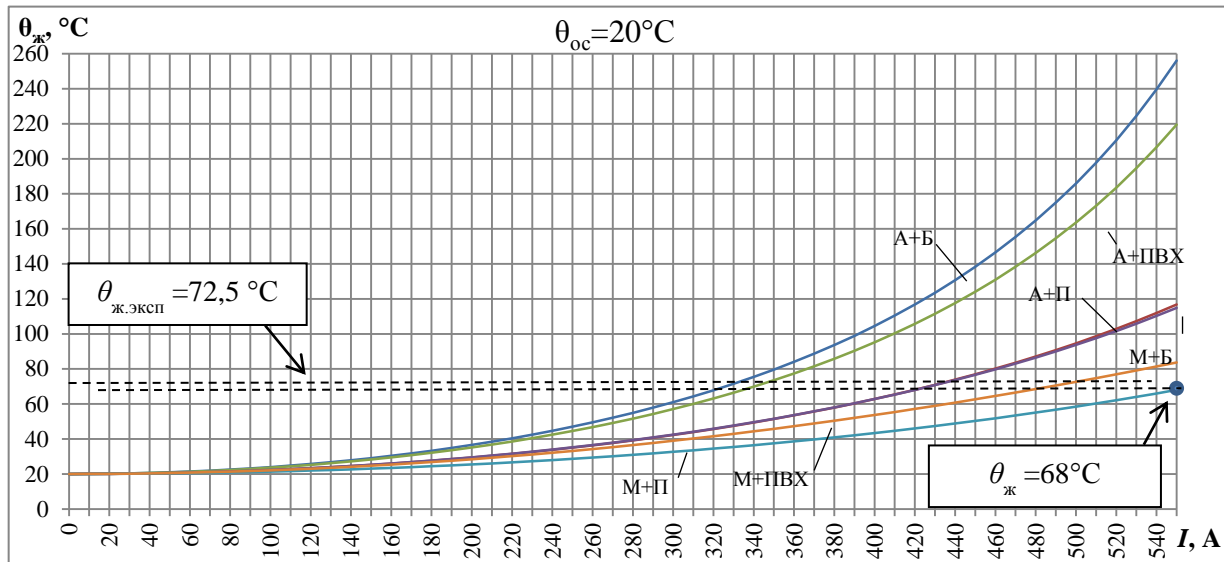
Исследование влияния тока нагрузки на температуру жилы проведено на примере силового кабеля с жилой (алюминиевой и медной) сечением  $120 \text{ мм}^2$  с различными типами изоляции (маслопропитанная бумага, сшитый полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат). В статье для исследуемых кабелей принято условное обозначение «Ж+ИЗ», где «Ж» – материал жилы; «ИЗ» – тип изоляции.

На рис.6,а показаны полученные расчетным путем по выражению (10) зависимости установившихся значений температуры токоведущей жилы сечением  $120 \text{ мм}^2$  от тока нагрузки для различных типов силового кабеля при температуре окружающей среды  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что наибольшему нагреву при увеличении тока нагрузки подвержен силовой кабель «А+Б», а наименьшему – кабель «М+П». Это объясняется тем, что из-за большего удельного сопротивления алюминий под воздействием тока нагрузки нагревается сильнее меди. Однако следует иметь в виду, что при нагреве жилы особое значение имеет теплообмен с окружающей средой через изоляцию кабеля. Полиэтиленовая изоляция имеет более низкое температурное сопротивление, чем у поливинилхлоридной и бумажной изоляции, в результате теплоотдача у кабеля с

полиэтиленовой изоляцией происходит сильнее. Менее интенсивно теплоотдача происходит у поливинилхлоридного пластика, и еще меньше – у бумажной изоляции. Зависимости установившихся значений температуры токоведущей жилы от тока нагрузки для кабелей «А+П» и «М+Б» практически совпадают из-за меньшего температурного сопротивления у изоляции из полиэтилена, чем у бумажной изоляции. В качестве примера на рис. 7,б показаны зависимости установившихся значений температуры токоведущей жилы для кабеля «М+П» при температуре окружающей среды  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , только уже с различным сечением жилы.

а)



б)

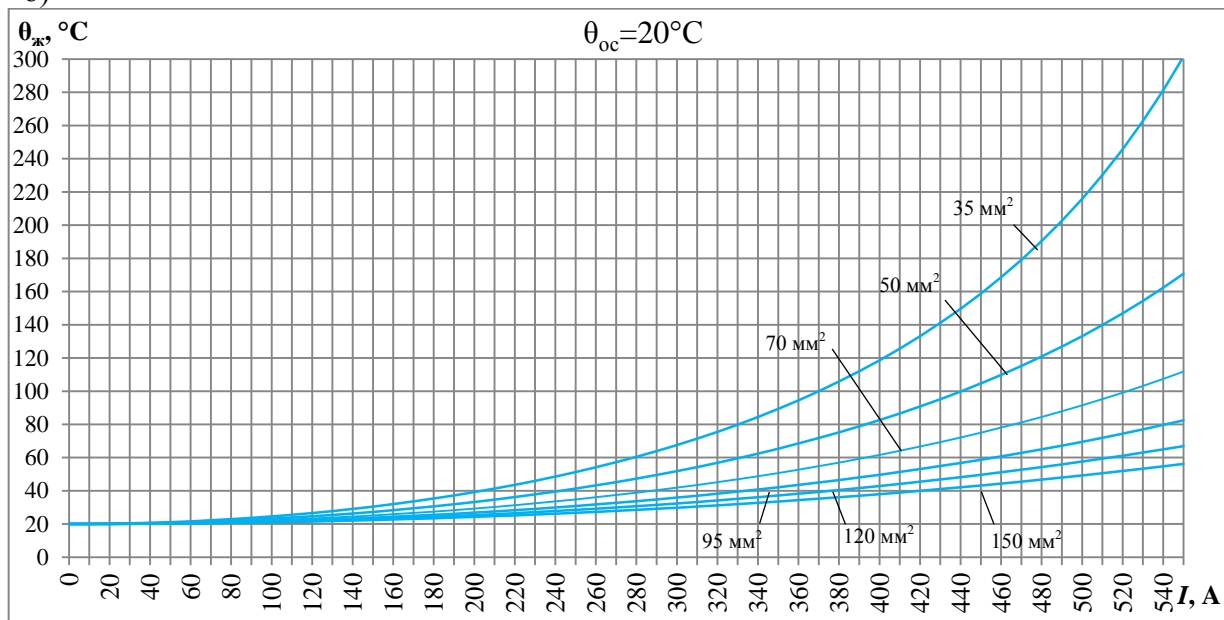


Рис. 6. Зависимости установившихся значений температуры жилы от тока нагрузки:  
 а – для различных типов кабеля с сечением жилы  $120\text{ мм}^2$ ;  
 б – для кабеля «М+П» с различным сечением жилы

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В СИЛОВОМ КАБЕЛЕ

Для исследования влияния тепловых процессов на потери мощности в силовом кабеле с учетом выражений (4) и (10) получена зависимость методической относительной погрешности расчета потерь мощности в силовом кабеле из-за неучета температуры нагрева его жилы при суммарном воздействии тока нагрузки и температуры окружающей среды:

$$\delta(I, \theta_{oc}) = \frac{\alpha_{ж} (\theta_{oc} + S_{из} I^2 R_{20} - 20)}{1 + \alpha_{ж} (\theta_{oc} - 20)} \times 100\%. \quad (11)$$

Зависимость (11) позволяет провести анализ влияния на методическую погрешность расчета потерь мощности в силовом кабеле из-за неучета температуры нагрева его жилы как при изменении тока нагрузки при фиксированном значении температуры окружающей среды, так и при изменении температуры окружающей среды при фиксированном значении тока нагрузки.

На рис. 7 в графическом виде представлены зависимости методической относительной погрешности  $\delta(I, \theta_{oc} = \text{const}) = \delta_I$  от тока нагрузки при температуре окружающей среды  $20^\circ\text{C}$  для различных типов кабелей. В этом случае методическая относительная погрешность расчета потерь мощности в силовом кабеле из-за неучета нагрева жилы током нагрузки при температуре окружающей среды  $20^\circ\text{C}$  определяется по формуле

$$\delta_I = \delta(I, \theta_{oc} = 20^\circ\text{C}) = \alpha_{ж} S_{из} I^2 R_{20} \times 100\% = \alpha_{ж} \frac{\sigma_{из} \rho_{0(20)}}{2\pi s_{ж}} \ln \frac{r_{ж} + k_{из}}{r_{ж}} I^2 \times 100\%, \quad (12)$$

где  $\rho_{0(20)}$  – удельное активное сопротивление кабеля при  $20^\circ\text{C}$ , Ом/м;  
 $s_{ж} = \pi(r_{ж})^2$  – площадь сечения жилы,  $\text{м}^2$ ;  
 $h_{из}$  – толщина изоляции, м.

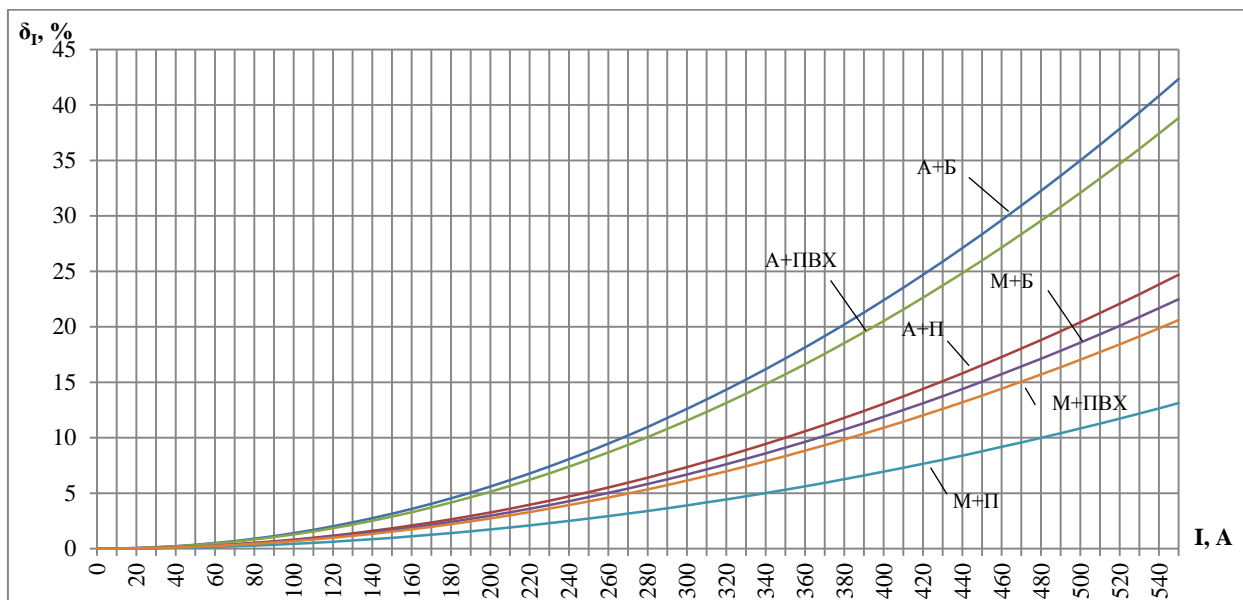


Рис. 7. Зависимости методической относительной погрешности расчета потерь из-за неучета нагрева жилы током нагрузки при фиксированном значении температуры окружающей среды  $20^\circ\text{C}$  для различных типов кабеля с сечением жилы  $120 \text{ мм}^2$

Как следует из выражения (12), погрешность  $\delta_I$  зависит от удельного теплового сопротивления материала и толщины изоляции, удельного сопротивления и температурного

коэффициента материала жилы, а также зависит от сечения жилы, но не зависит от длины самого кабеля.

Из анализа показанных на рис. 7 графиков следует, что при температуре окружающей среды  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  для различных типов кабеля при токах больших  $250\text{ A}$  методическая относительная погрешность расчета потерь  $\delta_I$  может достигать значения до  $10\%$ , что, очевидно, может влиять на точность расчета потерь электроэнергии.

На рис. 8 в графическом виде представлены зависимости методической относительной погрешности  $\delta(I, \theta_{oc})$  от температуры окружающей среды при фиксированных значениях тока нагрузки  $50\text{ A}$ ,  $100\text{ A}$ ,  $200\text{ A}$  и  $300\text{ A}$  для различных типов кабелей.

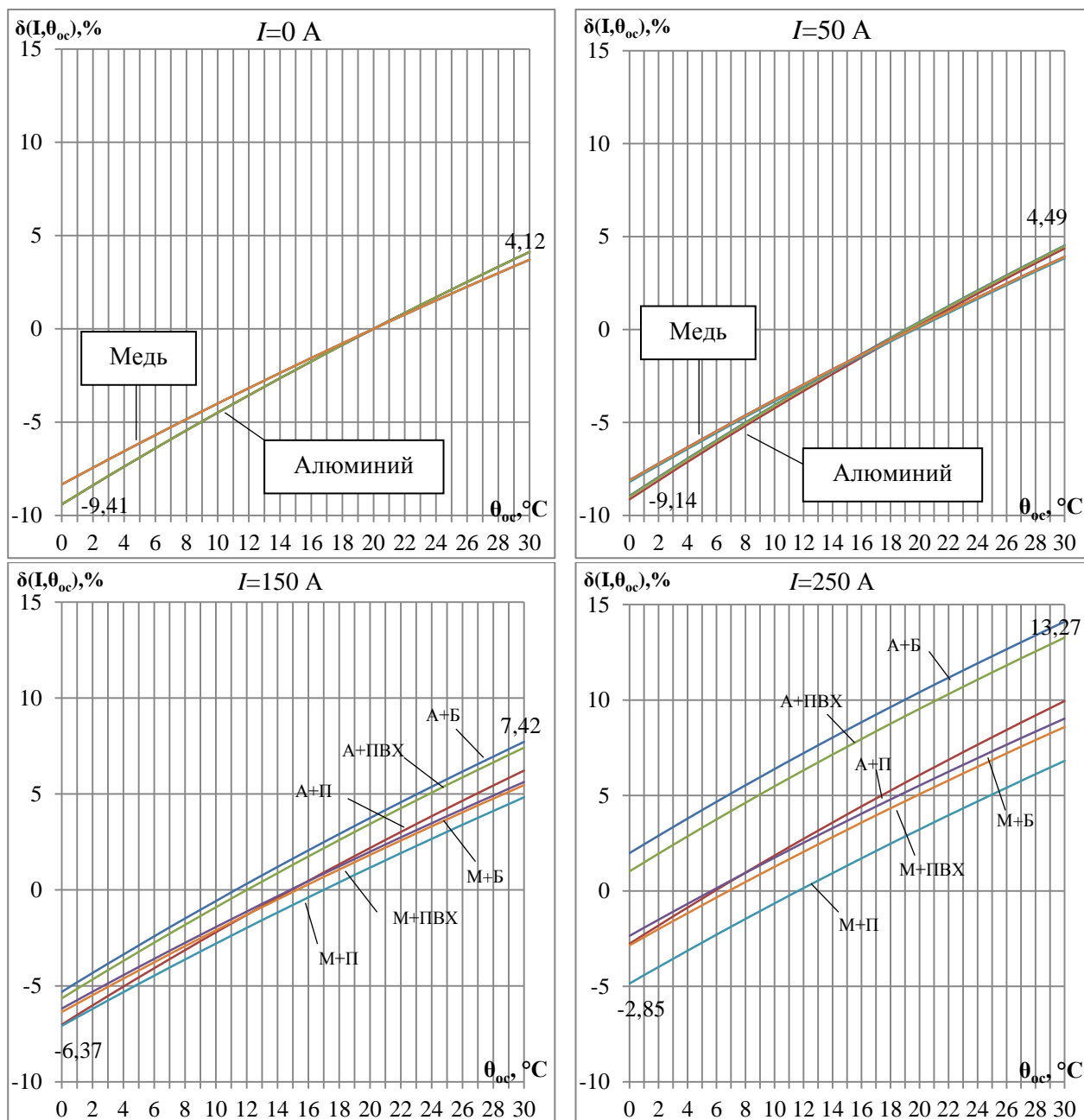


Рис. 8. Зависимости методической относительной погрешности  $\delta(I, \theta_{oc})$  от температуры окружающей среды при фиксированном значении тока нагрузки

Анализ представленных на рис. 8 графиков показывает, что зависимость погрешности  $\delta(I, \theta_{oc})$  от температуры окружающей среды может принимать как положительные (при

$\Delta P_{ж}(\theta_{ж}) > \Delta P_{ж}$ ), так и отрицательные (при  $\Delta P_{ж}(\theta_{ж}) < \Delta P_{ж}$ ) значения относительно некоторого значения температуры окружающей среды  $\theta_{oc}$ , при котором  $\delta(I, \theta_{oc}) = 0$ . Причем это значение  $\theta_{oc}$ , при котором  $\delta(I, \theta_{oc}) = 0$ , зависит от материала жилы и типа изоляции кабеля.

Влияние температуры окружающей среды на нагрев силового кабеля, обусловленный протеканием по нему тока нагрузки, можно оценить, применяя выражение

$$\delta(I, \theta_{oc}) = \frac{\delta_I + \delta_{oc}}{1 + \delta_{oc}} \times 100\%, \quad (13)$$

которое получено из выражения (11) с использованием соотношения

$$\delta_{oc} = \alpha_{ж} (\theta_{oc} - 20). \quad (14)$$

Оценить диапазон изменения температуры окружающей среды, при котором методическая относительная погрешность расчета потерь мощности с изменением токов нагрузки не превосходит заданной величины, можно с помощью выражения

$$\theta_{oc}(I, \delta) = \frac{\alpha_{ж} S_{из} I^2 R_{20} - 0.01\delta}{\alpha_{ж} (0.01\delta - 1)} + 20, \quad (15)$$

полученного из выражения (11). На рис. 9 показаны для различных типов кабелей зависимости, которые являются линиями одного уровня  $\delta(I, \theta_{oc}) = \text{const}$  на плоскости параметров  $(I, \theta_{oc})$ .

На рис. 9,а для различных типов кабеля, а на рис. 9,в для кабеля «М+П» с различными сечениями жил показаны линии уровня  $\delta(I, \theta_{oc}) = 0$ , которые делят плоскость  $(\theta_{oc}; I)$  на зоны с положительной и отрицательной погрешностью. Характер линий одного уровня  $\delta(I, \theta_{oc}) = \text{const}$  определяется материалом жилы и типом изоляции кабеля, а также его геометрическими параметрами (сечением токопроводящей жилы и толщиной изоляции), но не зависит от длины кабеля.

Располагая графиками линий уровня  $\delta(I, \theta_{oc}) = \text{const}$  на плоскости параметров  $(I, \theta_{oc})$ , для конкретного силового кабеля можно оценить, в каких диапазонах меняется погрешность  $\delta(\theta_{ж})$  при заданных диапазонах изменения нагрузки и температуры окружающей среды.

В качестве примера на рис. 9,б и г показаны линии одного уровня для  $\delta = -10\%$ ,  $\delta = 0\%$  и  $\delta = 10\%$  для кабеля «М+П» с сечениями жил 120 и 35 мм<sup>2</sup>. На рис. 9,б видно, что для кабеля «М+П» с сечением жилы 120 мм<sup>2</sup> при изменении тока нагрузки в диапазоне от 100 до 250 А и при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от -5 °С до 10 °С (средний диапазон изменения температуры почвы) методическая относительная погрешность расчета потерь мощности  $\delta(\theta_{ж})$  изменяется в диапазоне от -10 до 2%. При тех же условиях для того же кабеля, но с сечением жилы 35 мм<sup>2</sup>, значения погрешности  $\delta(\theta_{ж})$  изменяются в диапазоне от -9,6 до 9,9%. Отсюда можно сделать вывод: чем меньше сечение кабеля и больше температурное сопротивление его изоляции, тем больше нагрев силового кабеля влияет на потери электроэнергии в силовом кабеле при протекании тока нагрузки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье подход к оценке влияния тепловых процессов на потери ЭЭ в силовом кабеле можно рассматривать в качестве базового при оценке потерь в силовых кабельных линиях.

Математическая модель тепловых процессов в силовом кабеле, полученная на основе метода однородных тел, позволяет с достаточной точностью произвести оценку погрешности расчетных значений потерь мощности в кабеле.

