

СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Construction and industrial safety
Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture

№ 27(79) – 2022

Основан в 1996 году.
Выходит 4 раза в год (ежеквартально)

Учредитель:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (КФУ им. В.И. Вернадского), 295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовым коммуникациям (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61830 от 18 мая 2015 г.

Включен в утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Главный редактор
Федоркин Сергей Иванович, советник РААСН, д.т.н., проф.
(КФУ им.В.И. Вернадского)

Заместители главного редактора:
Любомирский Николай Владимирович, советник РААСН,
д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского)

Николенко Илья Викторович, д.т.н., проф.
(КФУ им. В.И. Вернадского)

Редакционная коллегия:

Абдулгазис У.А., д.т.н., проф. (КИПУ, Симферополь)

Бакаева Н.В., д.т.н., проф. (ЮЗГУ, Курск);

Бекиров Э.А., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь);

Беспалов В.И., д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону)

Ветрова Н.М., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Экологическая
безопасность»;

Графкина М.В., д.т.н., проф. (МГМУ, Москва);

Гузнецков В.Н., д.пед.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва);

Дворецкий А.Т., советник РААСН, д.т.н., проф.
(КФУ им. В.И. Вернадского, Симферополь);

Зайцев О.Н., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Инженерное
обеспечение»;

Кукунаев В.С., советник РААСН, д.т.н., с.н.с.
(КФУ им.В.И. Вернадского, Симферополь);

Маилян Д.Р., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ,
Ростов-на-Дону);

Нагаева З.С., член-корреспондент РААСН, д.арх., проф. –
руководитель раздела «Градостроительство»

Несветаев Г.В., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ,
Ростов-на-Дону);

Пищулина В.В., д.арх., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

Сергейчук О.В., д.т.н., проф. (КНУСА, Киев, Украина);

Серпокрылов Н.С., д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

Толстой М.Ю., к.т.н., доц. (ИРНИТУ, Иркутск);

Цопа Н.В., советник РААСН, д.э.н., проф. (КФУ
им. В.И. Вернадского, Симферополь);

Чемодуров В.Т., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь);

Чеботарев В.И., д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

Шаленный В.Т., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Строительство»;

Шеина С.Г., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ,
Ростов-на-Дону);

Щербаков В.И., д.т.н., доц. (ВГТУ, Воронеж)

Федосов С.В., академик РААСН, д.т.н., проф. (МГСУ,
Москва)

СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

№ 26(78) – 2022

научно-технический журнал

Печатается по решению научно-технического
совета ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
(протокол № 6 от 28.11.2022)

Координатор выпуска: *И.В. Николенко*
Верстка: *Г.Р. Биленко*

Редакция Института «Академия строительства и
архитектуры» ФГАОУ ВО «КФУ им.
В.И. Вернадского»

Адрес редакции: 95006, Республика Крым,
г. Симферополь, ул. Павленко, 3, корпус 2, к. 200,
e-mail: rio@napks.ru

Подписан в печать 19.12.2022.

Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Гарнитура Times New Roman. Усл.-печ. л. 12,2.
Тираж 100 экз.

Издатель: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Крымский федеральный университет имени
В.И. Вернадского».

Издательство: ФГАОУ ВО «КФУ
им. В.И. Вернадского»

<http://cfuv.ru>, io_cfu@mail.ru
(3652) 60-84-98,

295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект
Академика Вернадского, 4, каб. 400Б

Отпечатано в типографии ФГАОУ ВО «КФУ
им. В.И. Вернадского»
295000, Республика Крым, г. Симферополь, бульвар
Ленина, 5/7

Распространяется по подписке.
Подписка по каталогу агентства «Роспечать».
Подписной индекс: 64974 (полугодовая).
Стоимость 1 экз. журнала 227,0 руб.

© Академия строительства и архитектуры
ФГАОУ ВО «КФУ им. Вернадского», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 2. Строительство

<i>Радаев А.Е., Гамаюнова О.С., Бардина Г.А.</i>	5
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ОПТИМИЗАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ	
<i>Коряковцева Т.А., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С.</i>	27
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В БЕТОННЫХ КОМПОЗИТАХ	
<i>Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В., Ажермачев С.Г., Кореньков П.А.</i>	39
ПРУЖИННО-МАССОВАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	
<i>Дядичев В.В., Дядичев А.В., Дядичева Е.А.</i>	49
ИССЛЕДОВАНИЕ СОЗДАНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО АДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МНОГОСЛОЙНОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ РАЗДУВА СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	

Раздел 3. Инженерное обеспечение

<i>Волна В. В., Крымов Р. С., Мельникова Н. С.</i>	59
ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. ФЕОДОСИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДОВ.	
<i>Орлов В.А., Мельник О.В., Подольян Д.В.</i>	71
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДООТВОДЯЩЕЙ СЕТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЕЕ ПОДСВОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ	
<i>Шурилин Е.А., Олехнович Я.А.</i>	79
ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ И НЕИСКЛЮЧЕННЫХ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОСНОВНЫХ МЕТОДАХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	
<i>Арифов А. М., Бекиров Э. А.</i>	89
МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ПОЛЯРЗАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	
<i>Тынчерова Э.Л., Бекиров Э.А.</i>	101
АНАЛИЗ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ ВЛ 110 КВ С ОТПАЙКОЙ НА СОЛНЕЧНУЮ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЮ	

Раздел 4. Экологическая безопасность

<i>Николенко И.В., Каримов Э.А., Боков С.А., Авдеева Д.В.</i>	111
АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ ЕСТЕСТВЕННОГО СТОКА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ И Г. СЕВАСТОПОЛЯ	
<i>Николенко И.В., Котовская Е.Е., Луд Н.В.</i>	125
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ПИТЬЕВЫХ ВОД В РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ	
<i>Список авторов</i>	144
<i>Руководство для авторов</i>	145

CONTENT

Section 2. Construction

<i>Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A.</i>	5
USE OF OPTIMIZATION MODELING TOOLS TO JUSTIFY THE CHARACTERISTICS OF ENERGY EFFICIENT STRUCTURAL SOLUTION	
<i>Koryakovtseva T.A., Zaborova D.D., Gamayunova O.S.</i>	27
USE OF PLANT AND COAL WASTE AS A SECONDARY RAW MATERIAL IN CONCRETE COMPOSITES	
<i>Chemodurov V.T., Litvinova E.V., Azhermachev S.G. Korenkov P. A.</i>	39
SPRING-MASS MODEL OF DEFORMATION OF A REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL SYSTEM UNDER DYNAMIC INFLUENCES	
<i>Dyadichev V.V., Dyadichev A.V., Dyadicheva E.A.</i>	49
INVESTIGATION OF THE CREATION OF A HIGH-QUALITY ADHESIVE JOINT DURING DEFORMATION OF A MULTILAYER BILLET IN THE PROCESS OF BLOWING UP CONSTRUCTION PRODUCTS	

Section 3. Engineering Support

<i>Volna V.V., Krymov R.S., Melnikova N.S.</i>	59
OPTIMIZATION OF THE WATER SUPPLY SYSTEM IN FEODOSIA, TAKING INTO ACCOUNT THE WEAR OF PIPELINES.	
<i>Orlov V.A., Melnik O.V., Podolyan D.V.</i>	71
MODELING THE OPERATION OF THE DRAINAGE NETWORK WHEN USING THE SUPPLY VENTILATION OF ITS SUBSURFACE SPACE TO REMOVE HARMFUL GASES	
<i>Shurshilin E. A., Olekhnovich Ya. A.</i>	79
ESTIMATION OF RANDOM AND NON-EXCLUDED SYSTEMATIC ERRORS IN BASIC METHODS OF GEODETIC MEASUREMENTS	
<i>Arifov A.M., Bekirov E. A.</i>	89
METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF POLARIZATION- INDUCED DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS	
<i>Tyncherova E.L., Bekirov E.A.</i>	101
ANALYSIS OF OPERATION AND TECHNICAL SOLUTIONS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF DIFFERENTIAL-PHASE PROTECTIONS OF 110 KV POWER LINE WITH A TAP TO A SOLAR POWER PLANT.	

Section 4. Environmental safety

<i>Nikolenko I.V., Karimov E.A., Bokov S.A., Avdeeva D.V.</i>	111
ANALYSIS OF WATER RESOURCE LOSSES FROM NATURAL RUNOFF RESERVOIRS OF THE REPUBLIC OF CRIMEA AND SEVASTOPOL	
<i>Nikolenko I.V., Kotovskay E.E., Lud N.V.</i>	125
ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE QUALITATIVE COMPOSITION OF DRINKING WATER IN THE REPUBLIC OF CRIMEA ON THE HEALTH OF THE POPULATION WITH AN ASSESSMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS TO IMPROVE IT	
<i>List of authors</i>	144
<i>Authors Guide</i>	145

Раздел 2. Строительство

УДК 692.23

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ОПТИМИЗАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ

Радаев¹ А.Е., Гамаюнова² О.С., Бардина³ Г.А.

Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: ¹tw-inc@yandex.ru, ²gamayunova@inbox.ru, ³bardina_ga@spbstu.ru

Аннотация. Обеспечение требуемых теплотехнических показателей ограждающих конструкций в составе современных объектов жилищного строительства не уступает по значимости обеспечению надежности и долговечности применяемых конструктивных решений. Поскольку наиболее распространенным способом повышения энергетической эффективности объектов жилищного строительства является применение теплоизоляционных материалов в составе соответствующих ограждающих конструкций, разнообразие вариантов упомянутых материалов в совокупности с вариативностью технических решений в части устройства многослойных ограждающих конструкций в составе объекта строительства определяет высокую важность решения задач обоснования характеристик упомянутых технических решений на основе критериев экономической и энергетической эффективности. Данное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка инструментальных средств для обоснования характеристик конструктивных решений в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования. На промежуточных этапах исследования была разработана методика обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования. Методика предполагает формирование аналитических моделей, каждая из которых описывает зависимость величины удельной стоимости теплоизоляционного материала от его технических характеристик для отдельной ограждающей конструкции в составе объекта строительства, создание и реализацию дробно-линейной оптимизационной модели для получения предварительных (математически идеальных) значений технических характеристик материала в составе каждой отдельной ограждающей конструкции, а также модели целочисленной линейной оптимизации для формирования состава наиболее предпочтительных образцов (вариантов) материала для ограждающих конструкций в составе объекта строительства. На заключительных этапах исследования произведена реализация вышеупомянутой методики на практическом примере для решения задачи обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности проектируемого объекта жилищного строительства – двухэтажного коттеджа, расположенного на территории города Санкт-Петербурга, также выполнен анализ полученных результатов.

Предмет исследования: технические и стоимостные характеристики теплоизоляционного материала в составе ограждающих конструкций в рамках объекта жилищного строительства.

Материалы и методы: методика обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования, разработанная в рамках промежуточных этапов исследования.

Результаты: разработанная методика реализована на практическом примере для решения задачи обоснования состава образцов теплоизоляционного материала для проекта двухэтажного коттеджа, расположенного на территории Санкт-Петербурга, выполнен анализ чувствительности характеристик формируемого технического решения по отношению к величине градусо-суток отопительного периода.

Выводы: на основе результатов сделан вывод о высокой практической значимости разработанной методики; выявлена зависимость адекватности получаемых результатов от состава образцов теплоизоляционного материала, учитываемых при рассмотрении каждой отдельной ограждающей конструкции в составе объекта строительства.

Ключевые слова: ограждающая конструкция, сопротивление теплопередаче, срок окупаемости, оптимизационная модель, энергоэффективность, теплоизоляционный материал.

ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль характеризуется высоким уровнем конкуренции между участниками рынка жилищного строительства, определяющим потребность в снижении как себестоимости объекта строительства, так и затрат в процессе его эксплуатации [1-5]. Ситуация усугубляется наличием большого количества зданий, имеющих срок эксплуатации от 30 до 50 лет и потому не отвечающих современным требованиям в части энергетической эффективности объектов строительства, оказывающей огромное влияние на

величину эксплуатационных затрат. Снижение упомянутых затрат по отношению к объекту строительства на стадиях возведения и реновации в современных условиях обеспечивается посредством разработки и реализации различных конструктивных решений, предполагающих в том числе обеспечение высоких показателей энергетической эффективности указанного объекта за счет применения в составе соответствующих ограждающих конструкций теплоизоляционных материалов. Тем не менее, существующие методические разработки и инструментальные средства, применяемые для обоснования

характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов строительства, не обеспечивают полноценного и совместного учета показателей энергетической эффективности (в данный момент также регламентируемых СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий») и экономической целесообразности конструктивных решений [6-8].

Данное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка инструментальных средств для обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования. Для достижения упомянутой цели в рамках исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обзор и сравнительный анализ научных разработок в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства.

2. Разработка методики обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования.

3. Реализация разработанной методики на практическом примере – для решения задачи обоснования состава образцов теплоизоляционного материала для проекта двухэтажного коттеджа, расположенного на территории Санкт-Петербурга

Объектом исследования является проектируемый или существующий объект жилищного строительства, по отношению к которому формируется конструктивное решение в области обеспечения энергетической эффективности посредством использования теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций.

Предметом исследования являлись характеристики вышеупомянутого конструктивного решения в части технических характеристик теплоизоляционных материалов, а также показателей энергетической эффективности и экономической целесообразности.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

На начальных этапах исследования был выполнен обзор и сравнительный анализ научных работ в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства. Полученные результаты определяются следующими положениями:

1. Научные работы, соответствующие тематике исследования, могут классифицированы по следующим основным признакам:

1.1. В зависимости от объекта и предмета исследования:

- прикладные [9-18] – содержат описание процедур и результатов расчета отдельных реально существующих ограждающих конструкций при различных вариантах решений в области повышения энергетической эффективности конструкций

- научные [19-27] – содержат описание принципов, подходов, инструментальных средств для решения задачи обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства.

1.2. В зависимости от категории инструментальных средств:

- предполагающие использование средств аналитического моделирования [19-21, 26, 27], в том числе метода анализа иерархий [19] и процедуры многофакторной линейной регрессии [26, 27] для обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе ограждающей конструкции;

- предполагающие использование средств оптимизационного моделирования [22-25], в том числе генетических алгоритмов [22, 23] и нейронных сетей [24] и квадратичного программирования [25] для решения вышеупомянутой задачи;

- предполагающие совместное использование средств аналитического (для построения аналитических моделей зависимости удельной стоимости теплоизоляционного материала от его технических характеристик [26]) и оптимизационного (для непосредственного обоснования наиболее предпочтительных значений характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции) моделирования [27].

2. Основными недостатками вышеперечисленных научных разработок являются следующие:

- отсутствие информации об области эффективного применения полученных научных результатов (возможности применения упомянутых результатов по отношению к иным реально существующим ограждающим конструкциям) [9-18];

- отсутствие оновременного учета критериев стоимости и энергетической эффективности при обосновании технических характеристик теплоизоляционного материала [19-21];

- отсутствие критерия оптимальности получаемого решения в виде значений технических характеристик теплоизоляционного материала, что оказывает негативное влияние на практическую значимость инструментального средства [22-24];

- несоответствие получаемого решения в виде значений технических характеристик теплоизоляционного материала комбинациям значений для существующих моделей (образцов) материала [25];

- невозможность формирования единого решения для совокупности ограждающих конструкций в составе объекта строительства

(инструментальное средство обеспечивает обоснование характеристик только для отдельной ограждающей конструкции) [19-27].

Таким образом, результаты, полученные в процессе анализа публикаций, свидетельствуют о недостаточной степени научной проработанности вопросов обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства. Данное обстоятельство определило необходимость разработки инструментальных средств для решения рассматриваемой задачи с использованием средств оптимизационного моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На промежуточных этапах исследования была разработана методика обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования. Подробное описание структуры разработанной методики представлено в работе [28]. Процесс реализации методики предполагает последовательное выполнение следующих этапов:

1. Подготовка исходных данных для решения поставленной задачи.

2. Последовательное рассмотрение (перебор) каждой из ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства с последующим формированием аналитической модели зависимости удельной стоимости теплоизоляционного материала в составе конструкции от его технических характеристик, а также оценкой адекватности сформированной модели на основе коэффициента детерминации.

3. Построение многокритериальной мелко-линейной оптимизационной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций.

4. Приведение мелко-линейной оптимизационной модели к линейному виду.

5. Реализация производных однокритериальных моделей для формирования частных значений критериев.

6. Расчет коэффициентов значимости учета критериев в соответствии с методом линейной свертки для обеспечения их сбалансированности.

7. Формирование однокритериальной линейной оптимизационной модели на основе многокритериальной линейной модели, полученной в рамках четвертого этапа методики.

8. Вычисление оптимальных значений изменения коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций.

9. Построение и реализация оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках конструктивного решения.

10. Формирование конструктивного решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В рамках дальнейших этапов исследования методика была реализована на практическом примере для решения задачи обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности проектируемого объекта жилищного строительства – двухэтажного коттеджа, расположенного на территории города Санкт-Петербурга. Подготовка исходных данных для реализации методики, представленных на рисунках 1 и 2, а также в таблицах 1 и 2, производилась с учетом следующих основных особенностей объекта строительства:

– рассматриваемый объект строительства не содержит подполья или подвала, что исключает необходимость проверки условия тепловой защиты по отношению к конструкции пола; при этом структура указанной ограждающей конструкции должна удовлетворять прочим условиям, указанным в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция»;

– светонепрозрачные фрагменты каждой отдельной стеновой ограждающей конструкции (включая парапет) имеют идентичную структуру с точки зрения состава и расположения составных слоев материалов;

– объект строительства имеет плоскую крышу с уклоном на стену, расположенную на оси А (для удаления дождевой воды предполагается устройство воронок на пересечении осей 1 и 4 с осью А); для обеспечения указанного уклона используется специальный теплоизоляционный материал с заданными техническими характеристиками.



Рис. 1. Описание объекта жилищного строительства, явившегося базой для реализации разработанной методики: а) – изометрическая проекция (общий вид); б) – изометрическая проекция с указанием окон и входных дверей при условно-прозрачных ограждающих конструкциях и отсутствующих внутренних перегородках; в) – план первого этажа; г) – план второго этажа

Fig. 1. Description of the housing construction object, which was the basis for the implementation of the developed methodology: а) – isometric projection (general view); б) – isometric projection indicating windows and entrance doors with conditionally transparent enclosing structures and missing internal partitions; в) – plan of the first floor; г) – plan of the second floor

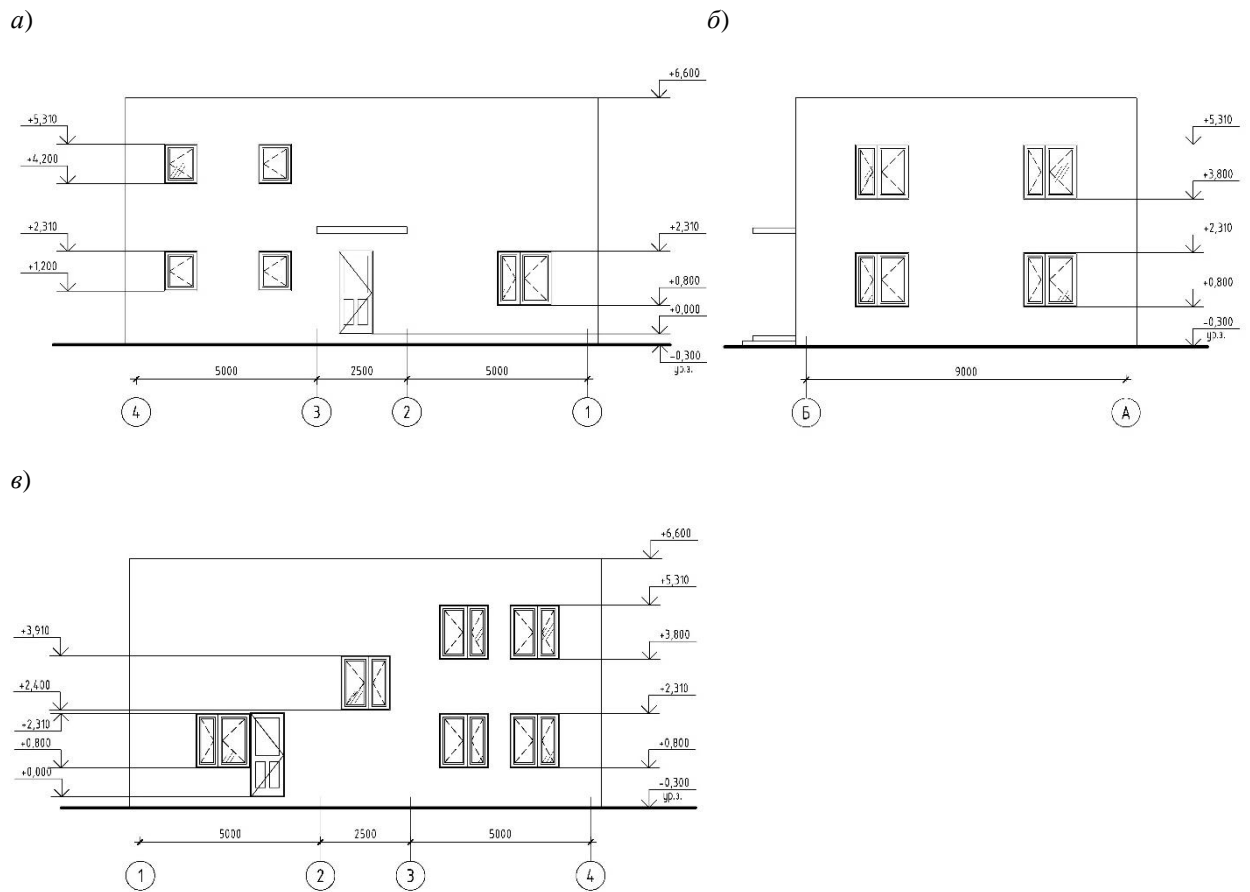


Рис. 2. Схема расположения окон и входных дверей в составе стеновых конструкций: а) – стена по оси Б; б) – стена по оси 1; в) – стена по оси А

Fig. 2. Layout of windows and entrance doors as part of wall structures: а) – wall along axis B; б) – wall along axis 1; в) – wall along axis A

Таблица 1. Индексы и наименования ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства

Table 1. Indices and names of enclosing structures as part of a housing construction object

Индекс конструкции	Наименование ограждающей конструкции в составе объекта
<i>k</i>	-
1	Стена по оси 1 (газобетон)
2	Стена по оси 4 (газобетон)
3	Стена по оси А (газобетон)
4	Стена по оси Б (газобетон)
5	Покрытие (железобетон)

Таблица 2. Параметры и расчетные характеристики слоев ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства

Table 2. Parameters and design characteristics of the layers of enclosing structures as part of a housing construction object

№ п.п.	Наименование параметра	Обозн.	Ед. изм.	Значение для ограждающей конструкции с наименованием и индексом (<i>k</i>)				
				1	2	3	4	5
1.1	Наименование материала для слоя с индексом (<i>s</i>)	1	-	-	Штукатурка декоративная (полистирол)		Верхнее кров. покрытие (битумно.-полимерн.)	
1.2		2	-	-	Штукатурка выровни-вающая (известк.)		Гидроизоляция. полотно (битумно-полимерное)	
1.3		3	-	-	Штукатурка базовая (цементно-песчан.)		Асбесто-цементные листы	
1.4		4	-	-	Кладка из газобетонных блоков		Накл. теплоизол. полотно (экстр. полистирол)	
1.5		5	-	-	-		Нижнее кровельное покрытие (стеклоткань)	
1.6		6	-	-	-		Железобетонная плита	
2.1	Толщина слоя с индексом (<i>s</i>)	1	$\delta_{s=1,k}$	м	0,005		0,0042	
2.2		2	$\delta_{s=2,k}$	м	0,015		0,003	
2.3		3	$\delta_{s=3,k}$	м	0,015		0,016	
2.4		4	$\delta_{s=4,k}$	м	0,375		0,06	
2.5		5	$\delta_{s=5,k}$	м	-		0,003	
2.6		6	$\delta_{s=6,k}$	м	-		0,2	
3.1	Коэффициент теплопроводности [29] слоя с индексом (<i>s</i>)	1	$\lambda_{s=1,k}$	Вт/(м·°С)	0,21		0,22	
3.2		2	$\lambda_{s=2,k}$	Вт/(м·°С)	0,7		0,28	
3.3		3	$\lambda_{s=3,k}$	Вт/(м·°С)	1,2		0,4	
3.4		4	$\lambda_{s=4,k}$	Вт/(м·°С)	0,21		0,034	
3.5		5	$\lambda_{s=5,k}$	Вт/(м·°С)	-		0,04	
3.6		6	$\lambda_{s=6,k}$	Вт/(м·°С)	-		1,7	
Суммарное термическое сопротивление слоев		$\sum_s \frac{\delta_{s,k}}{\lambda_{s,k}}$	М ² ·°С/Вт		1,843		2,027	

Состав образцов теплоизоляционного материала аналогичен составу выборки, рассматриваемой в работе [8]. При этом предполагалось, что каждый из образцов материала может быть использован в качестве дополнительного слоя в составе каждой ограждающей конструкции, по отношению к которой осуществляется проверка условия тепловой защиты.

Процесс реализации разработанной методики на основе вышеописанного объекта жилищного строительства включал в себя следующие основные процедуры:

1. Обоснование характеристик формируемого конструктивного решения в части предпочтительных образцов теплоизоляционного материала на основе базовых значений исходных данных, соответствующих реальным условиям (базовая реализация методики).

2. Анализ чувствительности характеристик формируемого конструктивного решения к изменениям элемента исходных данных – значения градусо-суток отопительного периода (D_d), варьируемого в диапазоне от 4250 до 4500 °С·сут. с шагом 50 °С·сут.; при этом значения остальных элементов исходных данных соответствовали тем,

что использовались в рамках базовой реализации методики.

Реализация методики осуществлялась с использованием программной среды «Microsoft Excel» – в соответствующей книге были созданы следующие рабочие листы:

– лист «Этап 2», содержащий исходные данные и результаты формирования аналитических моделей зависимостей удельной стоимости теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций от технических характеристик утеплителей;

– лист «Этапы 5-8», содержащий описание структурных элементов линейной оптимизационной модели для обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций и производных от нее моделей, а также результаты соответствующих оптимизационных процедур;

– лист «Этап 9», содержащий описание структурных элементов оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения, а также результаты реализации модели.

Общий вид указанных рабочих листов, содержащих базовые значения элементов исходных данных, а также результаты базовой реализации основных этапов методики, представлен на рисунках 3–5. Принципы заполнения соответствующих ячеек представлены в таблицах 3–5. Собственно реализация оптимизационных моделей производилась с использованием надстройки «OpenSolver» – описание соответствующих настроек приведено в таблицах 6 и 7. На основе полученных результатов базовой реализации методики были сделаны следующие выводы:

– скорректированные коэффициенты детерминации аналитических моделей зависимости стоимости теплоизоляционного материала от его технических характеристик для всех рассматриваемых ограждающих конструкций имеют достаточно высокие значения, что свидетельствует о высокой адекватности вышеупомянутых моделей (рисунок 3);

– использование метода линейной свертки для реализации многокритериальной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций позволило получить оптимальное решение, в соответствии с которым итоговое значение термического сопротивления для стен по осям 1 и 4 соответствует нормативному значению, а для стен по осям А и Б, а также для покрытия – превышает нормативное значение на 7,7% и 13,7 % соответственно (рисунок 4);

– несмотря на разные оптимальные значения технических характеристик теплоизоляционного материала для различных стеновых ограждающих

конструкций, по результатам реализации модели целочисленной линейной оптимизации на заключительном этапе выполнения методики был выбран единый образец материала марки «URSA Geo Лайт» (имеющий промежуточные значения характеристик относительно предварительно полученных оптимальных значений в пределах допустимых отклонений) ввиду ограниченного количества альтернативных вариантов материала (рисунок 5).

Результаты выполнения процедуры анализа чувствительности характеристик формируемого конструктивного решения к значению градусо-суток отопительного периода, содержащие расчетные и фактические значения агрегированных характеристик, полученные при реализации оптимизационных моделей в рамках выполнения соответственно этапов 7 и 9 методики, представлены на рисунке 6. На основе вышеуказанных результатов были сделаны следующие выводы:

– изменения расчетных значений агрегированных характеристик при увеличении значения градусо-суток отопительного периода имеют монотонный характер, при этом темп прироста значения суммарных затрат (в среднем 0,57%) существенно меньше темпа прироста значения суммарной годовой экономии (в среднем 2%), что обуславливает равномерное уменьшение значения срока окупаемости со средним темпом прироста –1,4%.

– относительно небольшие диапазоны изменения расчетных значений агрегированных характеристик свидетельствуют об их относительно невысокой чувствительности к величине градусо-суток отопительного периода при заданных граничных значениях параметра.

– изменения фактических значений агрегированных характеристик при увеличении значения градусо-суток отопительного периода так же, как и изменения расчетных значений, имеют монотонный характер, однако, в отличие от последних, характеризуются большей колеблемостью темпов прироста, обуславливающей в том числе отклонения (положительные и отрицательные) фактических значений агрегированных характеристик от расчетных значений. Причиной наличия указанных отклонений является дискретный характер оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках конструктивного решения, а также относительно небольшое количество образцов материала в исходно рассматриваемой выборке. Данное обстоятельство также определяет меньшее (в подавляющем большинстве случаев) качество решения, определяемого фактическими значениями агрегированных характеристик, относительно решения, определяемого расчетными значениями упомянутых характеристик.

№ п.п.	Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Значение
1	Коэффициент учета снижения теплопотребления жилых зданий при наличии локального учета тепловой энергии на отопление	ξ	-	0,1
2	Коэффициент учета дополнительного теплопотребления системы отопления	$\beta_{\text{д}}$	-	1
3	Расчетная температура внутреннего воздуха здания	$t_{\text{вн}}$	°C	20
4	Расчетная температура наружного воздуха здания	$t_{\text{вн}}$	°C	-1,2
5	Продолжительность отопительного периода в пределах года	$T_{\text{от}}$	сут./год	211
6	Значение градус-суток отопительного периода	$D_{\text{от}}$	сут.°C	4473,2
7	Удельная стоимость электроэнергии, расходуемой на отопление объекта жилищного строительства	$c_{\text{э}}$	руб./кВт·ч	1,443439

Индекс конструкции	Наименование ограждающей конструкции	Эквивалентный коэффициент для определения трем. сопротивления	Треб. значение значения терм. сопротивления	Площадь светопрозрачных ограждающих конструкций	Удельн. затраты на монтаж ограждающих конструкций	Кэф-т учета отпущен значений температуры	Макс. допуст. отклонение факт. знач-я уд. изм-я коэф-та теплопроводн-ти от трем.	Кэф-т значимости учета отклонения факт. знач-я уд. изм-я коэф-та теплопроводн-ти от трем.	Усл. постоянная компонента стоимости
k		$\frac{a_{\text{вн}}}{R_{\text{тр}}} \cdot \beta_{\text{д}}$	$R_{\text{тр,треб}}$	$A_{\text{ср}}$	$C_{\text{монтаж}}$	$\eta_{\text{т}}$	$\sigma_{\text{доп}}$	$\rho_{\text{откл}}$	$C_{\text{пост}}$
1	Стена по оси 1 (газобетон)	0,00035	1,4	2,96562	57,12	225	1	0,15	0
2	Стена по оси 4 (газобетон)	0,00035	1,4	2,96562	66,24	225	1	0,15	0
3	Стена по оси А (газобетон)	0,00035	1,4	2,96562	77,69	225	1	0,15	0
4	Стена по оси Б (газобетон)	0,00035	1,4	2,96562	81,86	225	1	0,15	0
5	Покрывание (селезобетон)	0,0005	2,2	4,4366	112,66	200	1	0,15	0

Индекс конструкции	Наименование ограждающей конструкции	Предельно допустимое значение изменения коэффициента теплопередачи	Треб. значение изменения коэффициента теплопередачи	Значение отклонения факт. значения удельного изменения коэф-та теплопередачи от трем. значения	Отклонение факт. значения удельного изменения коэф-та теплопередачи конструкции от трем. значения	Отклонение факт. значения уд. изменения коэф-та теплопередачи конструкции от трем. значения	Факт. знач-е изменения коэф-та теплопередачи	Факт. значение терм. сопротивления	Стоимость материала и его монтажа	Головая экономия эксплуатационных затрат на отопление		
k		$\frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{тр}}} \cdot \beta_{\text{д}}$	$\frac{M_{\text{тр}}}{M_{\text{тр}}}$	$\frac{M_{\text{факт}}}{M_{\text{тр}}} \cdot \beta_{\text{д}}$	$\frac{M_{\text{факт}}}{M_{\text{тр}}} \cdot \beta_{\text{д}}$	$\frac{M_{\text{факт}}}{M_{\text{тр}}} \cdot \beta_{\text{д}}$	$\frac{M_{\text{факт}}}{M_{\text{тр}}} \cdot \beta_{\text{д}}$	$R_{\text{факт}}$	$C_{\text{мат}}$	$E_{\text{э}}$		
1	Стена по оси 1 (газобетон)	0,124795	0,293729	0,162335	1,47E-03	1,13E-05	2,67E-05	0	0,162335	2,96562	13970,45	1293,212
2	Стена по оси 4 (газобетон)	0,124795	0,293729	0,162335	1,47E-03	1,13E-05	2,67E-05	0	0,162335	2,96562	16201,02	1499,691
3	Стена по оси А (газобетон)	0,124795	0,293729	0,162335	1,69E-05	1,13E-05	2,67E-05	0	0,186685	3,196446	20829,43	2022,761
4	Стена по оси Б (газобетон)	0,124795	0,293729	0,162335	1,69E-05	1,13E-05	2,67E-05	0	0,186685	3,196446	21947,45	2131,332
5	Покрывание (селезобетон)	0,106944	0,259239	0,232147	2,35E-05	9,7E-06	2,35E-05	2,46E-06	0,259239	5,042722	39064,69	4073,248

№ п.п.	Наименование неизвестной переменной / расчетной характеристики	Обозначение	Ед. изм.	Знач-е для модели
1	Обратное значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат по результатам реализации конструктивного решения	$\theta_{\text{об}}$	(руб./ед.г)	9,07E-05
2	Миним. значение	$\theta_{\text{мин}}$	(руб./ед.г)	6,38E-05
3	Максим. значение	$\theta_{\text{макс}}$	(руб./ед.г)	0,000151
4	Удельная экономия эксплуатационных затрат на отопление объекта строительства	$C_{\text{э}}$	руб./ед.	139,4667296
5	Суммарная стоимость теплоизоляционных материалов и их монтажа	$C_{\text{мат}}$	руб.	112013
6	Суммарная годовая экономия эксплуатационных затрат на отопление	$E_{\text{э}}$	руб./ед.	11020,24
7	Отношение фактического значения сумм. годовой экономии к расчетному	$F_{\text{факт}}$		1
8	Срок окупаемости рассматриваемого конструктивного решения	$F_{\text{окуп}}$	ед.	10,1643
9	Сумм. приведен. отклонение фактических значений теплотех. хар-ки от требуемых	$F_{\text{откл}}$		6,88E-06
10	Комплексный критерий нахождения оптимального решения	Ω		0,536302

Индекс модели	Наименование целевой функции (критерия) однокритериальной модели	Обозначение	Исход. значение критерия с индексом (ψ) в оптим. решении	Порог. значение критерия с индексом (ψ) в оптим. решении
i			$F_{\text{опт},i}$	$F_{\text{порог},i}$
1	Срок окупаемости рассматриваемого конструктивного решения	$F_{\text{окуп}}$	10,04579	1,09E-05
2	Сумм. приведен. отклонение фактических значений теплотех. хар-ки от требуемых	$F_{\text{откл}}$	10,44692	0
3	Срок окупаемости рассматриваемого конструктивного решения	$F_{\text{окуп}}$	10,44692	6,94E-13
4	Сумм. приведен. отклонение фактических значений теплотех. хар-ки от требуемых	$F_{\text{откл}}$	10,04579	1,09E-05
5	Значение коэффициента значимости учета критерия	$\rho_{\text{откл}}$	0,5	0,5

Рис. 4. Общий вид рабочего листа «Этапы 5-8» книги «Microsoft Excel», созданного в рамках процесса реализации разработанной методики

Fig. 4. General view of the worksheet «Steps 5-8» of the book «Microsoft Excel», created as part of the process of implementing the developed methodology

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	Таблица 11. Исходные данные, неизвестные переменные и расчетные характеристики образцов теплоизоляционного материала и ограждающих конструкций														
3	Индекс материала	Наименование образца теплоизоляционного материала								Значение индикатора целесообразности использования образца материала в качестве дополнительного слоя в составе ограждающей конструкции с учетом					
4										1	2	3	4	5	
5															
6															
7	i									$У_{ik-1}$	$У_{ik-2}$	$У_{ik-3}$	$У_{ik-4}$	$У_{ik-5}$	
8	-									-	-	-	-	-	
9	1	KNAUF ECOROLL, 1000x610x50 мм								0	0	0	0	0	
10	2	KNAUF ECOROLL Плита, 1230x610x50 мм								0	0	0	0	0	
11	3	KNAUF ECOROLL Плита, 1230x610x100 мм								0	0	0	0	0	
107	99	BASWOOL Фасад 120, 1200x600x50 мм								0	0	0	0	0	
108	100	BASWOOL Фасад 140, 1200x600x50 мм								0	0	0	0	0	
109		Суммарное кол-во используемых образцов материала							$У_k$	ед.	1	1	1	1	1
110		Фактич. значение удельной стоимости материала							C'_k	руб./м ²	38,3883	38,3883	38,3883	38,3883	131,5941
111		Фактич. значение стоимости материала и его монтажа							C'^{Σ}_k	руб.	15044,74	17446,84	20462,64	21560,97	37357,39
112		Фактич. значение изм-я коэф-та теплопередачи конструкции							ΔU^{Σ}_k	Вт/(м ² ·С)	0,180882	0,180882	0,180882	0,180882	0,244124
113		Относит. отклонение фактич. значения уд. изменения коэффициента теплопередачи конструкции от требуемого знач-я							фактическое σ_k	-	0,114254	0,114254	0,114254	0,114254	0,051592
114									минимальное σ_k^{\min}	-	0	0	0	0	0
115															
116		Относит. отклонение фактич. значения изменения коэффициента теплопередачи от оптимального значения													
117									минимальное ε_k^{\min}	-	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15
118															
119		Фактич. значение годовой экономии экпл. затрат на отопл.													
120															
121															
122	Таблица 12. Общие исходные данные и агрегированные расчетные характеристики конструктивного решения														
123	№ п.п.	Наименование расчетной характеристики								Обозначение	Ед. изм.	Значение			
124															
125	1	Относит. уступка по миним. знач-ю суммарной годовой экономии экпл. затрат								ζ	-	0,1			
126	2	Фактич. значение суммарной стоимости теплоизоляционных материалов								C'	руб.	25685,83			
127	3	Фактич. значение суммарной стоимости теплоизоляц. материалов и их монтажа								C'^{Σ}	руб.	111872,6			
128	4	Значение суммарной годовой экономии экпл. затрат на отопление							фактическое E^{Σ}	руб./ед.	10972,72				
129	5								минимальное $E^{\Sigma \min}$	руб./ед.	9918,219				
130	6	Фактич. значение срока окупаемости рассматриваемого конструктивн. решения								T^{Σ}	ед.	10,19551			
131															
132															
133	Таблица 13. Итоговые параметры конструктивного решения														
134	Индекс конструкции	Наименование ограждающей конструкции							Индекс предпоч. образца	Наименование предпочтительного образца материала					
135															
136															
137	k	-							i^*_k	-					
138	1	Стена по оси 1 (газобетон)							58	URSA Geo Лайт, 6250x1200x50 мм					
139	2	Стена по оси 4 (газобетон)							58	URSA Geo Лайт, 6250x1200x50 мм					
140	3	Стена по оси А (газобетон)							58	URSA Geo Лайт, 6250x1200x50 мм					
141	4	Стена по оси Б (газобетон)							58	URSA Geo Лайт, 6250x1200x50 мм					
142	5	Покрытие (железобетон)							55	URSA Geo М-11, 7000x1200x100 мм					

Рис. 5. Общий вид рабочего листа «Этап 9» книги «Microsoft Excel», созданного в рамках процесса реализации разработанной методики

Fig. 5. General view of the worksheet «Stage 9» of the book «Microsoft Excel», created as part of the process of implementing the developed methodology

Таблица 3. Принципы заполнения ячеек рабочего листа «Этап 2» книги «Microsoft Excel» в рамках процесса реализации разработанной методики на практическом примере

Table 3. Principles of filling in the cells of the worksheet «Stage 2» of the book «Microsoft Excel» as part of the process of implementing the developed methodology on a practical example

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾⁽²⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
Таблица 1		
A9:A14	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 2.2
B9:K14	Значения элемента исходных данных	Таблица 1, столбцы 2–5; таблица 2, п. 5.1
L9:L14	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 5.2
M9:M14	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 5.3
Таблица 2		
Q20	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 1.1
Q21	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 1.2
Q22	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 1.3
Q23	=СЧЁТЗ(J9:J13)	Таблица 1, столбец 6