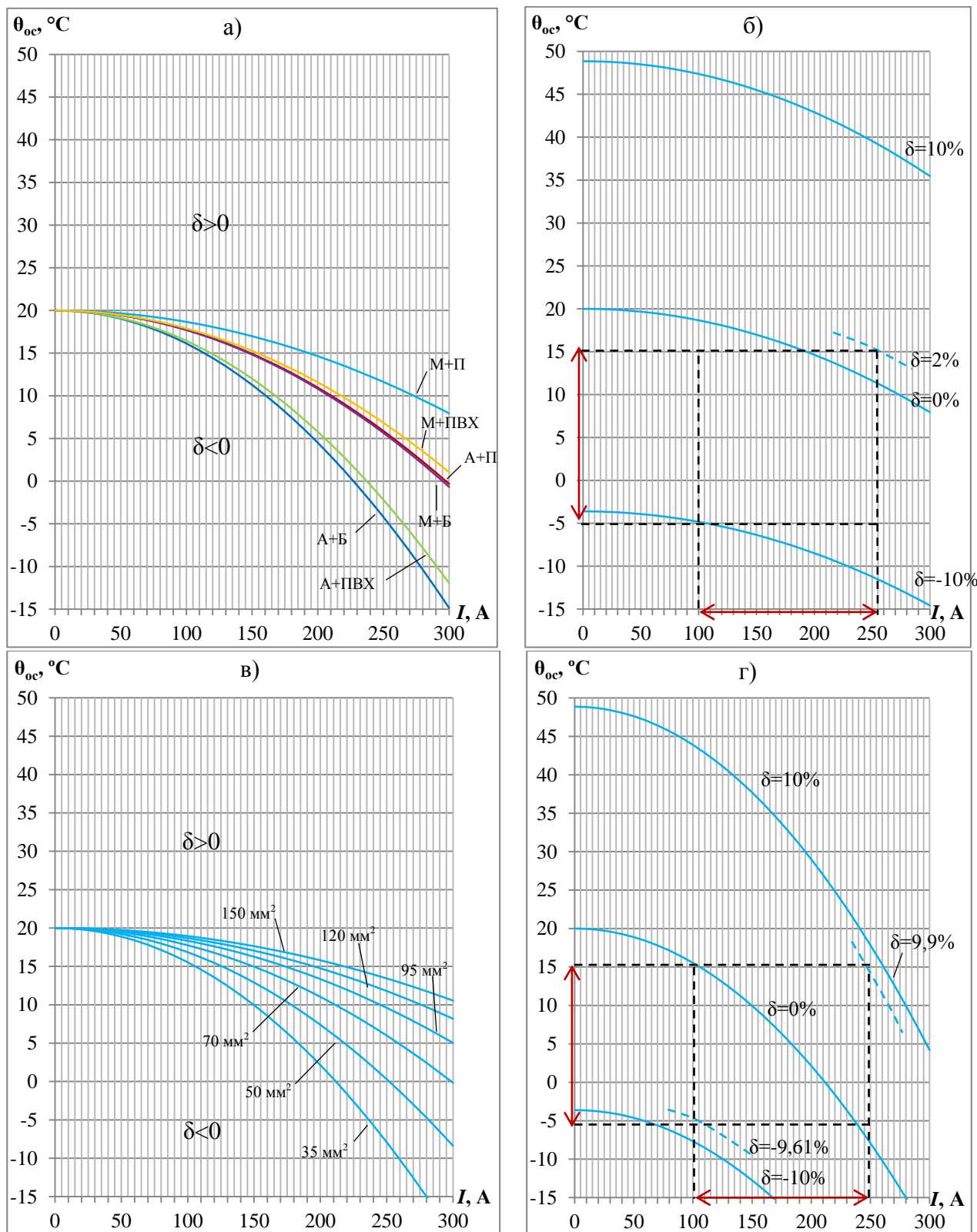


Рис. 9. Линии одного уровня  $\delta(I, \theta_{oc}) = const$  на плоскости параметров  $(I, \theta_{oc})$ :  
 а – при  $\delta(I, \theta_{oc}) = 0$  для различных типов кабеля с сечением жилы 120 мм<sup>2</sup>;  
 б – при  $\delta(I, \theta_{oc}) = -10\%$ ,  $\delta(I, \theta_{oc}) = 0\%$  и  $\delta(I, \theta_{oc}) = 10\%$  для кабеля «M+П» с сечением жилы 120 мм<sup>2</sup>; в – при  $\delta(I, \theta_{oc}) = 0\%$  для кабеля «M+П» с различным сечением жилы;  
 г – при  $\delta = -10\%$ ,  $\delta = 0\%$  и  $\delta = 10\%$  для кабеля «M+П» с сечением жилы 35 мм<sup>2</sup>



Проведенная оценка влияния тепловых процессов на потери мощности в силовом кабеле показывает, что из-за неучета температуры жилы погрешность расчета потерь может достигать значений от  $-10$  до  $+10\%$ . Учитывая, что силовые кабельные линии напряжением  $6(10)-0,4$  кВ являются одним из основных источников (очагов) потерь ЭЭ в системах электроснабжения СО, неучет тепловых процессов в силовом кабеле при протекании тока нагрузки ведет к снижению точности расчета потерь ЭЭ в СЭС СО.

### Список используемых источников

1. Руководство по обеспечению в Министерстве обороны Российской Федерации энергосбережения и повышения энергетической эффективности [разработано в качестве дополнения к Приказу Министра обороны РФ № 305 от 22 апреля 2013 года].
2. Руководство по коммунально-эксплуатационному отделу в ВС РФ [введено в действие приказом Министра обороны РФ № 860 от 2017 года].
3. *Зализный Д.И., Прохоренко С.Н.* Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: междунар. научно-техн. журнал. – 2012. – №5. – С. 25–34.
4. *Бачелис Д.С., Белоруссов Н.И., Саакян А.Е.* Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / под общ. ред. Н.И. Белоруссова. – Изд. 3-е, перераб. – М.: Энергия, 1971. – 704 с.
5. Методика численного расчета нестационарных тепловых процессов в изоляции силового кабеля / Д. И. Зализный, М.Н. Новиков, Н.М. Ходанович, А.Ю. Шутов // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого. – 2010. – №4. – С.86–94.

А.Л. Копейка;  
А.Г. Кохановский,  
*кандидат техн. наук;*  
А.Г. Тарасов,  
*доктор техн. наук*

## **МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ И ДЕСТРУКТИВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В статье представлена модель функционирования автоматизированной системы подготовки и пуска ракеты космического назначения, учитывающая различные режимы задействования аппаратно-программных средств в процессе подготовки и пуска. Предлагаемая модель позволяет учитывать деструктивные внешние воздействия среды путем коррекции показателей интенсивности отказов элементов, связывающие параметры надежности с характеристиками условий применения изделий.

Ключевые слова: техническое состояние, контроль, автоматизированная система подготовки и пуска ракет космического назначения, деструктивные внешние воздействия, имитационная модель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Обеспечение безотказности и высокой эффективности эксплуатации аппаратуры из состава автоматизированной системы подготовки и пуска (АСПП) является важнейшей проблемой. Решение данной проблемы начинается еще на стадиях проектирования и производства. Расширение функциональных возможностей АСПП, повышение значимости выполняемых функций заставляют обратить особое внимание на этап эксплуатации.

В процессе эксплуатации автоматизированная система подготовки и пуска (АСПП) ракеты космического назначения (РКН) подвержена различным внешним дестабилизирующим воздействиям. Это приводит к деградиационным процессам в радиоэлектронных элементах аппаратуры и, как следствие, к их отказам. Важнейшей функциональной задачей при эксплуатации аппаратуры АСПП [1] является прогнозирование постепенных отказов, а следовательно, поддержание работоспособного состояния, для решения такой задачи требуется методологическое и инженерно-техническое обеспечение.

Решение задачи предотвращения отказов АСПП в значительной степени зависит от возможности контроля и прогнозирования их технического состояния. Классические методы контроля технического состояния сложных технических систем основаны на предположении, что техническая система в процессе ее функционирования имеет устойчивую структуру. В то же время аппаратура АСПП в период подготовки и пуска функционирует в соответствии с графиком подготовки и пуска РКН (рис. 1), который предполагает работу аппаратуры непродолжительный период времени и нахождение аппаратуры в готовности к применению в остальное время проведения технологических операций подготовки и пуска РКН [2]. В связи с тем, что показатели интенсивности отказов для режимов эксплуатации и хранения (нахождения в резерве) различные, целесообразно при определении показателей надежности аппаратуры АСПП в процессе подготовки и пуска РКН использовать переменную структуру АСПП [3] (рис. 2).

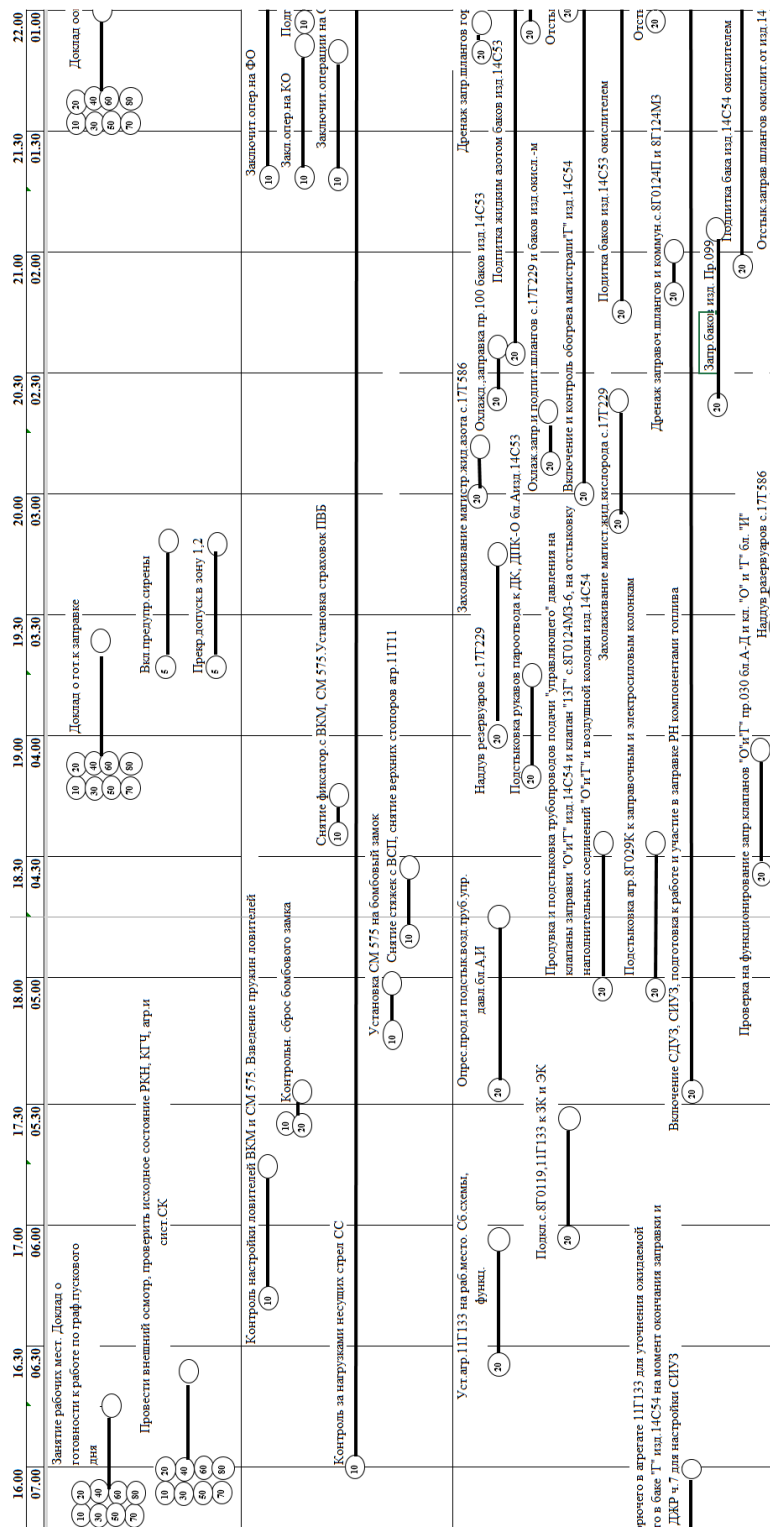


Рис. 1. Фрагмент операций технологического графика подготовки РКН «Союз-2» в пусковой день

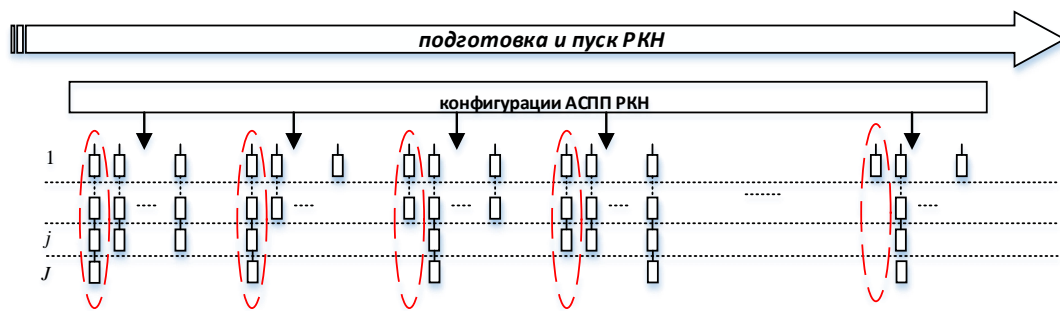


Рис. 2. Переменная структура АСПП РКН

Проведенный анализ функционирования АСПП в процессе подготовки РКН к пуску показывает, что аппаратура может быть подвергнута следующим силовым деструктивным воздействиям (СДВ): воздействию мощных коротких электромагнитных импульсов по эфиру, по проводным линиям, а также воздействию по питанию [4].

Учитывая особенности размещения АСПП РКН на стартовом комплексе (протяженность линий электропередачи или управляющих каналов связи между оборудованием и возможностью скрытого оказания воздействия), СДВ оказывают влияние и на надежность оборудования АСПП РКН.

Одним из наиболее скрытных и эффективных СДВ по эфиру является воздействие мощного короткого электромагнитного импульса. При этом представляется возможным реализовать достаточно компактные электромагнитные технические средства СДВ, которые могут быть размещены с целью маскировки на достаточном большом удалении от объекта атаки.

Описание модели определения вероятностно-временных характеристик работоспособного состояния АСПП РКН с учетом результатов предшествующих испытаний представлено на рис. 3.

Во время функционирования через промежутки времени  $[t_{n-1}; t_n]$  происходит смена конфигураций  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  АСПП РКН (1), каждая конфигурация содержит задействованные и незадействованные элементы. Особенности подсистемы контроля аппаратно-программных средств позволяют контролировать изменения внутренних параметров (напряжения, силы тока, мощности, температуры окружающей среды) АСПП РКН.

Для учета деструктивных внешних воздействий противника и среды предлагаются коэффициентные модели с целью определения эксплуатационной интенсивности отказов, связывающие параметры надежности с характеристиками условий применения изделий (посредством коэффициентов, характеризующих влияние на показатели надежности особенностей контроля качества; климатических факторов и факторов нагрузки: механических, электрических, ионизирующих, радиоэлектронных и т. п.). Интенсивность отказов незадействованных элементов на 2–4 порядка ниже, чем задействованных элементов [5–7]. Значит,

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_0 \prod_{i=1}^n K_i ;$$

где  $\lambda_0$  – базовое значение интенсивности отказов;

$n$  – количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов;

$K_i$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние  $i$ -го фактора [2].

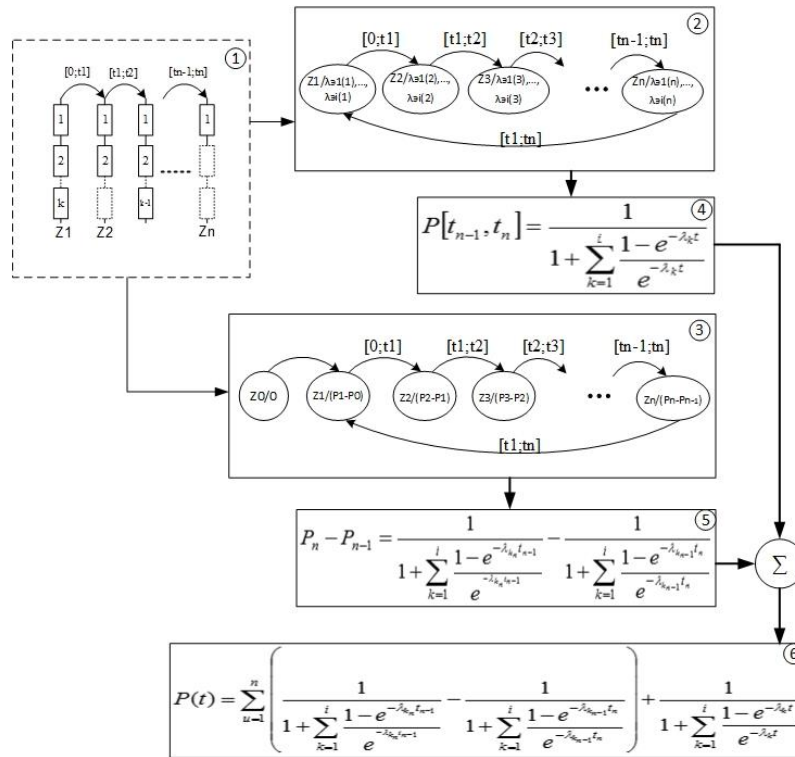


Рис. 3. Модель определения вероятностно-временных характеристик работоспособного состояния АСПП РКН с учетом результатов предшествующих испытаний

Модели, построенные на конечных автоматах (блоки 2 и 3), имитируют поведение системы во время проведения технологических операций по подготовке к пуску РКН, предназначены для расчета вероятности работоспособного состояния на интервале  $[t_{n-1}; t_n]$  (блок 4) и разницы предыдущего и текущего значений вероятности работоспособного состояния (блок 5). Суммирование результатов при моделировании позволяет вывести рекурсивную формулу расчета вероятности работоспособного состояния с учетом результатов предшествующих испытаний и деструктивных внешних воздействий (блок 6).

На рис. 4 представлена схема контроля вероятностно-временных характеристик при функционировании АСПП РКН, а на рис. 5 – алгоритм расчета вероятности работоспособного состояния АСПП РКН в условиях деструктивных внешних воздействий.

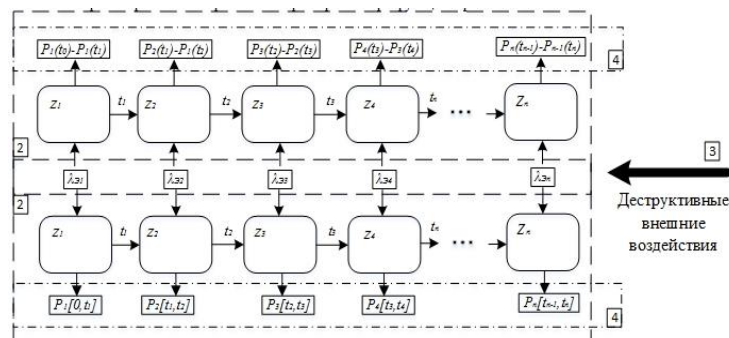


Рис. 4. Схема контроля вероятностно-временных характеристик при функционировании АСПП РКН

Имитационная модель функционирования АСПП РКН для определения вероятностно-временных характеристик работоспособного состояния с учетом результатов предшествующих испытаний реализована в среде моделирования *Stateflow* программного продукта *Matlab* [8] (рис. 6). В модели учтены режимы работы аппаратуры АСПП, условия эксплуатации и воздействия дестабилизирующих факторов.

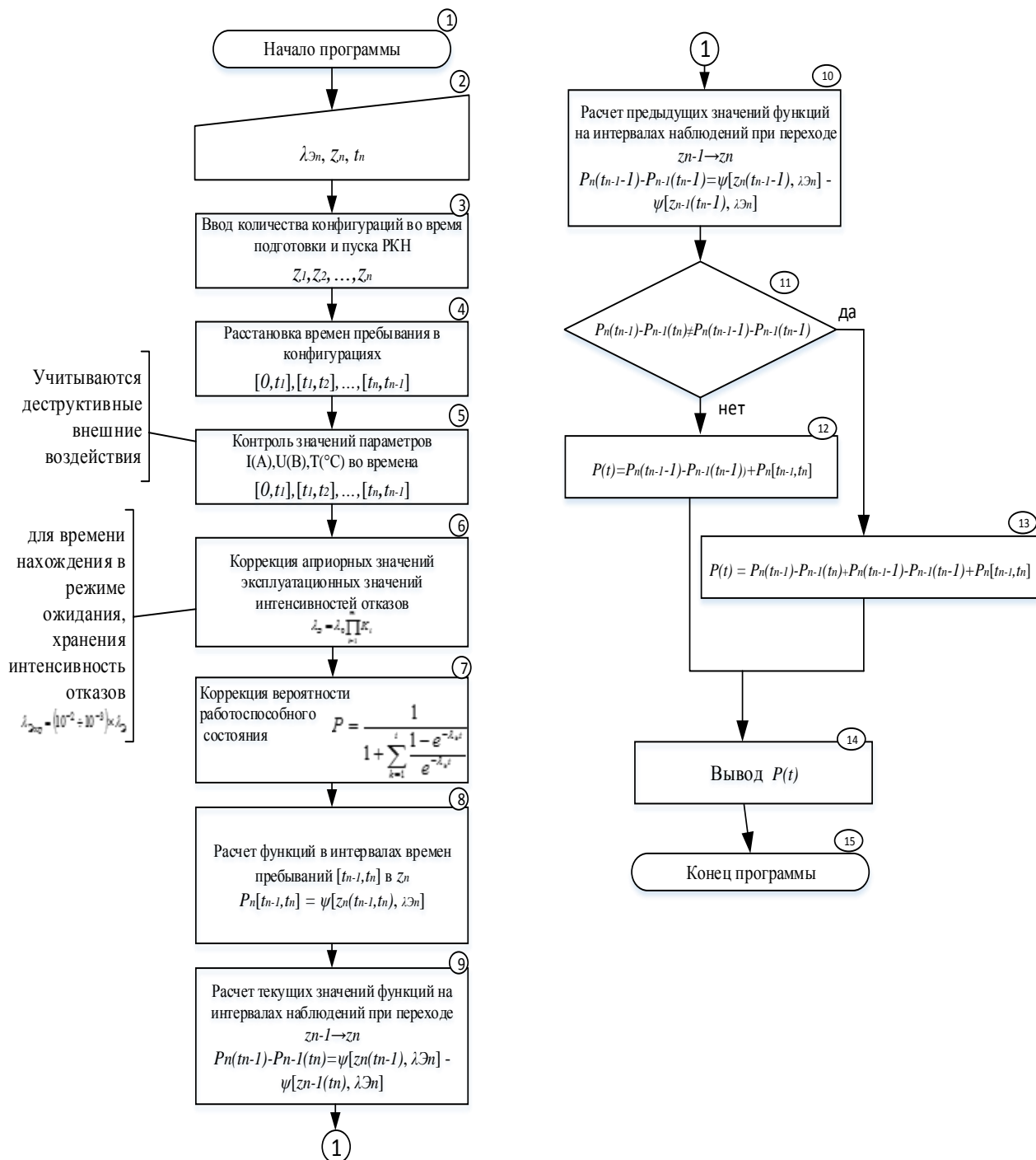


Рис. 5. Алгоритм расчета вероятности работоспособного состояния АСПП РКН в условиях деструктивных внешних воздействий