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾⁽²⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
Q24	=СЧЁТЗ(К9:К13)	Таблица 1, столбец 7
Q25	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 1.4
Q26	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 1.5
Таблица 3		
A39:A43	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 2.4
B39:F43	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 6.1
H39:H43	Значения элемента исходных данных	Примечание таблицы 2, п. 6
I39:I43	Значения элемента исходных данных	Таблица 8
J39:J43	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 7.5; примечание таблицы 2, п. 6
K39:(K43)	=1/H39+J39+1/I39	Таблица 3, п. 1.1.2
L39:(L43)	=СУММ(СМЕЩ(\$N\$54;;A39-1;\$Q\$20))	Таблица 3, пп. 2.1.1–2.1.5
M39:(Q43)	=ИНДЕКС(ЛИНЕЙН(СМЕЩ(\$N\$164;; ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156)*(A39-1);\$L39); СМЕЩ(\$J\$164;;ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156)*(A39-1);\$L39;\$Q\$24+1));\$Q\$24+2-(СТОЛБЕЦ()-СТОЛБЕЦ(\$M:\$M)))	Таблица 3, п. 3.2.1
R39:(R43)	=1-СУММКВРАЗН(СМЕЩ(\$O\$164;; ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156)*(A39-1);\$L39); СМЕЩ(\$N\$164;;ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156)*(A39-1);\$L39;)/ (ДИСП.Г(СМЕЩ(\$N\$164;; ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156)*(A39-1);\$L39;))* L39)	Таблица 3, п. 3.2.2
S39:(S43)	=1-(1-R39)*(L39-1)/(L39-(\$Q\$22+1))	Таблица 4
Таблица 4		
A54:A153	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 2.1
B54:G153	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 4.1
H54:L153	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 6.1
M54:M153	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 4.2
N54:S153	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 8.1
T54:(Y153)	=ЕСЛИ(СТРОКА()-СТРОКА(\$53:\$53)=1;N54; N54+T53)	-
Таблицы 5.1, 5.2, ... 5.5 ⁽³⁾		
A164:(A263), R164:(R263), ..., BQ164:(BQ263)	=ЕСЛИ(СТРОКА()-СТРОКА(\$163:\$163)<= СМЕЩ(\$L\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1;;);СМЕЩ (\$A\$54;ПОИСКПОЗ(СТРОКА()-СТРОКА(\$163: \$163);СМЕЩ(\$T\$54;;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A \$156:\$Q\$156);0)-1;\$Q\$20;))-1; ;);""	Таблица 2, п. 2.1; таблица 3, п. 1.1.1
B164:(G263), S164:(X263), ..., BR164:(BW263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИС ЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))>0;СМЕЩ(\$B\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))-1;);""	Таблица 2, п. 4.1
H164:(H263), Y164:(Y263), ..., BX164:(BX263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИС ЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))>0;СМЕЩ(\$H\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))-1;);""	Таблица 3, п. 1.2.1
I164:(I263), Z164:(Z263), ..., BY164:(BY263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИС ЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))>0;СМЕЩ(\$I\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))-1;);""	
J164:(J263), AA164:(AA263), ..., BZ164:(BZ263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИС ЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))>0;СМЕЩ(\$J\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))-1;);""	
K164:(K263), AV164:(AV263), ..., CA164:(CA263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИС ЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156);0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;))>0;СМЕЩ(\$K\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾⁽²⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
	СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;)-1;;;)"")	
L164(:L263), AC164(:AC263), ..., CB164(:CB263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;))>0;СМЕЩ(\$L\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;)-1;;;)"")	
M164(:M263), AD164(:AD263), ..., CC164(:CC263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;))>0;1/СМЕЩ(\$K\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;)-1/(СМЕЩ(\$K\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;)+N164/I164);)"")	Таблица 3. п. 1.2.2
N164(:N263), AE164(:AE263), ..., CD164(:CD263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;))>0;СМЕЩ(\$M\$54;СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;)-1;;;)"")	Таблица 2, п. 4.2; таблица 3, п. 1.1.1
O164(:O263), AF164(:AF263), ..., CE164(:CE263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;))>0;СМЕЩ(\$M\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;)+ СУММПРОИЗВ(СМЕЩ(\$N\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(ЯЧЕЙКА("столбец";O164)/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;Q\$24+1);J164:M164);)"")	Таблица 3, п. 3.1.1
P164(:P263), AG164(:AG263), ..., CF164(:CF263)	=ЕСЛИ(ДЛСТР(СМЕЩ(\$A164;;(ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1)* ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;;))>0;СМЕЩ(\$M\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;)+ СУММПРОИЗВ(СМЕЩ(\$N\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(ЯЧЕЙКА("столбец";O164)/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;Q\$24);J164:L164);)"")	Таблица 3, п. 4.1.1
H264(:P264), Y264(:AG264), ..., BX264(:CF264)	=МИН(СМЕЩ(H\$164;;СМЕЩ(\$L\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;))	-
H265(:P265), Y265(:AG265), ..., BX265(:CF265)	=МАКС(СМЕЩ(H\$164;;СМЕЩ(\$L\$39;ОКРУГЛВВЕРХ(СТОЛБЕЦ()/ЧИСЛСТОЛБ(\$A\$156:\$Q\$156;0)-1;;;))	-

Примечание

- (1) абстрактное обозначение «A1(:B10)» означает, что в ячейку A1 необходимо ввести формулу, указанную в соответствующем столбце таблицы, после чего полученный результат «растянуть» (скопировать) до ячейки B10;
- (2) абстрактное обозначение «X1(:X10), Y1(:Y10)» означает, что ячейки полностью заполненного формулами диапазона X1:X10 необходимо скопировать в ячейки Y1:Y10 с сохранением исходных формул;
- (3) таблицы 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 и 5.5 имеют одинаковую конфигурацию, расположены на одном уровне рабочего листа по вертикали с горизонтальным интервалом в один столбец; соответствующая информация в части таблиц таблицы 5.1 и 5.2 иллюстрируется рисунком 4.

Таблица 4. Принципы заполнения ячеек рабочего листа «Этапы 5-8» книги «Microsoft Excel» в рамках процесса реализации разработанной методики на практическом примере

Table 4. Principles of filling in the cells of the worksheet «Steps 5-8» of the book «Microsoft Excel» as part of the process of implementing the developed methodology on a practical example

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
Таблица 6		
Q4	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 3.1
Q5	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 3.2
Q6	Значение элемента исходных данных	
Q7	Значение элемента исходных данных	

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
Q8	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 3.3; примечание таблицы 2, п. 3
Q9	=(Q6-Q7)*Q8	
Q10	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 3.4
Таблица 7		
A23(:A27)	='Этап 2'!A39	Таблица 2, п. 2.4
B23(:G27)	='Этап 2'!B39:G39	Таблица 2, п. 7.1
H23:I27	Значения элементов исходных данных	Таблица 2, п. 7.6; примечание таблицы 2, п. 7
J23(:J27)	=H23*\$Q\$9+I23	
K23:K27	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 7.2
L23:L27	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 7.3
M23:M27	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 7.4
N23:O27	Значения элементов исходных данных	Таблица 2, п. 7.7
P23:Q27	Значения элементов исходных данных	Таблица 2, п. 7.8
R23(:R27)	=СМЕЩ('Этап 2'!\$P\$264;;ЧИСЛСТОЛБ('Этап 2'!\$A\$156:\$Q\$156)*(A40-1);;)	Таблица 3, п. 4.2.1
Таблица 8		
A40(:A44)	=A23	Таблица 2, п. 2.4
B40(:G44)	=B23	Таблица 2, п. 7.1
H40(:H44)	=СМЕЩ('Этап 2'!\$M\$264;;ЧИСЛСТОЛБ('Этап 2'!\$A\$156:\$Q\$156)*(A40-1);;)	Таблица 3, п. 1.1.3
I40(:I44)	=СМЕЩ('Этап 2'!\$M\$265;;ЧИСЛСТОЛБ('Этап 2'!\$A\$156:\$Q\$156)*(A40-1);;)	Таблица 3, п. 1.1.4
J40(:J44)	=1/'Этап 2'!K39-1/J23	Таблица 5, п. 1.1.1
K40:K44	Значения неизвестных переменных	Таблица 4, п. 1.2
L40(:L44)	=H40*\$L\$51	Выражение (27), левая часть
M40(:M44)	=I40*\$L\$51	Выражение (27), правая часть
N40:N44	Значения неизвестных переменных	Таблица 4, п. 1.3
O40(:O44)	=N23*J40*\$L\$51	Выражение (31), правая часть
P40:P44	Значения неизвестных переменных	Таблица 4, п. 1.3
Q40(:Q44)	=O23*J40*\$L\$51	Выражение (32), правая часть
R40(:R44)	=K40-J40*\$L\$51	Выражение (30), левая часть
S40(:S44)	=N40-P40	Выражение (30), правая часть
T40(:T44)	=ЕСЛИОШИБКА(K40/\$L\$51;"-")	Выражение (41)
U40(:U44)	=ЕСЛИОШИБКА(1/(1/'Этап 2'!K39-T40);"-")	Таблица 5, п. 2.1.8
V40(:V44)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(T40);K23*(L23+'Этап 2'!Q39*T40+R23);"-")	Таблица 5, п. 2.1.2
W40(:W44)	=\$L\$54*K23*M23*T40	Таблица 5, п. 2.1.4
Таблица 9		
L51	Значение неизвестной переменной	Таблица 4, п. 2.1
L52	=1/(\$L\$54*СУММПРОИЗВ(K23:K27;M23:M27; I40:I44))	Таблица 5, п. 2.2.1
L53	=1/(\$L\$54*СУММПРОИЗВ(K23:K27;M23:M27; H40:H44))	Таблица 5, п. 2.2.2
L54:M54	=24/1000*Q10*Q9*(1-Q4)*Q5	Таблица 5, п. 1.2.1
M55	=СУММ(V40:V44)	Таблица 5, п. 2.2.3
L56	=ЕСЛИОШИБКА(1/L51;"-")	Примечание таблицы 4, п. 2
M56	=ЕСЛИОШИБКА(СУММ(W40:W44);"-")	Таблица 5, п. 2.2.4

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
L57	= $\$L\$54 * \text{СУММПРОИЗВ}(K23:K27;M23:M27; K40:K44)$	Выражение (34), левая часть
L58	= $(\text{СУММПРОИЗВ}(K23:K27;L23:L27)+ \text{СУММПРОИЗВ}(K23:K27;R23:R27)) * L51 + \text{СУММПРОИЗВ}(K23:K27; \text{Этап 2!}Q39:Q43;K40:K44)$	Выражение (25), левая часть
M58	=ЕСЛИОШИБКА(M55/M56;"-")	Таблица 5, п. 2.2.5
L59	= $\text{СУММПРОИЗВ}(P23:P27;N40:N44)+ \text{СУММПРОИЗВ}(Q23:Q27;P40:P44)$	Таблица 5, п. 2.2.6
L60	=ЕСЛИОШИБКА(K75*(L58-K73)/(K71-K73)+ L75*(L59-L74)/(L72-L74);"-")	Выражение (40), левая часть
Таблица 10		
K71:L71	Транспонированные значения, скопированные из ячеек L57:L58 после реализации производной однокритериальной модели с целевой функцией $F_1 \rightarrow \min$	Таблица 7, строка 1
K72:L72	Транспонированные значения, скопированные из ячеек L57:L58 после реализации производной однокритериальной модели с целевой функцией $F_2 \rightarrow \min$	Таблица 7, строка 2
K73:L73	Транспонированные значения, скопированные из ячеек L57:L58 после реализации производной однокритериальной модели с целевой функцией $F_1 \rightarrow \max$	Таблица 7, строка 3
K74:L74	Транспонированные значения, скопированные из ячеек L57:L58 после реализации производной однокритериальной модели с целевой функцией $F_2 \rightarrow \max$	Таблица 7, строка 4
M71(:M72)	=ЕСЛИОШИБКА((K71-\$K\$73)/(\$K\$71-\$K\$73);"-")	Выражение (36), таблица 7
N71(:N72)	=ЕСЛИОШИБКА((L71-\$L\$74)/(\$L\$72-\$L\$74);"-")	
K75(:L75)	=("Этап 2!"\$Q\$26-СУММ(M71:M72))/("Этап 2!"\$Q\$26^2-СУММ(\$M\$71:\$N\$72))	Выражение (35)

Примечание

⁽¹⁾ абстрактное обозначение A1(:B10) означает, что в ячейку A1 необходимо ввести формулу, указанную в соответствующем столбце таблицы, после чего полученный результат скопировать до ячейки B10.

Таблица 5. Принципы заполнения ячеек рабочего листа «Этап 9» книги «Microsoft Excel» в рамках процесса реализации разработанной методики на практическом примере

Table 5. Principles of filling in the cells of the worksheet «Stage 9» of the book «Microsoft Excel» as part of the process of implementing the developed methodology on a practical example

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
Таблица 11		
A9(:A108)	=Этап 2!A54	Таблица 2, п. 2.1
B9(:I108)	=Этап 2!B54	Таблица 2, п. 4.1
J9:N108	Значения неизвестных переменных	Таблица 8, п. 1.1
J109(:N109)	=СУММ(J9:J108)	Таблица 9, п. 1.1
J110(:N110)	= $\text{СУММПРОИЗВ}(\text{СМЕЦ}(\text{Этап 2!} \$O\$164;; \text{ЧИСЛСТОЛБ}(\text{Этап 2!} \$A\$156: \$Q\$156) * (J6-1); \text{СМЕЦ}(\text{Этап 2!} \$L\$39; J6-1;;;); J9:J108)$	Таблица 9, п. 1.2
J111(:N111)	= $\text{СМЕЦ}(\text{Этапы 5-8!} \$K\$23; J6-1;;;) * (\text{СМЕЦ}(\text{Этапы 5-8!} \$L\$23; J6-1;;;)+ J110)$	Таблица 9, п. 1.3
J112(:N112)	= $\text{СУММПРОИЗВ}(\text{СМЕЦ}(\text{Этап 2!} \$M\$164;; \text{ЧИСЛСТОЛБ}(\text{Этап 2!} \$A\$156: \$Q\$156) * (J6-1); \text{СМЕЦ}(\text{Этап 2!} \$L\$39; J6-1;;;); J9:J108)$	Таблица 9, п. 1.4
J113(:N113)	= $(J112 - \text{СМЕЦ}(\text{Этапы 5-8!} \$J\$40; J6-1;;;)) / \text{СМЕЦ}(\text{Этапы 5-8!} \$J\$40; J6-1;;;)$	Таблица 9, п. 1.5
J114(:N114)	=-СМЕЦ(Этапы 5-8!\$O\$23;J6-1;;;)	Выражение (51), левая часть

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾	Формула / комментарий	Элемент матем. описания методики
J115:(N115)	=СМЕЩ("Этапы 5-8!"\$N\$23;J6-1;;)	Таблица 2, п. 7.7
J116:(N116)	=(J112-СМЕЩ("Этапы 5-8!"\$T\$40;J6-1;;))/ СМЕЩ("Этапы 5-8!"\$T\$40;J6-1;;)	Таблица 9, п. 1.6
J117:(N117)	=-J118	Выражение (52), левая часть
J118:N118)	Значения элемента исходных данных	Таблица 2, п. 7.9;
J119:(N119)	="Этапы 5-8!"\$L\$54*СМЕЩ("Этапы 5-8!"\$M\$23;J6-1;;)*СМЕЩ("Этапы 5-8!"\$K\$23;J6-1;;)*J112	Таблица 9, п. 1.7
Таблица 12		
L125	Значение элемента исходных данных	Таблица 2, п. 3.5
L126	=МУМНОЖ(J110:N110;"Этапы 5-8!"K23:K27)	Таблица 9, п. 2.1
L127	=СУММ(J111:N111)	Таблица 9, п. 2.2
L128	=СУММ(J119:N119)	Таблица 9, п. 2.3
L129	="Этапы 5-8!"L56*(1-L125)	Таблица 9, п. 2.4
L130	=ЕСЛИОШИБКА(L127/L128;"-")	Таблица 9, п. 2.5
Таблица 13		
A138:(A142)	="Этапы 5-8!"A23	Таблица 2, п. 2.4
B138:(G142)	="Этапы 5-8!"B23	Таблица 2, п. 7.1
H138:(H142)	=ЕСЛИОШИБКА(ПОИСКПОЗ(1;СМЕЩ(\$J\$9;; A138-1;"Этап 2!"L39;);0);"-")	Выражение (54)
I138:(I142)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(H138);СМЕЩ(\$B\$9;H138-1;;);"-")	Таблица 2, п. 4.1; выражение (54)

Примечание

⁽¹⁾ абстрактное обозначение A1:(B10) означает, что в ячейку A1 необходимо ввести формулу, указанную в соответствующем столбце таблицы, после чего полученный результат «растянуть» (скопировать) до ячейки B10.

Таблица 6. Значения настроек надстройки «OpenSolver» для реализации оптимизационных моделей в рамках этапов 5 и 7 разработанной методики

Table 6. Values of the settings of the «OpenSolver» add-in for the implementation of optimization models within the framework of stages 5 and 7 of the developed methodology

№ п.п.	Наименование параметра настройки	Значение для оптимизационной модели, реализуемой на определенном этапе методики, с целевой функцией вида					Элемент матем. описания методики
		этап 5				этап 7	
		$F_1 \rightarrow \min$	$F_2 \rightarrow \min$	$F_1 \rightarrow \max$	$F_2 \rightarrow \max$	$\Omega \rightarrow \max$	
		таблица 7, строка 1	таблица 7, строка 2	таблица 7, строка 3	таблица 7, строка 4	выражение (40)	
1.1	Ячейка целевой функции	L58	L59	L58	L59	L60	-
1.2	Тип задачи оптимизации	минимум			максимум		
2.1	Ячейки переменных	K40:K44					Таблица 4, п. 1.2
2.2		N40:N44					Таблица 4, п. 1.3
2.3		P40:P44					
2.4		L51					Таблица 4, п. 2.1
3.1	Ограничения	K40:K44 >= L40:L44					Выражение (27)
3.2		K40:K44 <= M40:M44					
3.3		N40:N44 >= 0					Выражение (28)
3.4		P40:P44 >= 0					Выражение (29)
3.5		R40:R44 = S40:S44					Выражение (30)
3.6		N40:N44 <= O40:O44					Выражение (31)
3.7		P40:P44 <= Q40:Q44					Выражение (32)
3.8		L51 >= L52					Выражение (33)
3.9		L51 <= L53					
3.10		L57=1					
4	Алгоритм	COIN-OR CBC (симплекс-метод)					-

Таблица 7. Значения настроек надстройки «OpenSolver» для реализации оптимизационной модели в рамках этапа 9 разработанной методики

Table 17. Values of the settings of the «OpenSolver» add-on for the implementation of the optimization model within the framework of stage 9 of the developed methodology

№ п.п.	Наименование параметра настройки	Значение	Элемент матем. описания методики
1.1	Ячейка целевой функции	L126	Выражение (48)
1.2	Тип задачи оптимизации	минимум	
2	Ячейки переменных	J9:N108	Таблица 8, п. 1.1
3.1	Ограничения	J9:N108 = bin	Выражение (49)
3.2		J109:N109 = 1	Выражение (50)
3.3		J113:N113 >= J114:N114	Выражение (51)
3.4		J113:N113 <= J115:N115	
3.5		J116:N116 >= J117:N117	Выражение (52)
3.6		J116:N116 <= J118:N118	
3.7		L128 >= L129	Выражение (53)
4	Алгоритм	COIN-OR CBC (метод ветвей и границ)	-

а)

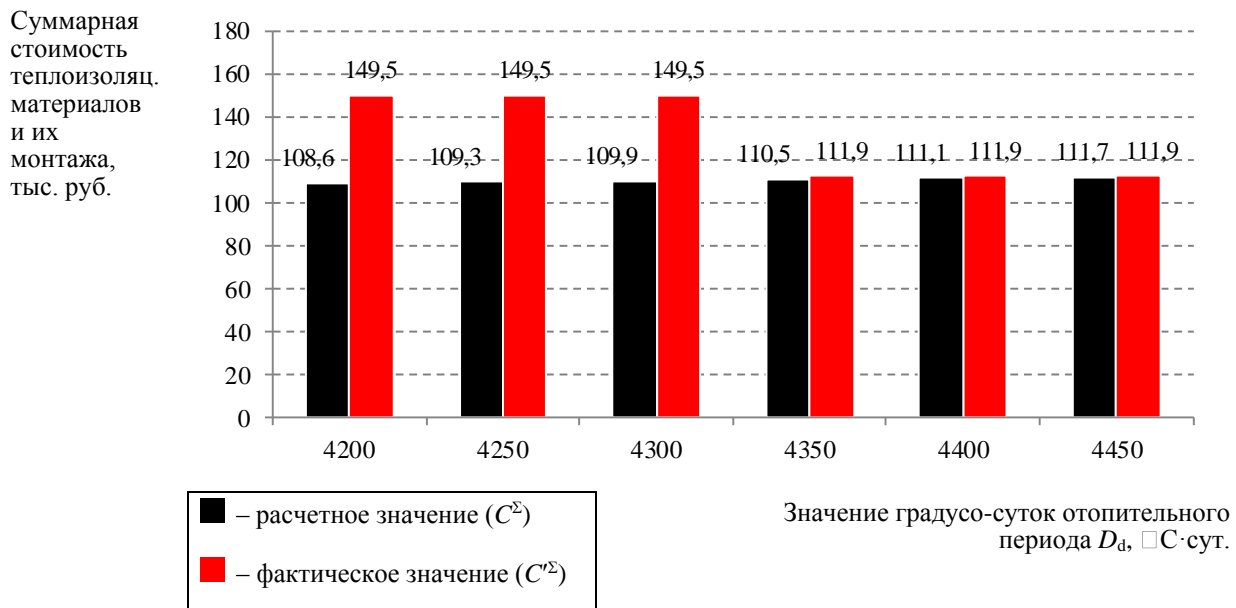
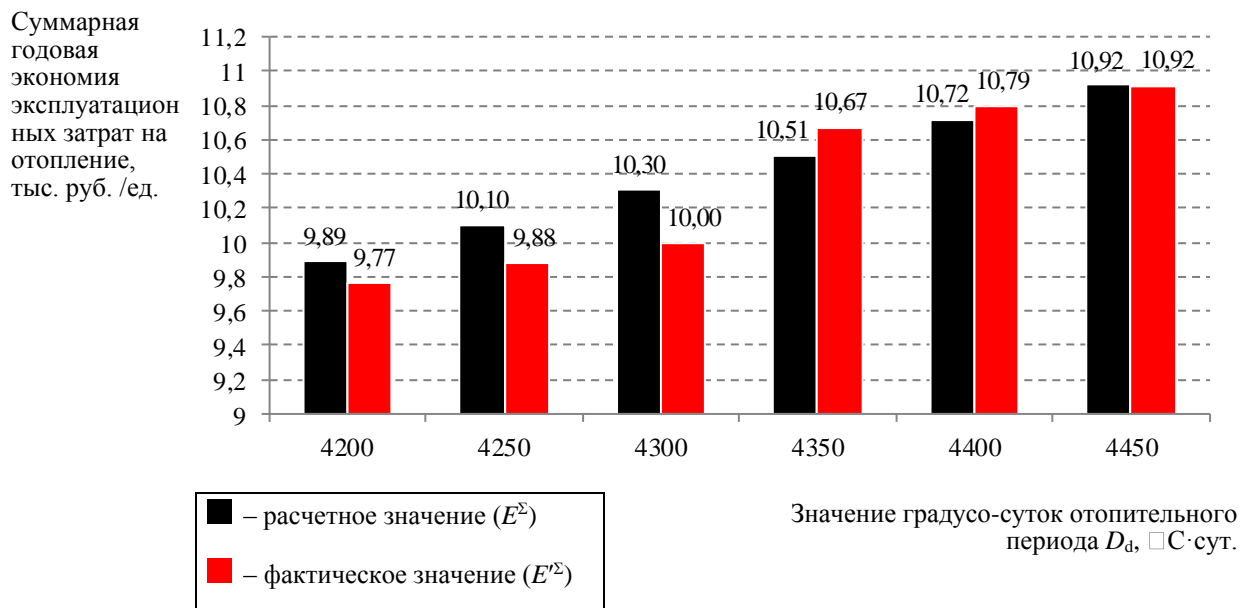


Рис. 6 а. Результаты анализа чувствительности, выполненного в процессе реализации методики на практическом примере

Fig. 6 a. Results of the sensitivity analysis performed in the process of implementing the methodology on a practical example

б)



в)

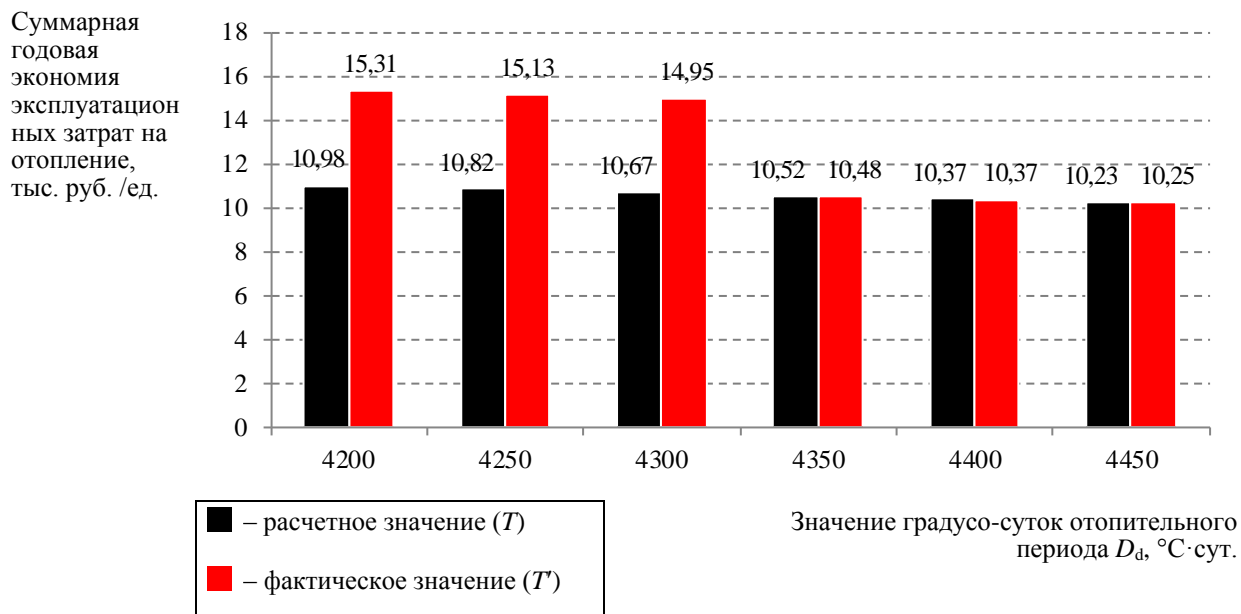


Рис. 6 б, в. Результаты анализа чувствительности, выполненного в процессе реализации методики на практическом примере

Fig. 6 б, в. Results of the sensitivity analysis performed in the process of implementing the methodology on a practical example

Таким образом, полученные в процессе реализации методики на практическом примере соответствуют реальным условиям эксплуатации объектов жилищного строительства, что позволяет сделать вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

ВЫВОДЫ

В рамках выполнения основных этапов исследования были получены следующие результаты:

1. Выполнен обзор и сравнительный анализ научных работ в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства; результаты выполнения вышеупомянутых процедур позволили сделать вывод об ограниченности существующих инструментальных средств, специфические особенности которых не обеспечивают формирование эффективных решений в части применяемых в составе ограждающих конструкций теплоизоляционных материалов.

2. Разработана методика обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства, предполагающая последовательную реализацию моделей дробно-линейной и целочисленной линейной оптимизации для обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в составе ограждающих конструкций с использованием предварительно сформированных зависимостей удельной стоимости теплоизоляционного материала от его технических характеристик.

3. Разработанная методика реализована на практическом примере для решения задачи обоснования состава образцов теплоизоляционного материала для проекта двухэтажного коттеджа, расположенного на территории Санкт-Петербурга. На основе результатов выполнения процедуры сделан вывод о высокой практической значимости разработанной методики.

Вышеперечисленные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Формирование эффективных решений в области устройства ограждающих конструкций в составе объекта гражданского строительства на основе совместно рассматриваемых критериев энергетической и экономической эффективности может быть выполнено с использованием:

- средств аналитического моделирования – для формализации зависимости удельной стоимости теплоизоляционного материала в составе каждой отдельной ограждающей конструкции от технических характеристик;
- средств оптимизационного моделирования – для обоснования наиболее предпочтительных значений технических характеристик теплоизоляционного

материала в составе каждой отдельной ограждающей конструкции.

2. Адекватность результатов обоснования обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства существенно зависит от состава образцов теплоизоляционного материала, учитываемых по отношению к каждой отдельной ограждающей конструкции в рамках объекта жилищного строительства.

На дальнейших этапах исследования предполагается укрупнение состава учитываемых образцов теплоизоляционного материала для формирования универсальных зависимостей показателей энергетической эффективности конструктивного решения от технических характеристик материалов, применяемых в составе ограждающих конструкций объекта строительства, а также параметров внутренней и внешней среды (в частности, величины градусо-суток отопительного периода).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zubarev K., Gagarin V. Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Т. 247. P. 625-634. EDN DYJJSQ
2. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes // Sustainability. 2022. Т. 14. № 10. P. 5914. EDN IXJBWJ
3. Musorina T., Bagautdinov R., Rakova X. Energy-efficiency of industrial area as a part of renovation project // Construction of unique buildings and structures. 2016. № 12 (51). P. 61-72. EDN XUWFGX
4. Terekh M., Tretyakova D., Morozova N., Zemitis J. Cost and energy assessment of buildings thermal protection level // В сборнике: Proceedings of EECE 2019. Energy, Environmental and Construction Engineering. Cham, 2020. С. 191-204. EDN VCSMPV
5. Zubarev K., Gagarin V. Heat and moisture regimes in the facade thermal insulation composite system with polystyrene insulation // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 247. P. 247-255. EDN PLRUUF
6. Чакин Е.Ю. Энергоэффективные теплоизоляционные материалы для ограждающих стеновых конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 1 (6). С. 9-18. EDN GYDSPL
7. Попов Г.П. Анализ рынка теплоизоляционных материалов // Инженерные исследования. 2021. № 3 (3). С. 3-8. EDN ICRUNH
8. Гамаюнова О.С. Методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения"). СПб.: Санкт-

Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020. 166 с. EDN CJHXXK

9. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Оценка прогнозируемых сроков окупаемости работ по утеплению фасадов при капитальном ремонте жилых зданий первых массовых серий // Кровельные и изоляционные материалы. 2015. № 6. С. 33-39. EDN VSUTON

10. Вилинская А.О., Немова Д.В., Давыдова Е.И., Гнам П.А. Повышение класса энергоэффективности общественного здания // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 9 (36). С. 7-17. EDN VHGLBX

11. Горшков А.С., Ватин Н.И., Рымкевич П.П., Кудревич О.О. Период возврата инвестиций в энергосбережение // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 2 (78). С. 65-75. EDN XPKZSP

12. Горшков А.С., Корниенко С.В. Технико-экономическое обоснование фасадных систем // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 1 (76). С. 30-40. EDN WCVLIK

13. Горшков А.С., Рымкевич П.П. Методика и пример расчета окупаемости инвестиций при реализации энергосберегающих мероприятий в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 9 (188). С. 40-45. EDN SZSWMJ

14. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Немова Д.В., Ватин Н.И. Методика расчета окупаемости инвестиций по реновации фасадов существующих зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №2 (17). С. 82-106. EDN RWGNPV

15. Немова Д.В., Ватин Н.И., Горшков А.С., Кашабин А.В., Рымкевич П.П., Цейтин Д.Н. Технико-экономическое обоснование мероприятий по утеплению ограждающих конструкций индивидуального жилого дома // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 8 (23). С. 93-115. EDN SOBLWD

16. Романова А.А., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Методика расчета прогнозируемых сроков окупаемости энергосберегающих мероприятий по утеплению зданий // Техно-технологические проблемы сервиса. 2014. № 4 (30). С. 68-74. EDN TGSDWV

17. Цейтин Д.Н., Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Технико-экономическое обоснование утепления фасадов при реновации жилых зданий первых массовых серий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 1 (40). С. 20-31. EDN VLNKSB

18. Ярцев, В.П., Струлев С.А., Мамонтов А.А., Струлева И.А., Жеребцов А.В., Попинако Е.О. Анализ экономической целесообразности применения различных ограждающих конструкций зданий // Кровельные и изоляционные материалы. 2018. № 4. С. 29-32. EDN OZSYFN

19. Иванова И.Б., Романов М.А. Выбор проектного решения на основе системы показателей с использованием метода парных сравнений //

Социально-экономическое управление: теория и практика. 2019. №1 (36). С. 80-82. EDN UQDZZK

20. Петров П.В., Резанов Е.М., Ведрученко В.Р., Стариков А.П. Определение оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 254-258. EDN VCNURV

21. Стахов А.Е., Андреев А.А. Экономическая оценка конструктивных решений тепловой защиты зданий // АВОВ: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2018. № 4. С. 42-47. EDN UQQGPG

22. Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies // Applied Energy. 2015. No 139. Pp.131-150.

23. Алексейцев А.В. Поиск рациональных параметров строительных конструкций на основе многокритериальной эволюционной оптимизации // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 7. С. 18-22. EDN ATOHRX

24. Wei Yu, Baizhan Li, Hongyuan Jia, Ming Zhang, Di Wang. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design // Energy and Buildings. 2015. No 88. Pp. 135-143.

25. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С. Обоснование характеристик многослойной стеновой конструкции с использованием средств квадратичного программирования // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 111-127. EDN ORVFEG

26. Гамаюнова О.С. Обоснование стоимости утеплителей от их теплофизических характеристик // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 1 (76). С. 19-29. EDN MMSZFC

27. Gamayunova O.S., Radaev A.E., Petrichenko M.R. The procedure for determination of the dependence of the cost of insulation materials on their thermophysical characteristics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2019» 2019. P. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012018 EDN CGIXMA

28. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects // AlfaBuild. 2021. № 5 (20). С. 2003. EDN RZOJPY

29. Теплопроводность строительных материалов, их плотность и теплоемкость. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmaterialy/teploprovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost> (дата обращения 30.07.2021).

REFERENCES

1. Zubarev K., Gagarin V. Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Т. 247. P. 625-634. EDN DYJJSQ
2. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes // *Sustainability*. 2022. Т. 14. № 10. P. 5914. EDN IXJBWJ
3. Mussorina T., Bagautdinov R., Rakova X. Energy-efficiency of industrial area as a part of renovation project // *Construction of unique buildings and structures*. 2016. № 12 (51). P. 61-72. EDN XUWFGX
4. Terekh M., Tretyakova D., Morozova N., Zemītis J. Cost and energy assessment of buildings thermal protection level // В сборнике: *Proceedings of EECЕ 2019. Energy, Environmental and Construction Engineering*. Cham, 2020. С. 191-204. EDN VCSMPV
5. Zubarev K., Gagarin V. Heat and moisture regimes in the facade thermal insulation composite system with polystyrene insulation // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Т. 247. P. 247-255. EDN PLRUUF
6. Chakin E.Yu. Energy efficient thermal insulation materials for enclosing wall structures // *Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]*. 2022. No. 1(6). Pp. 9-18. EDN GYDSPL
7. Popov G.P. Analysis of the market for thermal insulation materials // *Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]*. 2021. No. 3(3). Pp. 3-8. EDN ICRUNH
8. Gamayunova O.S. Methodology for substantiating the thermal characteristics of wall structures of residential buildings: a dissertation for the degree of candidate of technical sciences (specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures»). St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2020. 166 p. EDN: CJHWXK
9. Vatin, N.I. Nemova, D.V. Rymkevich, P.P. Gorshkov, A.S. Assessment of projected payback period of works on warming of facades during capital repairs of residential buildings of the first mass series // *Roofing and insulation materials*. 2015. No. 6. Pp. 33-39. EDN VSUTOH
10. Vilinskaya A.O., Nemova D.V., Davydova E.I., Gnam P.A. Rising the energy efficiency class of public building // *Construction of unique buildings and structures*. 2015. No. 9 (36). Pp. 7-17. EDN VHGLBX
11. Gorshkov, A.S. Vatin, N.I. Rymkevich, P.P. Kydrevich, O.O. Payback period of investments in energy saving // *Magazine of civil engineering*. 2018. № 2 (78). С. 65-75. EDN XPKZSP
12. Gorshkov, A.S. Korniyenko, S.V. The technical and economic basis of facade systems // *Construction of unique buildings and structures*. 2019. № 1 (76). Pp. 30-40. EDN WCVLIK
13. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. Methodology and sample calculation of ROI when implementing energy saving measures in building // *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2014. № 9 (188). Pp. 40-45. EDN SZSWMJ
14. Gorshkov, A.S. Rymkevich, P.P. Nemova, D.V. Vatin, N.I. Method of calculating the payback period of investment for renovation of building facades // *Construction of unique buildings and structures*. 2014. №2 (17). Pp. 82-106. EDN RWGNPV
15. Nemova, D.V. Vatin, N.I. Gorshkov, A.S. Kashabin, A.V. Rymkevich, P.P. Tseitin, D.N. Technical and economic assessment on actions for heat insulation of external envelopes of an individual house // *Construction of unique buildings and structures*. 2014. № 8 (23). Pp. 93-115. EDN SOBLWD
16. Romanova A.A., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Calculating methods for the projected payback of energy-saving measures for buildings insulation // *Technical and technological problems of service*. 2014. № 4 (30). Pp. 68-74. EDN TGSDWV
17. Tseytin, D.N. Vatin, N.I. Nemova, D.V. Rymkevich, P.P. Gorshkov, A.S. Feasibility study for renovation of facades heat insulation of residential buildings of the first mass series // *Construction of unique buildings and structures*. 2016. № 1 (40). P. 20-31. EDN VLNKSB
18. Yartsev V.P., Strulev S.A., Mamontov A.A., Struleva I.A., Zherebtsov A.V., Popinako E.O. Analysis of economic feasibility of the various enclosing structures of buildings // *Roofing and insulation materials*. 2018. № 4. С. 29-32. EDN OZSYFN
19. Ivanova, I.B., Romanov, M.A. Selection of the design solution based on the system of indicators using the method of pair comparisons // *Socio-economic management: theory and practice*. 2019. №1 (36). С. 80-82. EDN UQDZZK
20. Petrov P.V., Rezanov E.M., Vedruchenko V.R., Starikov A.P. Determination of optimum thickness of thermal isolation of the protecting designs of buildings at capital repairs // *Omsk Scientific Bulletin*. 2015. № 3 (143). Pp. 254-258. EDN VCNURV
21. Stakhov A.E., Andrenko A.A. Economic assessment of structural solutions for thermal protection of buildings // *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics*. 2018. № 4. P. 42-47. EDN UQQGPG
22. Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies // *Applied Energy*. 2015. No 139. Pp.131-150.
23. Alekseytsev A.V. Search for rational parameters of building structures based on multi-criteria evolutionary optimization // *Industrial and Civil Construction*. 2019. № 7. Pp. 18-22. EDN ATOHRX
24. Wei Yu, Baizhan Li, Hongyuan Jia, Ming Zhang, Di Wang. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design // *Energy and Buildings*. 2015. No 88. Pp. 135-143.
25. Radaev A.E., Gamayunova O.S. Substantiation of the characteristics of a multilayer wall structure using quadratic programming tools // *Construction and*

technogenic safety. 2021. No. 22 (74). pp. 111-127. EDN ORVFEG

26. Gamayunova O.S. Determination of the cost of insulation on their thermophysical characteristics // Construction of unique buildings and structures. 2019. № 1 (76). Pp. 19-29. EDN MMSZFC

27. Gamayunova O.S., Radaev A.E., Petrichenko M.R. The procedure for determination of the dependence of the cost of insulation materials on their thermophysical characteristics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2019» 2019. P.

012018. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012018 EDN CGIXMA

28. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects // AlfaBuild. 2021. № 5 (20). P. 2003. EDN RZOJPY

29. Thermal conductivity of building materials, their density and heat capacity. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmaterialy/teploprovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost> (дата обращения 30.07.2021).

USE OF OPTIMIZATION MODELING TOOLS TO JUSTIFY THE CHARACTERISTICS OF ENERGY EFFICIENT STRUCTURAL SOLUTION

Radaev¹ A.E., Gamayunova² O.S., Bardina³ G.A

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29
E-mail: ¹tw-inc@yandex.ru, ²gamayunova@inbox.ru, ³bardina_ga@spbstu.ru

Abstract. Ensuring of the required thermal efficiency indicators the of enclosing structures within modern housing construction objects is not less important than ensuring of the reliability and durability for the design solutions used. Since the most common way to improve the energy efficiency of housing construction objects proposes the application of heat-insulating materials as part of the corresponding enclosing structures, the variety of models for the mentioned materials, coupled with the variability of technical solutions connected to the installation of multilayer enclosing structures as part of the construction object, determines the high importance of solving the problems connected to justification of the characteristics for the mentioned technical solutions on the basis of economic and energy efficiency criteria. This circumstance determined the feasibility of the conduction of the research aimed to the development of the tools for justification of the characteristics for design solution connected to ensuring of the energy efficiency for a housing construction object with the use of optimization modeling tools. At the intermediate stages of the study, the procedure has been developed for the justification of the characteristics for a design solution connected to the ensuring of the energy efficiency for a housing construction object with the use of optimization modeling tools. The procedure assumes the formation of analytical models, each of which describes the dependence of the unit cost of the heat-insulating material on its technical characteristics for a certain enclosing structure within the construction object, the creation and implementation of a fractional-linear optimization model to obtain preliminary (mathematical ideal) values for the technical characteristics of the material within each enclosing structure, as well as an integer linear optimization model to form the composition of the most preferred samples (models) of the material for enclosing structures within the construction object. At the final stages of the study, the above-mentioned procedure has been implemented on a practical example to solve the problem connected to the justification the characteristics of a design solution in the field of ensuring the energy efficiency for the designed housing construction object – a two-story cottage located on the territory of St. Petersburg city, also the analysis of the results obtained has been performed.

Subject: technical and cost characteristics of the heat-insulating material as part of the enclosing structures within the housing construction project.

Materials and methods: procedure for justification of the characteristics for a constructive solution connected to ensuring of the energy efficiency for a housing construction object with th use of optimization modeling tools, developed as part of the intermediate stages of the study.

Results: The developed procedure has been implemented on a practical example to solve the problem of justification of the composition of heat-insulating material samples for the project of a two-story cottage located on the territory of St. Petersburg, an analysis of the sensitivity of the characteristics for the formed design solution in relation to the degree-day value of the heating period.

Conclusions: based on the results, a conclusion has been made about the high practical significance of the developed procedure; the dependence of the adequacy of the obtained results on the composition of the heat-insulating material samples taken into account for each individual enclosing structure within the construction object has been revealed.

Key words: Enclosing structure, resistance to heat transfer, payback period, optimization model, energy efficiency, heat-insulating material.