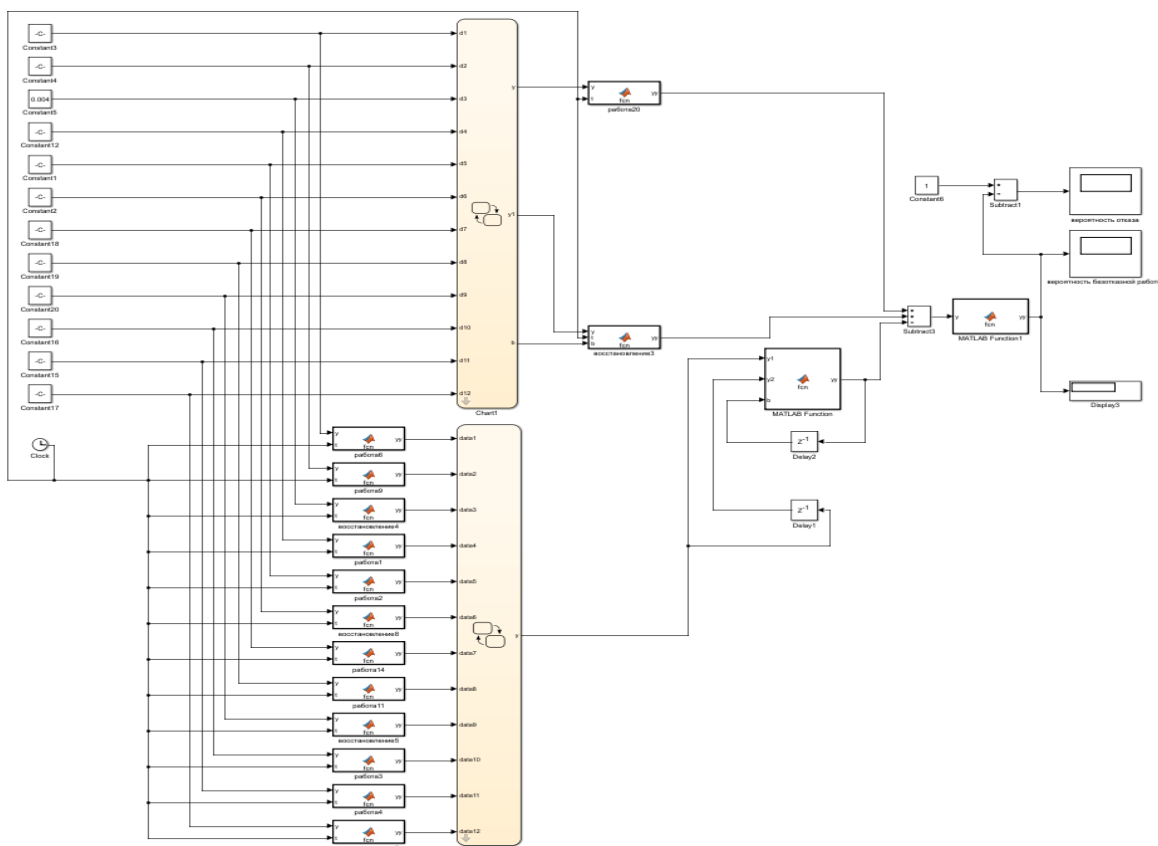


Рис. 6. Модель функционирования АСПП РКН в среде моделирования Stateflow

Результаты моделирования представлены на рис. 7 для одного цикла работ по подготовке к пуску и на рис. 8 – для четырех циклов работ по подготовке к пуску в течение 1 года.

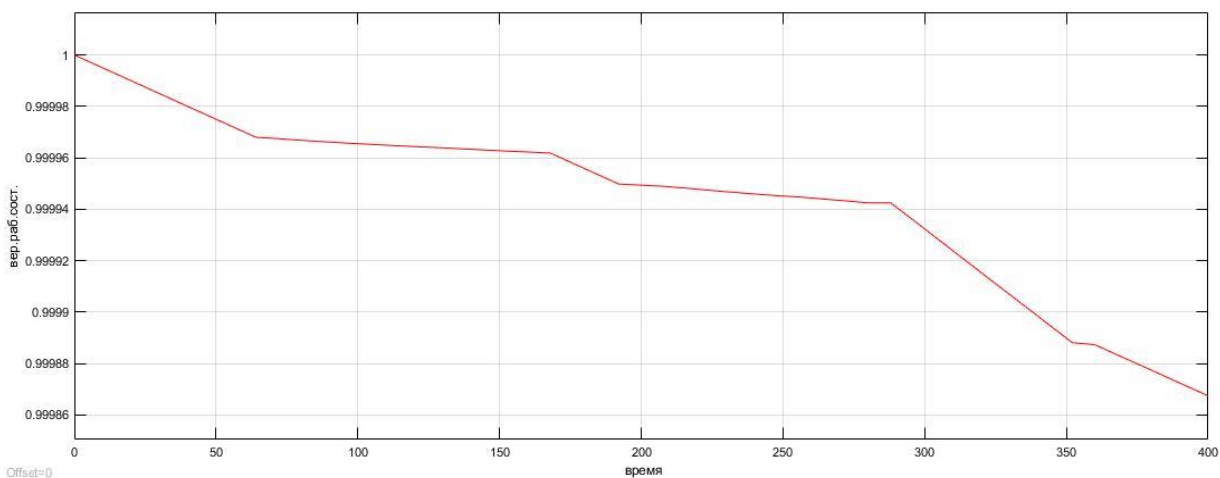


Рис. 7. Результаты моделирования для одного цикла работ по подготовке к пуску РКН на СК

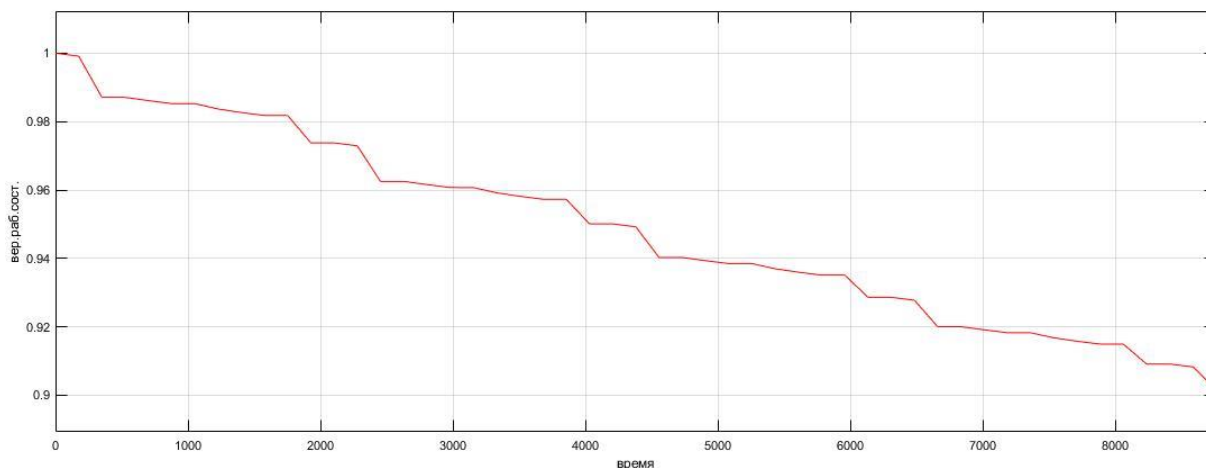


Рис. 8. Результаты моделирования для четырех циклов работ по подготовке к пуску РКН на СК в течение 1 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель функционирования АСПП РКН для определения вероятностно-временных характеристик работоспособного состояния с учетом результатов предшествующих испытаний и деструктивных внешних воздействий отличается от известных. Это отличие состоит в том, что на основе контроля внутренних параметров АСПП РКН, учета длительностей пребывания в различных конфигурациях производится коррекция априорных значений интенсивностей отказов элементов и определяется вероятность работоспособного состояния на текущий момент и последующие моменты времени проведения испытаний.

Применение данной модели возможно в подсистеме контроля аппаратно-программных средств АСПП РКН в качестве компонента программного анализатора информации о деструктивных воздействиях среды и прогнозирования вероятности работоспособного состояния автоматизированной системы подготовки и пуска РКН.

## Список используемых источников

1. Тарасов А.Г. Оценивание надежности программно-технического комплекса автоматизированной системы управления технологическими процессами // Тезисы докладов научно-технической конференции ФГУП «РНИИ КП». – М., 2010.
2. Имитационная модель процесса подготовки ракеты космического назначения к пуску на стартовом комплексе с учетом возможных нештатных ситуаций / А.Е. Привалов, А.Г. Тарасов, А.Л. Копейка, С.С. Степанов // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 1. – С.146–150.
3. Тарасов А.Г., Минаков Е.П., Бутырин А.В. Обеспечение безопасности технологических процессов подготовки и пуска ракет космического назначения на стартовом комплексе путем применения робототехнических систем // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сб. ст. – 2018. – С. 314–319.
4. Модель прогнозирования надежности автоматизированных систем с учетом этапов эксплуатации / И.В. Дорожко, А.Л. Копейка, Е.А. Захарова, А.С. Шавин // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 490–498.



5. *Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д.* Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
6. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: введ. 2017-03-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 24 с.
7. *Прытков С.Ф.* Надежность электрорадиоизделий: справочник. – М.: ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2008. – 641 с.
8. Программа моделирования надежности сложных технических систем в процессе функционирования с учетом условий эксплуатации и применения по назначению: программа для ЭВМ № 2018615520 от 10 июля 2018 г. / А.Л. Копейка, А.Б. Кузнецов

А.Г. Кохановский,  
кандидат техн. наук;  
И.Н. Кошель;  
А.Б. Кузнецов,  
кандидат техн. наук, доцент

## МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С РАСШИРЕННЫМ МНОЖЕСТВОМ РАБОТОСПОСОБНЫХ СОСТОЯНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

В статье представлена модель диагностирования вычислительных средств автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения с расширенным множеством работоспособных состояний. Применение данной модели позволяет прогнозировать изменение технического состояния вычислительных средств при воздействии дестабилизирующих факторов и поддерживать в работоспособном состоянии вычислительные средства автоматизированной системы подготовки и пуска ракет космического назначения на длительном промежутке времени.

Ключевые слова: вычислительные средства, работоспособное состояние, контроль, автоматизированная система подготовки и пуска ракет космического назначения, дестабилизирующие факторы.

Функционирование вычислительных средств (ВСр) автоматизированной системы подготовки и пуска (АСПП) ракеты космического назначения (РКН) и внутренние процессы, происходящие в них, сопровождаются изменением значений различных параметров. Для создания адекватной модели вычислительных средств необходимо, помимо изменений внутренних параметров, учитывать изменения параметров, характеризующих состояние окружающей среды.

Для оценивания качества процесса диагностирования применяется такой показатель, как достоверность диагностирования, под которой понимается степень соответствия полученных результатов диагностирования реальному техническому состоянию (ТС) объекта диагностирования [1]. Достоверность диагностирования принято оценивать с помощью условной вероятности события, заключающегося в том, что объект находится в техническом состоянии  $S_i$  при условии, что в результате диагностирования зафиксировано соответствующее техническое состояние  $S_i^*$ . Классическая модель диагностирования в форме графа состояний, описывающего марковский процесс перехода из одного состояния в другое, представлена на рис. 1 [2].

На рис. 1 вводятся следующие обозначения:  $\lambda$  – интенсивность отказов;  $T_{CP}$  – среднее время наработки на отказ;  $T_d$  – периодичность процесса диагностирования;  $T_B^*$  – среднее время восстановления по результатам диагностирования;  $T_{II}$  – среднее время перевода объекта из режима диагностирования в режим штатного функционирования (при функциональном диагностировании  $T_{II} = 0$ );  $R_1, R_3$  – состояния, при которых результат диагностирования соответствует техническому состоянию объекта.

При оценивании надежности АСПП РКН и вычислительных средств, входящих в ее состав, особое внимание уделяется комплексному показателю надежности – коэффициенту готовности. Для того чтобы определить зависимость надежности АСПП РКН в виде

коэффициента готовности от качества процесса диагностирования в виде достоверности диагностирования и периодичности диагностирования, разработана уточненная модель процесса диагностирования, особенностью которой является учет ошибок первого и второго рода, возникающих в процессе диагностирования. Граф состояний уточненной модели показан на рис. 2.

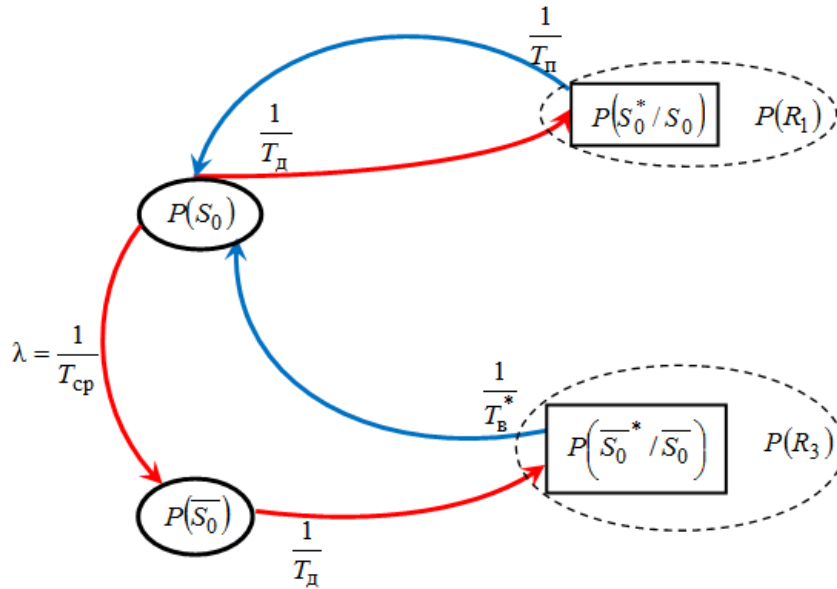


Рис. 1. Классическая модель процесса диагностирования

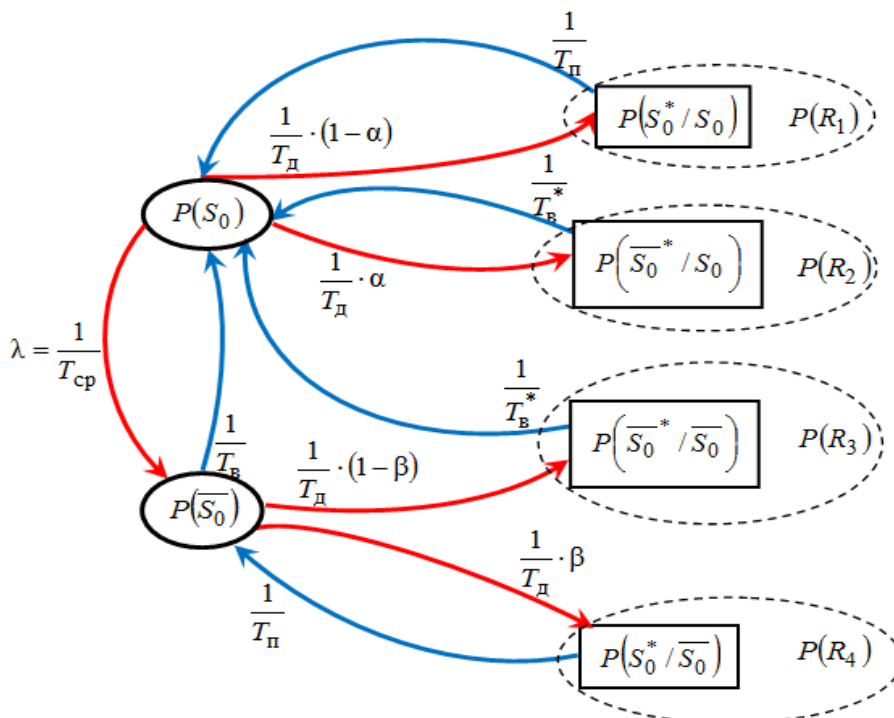


Рис. 2. Уточненная модель процесса диагностирования

На рис. 2 дополнительно введены следующие обозначения:  $T_B$  – среднее время восстановления без проведения диагностирования;  $\alpha$ ,  $\beta$  – вероятности ошибок в процессе диагности-

рования (ошибки первого и второго рода);  $R_2, R_4$  – состояния, при которых результат диагностирования не соответствует техническому состоянию объекта.

Уточненная модель процесса диагностирования (рис. 2), в отличие от классической модели (рис. 1), рассмотренной в [2, 3], позволяет варьировать показатели качества диагностирования с целью получения следующих практических результатов:

- возможность оценивания достоверности диагностирования (на основе учета вероятностей ошибочных результатов диагностирования);
- возможность моделирования предельных случаев за счет изменения периодичности диагностирования: от полного отсутствия процедур диагностирования до постоянного диагностирования (функциональное диагностирование).

На основе графа состояний предложенной уточненной модели процесса диагностирования (см. рис. 2) марковский процесс в стационарном режиме будет описываться следующей системой алгебраических уравнений (1):

$$\begin{cases} P(S_0) + P(\overline{S_0}) + P(R_1) + P(R_2) + P(R_3) + P(R_4) = 1; \\ \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_1) + \frac{1}{T_B^*} \cdot (P(R_3) + P(R_2)) + \frac{1}{T_B} \cdot P(\overline{S_0}) - P(S_0) \cdot \left( \frac{1}{T_D} + \frac{1}{T_{CP}} \right) = 0; \\ \frac{1-\alpha}{T_D} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_1) = 0; \\ \frac{1}{T_{CP}} \cdot P(S_0) - P(\overline{S_0}) \cdot \left( \frac{1}{T_D} + \frac{1}{T_B} \right) + \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_4) = 0; \\ \frac{1-\beta}{T_D} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_3) = 0; \\ \frac{\alpha}{T_D} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_2) = 0; \\ \frac{\beta}{T_D} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_4) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для определения коэффициента готовности необходимо решить систему уравнений (1) относительно вероятности работоспособного состояния  $P(S_0)$  и вероятности результата «годен» при условии, что объект находится в работоспособном состоянии  $P(R_1)$ . При этом получается следующее аналитическое выражение:

$$\begin{aligned} K_{\Gamma} &= P(S_0) + P(R_1) = \\ &= \frac{T_{CP} \cdot (T_{\Pi} \cdot (1-\alpha) + T_D) \cdot (T_B \cdot (1-\beta) + T_D)}{T_{CP} \cdot T_B \cdot (1-\beta) \cdot (T_B^* \cdot \alpha + T_{\Pi} \cdot (1-\alpha)) + T_{CP} \cdot T_D \cdot (T_{\Pi} \cdot (1-\alpha) + T_B \cdot (1-\beta)) + T_D \cdot (T_B \cdot T_B^* \cdot (1-\beta) + T_D \cdot (T_{CP} + T_B)) + T_{CP} \cdot T_B^* \cdot \alpha + T_{\Pi} \cdot T_B \cdot \beta} \end{aligned} \quad (2)$$

В том случае, если для восстановления объекта диагностирование необходимо ( $T_B = \infty$ ), то система уравнений (1) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(S_0) + P(\overline{S_0}) + P(R_1) + P(R_2) + P(R_3) + P(R_4) = 1; \\ \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_1) + \frac{1}{T_B^*} \cdot (P(R_3) + P(R_2)) - P(S_0) \cdot \left( \frac{1}{T_D} + \frac{1}{T_{CP}} \right) = 0; \\ \frac{1-\alpha}{T_D} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_1) = 0; \\ \frac{1}{T_{CP}} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_D} \cdot P(\overline{S_0}) + \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_4) = 0; \\ \frac{1-\beta}{T_D} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_3) = 0; \\ \frac{\alpha}{T_D} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_2) = 0; \\ \frac{\beta}{T_D} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_4) = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Проведя аналогичные преобразования относительно  $P(S_0)$  и  $P(R_1)$  для системы уравнений (3), получим следующее аналитическое выражение для определения коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = P(S_0) + P(R_1) = \frac{T_{CP} \cdot (1-\beta) \cdot [T_D + T_{\Pi} \cdot (1-\alpha)]}{T_{CP} \cdot (1-\beta) \cdot [T_B^* \cdot \alpha + T_{\Pi} \cdot (1-\alpha)] + T_D \cdot [(T_{CP} + T_B^*) \cdot (1-\beta) + T_{\Pi} \cdot \beta + T_D]}. \quad (4)$$

С помощью выражения (4) определяются показатели надежности объектов, в которых не предусматривается возможность восстановления без проведения диагностирования.

В реальной системе диагностирования сложных технических систем применяется анализ множества видов неисправного технического состояния объекта диагностирования. Тогда, расширяя предложенный подход, на рис. 2 можно получить обобщенную модель диагностирования, представленную на рис. 3.

В ходе проведенного экспериментального исследования свойств современных вычислительных средств как объекта диагностирования было выявлено, что помимо классического подхода в диагностике – метода поиска неисправных состояний – актуально применять анализ множества видов исправного (работоспособного) состояния вычислительных средств, в которых они способны выполнять вычислительные задачи с применением новейших технологий самосохранения от физического разрушения вследствие перегрева микрочипов, снижая показатели быстродействия и энергопотребления.

Используя применительно к разработанным моделям выделенные ранее шесть видов ТС вычислительных средств: исправное, энергосберегающее, критическое, аварийное, неработоспособное и отключенное, – получаем разработанную модель диагностирования с учетом множества работоспособных состояний (рис. 4) [4].

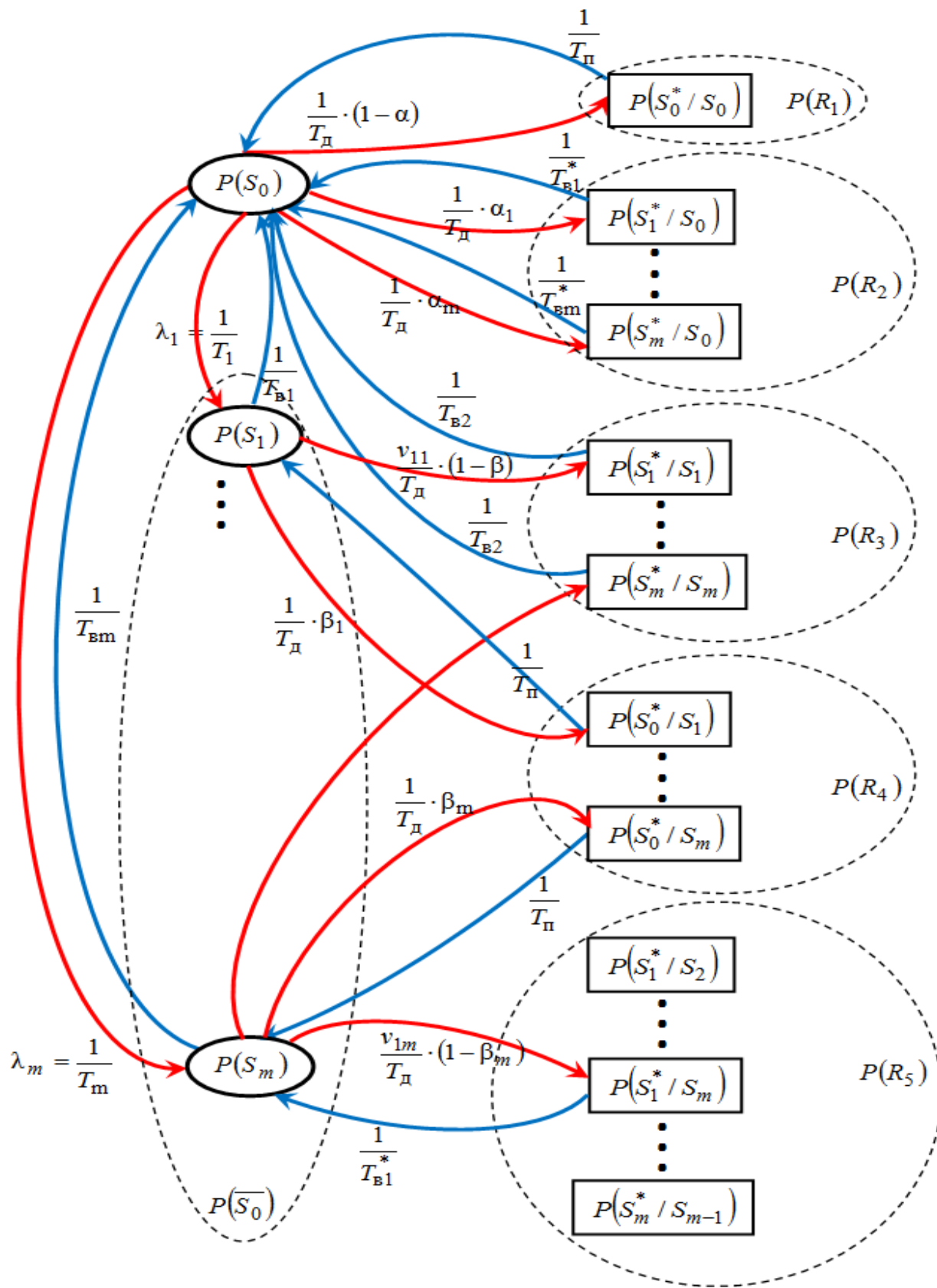


Рис. 3. Модель процесса диагностирования с учетом множества неисправных состояний, где  $(P(S_1) \dots P(S_m))$  – множество видов неисправных технических состояний  $P(\bar{S}_0)$

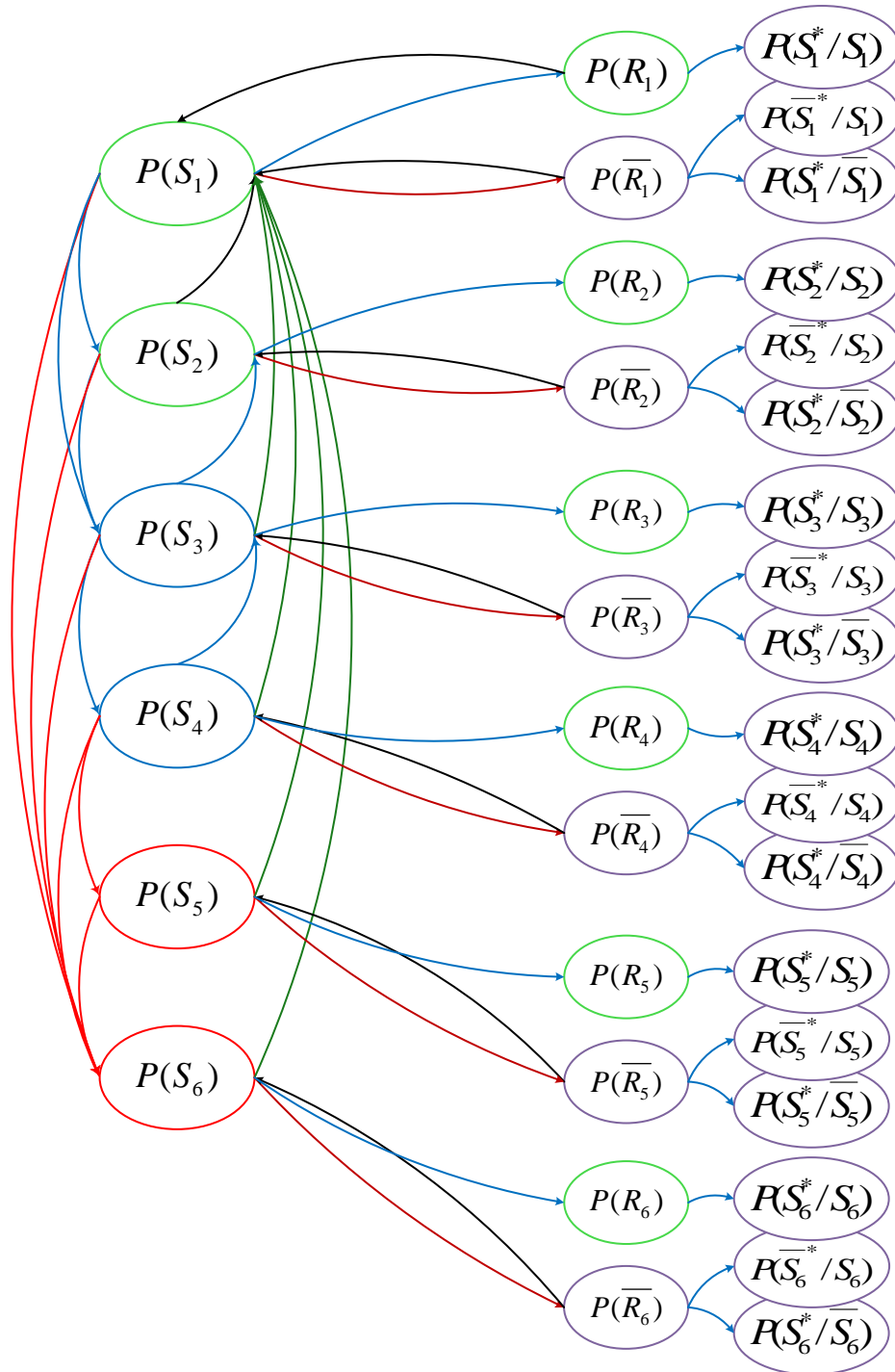


Рис. 4. Модель диагностирования с учетом множества работоспособных состояний

В ходе исследования были выявлены внешние признаки и проявления переходов, дестабилизирующие факторы, влияющие на изменения ТС ВСр АСПП РКН, а также возможные управляющие воздействия системы поддержания работоспособного состояния.

Переход из исправного в энергосберегающее состояние обусловлен включением функции управления энергопотреблением компонентов ВСр, что может быть вызвано следующими причинами:

- снижением нагрузки на центральный процессор (ЦП) и другие компоненты ВСр;
- работой от резервного источника питания;
- повышением температуры ЦП при низкой скорости вращения вентилятора (режим работы с низким уровнем шума).

Выход из энергосберегающего режима связан:

а) с использованием ЦП более чем на (50%  $L_{\text{ЦП}}$ );

б) с повышением скорости вращения вентилятора – снижением температуры ЦП. Переход из исправного в критическое состояние характеризуется повышением температуры ЦП  $T_{\text{ЦП}}$  выше порога включения функции термоконтроля ТМ2, при максимальной вычислительной нагрузке на ВСр  $L_{\text{ЦП}} \rightarrow \max$ .

Переход из энергосберегающего режима в критическое осуществляется повышением  $T_{\text{ЦП}}$  выше порога включения функции термоконтроля ТМ2 вне зависимости от вычислительной нагрузки (наблюдается, как правило, при минимальной нагрузке). Переход из критического в аварийное – повышением  $T_{\text{ЦП}}$  выше порога включения функции термоконтроля ТМ1. При этом дестабилизирующими факторами в зависимости от пороговых значений параметров функционирования ВСр являются:

- остановка вентилятора или значительное снижение скорости вращения, не обеспечивающее эффективный теплоотвод;
- при максимальной скорости вращения вентилятора недостаточный теплоотвод для текущей  $L_{\text{ЦП}}$  (не расчетный радиатор, высокая  $T$  воздуха в помещении, ухудшение теплопроводящего слоя, высокая  $T$  воздуха в корпусе при обычной  $T$  воздуха в помещении).

Переход из аварийного в неработоспособное соответствует достижению максимально допустимой рабочей температурой  $T_{\text{ЦП}}$  по следующим причинам:

- перегрев компонентов ВСр, отключение по питанию;
- неправильный монтаж системы охлаждения;
- неисправная система охлаждения;
- превышение максимальной температуры воздуха в помещении, при длительной высокой  $L_{\text{ЦП}}$ .

При нахождении ВСр в неработоспособном ТС источник бесперебойного питания, подключенный к локальной вычислительной сети (ЛВС), будет обеспечивать удаленный мониторинг и управление, соответственно появляется возможность перехода из состояния S5 в S6. Управляющее воздействие – это ручное или автоматическое отключение питания для проведения регламентных или восстановительных работ после состояния S5.

При переходе из состояний S1, S2, S3, S4 в S6 внешним признаком является отсутствие информации по всем диагностическим признакам ВСр. Дестабилизирующие факторы в этом случае следующие:

- отключение по питанию по всем линиям резервирования;
- отключение линий связи;
- внезапный отказ оборудования;
- зависание программного обеспечения;
- воздействие электромагнитного излучения.

Аналогично описывается и процесс восстановления, например, переход из неработоспособного или отключенного состояния в исправное возможен при первом включении после отказа и проведения ремонтно-восстановительных работ в результате ручного либо автоматического включения питания.

Внутри множества видов работоспособного состояния также имеют место быть обратные переходы «восстановления» прежних параметров функционирования ввиду снижения тепловыделения ЦП и других компонентов вследствие следующих причин:

- регулирования параметров работы ВСр и смежных систем (СмС);
- прекращения воздействия дестабилизирующего фактора;
- снижения вычислительной нагрузки на ВСр до состояния простоя.



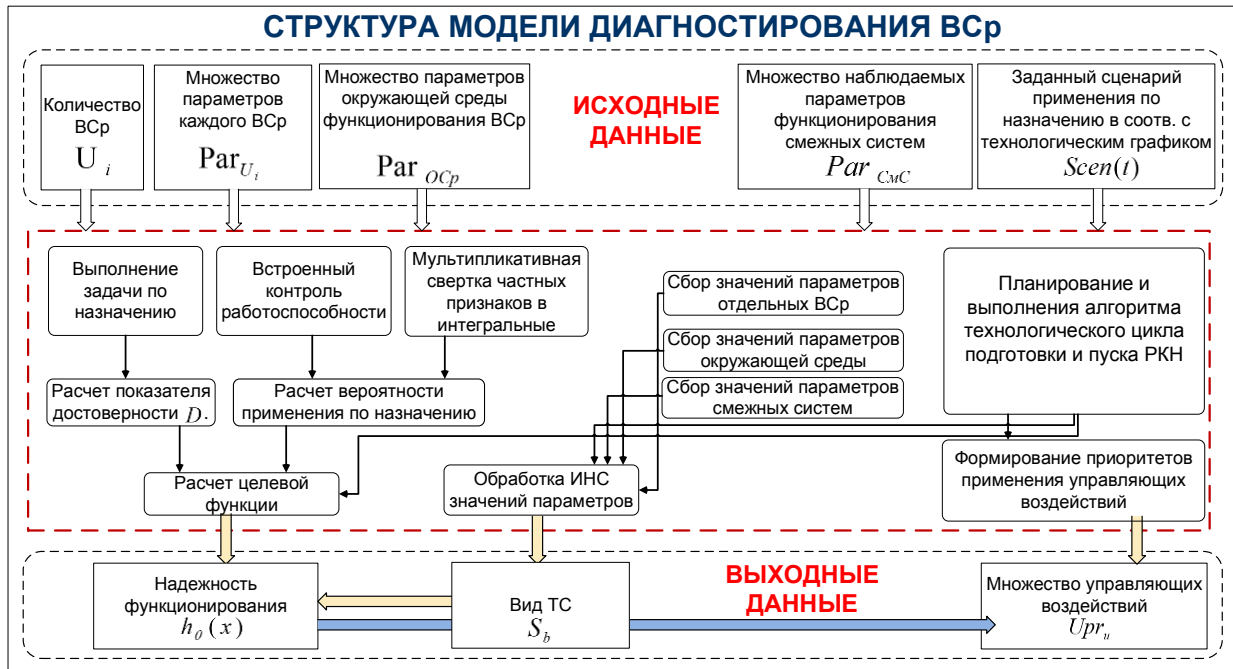


Рис. 5. Структура модели диагностирования ВСр

На рис. 5 представлена структура модели диагностирования [4], которую необходимо использовать при построении программного продукта, реализующего задачи диагностирования и управления параметрами функционирования ВСр.

В блоке исходных данных учитываются:

- количество ВСр, входящих в АСПП РКН, поскольку в разных вариантах применения и в результате последующих модернизаций оно может меняться;
- множество параметров каждого ВСр, перечень которых зависит от применяемых компонентов ВСр, а также от их коммуникационных возможностей;
- множество параметров окружающей среды функционирования ВСр;
- множество наблюдаемых параметров функционирования смежных систем;
- заданный сценарий применения ВСр по назначению в соответствии с технологическим графиком подготовки и пуска РКН.

В основной части модели происходят обработка исходных данных, сбор текущих значений диагностических параметров, с учетом выполнения задач по назначению и функционирования встроенного контроля работоспособности.

В качестве выходных данных модели формируется решение о надежности функционирования ВСр, текущем виде ТС ВСр, а в случае необходимости формируется множество управляющих воздействий, направленных на парирование воздействия дестабилизирующих факторов с целью поддержания ВСр в работоспособных состояниях.

Разработанная модель связывает диагностические признаки (параметры работы ВСр, смежных систем и окружающей среды) с параметром качества диагностирования (достоверности диагностирования) и с надежностью ВСр (коэффициентом готовности), создает основу для создания самоорганизующейся системы, способной поддерживать работоспособное состояние при воздействии дестабилизирующих факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена разработанная модель диагностирования ВСр АСПП РКН с расширенным множеством работоспособных состояний, переход в которые обусловлен воздействием де-

стабилизирующих факторов. Данная модель учитывает новые особенности функционирования ВСр, которые обеспечивают выполнение вычислительных задач в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Также учитывается связь между параметрами функционирования ВСр, СМС и параметрами окружающей среды. Таким образом, разработанная модель повышает достоверность диагностирования ВСр АСПП РКН.

Применение данной модели позволяет парировать отказы ВСр при воздействии дестабилизирующих факторов и поддерживать в работоспособном состоянии ВСр на максимально длительном промежутке времени, т. е. достигается повышение надежности ВСр в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

#### Список используемых источников

1. *Струков А.В.* Анализ международных и российских стандартов в области надёжности, риска и безопасности. – URL: [http://szma.com/standarts\\_analysis.pdf](http://szma.com/standarts_analysis.pdf) (дата обращения: 20.07.2019).
2. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
3. *Мозгалеvский А.В., Гаскаров Д.В.* Техническая диагностика. – М.: Высш. шк., 1975. – 205 с.
4. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем / А.В. Бутырин, И.В. Дорожко, И.А. Кочанов, Н.А. Осипов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 137–146.

К.Э. Куракин,

*кандидат техн. наук;*

Н.Б. Литвинова,

*доктор педагогических наук;*

Ю.Е. Тупицин,

*кандидат техн. наук, доцент*

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМОЙ КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НА ЭТАПАХ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

Предлагается вариант разрешения противоречия между потребностью тепловых электростанций в охлаждающей воде и возможностями природных источников. Рассматриваются вопросы оптимизации площади поверхности воздухоохлаждаемых конденсационных установок

Ключевые слова: воздухоохлаждаемая конденсационная установка, оптимизационная математическая модель, теплогидравлический расчет.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Строительство тепловой электростанции или теплоэлектроцентрали (ТЭС или ТЭЦ), как источника тепловой и электрической энергии требует выполнения ряда условий, одним из которых является наличие на месте ее строительства достаточных водных ресурсов, большая часть которых расходуется для нужд низкопотенциального комплекса станции с целью отвода тепла. Иногда это может быть затруднено из-за характерных особенностей местарасположения станции и общего ухудшения экологической обстановки. Не случайно отмечают, что в XXI веке к битвам за энергетические ресурсы добавятся битвы за водные ресурсы.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТЭЦ**

Указанное противоречие между потребностью в охлаждающей воде и возможностями природных источников может быть устранено применением альтернативного способа отвода низкопотенциального тепла. Такой способ заключается в использовании воздушных систем охлаждения. Применение таких систем устраняет зависимость расположения энерговырабатывающей установки от источника водоснабжения, устраняет необходимость в сооружении инженерных коммуникаций технологического водоснабжения и в их обслуживании, не вызывает активных коррозионных процессов на поверхностях теплообмена, обеспечивает выполнение возросших требований защиты окружающей среды от загрязнений и поддержание экологического природного равновесия. Однако создание таких систем требует решения целого ряда научных и инженерных задач, непосредственно связанных с определенными особенностями функционирования низкопотенциального комплекса станции, оснащенного воздухоохлаждаемыми конденсационными установками.

Наиболее существенными из них являются более высокие потери располагаемой тепловой мощности, обусловленные сравнительно низкой эффективностью теплообмена в воздухоохлаждаемых конденсационных установках. Исходя из этого возникает необходимость в

определении оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров низкопотенциального комплекса ТЭЦ, оснащенного воздухоохлаждаемой конденсационной установкой (ВКУ) для районов с дефицитом и низким качеством водных ресурсов.

Принципиальная схема ВКУ изображена на рис. 1.

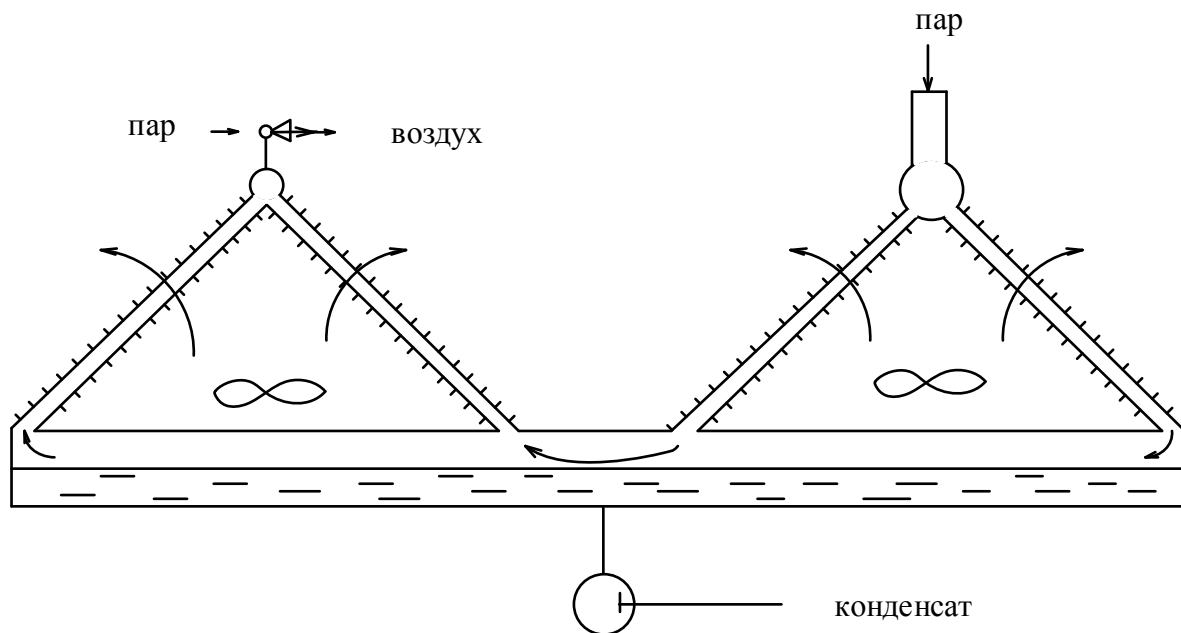


Рис. 1. Принципиальная схема воздухоохлаждаемой конденсационной установки

Установка состоит из пучков поперечно оребренных стальных труб овального сечения, охлаждаемых нагнетаемым осевым вентилятором воздухом. Количество труб в одном ряду пучка не превышает четырех, так как теплопередача последующих рядов снижается из-за нагрева воздуха в предыдущих рядах. Установка – двухступенчатая. В первой ступени происходит основная конденсация пара при движении его сверху вниз. Назначением второй ступени (дефлегматора) при движении снизу вверх является удаление имеющегося в паре воздуха и одновременная конденсация оставшегося пара.