УДК 691.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В БЕТОННЫХ КОМПОЗИТАХ

Коряковцева Т.А.¹, Заборова Д.Д.¹, Гамаюнова О.С.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
tamusorina@mail.ru, zaborova-dasha@mail.ru, gamayunova@inbox.ru

Аннотация: в статье представлен анализ использования углеродосодержащих добавок в строительстве. Выявлены преимущества нового бетонного композита на основе растительной и углеродосодержащих добавок. Даны выводы по вредному воздействию на окружающую среду и отходам при производстве нового бетонного композита.

Предмет исследования: использование отходов в качестве вторичного сырья в строительстве позволит сократить количество цемента или песка при производстве бетона. В статье предлагается в качестве добавки в бетон использовать сухую щепу борщевика длиной 50 мм. Второй добавкой в бетон является древесный уголь, который был использован в фильтрах очистки поверхностного стока (ФОПС). Целью работы является экологический анализ нового бетонного композита, состоящий из растительной добавки и активированного угля.

Материалы и методы: произведен анализ использования углеродосодержащих добавок в бетоне. С помощью EPD производителей, где собрана необходимая информация о материале, были посчитаны вредные выбросы (в эквиваленте выбросов CO₂), количество образованных отходов, получаемых при производстве бетонных композитов без добавки и бетонный композит с добавкой.

Результаты: Использование отходов других производств для создания строительных материалов может рассматриваться как вторичное сырье. Выбранные отходы позволяют создать более экологичный и менее негативный для окружающей среды материал. Из обзора литературы выявлено, что содержание углеродосодержащих добавок в бетоне приводит к улучшению механических свойств, делает его легче, снижает нагрузку от ограждающих и несущих конструкций. Получено уменьшение выбросов углекислого газа и отходов при производстве на 3% для нового бетонного композита. Объем отходов для бетонных композитов - 41,96 кг на 1 м³, объем выбросов углекислого газа - 626,8 кг на 1 м³.

Выводы: предложенные добавки не только могут улучшить свойства бетона, но и сократить количество вредного сорняка, дать возможность использовать отходы другого производства (угольные фильтры ФОПС), уменьшить негативное влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: добавка в бетон, уголь, угольные фильтры ФОПС, борщевик, негативное влияние на окружающую среду, объем отходов при производстве.

ВВЕДЕНИЕ

В строительстве разрабатываются и анализируются конструкции и материалы, снижающие чрезмерное потребление энергии и природных ресурсов [1]. В настоящее время ученые в строительной отрасли занимаются проблемами ограждающих конструкций и важно учитывать мероприятия по улучшению их энергоэффективности [2]–[4]. Важными являются вопросы энергоэффективности и экологичности зданий, но также необходимо учитывать комфорт нахождения человека в этом здании. Поэтому решаются вопросы, связанные с улучшением свойств строительных материалов и конструкций [5]–[8].

В настоящее время вопросы экологии становятся все актуальнее в связи с ростом добычи полезных ископаемых, ростом населения, которое все время вырабатывает отходы [9]. Использование отходов производства в качестве вторичного сырья в целях замещения природных сырьевых материалов – актуальная задача. Основная цель при выборе направления использования отходов – это определение вещественного состава конкретных отходов и оценки возможности их применения в качестве наиболее эффективного компонента как товарного продукта [10].

Активированный уголь — это углерод, полученный из углеродсодержащих исходных материалов, таких как бамбук, кокосовая шелуха, ивовый торф, древесина, кокосовое волокно, лигнит, уголь и нефтяной пек. Активированный уголь можно получить путем физической активации или химической активации. Форма активированного угля, известная как активированный уголь, обрабатывается для получения небольших пор небольшого объема, которые увеличивают площадь поверхности, доступную для адсорбции или химических реакций. Различные классификации активированного угля включают: порошкообразный, гранулированный, экструдированный, импрегнированный уголь и уголь с полимерным покрытием. Установлено, что сорбционная активность угля обусловлена наличием в его поверхности множества пор [11].

Экологическая проблема требует ликвидации отходов угольной промышленности. Фильтры очистки поверхностного (ливневого) стока ФОПС предназначены для очистки поверхностных (талых и ливневых) вод с автодорог, селитебных территорий и территорий промышленных предприятий. Технология фильтров ФОПС разработана, запатентована и внедрена совместно компанией ООО «Аква-Венчур», ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого». Фильтры очистки поверхностного (ливневого) стока ФОПС состоят из корзины для

мусора и самого фильтра. Содержание фильтра зависит от его назначения к применению [12-14]. Один фильтр ФОПС содержит уголь массой около 7 кг. Угольные фильтры после сроков эксплуатации не используются в дальнейшем и возникает вопрос их утилизации.

Предлагается создать бетонный композит с помощью добавления угля из фильтров в состав цемента и изучить его влияние на окружающую среду. Так как угольные фильтры являются «отходами» дождевых и талых стоков, то возникает необходимость исследования измельченных угольных фильтров в сочетании с цементом.

Цель работы – оценить негативное влияние на окружающую среду при производстве нового бетонного композита, состоящего из растительной добавки и активированного угля.

Задачи

1. Рассмотреть существующие сферы использования угля и золошлаковых отходов.
2. Рассмотреть свойства активированного угля в бетоне, определить примерные свойства нового материала
3. Рассчитать выбросы парниковых газов (в CO₂ экв.) и количество отходов, образующихся при производстве нового бетонного композита.

Ежегодно в мире производится более 20 миллиардов тонн бетона. Обычный цемент является основным источником выбросов CO₂ среди

компонентов бетона, в частности, оно обеспечивает 5–10% мировых выбросов углекислого газа. Изготовление цемента требует высокой температуры, а она достигается за счёт сжигания ископаемого топлива. Использование альтернативных вяжущих материалов настоятельно рекомендуется для снижения воздействия производства бетона на окружающую среду. Местные отходы могут быть приемлемым подходом с точки зрения экономической и экологической устойчивости благодаря их доступности на местах. Замена цемента «отходами» на основе угля дает экологические преимущества. На сегодняшний день в России и за рубежом ведутся работы по модификации бетонной смеси. Необходимо учитывать стратегию низкоуглеродной экономики, чтобы снизить количество выбросов углекислого газа. Для этой цели необходимо снизить содержание клинкера в бетонных смесях.

Потребление наибольшего количества топлива в России представлено на рисунке 1. На рисунке 2 представлена статистика по выбросам углекислого газа и парникового газа (переведено в эквивалент CO₂) в России по видам отрасли и секторам. Можно увидеть, что строительная и производственная отрасли находятся на третьем месте по негативному влиянию на окружающую среду.

CO₂ emissions by fuel type, Russia

Annual carbon dioxide (CO₂) emissions from different fuel types, measured in tonnes per year.

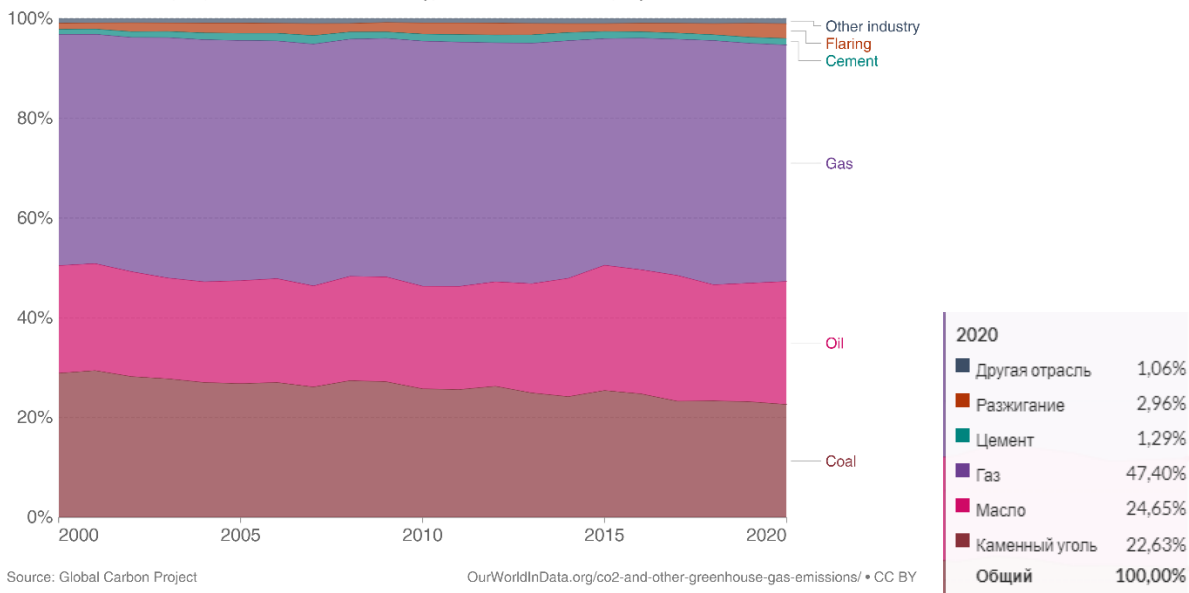
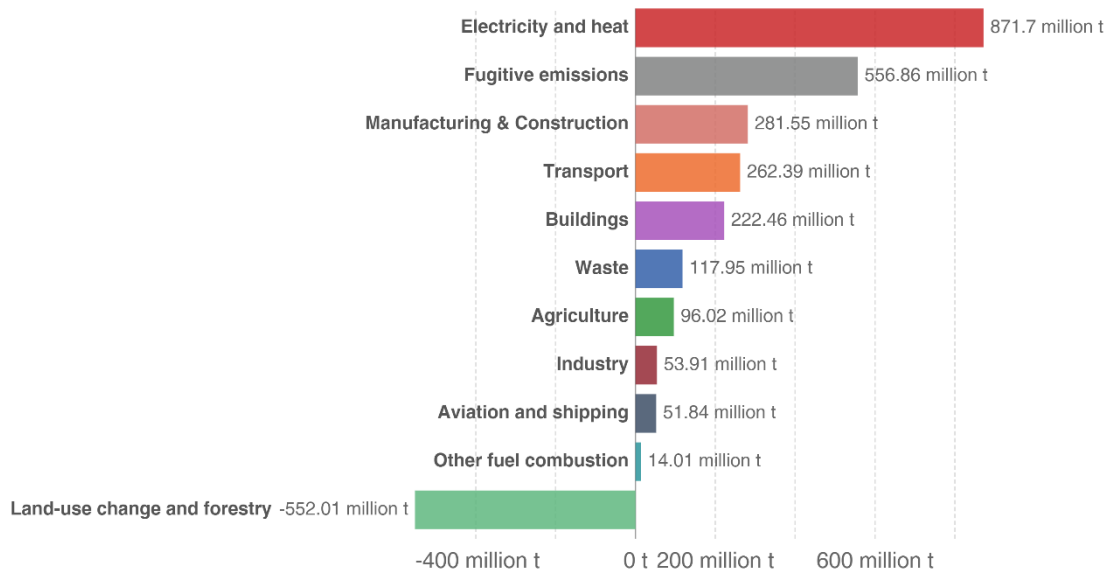


Рис. 1. Выбросы углекислого газа по видам отрасли в России [15]
Fig. 1. Carbon dioxide emissions by industry in Russia

Greenhouse gas emissions by sector, Russia, 2019



Emissions are measured in carbon dioxide equivalents (CO₂eq). This means non-CO₂ gases are weighted by the amount of warming they cause over a 100-year timescale.



Source: Our World in Data based on Climate Analysis Indicators Tool (CAIT).

Note: Greenhouse gases are weighted by their global warming potential value (GWP100). GWP100 measures the relative warming impact of one molecule of a greenhouse gas, relative to carbon dioxide, over 100 years.

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Рис. 2. Выбросы парникового газа по секторам в России за 2019 год [15]

Fig. 2. Greenhouse gas emissions by sector in Russia in 2019

Рост населения мира до ожидаемых 9,2 млрд человек к 2050 году повлечет за собой неуклонное повышение потребления строительных материалов, в том числе цемента. Одним из неблагоприятных экологических последствий производства этого искусственного материала является выброс парниковых газов, при этом выбросы CO₂ составляют 5-7 % от общемировых выбросов [16].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Сферы использования активированного угля

Активированный уголь — мелкий черный порошок, который образуется, когда древесный уголь подвергается воздействию высокой температуры. Она изменяет его внутреннюю структуру, уменьшая размер пор и увеличивая площадь поверхности [17]. Активированный уголь это мало затратный, экологически чистый и ежегодно- возобновляемый продукт. Измельченный уголь используют во многих отраслях, в том числе и в промышленности:

- дорожно-строительная отрасль — сфера применения отходов угольных ТЭС. Они являются универсальной добавкой при отсыпке дорожных насыпей, устройстве оснований и слоёв автодорог, в качестве компонента вяжущих материалов для укрепления грунтов;

- из угля и золошлаков можно изготавливать цемент, известь, золобетон, кирпич, а также

стенные, кровельные и облицовочные материалы. С добавлением этого ингредиента данная продукция приобретает особую прочность, обладая при этом низкой теплопроводностью и относительно низкой себестоимостью;

- уголь используется в производстве углеродного волокна и специализированных компонентов (к примеру, металлического кремния), которые применяются в изготовлении бытовых приборов;

- в качестве фильтрующего элемента в фильтрах системы водоотведения, для очистки воды от загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы, инсектициды и гербициды. Горючее ископаемое используют для очистки питьевых, бытовых и технических вод. Фильтры с угольной загрузкой удаляют примеси и сокращают мутность жидкости, частицы угля справляются с устранением посторонних запахов и привкусов;

- в сельском хозяйстве — как удобрение земельных участков для выращивания некоторых культур или как компоненты в составе различных минеральных удобрений;

- применяется в медицине в качестве лекарства и косметической продукции: благодаря его пористой структуре, которая имеет отрицательный электрический заряд, он помогает притягивать положительно заряженные молекулы, такие как токсины и газы. Это способствует их задержанию в кишечнике предотвращая всасывание [18].

В России много действующих тепловых электростанций, работающих на угольном топливе, в результате сжигания которого, помимо прочего, образуется огромное количество золы [19]. После

сжигания угля остаются золошлаки, которые можно применить в строительных материалах. В мире увеличивается производство строительных материалов с вкраплениями «отходных» элементов. Золошлаки являются заменителем материалов, используемых для формирования земляного полотна. Плюсы угля в широком распространении месторождений, низких ценах и отсутствии необходимости специальных условий для транспортировки

Добавки в бетон из углеродосодержащих материалов

Основной объем отходов угля используется в благоустройстве и озеленении территории, рекультивации земель, производстве материалов, для нужд дорожного строительства. Отходы угольного производства необходимо использовать в качестве вторичного сырья [20], развивать производство эффективных строительных материалов, полнее использовать вторичное сырье, рассматривая их не как отходы производства, а как ценное сырьё, источник расширения сырьевой базы [9, 21].

Бетон является наиболее универсальным материалом, который широко используется в строительстве, так как обладает преимуществами перед другими материалами. Одна из актуальнейших задач технологии строительного материаловедения - совершенствование составов и улучшение физико-технических свойств современных бетонов.

Среди известных способов снижения расхода цемента наиболее эффективными являются следующие технологические способы: дополнительное измельчение цемента; использование в качестве наполнителей в бетонной смеси тонкомолотых материалов; введение комплексных органоминеральных добавок; улучшение качества инертных заполнителей; использование многокомпонентных цементов, например пуццоланового портландцемента, быстротвердеющего шлакопортландцемента, характеризующихся пониженным содержанием клинкера.

В современных представлениях о роли высокодисперсных добавок в бетонных смесях отмечается положительное влияние оптимального количества золы от сжигания твердого топлива на структуру и физико-механические характеристики бетонных композитов: упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями с образованием кластеров «вязущее наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя; снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя; связывание гидроксида кальция аморфизованным кремнеземом пуццолановых наполнителей; повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком

измельчении и др. Получены образцы бетона с улучшенными физико-механическими свойствами благодаря введению в их состав 2-14 % (от массы цемента) золы от сжигания бурого угля [22].

В работе [23] зола выполняет функции наполнителя – тонкомолотой добавки (микронаполнителя). Положительный эффект, достигаемый благодаря наполнителю – это снижение расхода цемента высоких марок при изготовлении низкомарочных бетонов и строительных растворов, повышение плотности бетонов, их водонепроницаемости и теплозащитных свойств.

В работе [24] были предприняты попытки добавления активированного угля вместе с летучей золой в бетон. В результате максимальный прирост прочности оказался на 25% больше, чем у бетона без активированного угля. Комбинация нанозольной пыли и нанометакаолина с добавлением активированного угля может улучшить прочность бетона на сжатие и повысить надежность результатов анализа недорогостоящего метода быстрой оценки воздушных пустот в затвердевшем бетоне, поэтому влияние прочности на сжатие больше по сравнению с контрольным образцом.

В работе [25] уголь в количестве 2% и 4% по весу был впервые добавлен в систему зольного цемента для получения композитов активированный уголь-летучая зола в виде паст и строительных растворов. Было обнаружено, что использование активированного угля приводит к повышению прочности строительных растворов с летучей золой. Самая высокая прочность, полученная для цементных растворов с 20%-ной летучей золой, была обнаружена при 4%-ном активированном угле, где прочность на сжатие через 28 дней составила 22,39 МПа. Это преимущество можно ясно увидеть в цементе с летучей золой с содержанием летучей золы 20%, где важность добавления активированного угля означает, что относительная прочность по сравнению с прочностью цемента стала почти 100% через 28 дней. Кроме того, сканирующие электронные микрофотографии также показали, что хорошее взаимодействие между активированным углем и цементной матрицей летучей золы наблюдается при использовании активированного угля в качестве наполнителя, что приводит к более плотной микроструктуре и более высокой прочности по сравнению с эталонной смесью летучей золы без активированного угля.

В работе [26] были проведены лабораторные испытания для оценки возможности использования угольной золы в качестве заменителя речного песка в бетоне. Речной песок замещали золой угольного остатка по массе в бетоне при уровне замещения 0, 30, 50, 75 и 100%. Водопоглощение и начальная скорость поглощения воды за счет капиллярного действия увеличиваются при включении золы угольного остатка в производство бетона. Все бетонные смеси показали снижение средней глубины износа с возрастом, то есть повышение сопротивления истиранию.

В статье [27] сделан вывод, что добавка угольной золы до 10 % в качестве заменителя портландцемента позволяет улучшить механические свойства бетона и, таким образом, может быть использована в бетонной промышленности.

Ведение летучей золы делает внутреннюю часть цемента более плотной и предотвращает поглощение воды порошком активированного угля, что приводит к более низкому водопоглощению в экспериментальной группе с летучей золой, чем в экспериментальной группе без летучей золы. Частицы углерода заполняют часть пор и делают их более плотными, что объясняет повышенную прочность цемента на сжатие за счет добавления активированного угля [28].

Исследование [29] подтвердило, что крупность частиц материалов, заменяющих цемент, оказывает значительное влияние на прочностные характеристики бетона. Экспериментально было установлено, что 10 % измельченной золы, имеющей крупность частиц от 65 до 75 % и прошедшей через сито с размером ячеек 63 мкм, может обеспечить достаточную прочность бетона на сжатие и растяжение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование активированного угля в бетоне: свойства и способности бетонной смеси

В работе будут использованы угольные фильтры, состоящие из активированного угля БАУ-А. Активный уголь БАУ-А имеет сильно развитую общую пористость, широкий диапазон пор и значительную величину удельной поглощающей поверхности, размер частиц от 1-3 мм. Для этого необходимо исследовать состав бетонной смеси с процентным соотношением 3% угля к объему бетонного композита, и добавить растительную добавку в виде сухого борщевика в таком же процентном соотношении. Опыты и полученные свойства бетонного композита, армированного борщевиком, представлены в работе [30].

Адсорбционная природа активированного угля может быть эффективно использована для удаления токсичных загрязнителей воздуха, таких как оксиды азота, летучие органические соединения путем адсорбции на бетонных элементах (дымоходы, туннели и т.д.). Экспериментальные исследования, проведенные на цементных композитах, содержащих активированный уголь, выявили его потенциальную способность улучшать физико-механические и прочностные свойства цементных композитов. Исследователи всего мира экспериментально показали [16], [31]–[34], что присутствие активированного угля в цементных композитах положительно влияет на различные свойства цементных композитов:

1. Активированный уголь можно использовать в легком бетоне, и он действует как связующее вещество.

2. Увеличение процентного содержания активированного угля уменьшит тепловое воздействие.

3. Активированный уголь уменьшил содержание NOx (двуокиси азота, оксидов азота) от загрязнения в туннелях и гаражах.

4. Процент активированного угля может увеличить прочность на сжатие.

5. Активированный уголь уменьшает количество пор в обычном бетоне, что улучшает характеристики бетона [11].

Порошкообразный активированный уголь уменьшал содержание воздушных пустот и влиял на удельную площадь поверхности и коэффициент заполнения. Добавление небольшого количества активированного угля значительно увеличивает адсорбцию вредных газов; что ограничивало загрязнение окружающей среды. Добавление активированного угля в цементный раствор с летучей золой улучшило прочность на сжатие. [35]

В работе [36] провели эксперимент с бетоном, содержащим активированный уголь. Результат исследования показал, что улучшение эксплуатационных характеристик и долговечности бетона связано с наличием в бетоне активированного угля. Различные проценты использованного активированного угля составляли 0,48%, 1,06% и 1,43% по массе. Результаты испытаний, прочность на сжатие, прочность на изгиб и устойчивость к сульфатному воздействию, показали, что результаты были максимальными при 0,48%, 1,06% и 1,43% соответственно.