Целевая функция в математической модели ВКУ вычисляется посредством вариантной методики теплогидравлического расчета [5, 6] ВКУ. Используемые в ней исходные данные делятся на две группы: группа независимых переменных, которые оказывают неоднозначное влияние на суммарную площадь поверхности теплопередачи ВКУ и могут варьироваться при ее проектировании, и параметры, относимые к совокупности внешних факторов.

Проанализируем совокупность исходных данных для конструктивного расчета ВКУ с целью выделения независимых переменных и совокупности внешних факторов. Исходя из основных положений методики конструктивного расчета, к числу независимых переменных может быть отнесена длина труб теплообменных секций  $L$ . Угол наклона секций к горизонту связан с длиной труб и выбранным диаметром рабочего колеса вентилятора, что показано в выражении  $\beta = \arccos(D_B/2L)$ . Это накладывает ограничение на увеличение длины труб, необходимое, чтобы величина угла  $\beta$  находилась в пределах  $45^\circ - 65^\circ$ .

С увеличением длины труб теплообменных секций возрастает массовая скорость пара на входе в них, что приводит к росту коэффициента теплоотдачи при конденсации. Одновременно с ростом коэффициента теплоотдачи увеличивается температурный напор из-за повышения давления на входе в трубу, обусловленного гидравлическими потерями, что, в свою очередь, накладывает ограничение на увеличение длины труб, так как гидравлическое сопротивление пучка по данным работы [1] не должно превышать 410 кПа.

Аналогичное влияние на средний коэффициент теплоотдачи при конденсации оказывает увеличение относительного массового расходного паросодержания  $X$  на выходе из теплообменных аппаратов. При увеличении величины относительного массового расходного паросодержания на выходе из первой ступени конденсации абсолютно и относительно уменьшается площадь теплопередающей поверхности первой ступени конденсации, однако увеличивается площадь второй ступени конденсации, где теплоотдача меньше.

Следовательно, к числу независимых переменных необходимо отнести величину относительного расходного массового паросодержания на выходе из первой ступени. На величину относительного расходного массового паросодержания на выходе из первой ступени конденсации накладывают ограничение, с одной стороны, необходимость уменьшения влияния неконденсирующихся газов, а с другой стороны – ограничения на гидравлическое сопротивление пучка.

Для удовлетворения обоим требованиям величина относительного массового расходного паросодержания, входящего в расчетные зависимости, должна для выбранного диапазона изменения длины теплообменных секций соответствовать величине в пределах от 0,1 до 0,2. Интенсификации теплообмена и, следовательно, уменьшению теплопередающей поверхности ВКУ способствует увеличение скорости воздуха в теплообменных секциях. В аппаратах воздушного охлаждения, применяемых в нефтехимической промышленности, скорость воздуха в теплообменных секциях изменяется в интервале 5–13 м/с. Это соответствует числам Рейнольдса 3000–18000. Рекомендуется поддерживать скорость воздуха в таких пределах, чтобы электрическая мощность, расходуемая на привод вентиляторов, не превышала 1% тепловой мощности теплообменника [2].

Таким образом, к независимым переменным относятся: длина труб теплообменных секций  $L$ , относительное массовое расходное паросодержание  $x_{\text{вых}}$  на выходе из первой ступени конденсации, число  $Re_{\text{в}}$  в узком сечении теплообменного пучка. Область допустимых значений перечисленных параметров формируется указанными ограничениями первого и второго рода.

В совокупность внешних факторов входят величины, определяющие взаимодействие ВКУ с другими агрегатами низкочастотного комплекса (НПК), а также параметры, являющиеся внешними по отношению к НПК, в целом, и конструктивные параметры ВКУ. Так, к первым относятся расходные и гидродинамические параметры отработанного в турбоустановке теплофикационного моноблока пара  $P_{\text{к}}$ ,  $G_{\text{п}}$ . Ко второй группе в данном случае можно отнести расчетную температуру наружного воздуха для района расположения  $t_{\text{в1}}$ . К конструктивным параметрам ВКУ относятся:

$D_{\text{в}}$  – диаметр рабочего колеса вентилятора;

$d_1$ ,  $d_2$  – больший и меньший внутренние диаметры овальной трубы;

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – поперечный и продольный шаги трубного пучка;

$\phi$  – коэффициент оребрения трубы, связанный с коэффициентом увеличения поверхности  $\psi$  соотношением

$$\phi = \psi \cdot d_1/d_0,$$

где  $d_1$  и  $d_0$  – диаметры трубы по высоте оребрения и у основания соответственно. Часть из них, а именно конструктивные параметры ВКУ  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\phi$ , принимают фиксированное значение, обусловленное геометрическими характеристиками пучка. А такие параметры, как  $P_{\text{к}}$ ,  $G_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{в1}}$ ,  $D_{\text{в}}$  подлежат варьированию при многократных решениях.

С учетом вышесказанного задача оптимизации параметров ВКУ определяется следующим образом:

*Найти:*  $F_{\text{к}}(L, Re_{\text{в}}, x_{\text{вых}}) \rightarrow \min.$

При  $E_{\text{вх}} = \{d_1, d_2, \phi, \sigma_1, \sigma_2, D_{\text{в}}, t_{\text{в1}}, P_{\text{к}}, G_{\text{п}}\};$

$0,1 \leq x_{\text{вых}} \leq 0,2;$

$3 \cdot 10^3 \leq Re_{\text{в}} \leq 18 \cdot 10^3;$

$$45^\circ \leq \arccos(D/2L) \leq 65^\circ;$$

$$\Delta P_K(L, x_{\text{ВЫХ}}) < 410;$$

$$N_{\text{ВЕНТ}}(R_{\text{сВ}}) \leq 0,01Q.$$

Расчет теплообменной поверхности ВКУ базируется на двух уравнениях – теплового баланса и теплопередачи – решаемых совместно. При стационарном режиме работы конденсатора уравнение теплового баланса в общем виде записывается следующим образом:

$$Q = C_p^B (t_{\text{В2}} - t_{\text{В1}}) \cdot G_{\text{В}} = G_{\text{П}}(h'' - h'),$$

где  $h''$  и  $h'$  – энтальпии пара на входе в аппарат и конденсата на выходе из него.

Уравнение теплопередачи записывается в виде

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t = q \cdot F,$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>К;

$\Delta t$  – температурный напор, град.

Общий вид выражения для коэффициента теплопередачи поперечно оребренных труб выглядит как

$$K = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7},$$

где  $R_1$ – $R_7$  – термические сопротивления со стороны пара, внутренних загрязнений, стенки несущей трубы, термического контактного сопротивления ребер, стенки ребристой оболочки, наружных загрязнений и теплоотдачи к воздуху. Для способа оребрения с последующим горячим цинкованием механический контакт ребер трубой можно считать совершенным, поэтому сопротивление  $R_4$  можно не учитывать.

При экспериментальном исследовании пучка труб отдельно не определялось термическое сопротивление стенки ребристой оболочки, а учитывалось в коэффициенте теплоотдачи к воздуху.

При отсутствии данных по термическому сопротивлению загрязнений их приближенную оценку можно выполнить путем умножения коэффициента теплопередачи на корректирующий множитель. В работе [4] для случая конденсации водяного пара предлагается принимать его равным 0,95.

С учетом сказанного выражение для коэффициента теплопередачи, отнесенное к наружной поверхности трубы, будет записано в виде

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + R_{\text{СТ}} + \frac{d_H \varphi}{\alpha_P d_{\text{ВН}}}}.$$

Термическое сопротивление стенки трубы вычисляется по формуле

$$R_{\text{СТ}} = \frac{\varphi d_H}{2 \lambda_{\text{СТ}}} \ln \frac{d_H}{d_{\text{ВН}}}.$$

Для расчета коэффициента теплопередачи от поперечно оребренных труб охлаждающему воздуху целесообразно использовать формулы, полученные по результатам экспериментальных исследований для конкретного типа труб и оребрения. Причиной этого является малоизученность многообразия форм течений вокруг ребристой трубы, что не позволяет в настоящее время осуществить теоретический анализ и получение надежных расчетных зависимостей по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению поперечно оребренных труб во всем диапазоне геометрических и режимных параметров. Полученные экспериментальные данные обрабатываются с помощью теории подобия, что позволяет установить качественную связь между ними в форме критериальных уравнений.

При обобщении опытных данных по теплоотдаче поперечно обтекаемых пучков обычно используют два определения коэффициента теплоотдачи:

– конвективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{кн}}$  определяется отношением теплового потока, проходящего через ребра, к разности температур набегающего потока и средней температуры поверхности ребер;

– приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{пр}}$  определяется через отношение теплового потока, проходящего через ребра, к разности температур набегающего потока и температуры у основания ребра. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{пр}}$  учитывает термическое сопротивление пограничного слоя и ребра, поэтому он всегда меньше  $\alpha_{\text{кн}}$ .

С точки зрения упрощения техники эксперимента наиболее часто используют приведенный коэффициент теплоотдачи.

В НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова были проведены экспериментальные исследования пучков овальных поперечно оребренных труб со следующими характеристиками: внутренними осями эллипса 14 и 36 мм; толщиной стенки несущей трубы 2 мм; высотой ребер 10 мм; толщиной ребер 0,5 мм; шагом оребрения 3 мм. Полученные в критериальной форме результаты могут быть использованы при дальнейших расчетах.

Средняя теплоотдача по пучку

$$Nu = 0,885Re^{0,44}.$$

Локальная теплоотдача для каждого ряда:

– для 1-го ряда

$$Nu = 1,879Re^{0,352};$$

– для 2-го ряда

$$Nu = 0,587Re^{0,497};$$

– для 3-го ряда

$$Nu = 1,166Re^{0,423};$$

– для 4-го ряда

$$Nu = 0,450Re^{0,5145}.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации водяного пара внутри наклонной трубы можно использовать формулу

$$\frac{Nu}{Nu_{g\beta}} = \sqrt[2]{1 + \left(0,1A \frac{Nu_{g\beta=90}}{Nu_{g\beta}}\right)^2}.$$

Данная формула получена на экспериментальной базе НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова в процессе обработки экспериментальных данных при конденсации водяного пара внутри трубы (при углах наклона  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ) в следующем диапазоне режимных параметров:  $P = 0,09$  МПа,  $\Delta t = 20 \div 70^\circ$ ,  $q = 60 \div 200$  кВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение оптимальной площади теплообменной поверхности ВКУ представляет собой решение задачи нелинейного программирования и решается методом последовательных приближений с заданной заранее точностью решения. При каждой последовательной итерационной процедуре кроме вычисления тепловых потоков, температур охлаждающего воздуха, энтальпии пара необходимо также производить корректировку значений теплофизических параметров пара и воздуха, таких как теплоемкость, динамическая вязкость, теплопроводность. Поэтому для ее решения необходимо использовать заранее подго-

товленную программу на одном из языков программирования. Для удобства проведения расчетов следует использовать метод разбиения трубы на короткие участки, чтобы считать изменение параметров на них линейным. После вычисления площади теплообменной поверхности при определенных заранее заданных оптимизируемых параметрах дальнейшую задачу оптимизации можно решать, варьируя их в пределах наложенных ограничений до получения минимальной величины оптимизируемого параметра.

Таким образом, решая задачу нелинейного программирования [7, 8], мы получаем требуемые параметры, к которым относятся: минимальная площадь теплообменной поверхности ВКУ; оптимальное соотношение теплообменных площадей конденсатора и дефлегматора; оптимальная величина угла наклона теплообменных поверхностей; оптимальные параметры вентиляторной установки.

### Список используемых источников

1. *Арсентьев Т.В.* Тепловое оборудование и тепловые сети / Т.В. Арсентьев, В.П. Белоусов. – М.: Энергоатомиздат, 2015. – 400 с.
2. Разработка рекомендаций по проектированию систем охлаждения и охладителей АЭС. Системы воздушного охлаждения и нетрадиционные системы охлаждения. – М.: НИПКИИАтомэнергопроект: отчет ПО НИР. – 2011. – Т. 2. – 250 с.
3. *Булат Р.Е., Саркисов С.В., Вакуненко В.А.* Повышение эффективности функционирования жилищно-коммунального хозяйства Министерства обороны Российской Федерации // Военный инженер. – 2018. – № 4 (10). – С. 32–39.
4. *Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М.* Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 278 с.
5. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: справочник / под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
6. Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 1999. – 671 с.
7. *Таха Х.* Введение в исследование операций. – М.: Мир, 1985. – Кн.1. – 479 с.
8. *Чичинадзе В.К.* Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. – М.: Наука, 1983. – 256 с.



А.В. Малышев

ГУП «Водоканал СПб» филиал «Водоснабжение СПб»;

С.В. Саркисов\*,

доктор техн. наук, доцент;

А.А. Сорокин\*

\*ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулева

## **ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

В статье рассматриваются реконструкция и оптимизация режимов работы систем водоснабжения города Санкт-Петербурга. Проанализированы наиболее значимые проблемные вопросы, на основании которых разработаны приоритетные задачи по совершенствованию систем водоснабжения, обеспечивающих гарантированное водообеспечение потребителей и увеличение мощности водопроводных очистных сооружений для возможности дальнейшего потенциального расширения зоны влияния станции.

Ключевые слова: система водоснабжения, модернизация водоснабжения, режимы работы, очистные сооружения, оптимизация водообеспечения.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Оптимизация режимов работы и дальнейшая реконструкция систем водоснабжения крупных городов являются актуальными вопросами дальнейшего развития всей инфраструктуры любого города.

При анализе системы водоснабжения в Санкт-Петербурге был выявлен ряд проблем, которые являются сдерживающим фактором развития близлежащих территорий и требуют незамедлительного их решения [1, 2].

### **ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ**

По данным ГУП «Водоканал СПб» на 01 октября 2018 года система водоснабжения Санкт-Петербурга (рис.1) характеризуется:

- среднесуточной подачей питьевой воды – 1,6 млн. куб. м./сут;
- количеством водопроводных станций – 9 шт.;
- количеством повысительных насосных станций – 187;
- протяженностью водопроводной сети – 7382,1 км;
- количеством заводов по производству низкоконцентрированного гипохлорита натрия – 2 шт.

Одним из приоритетных вопросов в режимах работы систем водоснабжения является наличие гарантированно безопасной питьевой воды, поставляемой потребителю. Среди факторов важным является статистика петербургского Управления Роспотребнадзора, которая указывает на снижение заболеваемости гепатитом А (рис. 2) при реконструкции водоочистных сооружений и при оптимизации режимов работы элементов системы водоснабжения [3, 4]:

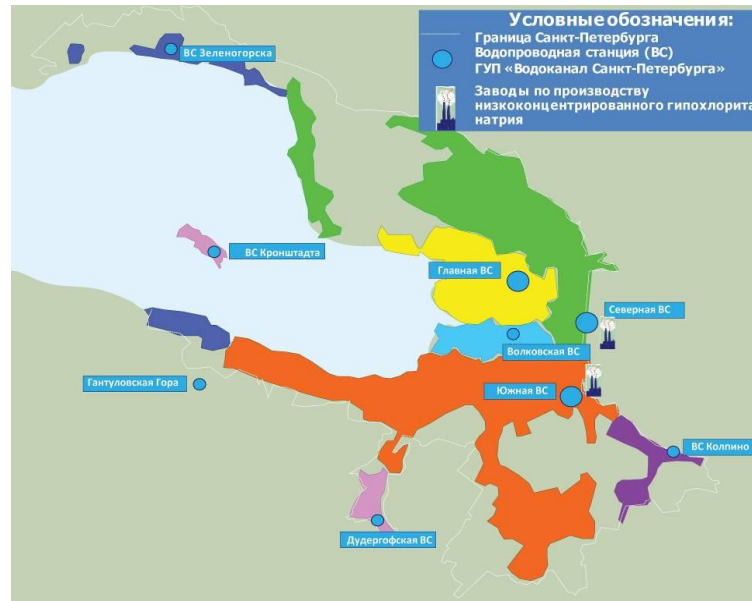


Рис.1. Характеристика системы водоснабжения Санкт-Петербурга

1. В ступени обеззараживания воды – замена хлора на гипохлорит натрия.
2. Внедрение установок ультрафиолетового облучения воды.
3. Создание систем управления водоснабжения отдельных районов.

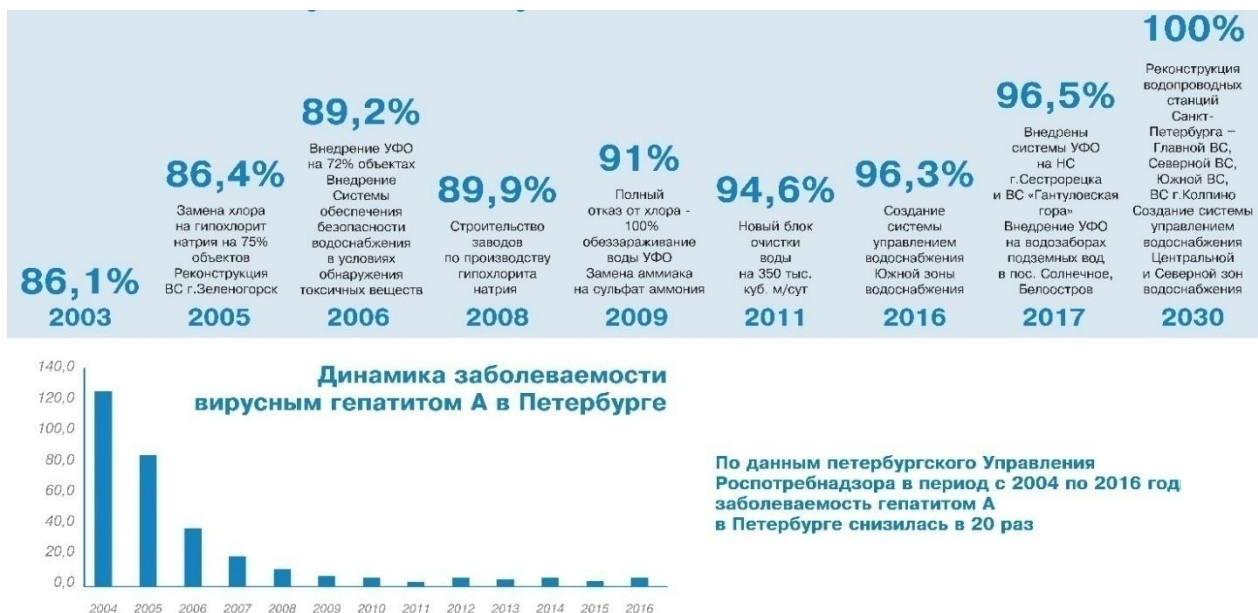


Рис.2. Динамика улучшения качества питьевой воды в распределительной сети

Основными проблемами системы водоснабжения являются:

1. Отсутствие дополнительных запасов воды для развития близлежащих территорий.
2. Отсутствие на некоторых существующих водопроводных скважинах систем доочистки воды.
3. Высокий уровень износа некоторых участков водоводов.
4. Отсутствие в некоторых районах гарантированного водоснабжения.

5. Моральное и физическое устаревание сооружений водопроводных станций – применение одноступенчатой технологии водоподготовки.

6. Экологическая нагрузка на окружающую среду – сброс неочищенных промывных вод.

7. Дефицит мощностей водопроводных очистных сооружений при потенциальном расширении зоны влияния станций – фактор, сдерживающий развитие территорий

При анализе существующих проблем были выработаны приоритетные задачи:

1. Реконструкция насосной станции 1-го подъема северной водопроводной станции.

2. Реконструкция водоводов подачи сырой воды на сооружения водоподготовки.

3. Строительство блока водоподготовки со строительством и реконструкцией резервуаров чистой воды.

4. Строительство новых магистральных водоводов.

5. Внедрение на станции водоподготовки блока ультрафиолетового обеззараживания.

6. Строительство новых водоочистных сооружений.

Немаловажным фактором работы систем водоснабжения является экологическое влияние на окружающую среду. В ходе утверждения новых норм по сбросу воды возникла необходимость внедрения новых схем водоподготовки [5, 6]. Одним из таких решений стало внедрение двухступенчатой технологии водоподготовки Северной водопроводной станции (рис.3).

### Схема двухступенчатой технологии водоподготовки

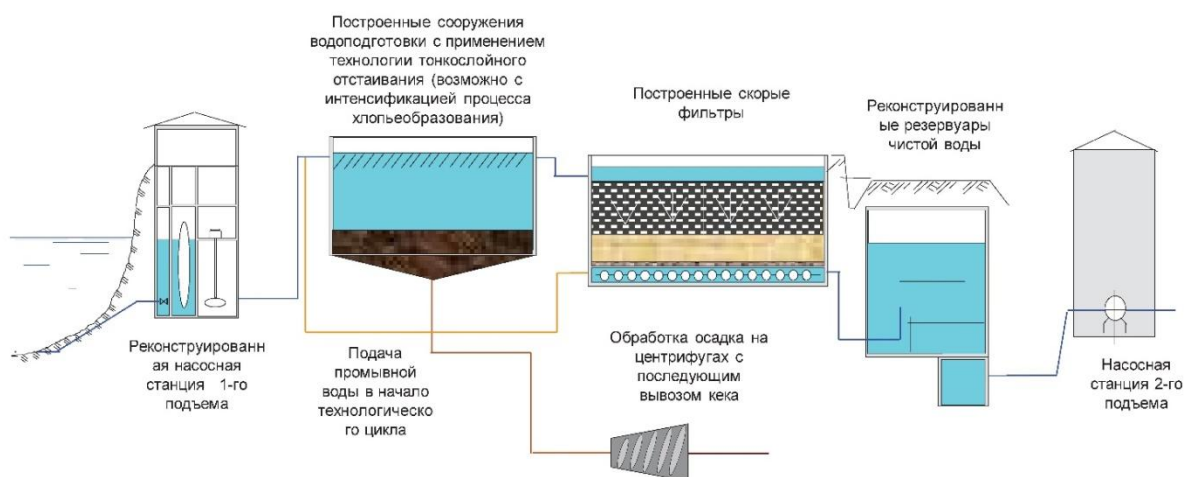


Рис.3. Схема двухступенчатой технологии водоподготовки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с возросшим водопотреблением и ужесточением гигиенических требований к качеству питьевой воды возникает необходимость реконструкции существующих систем водоснабжения крупных городов. При этом следует учитывать актуальные возможности систем по напору и расходу воды у потребителя.