В статье [37] экспериментально изучили влияние частичной замены цемента и мелких заполнителей активированным углем в бетоне. Активированный уголь при использовании в качестве связующего вещества в бетоне уменьшает поры в бетоне, тем самым улучшая характеристики бетона. В этом исследовании цемент был частично заменен активированным углем в различных процентных соотношениях, таких как 15%, 30% и 45% по массе. Мелкие заполнители были частично заменены активированным углем в количестве 15%, 30% и 45% по массе. Прочность на сжатие и прочность на растяжение были максимальными для бетона с частичной заменой 30%, в то время как прочность на изгиб набирала максимальную прочность при частичной замене 15%. Образец, приготовленный из смесей, в которых цемент заменен активированным углем, показал большую прочность, чем образец, частично изготовленный из бетона, содержащего активированный уголь в качестве частичной замены мелкого заполнителя.

В работе [38] доля активированного угля в растительном бетоне положительно связана с пористостью, проницаемостью, водоудерживающей способностью, содержанием питательных веществ и удерживающей способностью, в то время как она отрицательно связана с сухой плотностью,

водоудерживающей способностью, силой сцепления и углом внутреннего трения. Как правило, эффект древесного активированного угля более заметен, чем эффект минерального активированного угля, особенно с точки зрения плотности в сухом состоянии, проницаемости, содержания питательных веществ и удерживающей способности.

Результаты испытаний [24] на прочность при сжатии показали, что небольшое количество активированного угля в качестве мелкого заполнителя до 1,5 мас.% увеличивает прочность на сжатие обычного цементного раствора, тогда как избыточное количество, равное или превышающее 5%, существенно снижает прочность. Однако в цементном растворе с активированным углем вода, адсорбированная гранулами активированного угля, перераспределяется и доставляется к частицам цемента во время процесса отверждения. Этот микромасштабный процесс отверждения, вызванный локальной гидратацией, способствует увеличению общей прочности цементного раствора.

Из обзора следует, что добавка из углеродосодержащих веществ положительно

влияют на механические свойства материала, но не указывается какой экологический эффект данная добавка имеет.

Расчет негативного влияния на окружающую среду нового бетонного композита с растительной добавкой и разным процентным соотношением активированного угля

Необходимо проанализировать негативное воздействие на окружающую среду при производстве предложенной бетонной смеси и понять, какое количество цемента она может сократить и предположить, какие результаты могут получиться исходя из предыдущего опыта и литературного обзора.

Отходы активированного угля, из которого состоит угольный фильтр, будут использоваться для строительных целей – создание бетонной смеси. Бетонный композит будет иметь следующий состав для 1 литра бетонной смеси, представленный в таблице 1.

Таблица 1. Состав бетонного композита
Table 1. The composition of the concrete composite

Объем смеси, л	Портландцемент М400, г	Кварцевый песок 0,63 мм, г	Пластификатор, г	Вода, мл
1	687	1253	7	253

В бетонный композит добавляются следующие добавки:

- растительная добавка борщевика размером 50x0,5x0,5 мм, объемная доля составляет 3%;
- добавка активированного угля размером 0,25-1 мм, объемная доля составляет 3%.

Каждая составляющая бетонной смеси вносит свой вес в выбросы вредных газов, так как при создании бетонной смеси должны соблюдаться пропорции составляющих.

При взаимодействии угля с водой образуются различные кислоты (например, угольная), которые взаимодействуют с гидроксидом кальция, образующимся при гидратации цемента. При этом образуются различные карбонаты, в связи с чем процесс твердения замедляется. Для изготовления бетона с использованием угля необходимо применять специальные виды вяжущих, которые обладают повышенной стойкостью к карбонатной коррозии [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

При оценке негативного влияния материала на окружающую среду в работе рассматривается только первый этап - этап производства продукта: добыча полезных ископаемых – А1, транспортировка – А2, производство материала – А3. Оценку воздействия материала на окружающую среду можно найти в экологической декларации продукта [39]. При расчете параметра «Потенциал глобального потепления GWP» в качестве эталонного газа взят диоксид углерода (CO₂). Помимо этого, при производстве любого материала образуются различные виды отходов: опасные, неопасные, радиоактивные, которые также были посчитаны.

Рассчитаем количество компонентов, необходимых для одной формы опалубки. Для опытов была использована опалубка размерами 20x6x2 см, объемом 0,24 л. Расчетное количество выбросов углекислого газа и отходов на объем образца и 1 м³ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетное значение углекислого газа и отходов
Table 2. Estimated value of carbon dioxide and waste

	Портландцемент, кг	Песок, кг	Общее количество выбросов, кг	Значение на 1 м ³ бетона, кг
Бетонная смесь без добавок (контрольная)				
Вес составляющих 1 опалубку	0,16488	0,30072		
Выбросы CO ₂ , кг	0,88	0,03326		
Выбросы на 1 опалубку	0,1451	0,0100	0,1551	646,235
Отходы, кг	0,0171	0,02515		
Отходы на 1 опалубку	0,0028	0,00756	0,0103	43,26
Бетонная смесь с добавкой по объему (борщевик 3% и уголь 3%)				
Выбросы на 1 опалубку	0,1407	0,0097	0,1504	626,848
Отходы на 1 опалубку	0,00273	0,0073	0,0101	41,96

При замене 6% процентов бетонной смеси на растительные добавки (борщевик и уголь) количестве выбросов CO₂, а также отходов, образующихся при производстве такого материала, уменьшается на 3%.

Таким образом, используя растительные добавки, можно уменьшить количество цемента, который является одним из наиболее вредных для окружающей среды материалов, активно используемый в строительной индустрии.

ВЫВОДЫ

Были получены экологическое и экономическое преимущества бетонной смеси за счет использования вторичного сырья и сорняка:

- Применение угольных фильтров и сухого борщевика позволяет утилизировать отходы (отработанные угольные фильтры и сорняк). Использование отходов в качестве вторичного сырья помогают уменьшить вес конструкции и приводят к меньшим нагрузкам на фундамент.

- Использование борщевика в бетоне может привести к уменьшению количества сорняка, который растет в большом количестве в городах и является большой проблемой для сельского хозяйства и людей. Бетонный композит может быть применен заводами-изготовителями бетонной и железобетонной продукции.

- Уголь может адсорбировать оставшиеся токсичные свойства в опилках борщевика, тем самым борщевик будет работать как пористое тело с корой, без образования осадка на поверхности опилок. Улучшение вязкости бетонной смеси и возможность не использовать пластификаторы.

- Уменьшение количества цемента в бетонном композите может привести к снижению вредных выбросов и количества отходов, образованных при производстве продукции.

Для получения значимости данной смеси необходимо провести экспериментальные

исследования образца на трехточечный изгиб и определить теплопроводность материала.

Информация о финансировании/ благодарности: проект выполнен при поддержке Российского научного фонда, соглашение 21-79-10283 от 29.07.2021 <https://rscf.ru/project/21-79-10283/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпленков Даниил, Гамаюнова Ольга. Современные строительные энергоэффективные материалы // Строительство новые технологии - новое оборудование. 2021. (12). С. 6–11.
2. Мусорина Т.А., Гамаюнова О.С., Петриченко М.Р. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений // Вестник МГСУ. 2017. № 11 (110)(12). С. 1269–1277.
3. Чакин Е.Ю., Гамаюнова О.С. Использование BIM-технологий для выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов // Инженерные исследования. 2022. № 2(7). С. 11–21.
4. Petrichenko M.R., Petrichenko R.M. Convective heat and mass transfer in combustion chambers of piston engines. Basic results // Heat Transfer - Soviet Research. 1991. № 5(23). С. 703.
5. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Mathematical Model Using Discrete-Continuous Approach for Moisture Transfer in Enclosing Construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 2(463). С. 022023. DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022023.
6. Zubarev K.P., Зобнина Ю.С. Современные исследования стены Тромба-Мишеля в концепции пассивного дома // БСТ: Бюллетень Строительной Технологии. 2022. № 1054(6). С. 58–60.
7. Petrichenko M., Ostrovaia A., Statsenko E. The Glass Ventilated Facades – Research of an Air Gap // Applied Mechanics and Materials. 2015. (725–726). С. 87–92. DOI:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.725-

726.87.

8. Зубарев К.П., Зобнина Ю.С. Анализ особенностей исполнения стены Тромба – Мишеля // *Строительство и архитектура*. 2022. № 8(155). С. 94–98.

9. Шабанов Е.А., Гилязидинова Н.В. Исследование свойств бетонных смесей с применением отходов угледобычи для строительства шахт // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 9. С. 240–244.

10. Лавриненко А.А., Свечникова Н.Ю., Коновницына Н.С., Игуменшева Е.А., Куклина О.В., Хасанзянова А.И. Использование отходов флотации битуминозных углей в производстве керамического кирпича // *Химия твердого топлива*. 2018. (6). С. 64–68. DOI:10.1134/S0023117718060099.

11. Aiswarya.S, Malvin T Moses, Lloyd Bennet Thomas J.S., Dev and G. V. Prospective Benefits of Using Activated Carbon in Cement Composites- An Overview // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2019. № 3(10). С. 289–296.

12. Греков М.А., Елагин С.В., Козинец Г.Л., Леонов Л.В., Чечевичкин А.В., Якунин Л.А. Тестовая эксплуатация фильтра-сепаратора ФОПС-С при очистке поверхностного стока с территории автопарковки // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2021. № 2. С. 38–45. DOI:10.35776/VST.2021.02.04.

13. Игоревич В.К., Лазарев Ю.Г., Чечевичкин А.В., Чечевичкин В. Н., Якунин Л. А. Совершенствование технологии очистки поверхностного стока с мостовых переходов на автомагистралях // *Путевой навигатор*. 2021. № 49(75). С. 56–62.

14. Фильтры ФОПС от производителя | Аква-Венчур [Электронный ресурс]. URL: https://aquaventure.ru/page_200_poverhnostniy_livnev_iy_stok.html (дата обращения: 21.09.2022).

15. Ritchie H., Roser M., Rosado P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions // *Our World in Data*. 2020.

16. Frías M., Vigil de la Villa R., García R., Martínez S., Villar E., Vegas I. Effect of a high content in activated carbon waste on low clinker cement microstructure and properties // *Construction and Building Materials*. 2018. (184). С. 11–19. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.216.

17. Juurlink D.N. Activated charcoal for acute overdose: a reappraisal // *British journal of clinical pharmacology*. 2016. № 3(81). С. 482–487. DOI:10.1111/BCP.12793.

18. Villarreal J., Kahn C.A., Dunford J. V., Patel E., Clark R.F. A retrospective review of the prehospital use of activated charcoal // *The American journal of emergency medicine*. 2015. № 1(33). С. 56–59. DOI:10.1016/J.AJEM.2014.10.019.

19. Делицын Л.М., Рябов Ю.В., Власов А.С. Возможные технологии утилизации золы // *“Энергосбережение.”* 2014. (2). С. 60–66.

20. Аникеев В., Силка Д. От отходов угольных электростанций к производству строительных

материалов // *Энергетическая политика*. 2021. № 1(155). С. 48–55.

21. Владимировна Ф.М., Васильевна К.Л. Применение отходов добычи и переработки угля в качестве заполнителей бетонных смесей // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2013. № 3 (172).

22. Lyahevich G.D., Lishtvan I.I., Lyahevich A.G., Dudarchik V.M., Kraiko V.M., Zvonnik S.A. Technology And Efficiency In Usage Of Brown Coal Ash For Cement And Concrete Mixtures At The Lelchitsky Deposit // *Science & Technique*. 2017. № 2(16). С. 104–112. DOI:10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112.

23. Павлович Г.С. Оптимизация составов тяжелых бетонов применением тонкодисперсных добавок // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2012. № 17 (276).

24. Sai Dinakar Swaroop M P.A.R.G. Experiment on Concrete Containing with activated carbon and Nano-fly ash, nano metakaolin // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. № 6S4(8). С. 1030–1033. DOI:10.35940/ijitee.F1212.0486S419.

25. Yang Z., Ba J., Pan J., Zheng C., Liu Z., Xu J., Li X., Yao Y. Compressive Strength and Microstructure of Activated Carbon-fly Ash Cement Composites // *Chemical Engineering Transactions*. 2017. (59). DOI:10.3303/CET1759080.

26. Singh M., Siddique R. Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate // *Journal of Cleaner Production*. 2015. (91). С. 269–278. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2014.12.026.

27. Kurama H., Kaya M. Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture // *Construction and Building Materials*. 2008. № 9(22). С. 1922–1928. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.07.008.

28. Wang Y., Ge Y., Wang X., Chen X., Li Q. The effect of powder activated carbon on mechanical properties and pore structures of cement-based mortars // *Construction and Building Materials*. 2022. (316). С. 125798. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125798.

29. Mangi S.A., Ibrahim M.H.W., Jamaluddin N., Arshad M.F., Mudjanarko S.W. Recycling of Coal Ash in Concrete as a Partial Cementitious Resource // *Resources* 2019, Vol. 8, Page 99. 2019. № 2(8). С. 99. DOI:10.3390/RESOURCES8020099.

30. Musorina T.A., Zaborova D.D., Petrichenko M.R., Stolyarov O. Flexural properties of hogweed chips reinforced cement composites // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. № 1(107). С. 107. DOI:10.34910/MCE.107.9.

31. Liu J., Nie X., Zeng X., Su Z. Long-term leaching behavior of phenol in cement/activated-carbon solidified/stabilized hazardous waste // *Journal of Environmental Management*. 2013. (115). С. 265–269. DOI:10.1016/J.JENVMAN.2012.11.026.

32. Mahoutian M., Lubell A.S., Bindiganavile V.S. Effect of powdered activated carbon on the air void characteristics of concrete containing fly ash //

Construction and Building Materials. 2015. (80). С. 84–91. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.019.

33. Krou N.J., Batonneau-Gener I., Belin T., Mignard S., Javierre I., Dubois-Brugger I., Horgnies M. Reactivity of volatile organic compounds with hydrated cement paste containing activated carbon // Building and Environment. 2015. (87). С. 102–107. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2015.01.025.

34. Horgnies M., Dubois-Brugger I., Gartner E.M. NO_x de-pollution by hardened concrete and the influence of activated charcoal additions // Cement and Concrete Research. 2012. № 10(42). С. 1348–1355. DOI:10.1016/J.CEMCONRES.2012.06.007.

35. Chowdhury B. Investigations into the role of activated carbon in a moisture-blocking cement formulation // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2004 78:1. 2004. № 1(78). С. 215–226. DOI:10.1023/B:JTAN.0000042169.37321.24.

36. Tommaso M. Di, Bordonzotti I. NO_x Adsorption, Fire Resistance and CO₂ Sequestration of High Performance, High Durability Concrete Containing Activated Carbon [Электронный ресурс]. . 06.2016 URL: <http://gamatec-projects.com/wp-content/uploads/2016/11/PPT-BioConcrete.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).

37. Venkata Krishna Chaitanya. C., Dr. Neeraja. D. Experimental Study On Strength Assessment Of Concrete With Partial Replacement Of Activated Carbon // International Journal of Advanced Scientific Technologies in Engineering and Management Sciences. 2016. № 2. С. 2454–356.

38. Gao J., Liu D., Xu Y., Chen J., Yang Y., Xia D., Ding Y., Xu W. Effects of two types of activated carbon on the properties of vegetation concrete and Cynodon dactylon growth // Scientific Reports. 2020. № 1(10). DOI:10.1038/S41598-020-71440-W.

39. ISO - ISO 14025:2006 - Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/38131.html> (дата обращения: 15.04.2022).

REFERENCES

1. Tsyplenkov Daniil, Gamayunova Olga. Modern building energy-efficient materials // Building new technologies - new equipment. 2021. (12). pp. 6–11.

2. Musorina T.A., Gamayunova O.S., Petrichenko M.R. Substantiation of constructive measures to increase the energy efficiency of wall enclosures. Vestnik MGSU. 2017. No. 11 (110) (12). pp. 1269–1277.

3. Chakin E.Yu., Gamayunova O.S. The use of BIM-technologies for the selection of energy-efficient heat-insulating materials. Inzhenernye issledovaniya. 2022. No. 2(7). pp. 11–21.

4. Petrichenko M.R., Petrichenko R.M. Convective heat and mass transfer in combustion chambers of piston engines. Basic results // Heat Transfer - Soviet Research. 1991. No. 5(23). S. 703.

5. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Mathematical Model Using Discrete-Continuous Approach for Moisture Transfer in Enclosing Construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 2(463). С. 022023. DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022023.

6. Zubarev K.P., Zobnina Yu.S. Modern studies of the Trombe-Michel wall in the concept of a passive house // BST: Bulletin of Building Technology. 2022. No. 1054(6). pp. 58–60.

7. Petrichenko M., Ostrovaia A., Statsenko E. The Glass Ventilated Facades – Research of an Air Gap // Applied Mechanics and Materials. 2015. (725–726). pp. 87–92.

DOI:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.725-726.87.

8. Zubarev K.P., Zobnina Yu.S. Analysis of the performance features of the Trombe-Michel wall // Construction and architecture. 2022. No. 8(155). pp. 94–98.

9. Shabanov E.A., Gilyazidinova N.V. Investigation of the properties of concrete mixtures using coal mining waste for the construction of mines // Innovations and investments. 2020. No. 9. P. 240–244.

10. Lavrinenko A.A., Svechnikova N.Yu., Konovnitsyna N.S., Igumensheva E.A., Kuklina O.V., Khasanzyanova A.I. The use of bituminous coal flotation waste in the production of ceramic bricks // Chemistry of solid fuels. 2018. (6). pp. 64–68. DOI:10.1134/S0023117718060099.

11. Aiswarya.S, Malvin T Moses, Lloyd Bennet Thomas J.S., Dev and G. V. Prospective Benefits of Using Activated Carbon in Cement Composites- An Overview // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET). 2019. No. 3(10). pp. 289–296.

12. Grekov M.A., Elagin S.V., Kozinets G.L., Leonov L.V., Chechevichkin A.V., Yakunin L.A. Test operation of the filter-separator FOPS-S in the treatment of surface runoff from the parking area // Water Supply and Sanitary Engineering. 2021. No. 2. S. 38–45. DOI:10.35776/VST.2021.02.04.

13. Igorevich V.K., Lazarev Yu.G., Chechevichkin A.V., Chechevichkin V.N., Yakunin L.A. Improving the technology of treating surface runoff from bridge crossings on highways. 2021. No. 49(75). pp. 56–62.

14. FOPS filters from the manufacturer | Aqua-Venture [Electronic resource]. URL: https://aquaventure.ru/page_200_poverhnostniy_livneyiy_stok.html (date of access: 09/21/2022).

15. Ritchie H., Roser M., Rosado P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions // Our World in Data. 2020.

16. Frias M., Vigil de la Villa R., García R., Martínez S., Villar E., Vegas I. Effect of a high content in activated carbon waste on low clinker cement microstructure and properties // Construction and Building Materials. . 2018. (184). pp. 11–19. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.216.