Основными факторами, побуждающими к модернизации таких систем, являются экологическая безопасность и гарантированное водообеспечение потребителей.

## Список используемых источников

1. Лямаев Б.Ф., Кириленко В.И., Нелюбов В.А. Системы водоснабжения и водоотведения зданий: учеб. пособие для студентов ВУЗов. – СПб.: Политехника, 2012.

2. *Кириленко В.И.* Водоснабжение: учебник. – СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2018.
3. Методика оптимизации систем водоснабжения / *С.В. Саркисов, П.А. Путилин, В.С. Ивановский, В.С. Игнатчик* // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2015. – Вып. 649. – С. 181–187.
4. *Саркисов С.В., Путилин П.А., Обвинцев В.А.* Повышение надежности и энергосбережения систем водоснабжения путем оптимизации напоров в распределительной сети // Водосбережение, мелиорация и гидротехнические сооружения как основа формирования агрокультурных кластеров России в XXI веке: сб. докладов XVIII Международной научно-практической конф. – 2016. – С. 141–145.
5. Методика оптимизации систем водоснабжения / *С.В. Саркисов, П.А. Путилин, В.С. Ивановский, В.С. Игнатчик* // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2015. – Вып. 649. – С. 181–187.
6. *Саркисов С.В.* Насосы и воздухоудные станции: учебник. – СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2017.

А.Е. Радаев\*,  
кандидат техн. наук,  
кандидат экономических наук, доцент;  
М.М. Числова\*  
\*ФГАОУ ВО «СПбПУ»

## ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье рассматриваются вопросы обоснования характеристик процесса выполнения ремонтных работ объектов военной инфраструктуры. Разработана оптимизационная модель для обоснования последовательности выполнения ремонтных работ в рамках объектов военной инфраструктуры по критерию минимизации общих суммарных затрат на задержку освоения соответствующих фронтов работ. Произведена реализация модели на практическом примере, по результатам соответствующей процедуры сделан вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

Ключевые слова: объект военной инфраструктуры, ремонт инженерных систем, модель реконструкции, последовательность выполнения ремонтных работ, модель оптимизации ремонта.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день более 85% объектов военной инфраструктуры общего назначения (ОВИОН) составляют объекты, возведенные в период с 1941 по 1990 год. Вследствие большого сокращения строительства новых объектов и износа уже существующих происходит прогрессирующее увеличение объемов необходимых текущих и капитальных ремонтов [8]; именно поэтому особое значение приобретают задачи обоснования характеристик процесса выполнения ремонтных работ для объектов ОВИОН в части очередности освоения соответствующих фронтов работ [4]. При этом результаты анализа научной и учебно-методической литературы по соответствующей тематике – в области обоснования характеристик структуры технологического процесса, реализуемого над совокупностью объектов (в части очередности выполняемых операций), как в сфере организации производства, так и в сфере организации строительства – позволяют сделать следующие основные выводы:

- в работах, относящихся к сфере организации производства [5–7], представлены инструментальные средства, обладающие относительно невысокой практической значимостью ввиду требования по точности как неотъемлемой характеристики технологического процесса;
- работы, относящиеся к сфере организации строительства [1–3], содержат информацию об инструментальных средствах, не гарантирующих в общем случае нахождение оптимальной последовательности выполнения работ и обуславливающих высокую трудоемкость решения задачи при наличии сложной структуры анализируемого технологического процесса.

Вышеуказанные результаты определили целесообразность разработки оптимизационной модели для обоснования последовательности выполнения ремонтных работ на объектах ОВИОН.

### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В модели рассматривается совокупность фронтов работ – объектов ОВИОН, по отношению к которым выполняются процедуры ремонта с применением различных организационно-технологических ресурсов (рис. 1). При этом процесс освоения каждого отдельного фронта работ (ремонта объекта ОВИОН) описывается последовательностью этапов, в рамках

каждого из которых выполняются ремонтные работы определенного вида (каждый вид работ осуществляется однократно по отношению к определенному фронту работ – объекту ОВИОН). Также важно отметить, что в определенный момент времени ремонтные работы отдельного вида могут выполняться только по отношению к одному фронту работ (на одном фрагменте ОВИОН), каждый отдельный вид работ может одновременно выполняться на одном фронте работ.

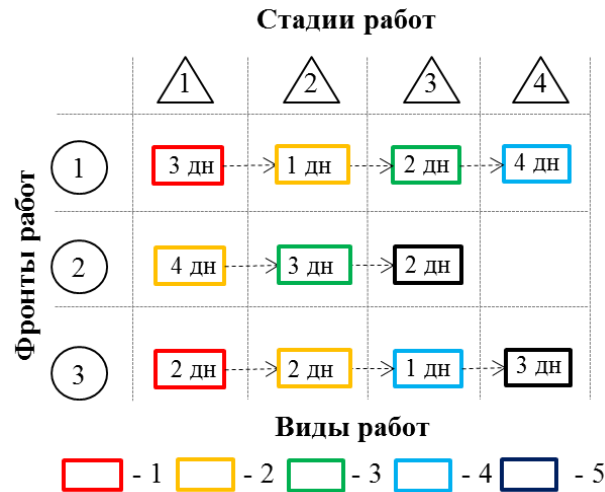


Рис.1. Структура объекта моделирования

Основными принципами построения модели явились следующие:

- целевая функция описывает минимальные суммарные условные затраты на задержку освоения фронтов работ в рамках технологического процесса ремонтных работ (минимизируются); указанные затраты по отношению к каждому отдельному фронту работ (объекту ОВИОН) определяются как сумма произведений задержек выполнения работ различных видов на соответствующие коэффициенты преобразования (удельные затраты);
- неизвестными переменными модели являются порядковые номера освоения фронтов для различных видов работ; задержки освоения фронтов для различных видов работ; моменты времени начала освоения фронтов для различных видов работ; индикаторы целесообразности выполнения определенных фронтов работ после окончания выполнения остальных фронтов работ в разрезе отдельных видов соответствующих процессов;
- взаимосвязь между вышеописанными переменными описывается основными ограничениями в формате следующих выражений:

$$u_{ik} - u_{jk} + 1 - (1 - y_{ij}^k) \cdot m_k \leq 0, \quad i, j, k : \omega_{ik} = 1, \omega_{jk} = 1; \quad (1)$$

$$i, j \in \{1, 2, \dots, m\}; i \neq j, k \in \{1, 2, \dots, z\}$$

$$T_{ik}^s - T_{jk}^s + t_{ik} - (1 - y_{ij}^k) \cdot \tau \leq 0, \quad i, j, k : \omega_{ik} = 1, \omega_{jk} = 1, \quad (2)$$

$$i, j \in \{1, 2, \dots, m\}; i \neq j, k \in \{1, 2, \dots, z\}$$

где  $u_{ik}$  – порядковый номер освоения фронта работ  $i$  в рамках работы вида  $k$ ;

$\Delta_{ik}$  – задержка освоения фронта работ  $i$  на работе вида  $k$ ;

$y_{ij}^k$  – индикатор целесообразности освоения фронта работ  $j$  после окончания освоения фронта работ  $i$  на работе вида  $k$ ;

$m_k$  – количество фронтов работ, выполняемых в рамках работы вида  $k$  ;

$\omega_{ik}$  – индикатор соответствия работы вида  $k$  фронту работ  $i$  ;

$m$  – количество фронтов работ;

$T_{ik}^s$  – момент времени начала освоения фронта работ  $i$  в рамках работы вида  $k$  ;

$t_{ik}$  – длительность выполнения работы вида  $k$  по отношению к фронту работ  $i$  ;

– возможность однократного освоения каждого фронта и его вхождения в оптимальную последовательность в разрезе отдельных видов работ определяется дополнительными функциональными ограничениями по отношению к переменным  $y_{ij}^k$ .

Таким образом, особенностью разработанной модели явилось соответствие каждого отдельного вида работ квадратной матрице (ранг матрицы соответствует общему количеству фронтов, осваиваемых в соответствии с рассматриваемой категорией работ) логических переменных  $y_{ij}^k$  с отсутствием элементов на главной диагонали. Указанная особенность, с одной стороны, обуславливает относительно большое количество переменных модели (т. е. сложность структуры), но, с другой стороны, достоинством модели является линейность, а следовательно, и возможность ее реализации с использованием стандартных вычислительных алгоритмов в средах *Microsoft Excel* и *Matlab*.

## РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Для оценки адекватности разработанной модели была произведена ее реализация на практическом примере задачи обоснования характеристик очередности освоения фронтов работ (зданий и сооружений военных городков) при проведении в них различных видов ремонтных работ. Матрица продолжительностей ремонтных работ при текущем и капитальном ремонтах объектов ОВИОН отображена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица продолжительностей ремонтных работ (дни)

№ п/п	Вид работы $k$	Фронт работы $i$					
		Учебное здание	Столовая	Казарма	Поликлиника	Здание штаба	Жилое здание
1	Ремонт кровли	0	14	0	12	10	10
2	Ремонт чердачных помещений	0	0	7	16	14	0
3	Ремонт фасадов	21	0	14	18	0	23
4	Ремонт подвальных помещений	15	22	15	0	12	10
5	Ремонт покрытий дворовых территорий	0	12	0	10	5	0
6	Ремонт инженерных систем	20	0	18	0	15	12

Важно отметить, что при расчете суммарных условных затрат на задержку освоения фронтов работ использовались идентичные друг другу коэффициенты преобразования (иными словами, фронты работ являлись полностью равнозначными с точки зрения удельных затрат на задержку их освоения).

Для реализации оптимизационной модели использовалась программная среда *Matlab*; соответствующие результаты в форме диаграммы Гантта представлены на рис. 2.

Необходимо отметить, что в разрезе отдельных видов работ последовательность освоения фронтов работ меняется при сравнении хронологически смежных этапов. Тем не менее продолжительность работ в найденном решении минимальна и соответствует 107 дням.

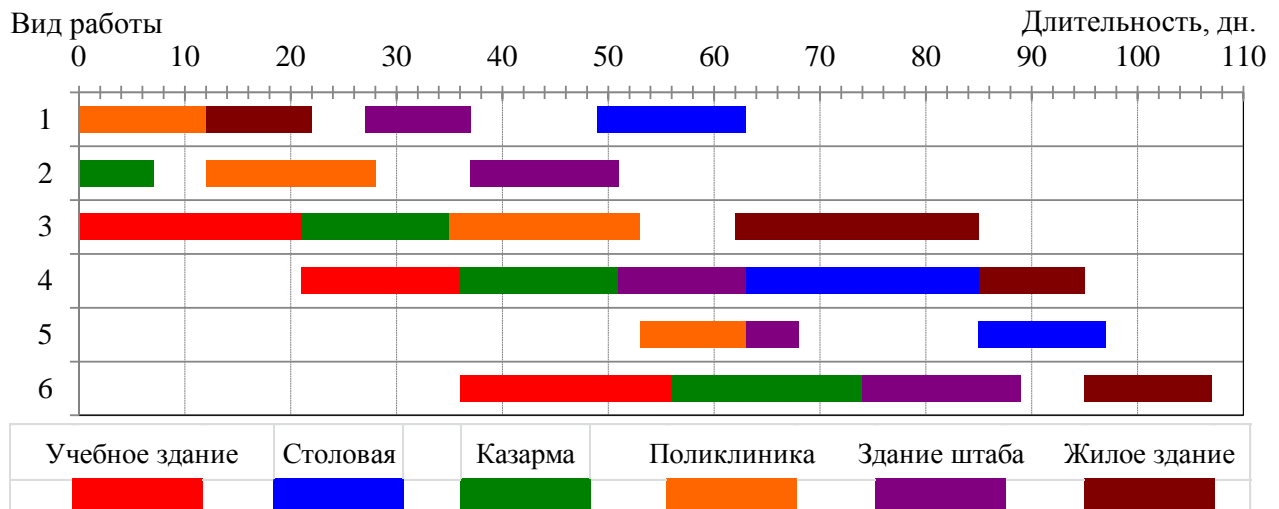


Рис.2. График моделируемого процесса выполнения работ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе реализации оптимизационной модели на практическом примере сделан вывод о соответствии полученных результатов реальным условиям выполнения ремонтных работ в рамках объектов ОВИОН. Это, в свою очередь, свидетельствует о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

## Список используемых источников

1. Аленичева Е.В. Организация строительства поточным методом: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 80 с.
2. Афанасьев В.А., Афанасьев А.В. Поточная организация работ в строительстве: учеб. пособие. – СПб.: СПбГАСУ, 2000. – 152 с.
3. Болотин С.А., Нефёдова В.К. Комбинаторная оптимизация в программах управления проектами // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 6. – С. 47–51.
4. ВСП 13-02-04 (МО РФ). Руководство по технической эксплуатации жилищного фонда и общевоинских зданий и сооружений Министерства обороны РФ. Ч. I. Жилищный фонд.
5. Глухов В. В. Менеджмент: учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб.: Питер. 2008. – 608 с.



6. *Кобзев В.В., Радаев А.Е., Кривченко А.С.* Математическое моделирование производственных систем: моногр. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 239 с.
7. *Козловский В. А.* Производственный менеджмент: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 574 с.
8. *Хрусталёв Е.Ю.* Состав, структура, состояние и перспективы использования объектов военной инфраструктуры // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2013. – №24. – С. 25–31.

С.В. Саркисов,

*доктор техн. наук, доцент*

ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулева;

М.А. Сеньюкович

Управление эксплуатации специального объекта, Московская обл., р. п. Монино;

А.А. Сорокин

ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулева

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье рассматривается анализ существующих систем водоснабжения жилых кварталов и военных городков, подтверждающий необходимость модернизации и оптимизации существующих систем водоснабжения, как их структуры, так и режимов работы, в связи с возросшим водопотреблением.

Ключевые слова: Оптимизация водоснабжения, реконструкция водоснабжения, водоочистка, высокопористые зернистые материалы, фильтрование, осветление.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы оптимизации систем водоснабжения зданий и сооружений на стадии проектирования, как и при их модернизации, являются актуальной технологической задачей. Особенностью современного этапа развития и модернизации систем водоснабжения являются возросшие требования к надежности и качеству функционирования систем водоподготовки в условиях повышения загрязненности различных типов водоисточников.

### ОПТИМИЗАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В области водоснабжения в настоящее время наметилась динамика, способствующая созданию при реконструкции объектов МО РФ максимально экономически эффективных систем водоснабжения [11].

**Во-первых**, Департаментом эксплуатационного содержания и обеспечения коммунальными услугами воинских частей и организаций, главными и центральными управлениями Министерства обороны Российской Федерации проводятся мероприятия по приведению показателей надежности, безопасности и энергосбережения при эксплуатации систем водоснабжения в соответствие современным высоким требованиям:

- федеральных законов РФ и подзаконных актов;
- приказов Министра обороны РФ, методических руководств и рекомендаций.

Указанные тенденции характерны и для систем водоснабжения городов и муниципальных образований Российской Федерации, в которых централизованная система управления развитием инженерной инфраструктуры перешла с уровня государства на региональный уровень, что связано со вступлением в силу законов № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении», № 210-ФЗ «Об основах регулирования тарифов организаций коммунального комплекса», постановления № 502 Правительства РФ «Об утверждении требований к программам комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры поселений, городских округов», приказа Минрегиона РФ № 204 «Методические рекомендации по разработке программ комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципальных образований» и др. В итоге произошли следующие изменения:

– определен перечень целевых показателей развития коммунальной инфраструктуры, к которым в том числе относятся показатели надежности по системам ресурсоснабжения, степени охвата потребителей приборами учета и эффективности производства (удельные расходы);

– выявлены обеспеченные источники финансирования, которые необходимы для реализации инвестиционных проектов по достижению целевых показателей. К ним относятся плата за подключение, инвестиции и целевое финансирование.

Однако в отличие от муниципальных образований и городов в Минобороны России из трех источников финансирования развития имеется только один – целевое финансирование.

**Во-вторых**, в последние годы, за счет массовой установки приборов учета воды, появления экономичной бытовой техники и введения многотарифного расчета за энергоснабжение, режим водопотребления сильно поменялся [12].

В то же время требования федеральных законов и постановлений Правительства, а также современная нормативно-техническая документация определяют необходимость на этапе проектирования проводить моделирование работы систем водоснабжения в различных режимах эксплуатации, применяя актуальные графики потребления воды. Однако действующими нормами при реконструкции систем водоснабжения не учтены особенности военных объектов, к которым относятся: малые размеры, территориальная отдаленность и строгое разнесение казарменно-жилых и специальных объектов; структура распорядка службы и быта личного состава воинских частей.

**В-третьих**, в последнее время в системах водоснабжения началось широкое внедрение комплектных насосных станций, включающих в себя и автоматику управления. Накоплен опыт их эксплуатации, но справочные данные по показателям надежности до настоящего времени не определены, что ограничивает возможности проектных организаций по обоснованию решений, заложенных в инвестиционных проектах и направленных на достижение целевых показателей по надежности и энергоэффективности.

**В-четвертых**, в соответствии с требованием отраслевого закона № 416-ФЗ от 07.12.2011 г. «О водоснабжении и водоотведении» введено обязательное техническое обследование систем водоснабжения для [12] следующих целей:

– отражения показателей технико-экономического состояния, включая показатели физического износа и энергетической эффективности;

– сравнения фактических значений показателей надежности, качества, энергетической эффективности с фактическими значениями этих показателей объектов, эксплуатируемых организациями, использующими наилучшие существующие (доступные) технологии.

**В-пятых**, впервые на законодательном уровне в главном отраслевом законе № 416-ФЗ от 07.12.2011 г. «О водоснабжении и водоотведении» отражено, что особенности водоснабжения объектов обороны и безопасности водоотведения устанавливаются Правительством РФ. При этом фактическое отнесение объектов к сфере обороны осуществляется при подготовке соответствующей схемы территориального планирования согласно «Положению о составе, порядке подготовки и согласования проекта схемы территориального планирования Российской Федерации в области обороны страны и безопасности государства, а также порядке внесения изменений в такую схему». В таких случаях проект схемы и материалы по его обоснованию размещаются в федеральной информационной системе. Кроме того, уведомление об обеспечении доступа к ним направляется в уполномоченные федеральные органы исполнительной власти.

В Российской Федерации, в том числе для обеспечения нужд Министерства Обороны, количество водопроводов из поверхностных источников составляет 2118. Из них 28,3% не имеют необходимого комплекса очистных сооружений, а на 16,2% водопроводов отсутствуют обеззараживающие установки. Наиболее сложная ситуация сложилась в Чеченской Республике, Тюменской области, Якутии, Дагестане. В этих регионах до 77,3% водопроводов не обеспечено системами очистки и обеззараживания воды.

Доля проб воды из водопроводной сети, не соответствующей гигиеническим нормам, составляет: по санитарно-химическим показателям – 16,9% и микробиологическим – 4,6%. Низкое качество воды по микробиологическим показателям приводит к вспышкам инфекционных заболеваний, что в последние годы отмечалось в 19 субъектах Российской Федерации [1, 7].

Рассмотрим решение данной задачи на примере способов очистки питьевой воды. Многочисленные способы очистки питьевой воды можно классифицировать по следующим группам: приведение органолептических свойств воды (запах и привкус, цвет, мутность) в соответствие с нормативными документами; обеззараживание или приведение в норму микробиологических и паразитологических показателей (хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое облучение и др.); улучшение минерального состава (рН, общая минерализация, общая жесткость и др.) [2, 6].

В качестве основного способа осветления на заключительном этапе обработки воды по-прежнему применяется фильтрование. Данный способ позволяет выделить из обрабатываемой воды и коллоидные примеси, помимо диспергированных примесей.

Осветление питьевой воды играет огромную роль в приведении органолептических показателей до допустимых значений, установленных требованиями санитарных норм [13], в которых утверждено, что количество взвешенных веществ в питьевой воде не должно превышать 1,5 мг/л.

Наиболее распространенные очистные сооружения для осветления воды (рис. 1) – это скорые фильтры с зернистой загрузкой, скорость фильтрования которых составляет от 5 до 12 м/ч. Фильтрующий слой выполняют из отсортированного материала, чаще всего – речного кварцевого песка крупностью от 0,5 до 2,0 мм [2, 8].

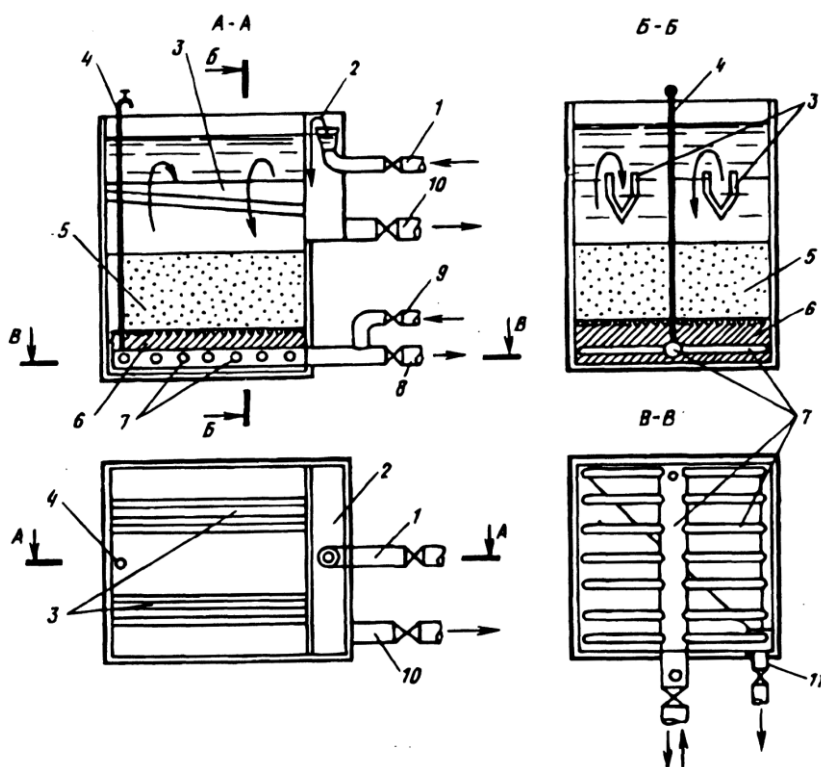


Рис. 1. Схемы очистных сооружений для осветления воды:  
 1, 8 – подача исходной и отвод фильтрованной воды; 2 – боковой карман;  
 3 – желоба; 4 – воздушник; 5, 6 – слой фильтрующей (песок, керамзит) и  
 поддерживающей (гравий, щебень) загрузки; 7 – распределительная дренажная система;  
 9, 10 – подача и отвод промывной воды; 11 – опорожнение фильтра

Для эффективной работы и увеличения сроков эксплуатации очистных сооружений, необходимо проводить оптимизацию и реконструкцию системы водоснабжения, в том числе сооружений для очистки питьевой воды. В большинстве случаев при проведении мероприятий реконструкции фильтровальных сооружений предусматриваются в рациональном конструировании фильтрующего слоя:

- 1) изменение крупности и высоты фильтрующего и поддерживающего слоя;
- 2) использование высокопористых зернистых материалов.

В ходе капитальной реконструкции фильтров с полным изменением конструкции дренажно-распределительной системы реализуется способ изменения крупности и высоты фильтрующего и поддерживающего слоя. Непрерывное распределение воды по всей площади может быть выполнено только с помощью дренажной системы, которая изготовлена из специальных пористых материалов и имеет величину пор меньшую, чем диаметр зерен в фильтрующем слое. Технологические показатели работы очистного сооружения с применением пористых материалов достаточно высоки, при этом необходимо обеспечить, чтобы загрузка хорошо промывалась, а остаточные загрязнения не превышали 1% [5, 10].

Для повышения производительности скорых фильтров нашли широкое применение в качестве загрузки дробленые высокопористые материалы, такие как шунгзит и керамзит. Такую же загрузку можно успешно использовать в качестве верхнего слоя взамен антрацита при проведении мероприятий реконструкции двухслойных фильтров [3, 4, 9].

Наличие количества взвешенных веществ – один из важных органолептических показателей питьевой воды, поэтому для эффективной очистки воды и предотвращения заболеваемости личного состава Вооруженных сил и гражданского населения Российской Федерации необходимо проведение оптимизации и реконструкции очистных сооружений и трубопроводов системы водоснабжения на субъектах Российской Федерации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что в области водоснабжения возможны изменения, способствующие созданию экономически эффективных систем водоснабжения. Все это необходимо в связи с возросшим водопотреблением и ужесточением гигиенических требований к качеству питьевой воды с учетом актуальных возможностей систем.

## Список используемых источников

1. Орлов А.В. Реконструкция систем водоснабжения. – М.: АСВ 2017 – 205 с.
2. Сомов М.А., Квитка Л.А. Водоснабжение. – М.: ИНФРА-М, 2007 – 282 с.
3. Методика оптимизации систем водоснабжения / С.В. Саркисов, П.А. Путилин, В.С. Ивановский, В.С. Игнатчик // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2015. – Вып. 649. – С. 181–187.
4. Саркисов С.В., Путилин П.А., Обвинцев В.А. Повышение надежности и энергосбережения систем водоснабжения путем оптимизации напоров в распределительной сети // Водосбережение, мелиорация и гидротехнические сооружения как основа формирования агрокультурных кластеров России в XXI веке: сб. докладов XVIII Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 141–145.
5. Методика оптимизации систем водоснабжения / С.В. Саркисов, П.А. Путилин, В.С. Ивановский, В.С. Игнатчик // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2015. – Вып. 649. – С. 181–187.
6. Влияние обеззараживания воды способом хлорирования на организм человека / В.И. Кириленко, А.А. Сорокин, М.А. Сеньюкович, А.А. Самсонов // Актуальные научные пробле-

мы военных исследований: сб. науч. тр. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. – 2019. – С. 255–263.

7. *Лямаев Б.Ф., Кириленко В.И., Нелюбов В.А.* Системы водоснабжения и водоотведения зданий: учеб. пособие для студентов ВУЗов. – СПб.: Политехника, 2012.

8. *Кириленко В.И.* Водоснабжение: учебник. – СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2018.

9. Методика оптимизации зональных систем водоснабжения / *Ф.В. Кармазинов, В.С. Игнатчик, С.В. Саркисов* и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – №2. – С. 64–70.

10. *Саркисов С.В.* Вероятностно-технологический метод прогнозирования изменения параметрических характеристик функционирования системы водоснабжения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 125–30.

11. *Булат Р.Е., Игнатчик В.С., Саркисов С.В.* Направления научно-исследовательских работ военного института (инженерно-технического) на современном этапе развития // Военный инженер. – СПб., 2017. – № 1 (3). – С. 29–32.

12. *Игнатчик В.С., Саркисов С.В., Обвинцев В.А.* Исследование коэффициентов часовой неравномерности водопотребления // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – №2 (70). – С. 27–39.

13. СанПин 2.1.4.1116-02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества.

Automated calculation and design of regularly core constructions (mesh plates) / M.S. Abu-Khasan, V.V. Egorov, L.R. Kuprava, A.S. Sakharov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 7–12.

Spatial core constructions of coatings are used for more efficient industrial production of building constructions, which makes it possible to reduce the costs of mass production, specialization of production and rationality of design solutions..

*Key words: automated calculation, design, core structures, mesh plates, structural plates, verification of the bearing capacity of elements.*

Velichkin V.Z., Petrochenko M.V., Pтуhina I.S. Matrix-network model of planning complex work packages // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 13–17.

The article discusses the possibility of forming a model for the construction of large and unique buildings and structures, which allows combining several separate construction and technological flows and separate separate work complexes into a single technological process. Such a process can be technologically linked and coordinated in the movement of various technical and labor resources along dedicated fronts of work. An example of the formation and calculation of the matrix-network model of the construction of a separate object is given. Interpretation of the model form for monitoring and control is shown.

*Key words: scheduling, network planning, critical path method, matrix network planning, construction management.*

Gamayunova O.S. Entry into force of regulations in the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 18–28.

Currently, many residential apartment buildings operated on the territories of military towns. A significant part of them doesn't meet modern regulatory requirements for the level of thermal protection of external enclosing structures. Such buildings for their further operation and improvement of energy efficiency require repair (reconstruction). A model and methodology for evaluating the comparative effectiveness of various types of heaters that provide modern requirements for the thermal protection of the old dwelling stock are developed. It uses the criterion of minimum of the discounted payback period of necessary expenses. The obtained theoretical results are illustrated by a calculation example.

*Key words: military town, residential buildings, old dwelling stock, energy efficiency, insulation, payback period.*

Gusev N.N., Kucherenko A.O. The influence, at special loads and effects, the stress-strain state evaluation of bearing capacity of constructions with special structures // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 29–37.

The article deals with the issues related to the need to take into account the formed stress-strain state of building structures of special structures subjected to special loads and influences during their examination. A new approach to the assessment of the bearing capacity of such structures has been developed. Recommendations for improving existing methods of inspection of special structures with formed stress-strain state for the entire period of their operation are proposed. The necessity of improving the means of monitoring the maximum and minimum values of the parameters of the stress-strain state of building structures at all stages of the life cycle of the object, including those formed under the action of emergency loads.

*Key words: inspection of technical condition, assessment of bearing capacity, stress-strain state, emergency impact, string converters, strain sensors.*

The method of determining the optimal spatial-constructive decisions of the special structures at the preliminary design stage / Y.N. Gusenitsa, Y.A. Zagrutdinov, S.U. Karasev, S.A. Machnev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 38–42.

The article describes new approaches to the choice of optimal design solutions in the design of special facilities. The method of optimization of volume-constructive decisions of special constructions in which the indicator and criterion of efficiency of development of the basic variant of the bearing skeleton and its basic structural material taking into account providing the required security is given is presented

*Key words: special construction, security, design phase, design solution.*

Esenina N.A., Zaycev A.A., Karasev Y.S. Ensuring safe operation and protection of hydraulic facilities and structures from ice abrasion // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 43–47.

The paper contains formulation and test results of experimental studies about parameters of ice abrasion of concrete samples with classes B30 and B60. A brief description of the test conditions at the laboratory facility and test results are presented in the article.

*Key words: ice abrasion, concrete, experimental facility.*

Kvitko A.V., Orekhov A.V., Petrov K.V. Scientific and experimental substantiation of optimal parameters of the beams spans military railway bridges of composite materials // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 48–52.

For the successful solution of a complex of tasks on high-speed restoration of railway bridges, it is necessary to have on supply new improved designs of bridge property, from modern innovative construction materials. The article describes the sequence of stages in the development of scientific and experimental justification of the optimal parameters of beams of superstructures of military railway bridges made of composite materials.

*Key words: superstructures, transport facilities, composite materials.*

Klepov A.V., Chernobaev A.J., Scherbina I.S. Justification of proposals for the development of the program maintenance and repair of ground technological equipment of rocket and space // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 53–60.

The paper analyzes the problem of justifying the choice of maintenance strategies and remount (MRO) of the complex technical systems, which are a part of the ground processing equipment rocket and space complexes.

The substantial model of functioning of the complex technical system (STS) is developed. Take into account the influence of various factors on the efficiency of CE functioning.

The problem of analysis of MRO Strategies from the point of view of the influence given in the model of the fact is formulated moat on the effectiveness of their application. Approaches to solving the problem using the method are proposed. Analysis of hierarchies, the hierarchical structure of criteria for selection of MRO Strategies is presented.

*Key words: maintenance strategy, repair, failure, complex technical system.*

Kuzhekin I.N., Surin D.V. Model blast and shrapnel damage of mobile equipment when exposed to conventional weapons // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 61–70.

The article presents scientific and methodical provision of assessment of joint damaging action of air shock wave and of the fragments produced by the explosion of precision-guided munitions, high-explosive type on poorly protected mobile weaponry. The defeat of such objects is considered



taking into account their orientation relative to the epicenter of the explosive explosion. This approach provides a more accurate mathematical calculation of the possible degrees of destruction of objects-targets of the military complex.

*Key words: explosive effects, fragmentation defeat, survival, extent of injury, the law of destruction.*

Ladyshkin G.S., Fedorenko A.V. An algorithm for ensuring the survivability of stationary objects under the influence of conventional weapons // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 71–77.

The article deals with the order of application of the algorithm to ensure the survivability of a stationary or sedentary object, special attention is paid to the disclosure of methods for evaluating the effectiveness of concealment measures as part of the disguise.

*Key words: the integrated system of counteraction to means to enemy weapons, the persistence of the object, the efficiency hide.*

Mandritsa D.P. The analysis of influence of not elastic deformations on residual deflections of bearing designs of special constructions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 78–83.

Results of numerical research of residual deformations and movings are presented at an estimation of a residual resource of starting constructions. The factor of increase of the residual deformations is defined, allowing to define limiting value of cycles of loading bearing designs of special constructions.

*Key words: Special constructions, residual movings, rigidity of section, the inertia moment.*

Mandritsa D.P. Method of restoration of operational suitability of starting constructions after emergency loadings and influences // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 84–91.

In article questions of increase of a residual resource of starting constructions after emergency loadings and influences are considered. It is offered ways of restoration (strengthening) of bearing designs of starting constructions on the basis of the basic indicators of restoration: service conditions of starting constructions, adaptability to manufacture and profitability of ways of restoration.

*Key words: Starting constructions, emergency loadings and influences, operational suitability, restoration model.*

Mironov A.N., Soldatenko T.N. Entry into force of regulations in the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 92–96.

The article is devoted to the development of a comprehensive indicator of the effectiveness of the project version of the construction and subsequent operation of the building. It is proposed to consider the components of this generalized indicator as the results of expert opinions. It is allowed to use both quantitative values of indicators in the form of fuzzy numbers and verbal form of statements of specialists, which are transformed into linguistic variables. The necessary transformations are carried out using fuzzy logic. The results are explained by a computational example.

*Key words: the integrated indicator of efficiency of project, fuzzy logic, function of accessory, linguistic variable.*

Soldatenko V.S., Tyurin E.A. Entry into force of regulations in the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 97–102.

The article is devoted to the development of a model of decision-making on the composition of operational activities based on the results of the survey of the building. It is proposed to use as a de-

cisive rule the criterion of information value of the characteristics of the parameters of the technical condition of the building. The necessary transformations are carried out taking into account the conclusions of the information theory and Bayes theorem. The results are explained by a computational example.

*Key words: a survey of the building, information value of the parameter, technical condition.*

Starchukov D.S., Shmakov R.B. The theoretical approach to working life definition military buildings and special constructions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 103–110.

The theoretical approach is led to definition of working life of buildings and the constructions, allowing theoretically to calculate periodicity of preventive maintenances. The formula of calculation of the between-repairs period which allows to co-ordinate periodicity flowing and major repairs with intensity of physical deterioration of buildings (constructions), and also their separate structural components is offered. It is revealed that periodicity of repairs should be appointed that will provide economic benefit in comparison with when it is set directive and, naturally, repairs are made more often, and amounts of works are overestimated.

*Key words: working life, the military buildings, special constructions, system of technical operation.*

Absalyamov D.R., Polyansky S.A., Trudov A.V. Modeling the process of extending the assigned indicators of the recourse systems formalized description of failures and the choice of the minimum set of cinerolled signs // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 111–119.

An approach is proposed to extend the assigned indicators of the resource of engineering systems for radar stations based on the results of a proactive analysis of the technical condition. The technique of analyzing the technical state in this case includes a formalized description of failures, in which the training procedure is combined with the procedure for selecting the minimum set of monitored features. The solution of the problem of choosing the minimum set of controlled features is made on basis of the properties of orthogonal vector systems.

*Key words: studying procedure, refusal, controlled characteristic, educational choice, recurrent relation, orthonormal basis.*

Avsiukevich D.A., Tupitsin U.E., Shishkin E.V. Mathematical model of total costs for reconstruction of water supply systems of space-rocket complexes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 120–123.

The article is devoted to the problem of structural-parametric optimization of water supply systems of rocket and space systems at the verbal and formal levels. As a criterion of optimization it is proposed to use the minimum total cost of reconstruction. Limitations and boundary conditions are structural and functional features of water supply systems and specified requirements for the modes of operation.

*Key words: structural-parametric optimization, water supply systems, reconstruction, total costs*

Zaharova E.A., Baranovskij A.M. Model of evaluating the readiness of complex technical systems taking into account the indicators of diagnosing quality // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 124–132.

The paper proposed and investigated a model for evaluating a complex reliability indicator (availability factor), taking into account indicators and diagnostic programs. The model allows to take into account the expanded composition of technical conditions and verification errors.

*Key words: availability factor, diagnostics, verification errors, diagnostic accuracy, markov model.*

Blinov A.V., Mysatov V.I., Polykov V.A. Design of wastewater treatment plants at the facilities of the Ministry of defense of the Russian Federation, located in St. Petersburg garrison // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 133–138.

The article discusses the existing and future legislative framework governing the emission of wastewater into the hydrosphere, the requirements for wastewater treatment plants of military towns of the St. Petersburg garrison. The indicators of the emission of untreated wastewater into the water body on the example of a military camp, with a staff of five thousand people, the most reliable schemes of wastewater treatment are proposed.

*Keywords: wastewater Treatment, design of treatment plants, requirements for treatment, wastewater indicators.*

Butyrin A V., Tarasov AG., Tsvetkov A Y. Neuro fuzzy model rating scale parameters of the technical condition of the automated systems of preparation and launch of space rockets // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 139–145.

The article considers the variant of construction of neuro fuzzy scale estimates of the parameters of the technical condition and the tendencies in their change. The proposed scale can be used to predict the technical condition of automated systems for the preparation and launch of space rockets.

*Key words: technical condition, artificial intelligence, fuzzy time series, neural networks*

Buyakov S.N., A.N. Mirgorodskiy, D.A. Alzofon, Evaluation of the characteristics of the building to ensure the required operating conditions products military equipment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 146–151.

The article deals with the construction as a means of operation of military equipment, designed to create the required operating conditions. The readiness of the structure to provide and maintain the required temperature in the premises is evaluated depending on the thermal characteristics of the enclosing structures. Functional dependences of time of refusal of products of military equipment on ambient temperature and level of thermal insulation of the protecting designs are presented.

*Key words: construction, means of operation, products of military equipment, availability factor, failure time, temperature regime, thermal characteristics, thermal insulation of enclosing structures, heating system.*

Vishnyakov E.P., Ilin A.V., Shvaykovskiy M.A. Selection of parameters of the circuit shuntable switch of DC inductive current // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 152–156.

The analysis of the parameters of the shunt disconnecting inductive load of direct current, the dependence of the switching voltage on the structure and parameters of the shunt, the characteristics of the process of disconnecting the inductive load by shunting. It is established that in the process of shutdown, close to optimal, the switch should behave like a sequential rC-circuit. The parameters of the shunt circuit depend both on the parameters of the load  $r$  and  $L$ , and on the capacitance of the capacitor installed in the shunt circuit. Current suppression before switching voltage minimization is realized due to the priority of minimizing leaked charge. Offered instead of rigid restrictions on the characteristics of the process of switching off, softer, integral constraints. The type of voltage found under these conditions allows us to determine the structure of the shunt and the parameters of its elements.

*Key words: switching voltage, shunting method, shunt parameters, DC switch, transient process.*

Voronin A.E., Peshehonov N.E. Taking into account the peculiarities of the functioning of a special object when rationing reliability of its power supply system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 157–161.

The issues concerning the selection of the reliability index for the valuation of the electricity system in the facility. The analysis of SES reliability assessment by various reliability indicators for certain periods of time is carried out. The dependence of the coefficient of operational readiness on the coefficient of readiness with changes in the intensity of recovery is shown.

*Key words: features of a special object, modes of operation, reliability index, recoverability of object systems, availability factor.*

Voronin A.E., Peshehonov N.E., Rybakov V.V. To the question of justification of requirements to values of indicators reliability of power supply systems as part of a special object's // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 162–168.

The technique of justification of requirements to reliability of system of power supply is presented. Questions of distribution of requirements to reliability of object between its systems for the purpose of justification of requirements to reliability of system of power supply are considered. The main stages of determining the significance of object systems by adapted functional-topological method are described. Mathematical models for determining the required values of reliability indicators of power supply systems are presented, which take into account the degree of importance of the systems that make up the object and the probabilistic reliability function of the object as a whole.

*Key words: normalization of reliability, allocation of reliability requirements, the rate of reliable news, the importance of systems, functional studies.*

Voronin A.E., Peshehonov N.E., Rybakov D.V. Selection of the optimal set of measure aimed at improving the reliability of special power supply systems object's // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 169–178.

The article deals with the problem of providing a given indicator of the reliability of the power supply system of a special object on the basis of the optimization problem. Three main groups of technical measures aimed at improving the reliability of the power supply system have been formed. A mathematical model of the optimization object is developed – a combination of measures aimed at improving the reliability of the power supply system of a special object. The choice of criteria of optimality is proved, expressions for objective functions are received, restrictions are defined. The choice of the method of the solution of the formulated optimization problem is made. In the article the optimization problem is solved with the help of genetic algorithms.

*Key words: reliability of power supply system, optimization problem, measures to improve reliability, genetic algorithm.*

Gordeev A.A., Nekrasov I.N., Senchenkov V.I. Improving the convergence of learning processes in diagnostic models of power equipment on the basis of cluster analysis // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 179–186.

The system of flexible control of the technical condition of the thermal power equipment of ground complexes of Space troops is offered, one of options of construction of such system is considered. Time vivalda theoretical basis of diagnostics of power equipment as necessary conditions for the implementation of adaptive management technical condition.

The methods of training in the construction of diagnostic models of technical systems are investigated. With the new position revealed a topology of a plurality of observed States and related is-

sues of imaging – formalized representation of failures of power equipment. A procedure for ranking training images has been developed, which can significantly speed up the convergence of the learning process. This procedure is based on the analysis of metric ratios in clusters of training education and the task on this basis of the sequence of their application in the learning process. The properties and metrics of finite-dimensional Euclidean spaces are used.

*Key words: Cluster analysis, thermal power equipment, diagnostic model, training pattern, image rejection, recurrence relation.*

Grinev A.P., Litvinova N.B., Sarkisov S.V. Practical application of the methods of determining the flow fluctuation of waste water during operation of pumping stations of the western military district // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 187–195.

On the example of one of the KNS of the Western military district the practical application of the developed method of determining the schedules of fluctuations in the flow of wastewater entering the sewage and drainage pumping stations is shown. Graphs and coefficients of unevenness of the inflow of wastewater to the KNS are obtained, the values of which allow to determine the estimated total maximum and minimum wastewater costs.

*Keywords: military infrastructure, waste water, wastewater metering, pump, coefficients of variation.*

Gukov D.V., Zagulyaev S.D., Ivankov S.M. Refined mathematical model of power transformer for calculation of magnetizing current under load systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 196–202.

Magnetizing current in power transformers causes losses in steel, so it is advisable to keep it minimal. The magnitude of the magnetization current under load are various factors. Taking into account them, a mathematical model of the power transformer is developed, which allows to calculate the magnetizing current under load with sufficient accuracy. The readings of the mathematical apparatus were compared with the real values of the magnetizing current, which were determined under load in the original way. The refined model allowed to identify additional factors affecting the reduction of the magnetizing current of power transformers during their operation under load.

*Keywords: transformer under load; equivalent circuit, the reduction of the magnetizing current, an approximation of magnetization curve, modeling of the transformer.*

Gukov D.V., Zagulyaev S.D., Kuprienko V.M. Increase of the capacity of the asynchronous motors when working to reduced loading // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 203–208.