17. Juurlink D.N. Activated charcoal for acute overdose: a reappraisal // *British journal of clinical pharmacology*. 2016. No. 3(81). pp. 482–487. DOI:10.1111/BCP.12793.
18. Villarreal J., Kahn C.A., Dunford J. V., Patel E., Clark R.F. A retrospective review of the prehospital use of activated charcoal // *The American journal of emergency medicine*. 2015. No. 1(33). pp. 56–59. DOI:10.1016/J.AJEM.2014.10.019.
19. Delitsyn L.M., Ryabov Yu.V., Vlasov A.S. Possible technologies for ash utilization // “Energy saving.” 2014. (2). pp. 60–66.
20. Anikeev V., Silka D. From the waste of coal-fired power plants to the production of building materials // *Energy policy*. 2021. No. 1(155). pp. 48–55.
21. Vladimirovna F.M., Vasilievna K.L. Application of coal mining and processing wastes as fillers for concrete mixtures. North Caucasian region. *Technical science*. 2013. No. 3 (172).
22. Lyahevich G.D., Lishtvan I.I., Lyahevich A.G., Dudarchik V.M., Kraiko V.M., Zvonnik S.A. Technology And Efficiency In Usage Of Brown Coal Ash For Cement And Concrete Mixtures At The Lelchitsky Deposit // *Science & Technique*. 2017. No. 2(16). pp. 104–112. DOI:10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112.
23. Pavlovich G.S. Optimization of the compositions of heavy concrete using finely dispersed additives // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2012. No. 17 (276).
24. Sai Dinakar Swaroop M.P.A.R.G. Experiment on Concrete Containing with activated carbon and Nano-fly ash, nano metakaolin // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. No. 6S4(8). pp. 1030–1033. DOI:10.35940/ijitee.F1212.0486S419.
25. Yang Z., Ba J., Pan J., Zheng C., Liu Z., Xu J., Li X., Yao Y. Compressive Strength and Microstructure of Activated Carbon-fly Ash Cement Composites // *Chemical Engineering Transactions*. . 2017. (59). DOI:10.3303/CET1759080.
26. Singh M., Siddique R. Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate // *Journal of Cleaner Production*. 2015. (91). pp. 269–278. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2014.12.026.
27. Kurama H., Kaya M. Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture // *Construction and Building Materials*. 2008. No. 9(22). S. 1922–1928. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.07.008.
28. Wang Y., Ge Y., Wang X., Chen X., Li Q. The effect of powder activated carbon on mechanical properties and pore structures of cement-based mortars // *Construction and Building Materials*. 2022. (316). P. 125798. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125798.
29. Mangi S.A., Ibrahim M.H.W., Jamaluddin N., Arshad M.F., Mudjanarko S.W. Recycling of Coal Ash in Concrete as a Partial Cementitious Resource // *Resources* 2019, Vol. 8, Page 99. 2019. No. 2(8). P. 99. DOI:10.3390/RESOURCES8020099.
30. Musorina T.A., Zaborova D.D., Petrichenko M.R., Stolyarov O. Flexural properties of hogweed chips reinforced cement composites // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 1(107). P. 107. DOI:10.34910/MCE.107.9.
31. Liu J., Nie X., Zeng X., Su Z. Long-term leaching behavior of phenol in cement/activated-carbon solidified/stabilized hazardous waste // *Journal of Environmental Management*. 2013. (115). pp. 265–269. DOI:10.1016/J.JENVMAN.2012.11.026.
32. Mahoutian M., Lubell A.S., Bindiganavile V.S. Effect of powdered activated carbon on the air void characteristics of concrete containing fly ash // *Construction and Building Materials*. 2015. (80). pp. 84–91. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.019.
33. Krou N.J., Batonneau-Gener I., Belin T., Mignard S., Javierre I., Dubois-Brugger I., Horgnies M. Reactivity of volatile organic compounds with hydrated cement paste containing activated carbon // *Building and Environment*. 2015. (87). pp. 102–107. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2015.01.025.
34. Horgnies M., Dubois-Brugger I., Gartner E.M. NO_x de-pollution by hardened concrete and the influence of activated charcoal additions // *Cement and Concrete Research*. 2012. No. 10(42). pp. 1348–1355. DOI:10.1016/J.CEMCONRES.2012.06.007.
35. Chowdhury B. Investigations into the role of activated carbon in a moisture-blocking cement formulation // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2004 78:1. 2004. No. 1(78). pp. 215–226. DOI:10.1023/B:JTAN.0000042169.37321.24.
36. Tommaso M. Di, Bordonzotti I. NO_x Adsorption, Fire Resistance and CO₂ Sequestration of High Performance, High Durability Concrete Containing Activated Carbon [Electronic resource]. . 06.2016 URL: <http://gamatec-projects.com/wp-content/uploads/2016/11/PPT-BioConcrete.pdf> (accessed 20.09.2022).
37. Venkata Krishna Chaitanya. C D.N.. Experimental Study On Strength Assessment Of Concrete With Partial Replacement Of Activated Carbon // *International Journal of Advanced Scientific Technologies in Engineering and Management Sciences*. 2016. No. 2. S. 2454–356.
38. Gao J., Liu D., Xu Y., Chen J., Yang Y., Xia D., Ding Y., Xu W. Effects of two types of activated carbon on the properties of vegetation concrete and *Cynodon dactylon* growth // *Scientific reports*. 2020. No. 1(10). DOI:10.1038/S41598-020-71440-W.
39. ISO - ISO 14025:2006 - Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures [Electronic resource]. URL: <https://www.iso.org/standard/38131.html> (accessed 04/15/2022).

USE OF PLANT AND COAL WASTE AS A SECONDARY RAW MATERIAL IN CONCRETE COMPOSITES

Koryakovtseva T.A.¹, Zaborova D.D.¹, Gamayunova O.S.¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
tamusorina@mail.ru, zaborova-dasha@mail.ru, gamayunova@inbox.ru

Abstract: the article presents an analysis of the use of carbon-containing additives in construction. The advantages of a new concrete composite based on vegetable and carbon-containing additives are revealed. Given conclusions represents the calculations of the harmful effects on the environment and waste during the production of a new concrete composite.

Subject: the use of waste as a secondary raw material in construction will reduce the amount of cement or sand in the production of concrete. The article suggests using dry wood chips of hogweed with a length of 50 mm as an additive to concrete. The second additive to concrete is charcoal, which was used in filters for surface water treatment (FOPS). The aim of the work is an ecological analysis of a new concrete composite consisting of a vegetable additive and activated carbon.

Materials and methods: the analysis of the use of carbon-containing additives in concrete. With the help of the manufacturers' EPD, where the necessary information about the material was collected, harmful emissions (in the equivalent of CO₂ emissions), the amount of waste generated during the production of concrete composites without additives and concrete composite with additives were calculated.

Results: Waste usage from other industries can be considered as secondary raw materials to create other building materials. The selected waste allows you to create a more environmentally friendly material. From the literature review it was revealed that the content of carbon-containing additives in concrete leads to an improvement in mechanical properties, makes it lighter, reduces the load from enclosing and load-bearing structures. The reduction of carbon dioxide emissions and waste during production by 3% for the new concrete composite was obtained. The volume of waste for concrete composites is 41.96 kg per 1 m³, the volume of carbon dioxide emissions is 626.8 kg per 1 m³.

Conclusions: the proposed additives can not only improve the properties of concrete, but also reduce the amount of harmful weed, make it possible to use waste from another production (coal filters FOPS), reduce the negative impact on the environment.

Key words: additive to concrete, coal, coal filters FOPS, hogweed, negative impact on the environment, the volume of waste in production.

УДК 699.8:69.04

ПРУЖИННО-МАССОВАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Чемодуров В.Т.¹, Литвинова Э.В.³, Ажермачев С.Г.², Кореньков П.А.⁴

Институт «Агротехнологическая академия»
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
295492, г. Симферополь, п. Аграрное;
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».
Адрес: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;
e-mail: ¹Chens_mu1@mail.ru, ²Sga.simf@gmail.com, ³Ellalit@mail.ru, ⁴KorenkovPA@mgsu.ru

Аннотация. Предельные нагрузки при нагружении здания импульсной нагрузкой лимитируются стойкостью сооружения, которая обеспечивается в том случае, если усилия во внутренних связях, перегрузки в ряде критических точек при сотрясении не превышают заранее заданных (предельных) значений. Оценку стойкости сооружения легко получить с помощью механико-математической модели колебания конструкции. Такая модель позволяет с достаточной степенью адекватности воспроизвести реакцию конструкции на внешнее воздействие. В статье рассмотрен вопрос расчета рамно-стержневой конструкции, работающей в условиях приложения запредельной нагрузки. Теория решения такой задачи построена на основе применения пружинно-массовой модели реальной конструкции. Живучесть рамно-стержневой конструкции оценивается ее состоянием при внезапном хрупком отключении одной из вертикальных связей.

Предмет исследования: Расчет рамно-стержневой конструкции, работающей в условиях приложения аварийного динамического воздействия.

Материалы и методы: Пружинно-массовая схема сложного объекта моделирования, каким является строительное сооружение, обычно содержит несколько десятков дискретных масс, соединенных в общую схему. Колебания элементов строительного сооружения описывается дифференциальными уравнениями второго порядка, определяющими состояние каждого узла пружинно-массовой схемы в последующий момент времени в зависимости от состояния данного и соседних узлов в два предыдущих момента времени.

Результаты: Живучесть рамы оценивается ее состоянием при внезапном хрупком отключении одной из вертикальных связей. С этой целью представим раму в виде ее пружинно-массовой схемы. Здесь общая масса системы разделена на девять сосредоточенных масс. Предварительно определим распределенные массы стержневых элементов (горизонтальных и вертикальных). Декременты затухания связей обычно определяются экспериментально. Из практического опыта связь между жесткостью и декрементом затухания механических систем имеет вид $h_{ij} \approx 0,01c_{ij}$. Жесткость зависит от площади поперечного сечения стержня и обобщенного модуля упругости. Рассмотрим аварийную ситуацию рамы при внезапном отключении первой связи. В этом случае исчезает опора под соответствующей массой. Время действия импульса силы обычно выбирается как одна четверть периода собственных колебаний. Изучая колебательные процессы системы можно всегда определить смещение по вертикали двух сосредоточенных масс. Зная смещения двух масс, расположенных по горизонтали, но в вертикальной плоскости можно, используя таблицы строительной механики, определить изгибающий момент и нормальные напряжения, которые и будут определять процесс трещинообразования бетона и снижения модуля упругости горизонтальных элементов рамы.

Выводы: Применение пружинно-массовых схем для оценки живучести строительных сооружений позволяет дать достаточно точную оценку напряженного состояния элементов проектируемой конструкции и определить меры для предотвращения цепной разрушительной реакции при выходе из строя какого-либо элемента. Такие модели дают возможность во времени определять перемещения узлов конструкции, их скоростей и ускорений, как источники для расчета деформаций в конструкции. Наиболее сложным и неопределенным вопросом является учет жесткости и ее изменение в колебательном процессе, если учитывать предварительное сжатие, свойства текучести и ползучести бетона.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, живучесть зданий и сооружения, рамно-стержневая конструкция, пружинно-массовая схема.

ВВЕДЕНИЕ

При нагружении здания импульсной нагрузкой оно получает сотрясение. Предельные нагрузки при этом лимитируются стойкостью сооружения, которая обеспечивается в том случае, если усилия во внутренних связях, перегрузки в ряде критических точек при сотрясении не превышают заранее заданных (предельных) значений. Оценку стойкости сооружения легко получить с помощью механико-математической модели колебания конструкции. Такая модель позволяет с достаточной степенью адекватности воспроизвести реакцию конструкции на внешнее воздействие.

Универсальные возможности механико-математических моделей предопределили их широкое распространение при расчетах динамического нагружения сложных конструкций. В них использованы различные подходы к представлению рассматриваемого объекта моделирования, например, с помощью методов конечных элементов, граничных элементов, пружинно-массовых схем [1-3]. В последнем случае непрерывно распределенная масса объекта воздействия заменяется дискретными массами, приведенным к его отдельным узлам. Упругие связи заменяются невесомыми пружинами, внутреннее трение учитывается при помощи декрементов затухания, определяемых экспериментально.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В научных публикациях последних лет рассмотрены и решены отдельные задачи, связанные проблемой конструктивной безопасности, изучен ряд новых особенностей напряженно деформированного состояния конструкций зданий и сооружений при таких воздействиях, вызывающих в конструкциях особое предельное состояние [4-6].

Задачи оценки стойкости к прогрессирующему обрушению конструкций пордверженных динамическим воздействиям решаются как квазистатическими, так и прямыми динамическими методами [7-9]. В нем разрабатываются теоретические положения и методы расчета на живучесть, решаются прикладные задачи определения критических нагрузок и форм потери устойчивости [10], а также влияния различных конструктивных особенностей [11,12].

Для установления равновесия конструктивной системы использованы два подхода [13,14]:

1) принцип возможных перемещений, по которому: если система находится в равновесии, то сумма работ всех внешних и внутренних сил на любых бесконечно малых перемещениях равна нулю;

2) свойство потенциальной энергии системы, по которому: если система находится в равновесии, ее потенциальная энергия (т.е. энергия внешних и внутренних сил) имеет экстремальное значение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пружинно-массовая схема сложного объекта моделирования, каким является строительное сооружение, обычно содержит несколько десятков дискретных масс, соединенных в общую схему [15, 16]. Колебания элементов строительного сооружения описывается дифференциальными уравнениями второго порядка, определяющими состояние каждого узла пружинно-массовой схемы в последующий момент времени $(t + \Delta t)$ в зависимости от состояния данного и соседних узлов в два предыдущих момента времени (t) и $(t - \Delta t)$

$$m_i \ddot{x}_i = c_{i-1,i}(x_{i-1} - x_i) + h_{i-1,i}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) - c_{i,i+1}(x_i - x_{i+1}) - h_{i,i+1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}). \quad (1)$$

Здесь: m_i – масса i – го элемента; $c_{i-1,i}$, $h_{i-1,i}$ – жесткость и коэффициент демпфирования, связывающие массы с индексами $i - 1$ и i ; x_i , \dot{x}_i , \ddot{x}_i – перемещение, скорость и ускорение i – ой точечной массы.

В матричной форме система имеет вид

$$A\ddot{x} + B\dot{x} + Cx = F. \quad (2)$$

Здесь: A , B , C – соответственно квадратные матрицы инерции, затухания и восстановления; F – вектор-столбец возмущающих функций. При

импульсном нагружении системы только один элемент столбца F отличен от нуля – элемент, соответствующий приложению внешней нагрузки.

Существенным моментом при разработке расчетной схемы сооружения является определение жесткостей как вертикальных, так и горизонтальных ее элементов. Жесткость соединительных узлов вертикальных элементов конструкции зависит от площади сечений и модуля упругости материалов. Жесткость горизонтальных элементов сооружения зависит от материала, площади поперечного сечения, а также от внешних нагрузок по длине пролета. Важным фактором, влияющим на жесткость горизонтальных элементов, является частота собственных колебаний данных элементов. Рассмотрим колебания горизонтальных стержней и определим частоты их собственных колебаний [12, 13].

При переменной по длине балки ее жесткости основное уравнение поперечных колебаний имеет вид

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E_{red} J_{red} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (3)$$

Здесь: x – координата вдоль оси баки; y – поперечный прогиб; $E_{red} J_{red}$ – приведенная изгибная жесткость сечения балки; m – ее масса.

Решение уравнения (3) ищется путем разложения функции по собственным формам колебаний с представлением в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одной переменной

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} X_k(x) T_k(t). \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$T_k(t) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E_{red} J_{red} \frac{\partial^2 X_k(x)}{\partial x^2} \right) + m X_k(x) \frac{\partial^2 T_k(t)}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Разделяем переменные

$$\frac{\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E_{red} J_{red} \frac{\partial^2 X_k(x)}{\partial x^2} \right)}{m X_k(x)} = - \frac{\frac{\partial^2 T_k(t)}{\partial t^2}}{T_k(t)} = -\omega_k^2.$$

Получим два уравнения:

$$\frac{\partial^2 T_k(t)}{\partial t^2} + \omega_k^2 T_k(t) = 0, \quad (6)$$

$$[E_{red} J_{red} X_k''(x)]'' - \omega_k^2 m X_k(x) = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (4) имеет вид уравнения колебаний с одной степенью свободы

$$T_k(t) = A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k). \quad (8)$$

Или

$$T_k(t) = A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t. \quad (9)$$

Постоянные в уравнениях (8) и (9) зависят от начальных условий.

Уравнение (7) невозможно решить аналитическими методами. Решение его ищется приближенными методами, например, методом Бубнова-Галеркина. Представим решение функции $y(x)$ в виде бесконечного ряда

$$y(x) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i = a_1 \varphi_1 + a_2 \varphi_2 + \dots \quad (10)$$

Подставим ряд (10) в выражение (7). Будем иметь

$$\left(E_{red} J_{red} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i'' \right)'' - \omega_k^2 m \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i = 0. \quad (11)$$

Умножим равенство (11) на любую функцию $\varphi_j(x)$, при этом равенство (11) не будет нарушено

$$\left[\left(E_{red} J_{red} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i'' \right)'' - \omega_k^2 m \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i \right] \varphi_j = 0.$$

Интегрируем это выражение по длине балки

$$\int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i'' \right)'' - \omega_k^2 m \sum_{i=1}^{\infty} a_i \varphi_i \right] \varphi_j dx = 0 \quad (12)$$

Развернем (12)

$$\begin{aligned} & a_1 \int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_1'' \right)'' \varphi_j - \omega_k^2 m \varphi_1 \varphi_j \right] dx + \\ & + a_2 \int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_2'' \right)'' \varphi_j - \omega_k^2 m \varphi_2 \varphi_j \right] dx + \dots \\ & + a_n \int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_n'' \right)'' \varphi_j - \omega_k^2 m \varphi_n \varphi_j \right] dx = 0. \end{aligned}$$

В данном случае бесконечный ряд усечен до n значений. В канонической форме это выражение имеет вид

$$C_{1j} a_1 + C_{2j} a_2 + \dots + C_{nj} a_n = 0. \quad (13)$$

Здесь

$$C_{ij} = \int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_i'' \right)'' \varphi_j - \omega_k^2 m \varphi_i \varphi_j \right] dx. \quad (14)$$

Здесь $C_{ij} = C_{ji}$. Функции φ_i подбираются таким образом, чтобы они полностью или частично удовлетворяли граничным условиям задачи, а также соответствовали формам главных колебаний.

Неопределенные коэффициенты a_i также должны удовлетворять уравнениям (14) при любых значениях k . Для этого следует определитель системы приравнять к нулю

$$D = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (15)$$

В простейшем случае, при $n = 1$, будем иметь $C_{11} a_1 = 0$, или

$$C_{11} = \int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_1'' \right)'' \varphi_1 - \omega_k^2 m \varphi_1^2 \right] dx = 0.$$

Откуда

$$\omega_k^2 = \frac{\int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_1'' \right)'' \varphi_1 \right] dx}{\int_0^l m \varphi_1^2 dx}. \quad (16)$$

Если на балке имеются сосредоточенные массы M , то

$$\omega_k^2 = \frac{\int_0^l \left[\left(E_{red} J_{red} \varphi_1'' \right)'' \varphi_1 \right] dx}{\int_0^l m \varphi_1^2 dx + \sum_{i=1}^s M_i \varphi_1^2}. \quad (17)$$

Для схемы балки с жесткими креплениями на концах функцию прогибов целесообразно выбрать в следующем виде

$$y_k(x) = a_1 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right) + a_2 \left(1 - \cos \frac{3\pi x}{l} \right) + \dots \quad (18)$$

Каждый член ряда должен удовлетворять условиям: $y(0) = y'(0) = 0$. В ряде (18) четные аргументы соответствуют граничным условиям, а нечетные аргументы удовлетворяют условию $y'(0) = 0$, но не удовлетворяют условию $y(0) = 0$.

Рассмотрим простейший случай, используется только один член ряда, то есть $C_{11} a_1 = 0$. На рисунке 1 представлена схема горизонтального пролета рамы. В этом случае

$$\begin{aligned} C_{11} = \int_0^L \left(E_{red} J_{red} \varphi_1'''' \varphi_1 - m \omega^2 \varphi_1^2 \right) dx \\ - M_i \omega^2 \left[(\varphi_1^2)_{L/3} + (\varphi_1^2)_{2L/3} \right] = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

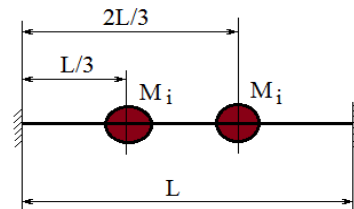


Рис. 1. Горизонтальный пролет рамы
Fig. 1. Horizontal frame span

Определим функцию φ_1 и ее производные из выражения (18):

$$\begin{aligned} \varphi_1 = 1 - \cos \frac{2\pi x}{L}; \quad \varphi_1'''' = -\frac{16\pi^4}{L^4} \cos \frac{2\pi x}{L}; \\ (\varphi_1)_{L/3} = 1,5; \quad (\varphi_1)_{2L/3} = 1,5. \end{aligned}$$

Выражение (19) примет вид:

$$\begin{aligned} C_{11} = \int_0^L \left[-E_{red} J_{red} \frac{16\pi^4}{L^4} \cos \frac{2\pi x}{L} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right) \right] dx \\ - \int_0^L m \omega^2 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right)^2 dx - M_i \omega^2 (1,5^2 + 1,5^2) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Определим последовательно каждый член данного выражения:

$$\begin{aligned}
 & -E_{red}J_{red} \frac{16\pi^4}{L^4} \int_0^L \cos \frac{2\pi x}{L} dx = 0; \\
 & E_{red}J_{red} \frac{16\pi^4}{L^4} \int_0^L \cos^2 \left(\frac{2\pi x}{L} \right) dx \\
 & \quad = E_{red}J_{red} \frac{16\pi^4 L}{L^4} \frac{1}{2}; \\
 & -\omega^2 m \int_0^L dx = -\omega^2 mL; \quad 2\omega^2 m \int_0^L \cos \frac{2\pi x}{L} dx = 0; \\
 & -\omega^2 m \int_0^L \cos^2 \left(\frac{2\pi x}{L} \right) dx = -\omega^2 m \frac{L}{2}; \\
 & \quad -4,5M_i \omega^2.
 \end{aligned}$$

Таким образом, имеем

$$\begin{aligned}
 E_{red}J_{red} \frac{16\pi^4 L}{L^4} \frac{1}{2} &= \omega^2 mL + \omega^2 m \frac{L}{2} + 4,5\omega^2 M_i \\
 &= \omega^2 \left(\frac{3}{2} mL + 4,5M_i \right).
 \end{aligned}$$

Из последнего равенства определим частоту собственных колебаний балки

$$\omega^2 = \frac{E_{red}J_{red} \frac{8\pi^4}{L^3}}{3mL/2 + 4,5M_i}. \quad (21)$$

Таким образом, жесткость горизонтальных элементов рамы при вертикальных колебаниях системы будет равна

$$c_{ij} = E_{red}J_{red} \frac{8\pi^4}{L^3}. \quad (22)$$

При внезапном разрушении одной из опорных связей в общей конструкции возбуждаются колебания, что приводит к разрушению при напряжениях меньших, чем при статическом нагружении. В бетоне происходит накопление неупругих деформаций, наблюдается снижение

условного модуля деформации бетона, а также момента инерции сечения вследствие образования трещин. То есть существенно уменьшается значение $E_{red}J_{red}$.