Asynchronous motors often operate at a load lower than nominal. This mode of operation causes an increase in the inductive component of the stator current. This is accompanied by a reduction factor, an increase in losses in the electric motor and an additional load on the supply network. The article proposes to reduce the supply voltage of an induction motor with respect to the nominal value so that the magnetic induction is constant and equal to the magnetic induction in the normal mode. In this case, the inductive magnetizing current at any load will be minimal and equal to the magnetizing current in the nominal mode.

*Key words: asynchronous motors, power factor, magnetizing current, idling.*

Dema I.A., Nizovtsev V.M., Semenov E.N. Computational and theoretical analysis of force interaction high gas flow with forced cooling elements turbines power plants and aircraft turbine engine // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 209–215.

The article discusses We consider the flow around the rotor blade turbine surfaces turbine engine (GTE) and power installations (PI) of the aircraft (A) and ground objects (GO) high-temperature flow of the heated, thermally conductive, viscous gas at the local blowing of cold gas from the inner space of the blade in the space between the turbine blades. Integration of viscous flow equations of motion performed finite-difference method. Achieved computational and theoretical investigation of the influence of the characteristic parameters and the main flow of the cold gas discharged to friction and pressure distribution along the blade surface and the change in the flow rate. It is found that in these conditions the blade may occur on the high-pressure region, allowing a 1.6-2.9 fold increase in normal force on the surface of the rotor blade and the torque on the shaft of the turbine unit. Therefore, the fuel consumption (gas generator) is increased or the power of the turbine unit can be reduced.

*Key words: gas turbine engine power plant, the turbine unit, the gas flow, computational and theoretical research.*

Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Osipov N.A. Model for evaluating the probability of immediate operation of complex technical complexes on the basis of dynamic bayesian networks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 216–223.

The article proposes a new approach to assessing the probability of failure-free operation of a complex technical complex, based on the apparatus of Bayesian networks. The developed model takes into account a priori information about the reliability of components and blocks, failure trees, diagnostic models and allows to estimate the probability of failure-free operation of the complex at the current time and to predict the value of the probability of failure-free operation during operation.

*Key words: reliability, Bayesian network, automated control system.*

Egorichev M.V., Motorin V.M., Roslykov E.M. A methodical approach to process control condition of life support systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 224–228.

The methodical approach to development of programs of the optimum organization of a complex of repair and recovery actions on life support systems of objects of terrestrial space infrastructure is offered.

For planning of repair and restoration activities, a simulation model has been developed that uses the method of analysis of types, consequences and criticality of failures, which allows to provide the required level of efficiency of systems functioning in conditions of limited funding and restrictions on the timing of the withdrawal of space forces from service.

*Key words: life support systems of objects of ground space infrastructure, simulation model, algorithm for selecting the program of repair and restoration activities.*

Ghabrovets E.I., Pudikov V.V. Management features of a uniflow-recirculating air-conditioning systems in the implementation of energy-saving modes of air treatment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 229–234.

The features of the control of direct-flow recirculation air conditioning systems in the implementation of energy-saving modes of air treatment. The conceptual and functional algorithm of air transportation subsystem control is presented. Key words: ventilation and air conditioning system, automatic control system, energy-saving air treatment modes.

*Key words: once-through and recirculation of the air conditioning system, energy-saving modes of air treatment.*

Ivankov V.S., Sapozhnikov M.M., Sharoglavov V.B. Method of justification the set of spare tools and accessories (STA) armament and military equipment (AME) of the Space forces, taking

into account the composition and accommodation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 235–240.

Modern weapons are complex technical complexes, which have, as a rule, long service life, high cost and laboriousness of maintenance. The efficiency of the use of such samples is influenced by the adopted operating system. It is possible to identify requirements for the composition of the qualification of maintenance personnel, as well as the range and volume of spare parts, tools and accessories (STA) consumed during operation, as factors characterizing the efficiency of the operation system

This article describes a method of justification of the set of STA AME of the Space forces, taking into account the composition and accommodation. This method allows you to determine the cost of transportation, storage, maintenance of elements and restoration of STA, and also helps to make a decision about the locations STA.

*Key words: spare parts, tools and accessories, support systems, recovery.*

Kapitonov O.V., Salnikov V.M., Shishkin E.V. Analysis of methods, means of diagnosis and technical devices for receiving, transmitting and processing information about the States and modes of operation of LSS and STS // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 241–245.

The analysis of features of functioning of life support systems of protective constructions of Space troops, including, systems of the automated management, control and diagnosing is presented. Proposals have been developed for the development and application of methods and means of monitoring and diagnosing sea for the benefit of Space forces. A method was developed to ensure the survivability and reliability of protective constructions in the period impact of natural and manmade factors with the use of intellectual systems of diagnostics of a condition of technical equipment,

*Key words: protective structures, life support systems and special technical systems, automated control, control and diagnosis systems, mathematical model of the object.*

Karagodin V.V., Polyanskiy K.A., Revyakov B.A. Optimization of parameters of diesel-driven generators and uninterrupted power systems in continuous power systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 246–253.

The issues of joint work of the main elements of continuous power system, designed to ensure the increasing requirements of essential consumers of special facilities to the reliability, continuity and quality of electricity. A mathematical formulation of the problem of optimizing the parameters of diesel generators and uninterrupted power systems in the form of discrete programming problem is proposed.

*Key words: optimization problem, continuous power system, driven generator, uninterrupted power system, electromagnetic compatibility.*

Karagodin V.V., Ryzhiy N.V., Smirnov S.V. Assessment of the impact of thermal processes on the loss of electricity in the cable lines of the power supply systems of special objects. // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 254–265.

The article discusses the impact of thermal processes on the electricity losses in the cable lines of the system special objects. Using the method of homogeneous bodies, a mathematical model of heating has been developed, taking into account the ambient temperature and load current. On the basis of the developed model, an assessment of the impact of thermal processes of electric power losses was carried out.

*Key words: energy efficiency, electric power losses, heating power cable, analysis of non-stationary thermal processes, the method of homogeneous bodies.*

Kopeika A.L., Kokhanovsky A.G., Tarasov A.G. The model of the automated system for preparing and launching space rockets functioning to determine the probability-time characteristics of a healthy state based on the results of previous tests and destructive external influences // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 266–273.

The article presents a model of an automated system of preparation and launch of a space rocket functioning, taking into account the different modes of hardware and software use in the process of preparation and launch. The proposed model allows to take into account the destructive external influences of the environment by correcting the failure rate of the elements, linking the parameters of reliability with the characteristics of the conditions of products use.

*Key words: technical condition, control, automated system of preparation and launch of space rockets, destructive external influences, simulation model.*

Kohanovsky A.G., Koshel I.N., Kyznetsov A.B. Model of diagnosing of computing means of the automated systems of preparation and start-up of rockets of space appointment with the expanded set of the efficient conditions caused by influence of destabilizing factors // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 274–282.

The article presents a model of diagnostics of computer facilities of automated systems for the preparation and launch of space rockets with an extended set of operational States. The application of this model makes it possible to predict the change in the technical condition of computing facilities under the influence of destabilizing factors and to maintain the calculating facilities of the automated system for the preparation and launch of space rockets for a long period of time.

*Key words: computing means, an efficient condition, the control, the automated system of preparation and start-up of rockets of the space appointment, destabilizing factors.*

Kurakin K.E., Litvinova N.B., Tupitsin U.E. Development of the mathematical model of air-cooled condensation installation for optimization of parameters at stages of creation and operation of the heat-generating complex // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 283–288.

A variant is proposed to resolve the contradiction between the need of thermal power plants in cooling water and the possibilities of natural sources. The issues of optimizing the surface area of air-cooled condensing units are considered.

*Key words: air cooled condensing unit, optimization mathematical model, thermal hydraulic calculation.*

Maliyshev A.V., Sarkisov S.V., Soprokin A.A. Issues and directions of modernization of water supply systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 289–292.

The article deals with the reconstruction and optimization of water supply systems of St. Petersburg. The main problematic issues on the basis of which the priority tasks on improvement of water supply systems, providing a guaranteed water supply to consumers and increasing the capacity of water treatment facilities for the possibility of long-term potential expansion of the zone of influence of the station are developed are considered.

*Key words: water supply System, modernization of water supply, operating modes, treatment facilities, optimization of water supply.*

Radaev A.E., Chislova M.M. The study of the characteristics of the execution process re-monthan works of military infrastructure facilities // Proceedings of the Military Space academy



named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 293–297.

The article deals with the issues of substantiation of the characteristics of the process of repair work of military infrastructure. An optimization model is developed to substantiate the sequence of repair work within the military infrastructure facilities according to the criterion of minimizing the total total cost of delay in the development of the relevant work fronts. The implementation of the model on a practical example is made, according to the results of the corresponding procedure, the conclusion is made about the high practical importance of the developed tool.

*Key words: objects of military infrastructure, repair of engineering systems, model of repair, matrix of duration of repair works, model of operability of system*

Sarkisov S.V., Seniukovich M.A., Sorokin A.A. Issues and directions of modernization of water supply systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 669. – P. 298–302.

The article deals with the reconstruction and optimization of water supply systems of St. Petersburg. The main problematic issues on the basis of which the priority tasks on improvement of water supply systems, providing a guaranteed water supply to consumers and increasing the capacity of water treatment facilities for the possibility of long-term potential expansion of the zone of influence of the station are developed are considered.

*Key words: water supply System, modernization of water supply, operating modes, treatment facilities, optimization of water supply.*

**Абсалямов Дамир Расимович**, профессор 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: damir73@yandex.ru

**Абу-Хасан Махмуд Самиевич**, профессор кафедры строительных конструкций Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, (190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9); доктор технических наук, профессор; тел: 8 (812) 315-13-32, e-mail: pgups1967@mail.ru

**Авсюкевич Дмитрий Алексеевич**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел. 8 (812) 347-96-43.

**Барановский Анатолий Михайлович**, профессор 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: bamvka@mail.ru

**Блинов Андрей Валентинович**, доцент кафедры систем жизнеобеспечения объектов военной инфраструктуры Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 211-02-27, e-mail: a9112110227@ya.ru

**Бутырин Александр Валерьевич**, преподаватель 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (906) 225-71-30, e-mail: bytirin@mail.ru

**Буяков Сергей Николаевич**, старший преподаватель 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: buysergej@ya.ru

**Вакуненко Вячеслав Александрович**, начальник отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); кандидат технических наук; тел.: 8(921) 657-35-20, e-mail: vakyn@mail.ru

**Величкин Виктор Захарович**, профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (909) 587-79-18, e-mail: v.velichkin2011@yandex.ru

**Вишняков Евгений Павлович**, доцент 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-44, e-mail: vishep44@yandex.ru

**Воронин Алексей Евгеньевич**, адъюнкт 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 023-30-88, e-mail: voroninalex87@yandex.ru

**Гамаюнова Ольга Сергеевна**, старший преподаватель кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29); тел.: +7 (921) 965-88-25, e-mail: gamayunova\_os@spbstu.ru

**Гордеев Антон Александрович**, курсант 453-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Гринев Алексей Павлович**, старший преподаватель кафедры систем жизнеобеспечения объектов военной инфраструктуры Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); кандидат технических наук; тел.: (921) 424-30-20, e-mail: apgrinev69@yandex.ru

**Гуков Дмитрий Васильевич**, доцент 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 754-57-85, 8 (812) 347-95-44, e-mail: guokovdmitry@rambler.ru

**Гусев Николай Николаевич**, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 958-42-90, e-mail: goussev\_nn@mail.ru

**Гусеница Ярослав Николаевич**, начальник лаборатории испытательной (информатики и вычислительной техники) Военного инновационного технополиса «ЭРА»; кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 831-50-29.

**Дема Игорь Анатольевич**, научный сотрудник 172-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 911-03-54, e-mail: kafedra17@rambler.ru

**Дорошко Игорь Владимирович**, старший преподаватель 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: Dorogko-Igor@yandex.ru

**Егоричев Максим Вячеславович**, курсант 453-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Егоров Владимир Викторович**, профессор кафедры строительных конструкций Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, (190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9); доктор технических наук, профессор; тел: 8 (812) 315-13-32, e-mail: pgups1967@mail.ru

**Есенина Наталья Александровна**, ведущий научный сотрудник 23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПИСС» (191167, Россия, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 6); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (921) 892-43-03, e-mail: Lidiya\_Rasporskaya@gmpi.spb.ru

**Жабровец Евгений Игоревич**, курсовой офицер-преподаватель факультета среднего профессионального образования Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: pudikov1@mail.ru

**Загрутдинов Юрий Александрович**, старший преподаватель 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 004-24-00.

**Загуляев Сергей Дмитриевич**, инженер 1-й категории «23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПИСС» (191167, Россия, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, 6); тел.: 8(921) 575-69-20, e-mail: zagulaev.sd@yandex.ru

**Зайцев Александр Александрович**, начальник отдела 23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПИСС» (191167, Россия, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 6); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 743-46-14, e-mail: Aleksandr\_Zaicev@gmpi.spb.ru

**Захарова Екатерина Алексеевна**, адъюнкт 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: mashenkokatay@mail.ru

**Иванков Виталий Сергеевич**, слушатель офицерских курсов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (995) 592-22-60, e-mail: tamb2003@yandex.ru

**Иваньков Сергей Михайлович**, адъюнкт 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (953) 352-20-37, e-mail: mihalych261@bk.ru

**Ильин Антон Викторович**, старший преподаватель 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-44.

**Капитонов Олег Витальевич**, старший помощник начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: kapitonow@bk.ru

**Карагодин Владимир Викторович**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 227-36-79, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

**Карасев Сергей Юрьевич**, начальник 153 лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 954-74-02.

**Карасев Юрий Сергеевич**, начальник лаборатории 23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПИСС» (191167, Россия, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 6); тел.: 8 (911) 268-74-86, e-mail: Yuriy\_Karasev@gmpi.spb.ru

**Квитко Александр Владимирович**, преподаватель 9-й кафедры Военной академии материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (196203, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 933-02-04, e-mail: kvitko.67@mail.ru

**Клепов Андрей Владимирович**, доцент 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: ada-2000@yandex.ru

**Копейка Александр Леонидович**, адъюнкт 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-26.

**Кохановский Андрей Геннадьевич**, доцент 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 730-84-17, e-mail: koха.and.68@mail.ru

**Кошель Игорь Николаевич**, начальник 2-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (900) 655-09-69, kin1470@mail.ru

**Кужекин Игорь Николаевич**, старший преподаватель 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 908-00-60, e-mail: kuzhekin@gmail.com

**Кузнецов Александр Борисович**, начальник 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (931) 953-74-11, e-mail: kuznetsov\_spb@mail.ru

**Куправа Лали Рамановна**, доцент кафедры строительных конструкций Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, (190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 315-13-32, e-mail: pgups1967@mail.ru

**Куприенко Василий Михайлович**, начальник отдела «23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПИСС» (191167, Россия, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, 6); доктор технических наук; тел.: 8 (921) 743-48-93, e-mail: vasilij\_kuprienko@gmpi.spb.ru

**Куракин Константин Эдуардович**, преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 762-77-40, e-mail: petrokomfort@yandex.ru

**Кучеренко Александр Олегович**, адъюнкт 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 958-19-80, e-mail: kucher\_90@bk.ru

**Ладышкин Григорий Сергеевич**, преподаватель 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (951) 681-86-72, e-mail: grega.89@yandex.ru

**Литвинова Наталья Борисовна**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук; тел.: (981) 189-79-24, e-mail: skarlet27@list.ru

**Малышев Андрей Владимирович**, заместитель начальника управления ГУП «Водоканал СПб» филиал «Водоснабжение СПб» Территориальное управление водоснабжения «Курортное» (197701, Россия, Санкт-Петербург, г. Сестрорецк, ул. Граничная, 18); тел.: 8 (921) 355-05-52, e-mail: malyshev\_avl@vodokanal.spb.ru

**Мандрица Дмитрий Петрович**, доцент 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-46, e-mail: MANDRIZA66@mail.ru

**Мачнев Сергей Александрович**, доцент 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 004-01-02.

**Миргородский Александр Николаевич**, старший преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: mirgorodsky@km.ru

**Миронов Андрей Николаевич**, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-45, e-mail: vka@mil.ru

**Моторин Виктор Михайлович**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-96-43.

**Мусатов Вячеслав Игоревич**, курсовой офицер-преподаватель факультета строительства военно-морских баз Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8(921) 555-78-21, e-mail: musatov2112@ya.ru

**Некрасов Игорь Николаевич**, преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 347-96-43.

**Низовцев Владимир Михайлович**, доцент 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 732-07-95, e-mail: kafedra17@rambler.ru

**Орехов Алексей Викторович**, адъюнкт 9-й кафедры Военной академии материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (196203, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); тел.: 8 (981) 180-17-99, e-mail: turok.79@bk.ru

**Осипов Никита Алексеевич**, доцент 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: bayes@mail.ru

**Петров Константин Валентинович**, преподаватель 9-й кафедры Военной академии материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (196203, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 926-02-04, e-mail: k.v.petrov@yandex.ru

**Петроченко Марина Вячеславовна**, доцент кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (921) 316-54-22, e-mail: mpetrochenko@mail.ru

**Пешехонов Николай Егорович**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 224-59-48, 8 (812) 347-95-44, e-mail: peshehonov@bk.ru

**Поляков Сергей Александрович**, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: polaykov86@mail.ru

**Полянский Константин Аркадьевич**, начальник 533-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 779-69-13, e-mail: PolyanskiyKA.VKА@yandex.ru

**Птухина Ирина Станиславовна**, доцент кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); кандидат технических наук; тел.: +7 (921) 648-27-20, e-mail: irena\_ptah@mail.ru

**Пудиков Вячеслав Валентинович**, старший преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: pudikov1@mail.ru

**Радаев Антон Евгеньевич**, доцент кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); кандидат технических наук, кандидат экономических наук, доцент; тел.: 8-911-169-38-11, e-mail: tw-inc@yandex.ru

**Ревяков Борис Александрович**, доцент 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (981) 918-67-20, e-mail: borisluga@mail.ru

**Росляков Евгений Михайлович**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-96-43.

**Рыбаков Вячеслав Вячеславович**, преподаватель 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 039-75-51, e-mail: S\_l\_a\_v\_a\_10@mail.ru

**Рыбаков Дмитрий Вячеславович**, преподаватель 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 914-98-02, e-mail: d\_i\_m\_a\_1\_7@bk.ru

**Рыжий Николай Витальевич**, адъюнкт 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931)334-57-37, e-mail: nikolya.ryzhiy@mail.ru

**Сальников Вадим Михайлович**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: salnikov50@yandex.ru

**Сапожников Михаил Михайлович**, слушатель офицерских курсов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (963) 965-40-04, e-mail: sap.mm@mail.ru

**Саркисов Сергей Владимирович**, доцент кафедры систем жизнеобеспечения объектов военной инфраструктуру Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); доктор технических наук, доцент; тел.: (911) 012-99-69, e-mail: ser-sark@yandex.ru

**Сахарова Антонина Сергеевна**, доцент кафедры строительных конструкций Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, (190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9); кандидат технических наук.

**Семенов Евгений Николаевич**, адъюнкт 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 727-62-36, e-mail: kafedra17@rambler.ru

**Сеньченков Валентин Иванович**, профессор 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 250-60-79, e-mail: svi9@rambler.ru

**Сенюкович Михаил Александрович**, инженер управления эксплуатации специального объекта (141170, Россия, Московская обл., Щелковский район, р. п. Монино, ул. Жуковского, 3); тел.: 8 (921) 653-05-65, e-mail: ser-sark@yandex.ru

**Смирнов Сергей Викторович**, доцент 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 357-51-43, e-mail: S.V.Smirnov23@mail.ru

**Солдатенко Владимир Стальевич**, доцент 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru



**Солдатенко Тамара Николаевна**, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-45, e-mail: vka@mil.ru

**Сорокин Александр Александрович**, адъюнкт кафедры систем жизнеобеспечения объектов военной инфраструктуры Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8(911)123-77-61, e-mail: regnatij4@ya.ru

**Старчуков Дмитрий Сергеевич**, доцент 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Сурин Дмитрий Васильевич**, профессор 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (963) 248-41-11.

**Тарасов Анатолий Геннадьевич**, заместитель начальника 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26, тел: 8 (812) 315-13-32, e-mail: pgups1967@mail.ru

**Трудов Алексей Вениаминович**, доцент 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: trudav@mail.ru

**Тупицин Юрий Евгеньевич**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, наб. Ждановская,13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (951) 675-39-24, e-mail: Nordman14056@yandex.ru

**Тюрин Евгений Анатольевич**, заместитель начальника 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Федоренко Андрей Владимирович**, заместитель начальника 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (952) 226-20-14, e-mail: favspb@mail.ru

**Цветков Александр Юрьевич**, доцент 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-91.

**Чернобаев Александр Юрьевич**, слушатель офицерских курсов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (904) 330-71-22, e-mail: def15654@gmail.com

**Числова Мария Михайловна**, студент-магистрант Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); тел.: 8-911-112-65-61, e-mail: animashki1@mail.ru

**Шароглазов Вадим Борисович**, преподаватель 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 980-31-53.

**Швайковский Михаил Александрович**, заместитель начальника 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-43.

**Шишкин Евгений Вячеславович**, начальник 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: shishkin78@yandex.ru

**Шмаков Руслан Борисович**, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Щербина Игорь Сергеевич**, начальник 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-35.

**Эльцофон Денис Александрович**, курсовой офицер-преподаватель 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: vka@mil.ru

**Абсалямов Дамир Расимович**, профессор 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: damir73@yandex.ru

**Авсюкевич Дмитрий Алексеевич**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-43.

**Карагодин Владимир Викторович**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-44.

**Сеньченков Валентин Иванович**, профессор 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 250-60-79, e-mail: svi9@rambler.ru

**Сурин Дмитрий Васильевич**, профессор 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (963) 248-41-11.

**Сычева Анастасия Максимовна**, профессор 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, доцент; тел.: 8 (921) 857-22-17, e-mail: amsychova@yandex.ru