Рассмотрим простой пример расчета на живучесть рамно-стержневой системы тем анализа ее пружинно-массовой схемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Исходная схема рамно-стержневой конструкции показана на рисунке 2. Сечение стержней рамы является прямоугольным. Для простоты первоначальных исследований армирования бетонных стержней осуществлено в центре сечения (рисунок 3) [13].

Основные исходные данные. Длина горизонтальных пролетов $L = 1,0$ м; вертикальных $H = 0,5$ м. К горизонтальным стержням приложены внешние силы: $F_1 = 2660$ Н, $F_2 = 2160$ Н, $F_3 = 1550$ Н.

При исследовании колебательного движения элементов рамы внешние силы заменим сосредоточенными массами $M_1 = 271$ кг, $M_2 = 220$ кг, $M_3 = 158$ кг. Плотности материалов бетона и арматуры $\rho_b = 2500$ кг/м³, $\rho_a = 7870$ кг/м³. Модули упругости этих материалов $E_b = 3 \cdot 10^{10}$ Па, $E_a = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Приведенную изгибную жесткость определим из выражения:

$$\begin{aligned}
 E_{red}J_{red} &= E_b b h^3 \left[\frac{0.0125}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} \right. \\
 &\quad \left. + 0.175 \mu \alpha \left(\frac{h_0 - a'}{h} \right) \right]. \quad (23)
 \end{aligned}$$

Условные обозначения приняты согласно действующих норм проектирования [8].

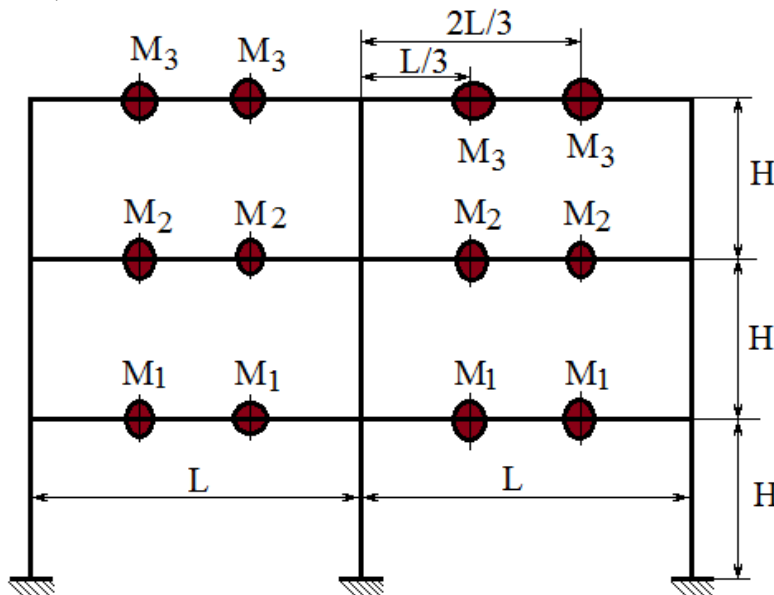


Рис. 2. Схема рамы
Fig. 2. Frame diagram

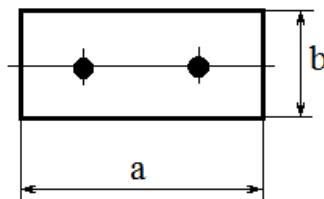


Рис. 3. Сечение стержневой рамы
Fig. 3. Cross section off rame bars

Размеры сечения стержневых элементов: $a = 0,1$ м, $b = 0,05$ м. Диаметр металлического стержня $d = 0,006$ м.

Живучесть рамы (рисунок 2) оценивается ее состоянием при внезапном хрупком отключении одной из вертикальных связей. С этой целью представим раму в виде ее пружинно-массовой схемы (рисунок 4).

Здесь общая масса системы разделена на девять сосредоточенных масс. Предварительно определим распределенные массы стержневых элементов

(горизонтальных и вертикальных):

$$\left. \begin{aligned} m_L &= (A_b \rho_b + A_a \rho_a)L, \\ m_H &= (A_b \rho_b + A_a \rho_a)H. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Обозначим: m_i – i -ая сосредоточенная масса; c_{ij} – жесткость связи соответствующих сосредоточенных масс; h_{ij} – соответствующие им декременты затухания связей. Декременты затухания связей обычно определяются экспериментально. Из практического опыта связь между жесткостью и декрементом затухания механических систем имеет вид $h_{ij} \approx 0,01c_{ij}$.

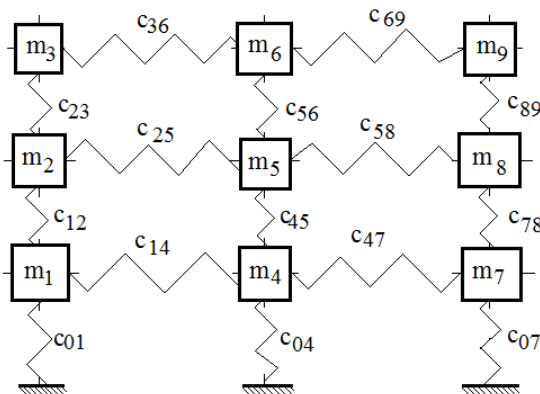


Рис. 4. Пружинно-массовая схема рамы
Fig. 4. Spring-mass framescheme

Выражения для сосредоточенных масс составлены с учетом того, что в них включены половины масс стержневых элементов, находящихся между назначенными узлами:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 0,5m_L + m_H + M_1, \\ m_2 &= 0,5m_L + m_H + M_2, \\ m_3 &= 0,5m_L + 0,5m_H + M_3; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} m_4 &= m_L + m_H + 2M_1, \\ m_5 &= m_L + m_H + 2M_2, \\ m_6 &= m_L + 0,5m_H + 2M_3; \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} m_7 &= 0,5m_L + m_H + M_1, \\ m_8 &= 0,5m_L + m_H + M_2, \\ m_9 &= 0,5m_L + 0,5m_H + M_3. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Перейдем к определению жесткостей связей между сосредоточенными массами. Для вертикальных связей жесткость находится обычным путем из анализа деформации стержня

$$c = AE_{red}.$$

То есть жесткость зависит от площади поперечного сечения стержня и обобщенного модуля упругости.

Первоначальная жесткость горизонтального

элемента рамы определяется по уравнению (22).

Ряд авторов предлагают для учета переменной жесткости использовать двухфазовые расчетные модели, связывающие между собой изгибающие моменты в сечениях с кривизной. Такой расчет, по нашему мнению, возможен для статически нагруженных конструкций. Кроме того, необходимо заранее иметь их графические зависимости, получаемые экспериментальным путем.

Другую концепцию представляет модель, в которой изменение жесткости элемента зависит от величины изгибающего момента и описывается зависимостью

$$E_{red} = (E_{red})_0 \left(1 - k \frac{M_i}{M_{кр}} \right). \quad (29)$$

Здесь M_i – текущий изгибающий момент, $M_{кр}$ – критическое значение изгибающего момента.

Составим систему уравнений колебаний всех приведенных масс рамы, представленных на рисунке 4:

$$m_1 \ddot{x}_1 = c_{01}(x_0 - x_1) + h_{01}(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - c_{12}(x_1 - x_2) - h_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_{14}(x_1 - x_4) - h_{14}(\dot{x}_1 - \dot{x}_4); \quad (30)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = c_{12}(x_1 - x_2) + h_{01}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_{23}(x_2 - x_3) - h_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - c_{25}(x_2 - x_5) - h_{25}(\dot{x}_2 - \dot{x}_5); \quad (31)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 = c_{23}(x_2 - x_3) + h_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - c_{36}(x_3 - x_6) - h_{36}(\dot{x}_3 - \dot{x}_6); \quad (32)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 = c_{04}(x_0 - x_4) + h_{04}(\dot{x}_0 - \dot{x}_4) - c_{45}(x_4 - x_5) - h_{45}(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) - c_{14}(x_4 - x_1) - h_{14}(\dot{x}_4 - \dot{x}_1) - c_{47}(x_4 - x_7) - h_{47}(\dot{x}_4 - \dot{x}_7); \quad (33)$$

$$m_5 \ddot{x}_5 = c_{45}(x_4 - x_5) + h_{45}(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) - c_{56}(x_5 - x_6) - h_{45}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) - c_{25}(x_5 - x_2) - h_{14}(\dot{x}_5 - \dot{x}_2) - c_{58}(x_5 - x_8) - h_{47}(\dot{x}_5 - \dot{x}_8); \quad (34)$$

$$m_6 \ddot{x}_6 = c_{56}(x_5 - x_6) + h_{56}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) - c_{36}(x_6 - x_3) - h_{36}(\dot{x}_6 - \dot{x}_3) - c_{69}(x_6 - x_9) - h_{69}(\dot{x}_6 - \dot{x}_9); \quad (35)$$

$$m_7 \ddot{x}_7 = c_{07}(x_0 - x_7) + h_{07}(\dot{x}_0 - \dot{x}_7) - c_{78}(x_7 - x_8) - h_{78}(\dot{x}_7 - \dot{x}_8) - c_{47}(x_7 - x_4) - h_{47}(\dot{x}_7 - \dot{x}_4); \quad (36)$$

$$m_8 \ddot{x}_8 = c_{78}(x_7 - x_8) + h_{78}(\dot{x}_7 - \dot{x}_8) - c_{89}(x_8 - x_9) - h_{89}(\dot{x}_8 - \dot{x}_9) - c_{58}(x_8 - x_5) - h_{58}(\dot{x}_8 - \dot{x}_5); \quad (37)$$

$$m_9 \ddot{x}_9 = c_{89}(x_8 - x_9) + h_{89}(\dot{x}_8 - \dot{x}_9) - c_{69}(x_9 - x_6) - h_{69}(\dot{x}_9 - \dot{x}_6). \quad (38)$$

В этих уравнениях $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$ – перемещения, скорости и ускорения i -ой сосредоточенной массы; h_{ij} – декременты затухания соответствующих пружинных связей. В первом приближении можно принять $h_{ij} = 0,01c_{ij}$. В уравнениях (30) – (38) необходимо принять $x_0 = \dot{x}_0 = 0$ (для неподвижных опор).

Рассмотрим аварийную ситуацию рамы при внезапном отключении связи c_{01} . В этом случае в уравнение (30) необходимо добавить член $F = 2g(m_1 + m_2 + m_3)$ – исчезает опора под массой m_1 . Коэффициент 2 обозначает внезапность приложения внешней силы. Если рассмотреть разрушение опоры под массой m_4 , то в уравнение (33) добавляется член $F = 2g(m_4 + m_5 + m_6)$.

Более эффективной начальной нагрузкой на систему является использование начального импульса, приходящегося на сосредоточенную массу, под которой исчезает опора. Согласно закону изменения количества движения

$$mv = Ft. \quad (39)$$

Время действия импульса силы обычно выбирается как одна четверть периода собственных колебаний, то есть:

$$t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2\omega}. \quad (40)$$

Для нахождения частоты собственных колебаний используем формулу (21). Тогда

$$\omega = \frac{2\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{2E_{red}J_{red}}{\frac{2}{3}m + 4,5\frac{M_i}{L}}}. \quad (41)$$

После подстановки (40) и (41) в (39) будем иметь

$$v = \frac{gL^2}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{3}m + 4,5\frac{M_i}{L}} \cdot \frac{1}{2E_{red}J_{red}}. \quad (42)$$

Для рассматриваемой схемы начальная скорость аварийной массы принимает значения $v = (0,3 \div 0,5)$ м/с.

Изучая колебательные процессы системы можно всегда определить смещение по вертикали двух сосредоточенных масс (рисунок 5).

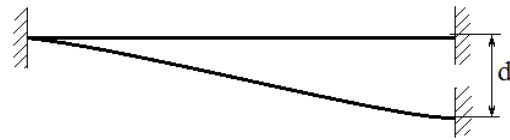


Рис. 5. Вертикальное смещение масс
Fig. 5. Vertical mass displacement

Зная смещения двух масс, расположенных по горизонтали, но в вертикальной плоскости d можно, используя таблицы строительной механики, определить изгибающий момент и нормальные напряжения, которые и будут определять процесс трещинообразования бетона и снижения модуля упругости горизонтальных элементов рамы.

ВЫВОДЫ

Применение пружинно-массовых схем для оценки живучести строительных сооружений позволяет дать достаточно точную оценку напряженного состояния элементов проектируемой конструкции и определить меры для предотвращения цепной разрушительной реакции при выходе из строя какого-либо элемента. Такие модели дают возможность во времени определять перемещения узлов конструкции, их скоростей и ускорений, как источники для расчета деформаций в конструкции.

Наиболее сложным и неопределенным вопросом является учет жесткости и ее изменение в колебательном процессе, если учитывать предварительное сжатие, свойства текучести и ползучести бетона. В этом случае без предварительных физических экспериментов не обойтись.

Исследования выполнены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (договор № 075-15-2021-312-2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко, Н.И. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета / Н.И.Карпенко, Б.С.Соколов, О.В. Радайкин. – М.: Издат. АСВ, 2019. – 192 с.
2. Колоушек, В. Динамика строительных конструкций / В.Колоушек. – М.: Издат. литературы по строительству, 1965. – 620 с.
3. Маилян, Р.Л. Строительные конструкции: учебное пособие / Р.Л.Маилян, Д.Р.Маилян, Ю.А.Веселев. – Ростов-на-Дону: Изд. Феникс, 2005. – 876 с.
4. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Клюева, Н. Б. Андросова, А. С. Бухтиярова. – М.: АСВ, 2014. – 208 с.
5. Колчунов, В. И. Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии / В. И. Колчунов, В. Н. Туен, Д. И. Нижегородов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 10. – С. 1337-1345. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.10.1337-1345. – EDN GIIICRD.
6. Колчунов, В.И. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях / В.И. Колчунов, В.И. Колчунов, Н.В. Федорова // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 54-60. – EDN UWOAEP.
7. Акимов, П.А. Дискретно-континуальные методы расчета сооружений при микроциклических квазистатических воздействиях / П. А. Акимов, А. Б. Золотов, В. Н. Савостьянов // Вестник МГСУ. – 2007. – № 1. – С. 141-145. – EDN MUSQWB.
8. Смирнов, А.Ф. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для вузов / А.Ф. Смирнов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
9. Гуж, Т. С. Применение энергетического метода при разработке математической модели расчета статически определимых и неопределимых стальных ферм / Т. С. Гуж, А. М. Козиков, В. А. Ильичев // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России: Материалы Всероссийской студенческой конференции: в 8 частях, Йошкар-Ола, 23–28 ноября 2015 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 53-57. – EDN VNQUFJ.
10. Савин, С.Ю. Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воздействиях с учетом деформаций сдвига / С.Ю. Савин // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 1. – С. 49-58. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.1.49-58. – EDN QDEXCC.
11. Колчунов, В.И. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях / В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, Д.Г. Фан // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 11. – С. 1462-1472. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472. – EDN ZBNUMY.
12. Ильющенко, Т. А. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях / Т.А. Ильющенко, В.И. Колчунов, С.С. Федоров // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 1(93). – С. 74-84. – DOI 10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84. – EDN JVКPHT.
13. Смирнов, А.Ф. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для вузов / А.Ф. Смирнов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
14. Струпинин, Л.Ю. Строительная механика плоских стержневых систем: учебное пособие / Л.Ю. Струпинин, С.И. Трушин. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 276 с.
15. Чемодуров, В.Т. Основы теории упругости, пластичности и ползучести: учебное пособие / В.Т. Чемодуров, С.Г. Ажермачев, К.С. Пшеничная-Ажермачева. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 238 с.
16. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52–01–2003. – М.: Минстрой России. – 2018. – 162 с.
17. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования». ЭС НТИ "Техэксперт", 2017. – 35 с.
18. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности / Т.А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1985. – 16 с.
19. Острейковский, В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
20. Райзер, В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание / В.Д. Райзер. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 384 с.
21. Чемодуров, В.Т. Физическое и математическое моделирование строительных систем: учебное пособие / В.Т. Чемодуров, Э.В. Литвинова. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 196 с.

REFERENCES

1. Karpenko, N.I. Design of concrete, reinforced concrete, stone and reinforced masonry elements and structures using diagrammatic methods of calculation / N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radaikin. – M.: Publishing house. DIA, 2019. – 192 p.
2. Koloushek, V. Dynamics of building structures / V. Koloushek. – M.: Publishing house. literature on construction, 1965. – 620 p.
3. Mailyan, R.L. Building structures: textbook / R.L. Mailyan, D.R. Mailyan, Yu.A. Veselev. – Rostov-on-Don: Ed. Phoenix, 2005. – 876 p.
4. Kolchunov V.I. Survivability of buildings and structures under beyond-design impacts / V.I. Kolchunov, N.V. Klyueva, N.B. Androsova, A.S. Bukhtiyarova. – M.: ASV, 2014. - 208 p.

5. Kolchunov, V.I., V.N. Tuen, D.I. Nizhegorodov, Dynamic response of the constructive system of a building with a finite number of degrees of freedom under special impact // Bulletin of MGSU. – 2021. – T. 16. – No. 10. – Pp. 1337-1345. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.10.1337-1345. – EDN GIICRD.
6. Kolchunov, V.I. Deformation models of reinforced concrete under special effects / V.I. Kolchunov, V.I. Kolchunov, N.V. Fedorova // Industrial and civil construction. – 2018. – No. 8. – P. 54-60. – EDN UWOAEP.
7. Akimov, P.A., Zolotov, A.B., Savost'yanov, V.N. Discrete-continuum methods for calculating structures under microcyclic quasi-static effects, Vestnik MGSU. – 2007. – No. 1. – Pp. 141-145. – EDN MUSQWB.
8. Smirnov, A.F. Structural mechanics. Dynamics and stability of structures: a textbook for universities / A.F. Smirnov [i dr.]. – M.: Stroyizdat, 1984. – 416 p.
9. Guzh, T. S. Application of the energy method in the development of a mathematical model for calculating statically determinate and indeterminate steel trusses / T. S. Guzh, A. M. Kozikov, V. A. Ilyichev // Engineering personnel - the future of the innovative economy of Russia: Materials of the All-Russian Student Conference: in 8 parts, Yoshkar-Ola, November 23-28, 2015. – Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2015. – Pp. 53-57. – EDN VNQUFJ.
10. Savin, S.Yu. Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements under special effects, taking into account shear deformations / S.Yu. Savin // Vestnik MGSU. – 2021. – T. 16. – No. 1. – Pp. 49-58. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.1.49-58. – EDN QDEXCC.
11. Kolchunov, V.I., Korenkov, P.A., Fan, D.G. Special limiting state in reinforced concrete frames with nodes reinforced by indirect reinforcement under emergency impacts, Vestnik MGSU. – 2021. – T. 16. – No. 11. – Pp. 1462-1472. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472. – EDN ZBNYMY.
12. Ilyushchenko, T.A. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-rod structures under special impacts / T.A. Ilyushchenko, V.I. Kolchunov, S.S. Fedorov // Construction and Reconstruction. – 2021. – No. 1 (93). – Pp. 74-84. – DOI 10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84. – EDN JVKPHT.
13. Smirnov, A.F. Structural mechanics. Dynamics and stability of structures: a textbook for universities / A.F. Smirnov [i dr.]. – M.: Stroyizdat, 1984. – 416 p.
14. Strupinin L.Yu. Structural mechanics of flat rod systems: textbook / L.Yu. Strupinin, S.I. Trushin. – M.: INFRA-M, 2014. – 276 p.
15. Chemodurov, V.T. Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep: textbook / V.T. Chemodurov, S.G. Azhermachev, K.S. Wheat-Azhermacheva. – M.: INFRA-M, 2019. – 238 p.
16. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Updated edition of SNiP 52-01-2003. - M. Ministry of Construction of Russia. - 2018. - 162 p.
17. SP 385.1325800.2018 "Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design Rules". ES NTI "Techexpert", 2017. – 35 p.
18. Golinkevich, T.A. Applied reliability theory / T.A. Golinkevich. - M.: Higher school, 1985. – 16 p.
19. Ostreykovsky, V.A. Reliability theory: a textbook for universities / V.A. Ostreykovskiy. – M.: Higher School, 2003. – 463 p.
20. Raiser, V.D. Theory of reliability of structures. Scientific publication / V.D. Raiser. – M.: DIA Publishing House, 2010. – 384 p.
21. Chemodurov, V.T. Physical and mathematical modeling of building systems: textbook / V.T. Chemodurov, E.V. Litvinov. – M.: INFRA-M, 2021. – 196 p.

SPRING-MASS MODEL OF DEFORMATION OF A REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL SYSTEM UNDER DYNAMIC INFLUENCES

Chemodurov V.T., Litvinova E.V., Azhermachev S.G. Korenkov P. A.

Institute «Agrotechnological Academy»

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea

295492, c. Simferopol', v. Agrarnoe

Moscow State University of Civil Engineering, (National Research University), 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337,

e-mail: ¹Chens_mu1@mail.ru, ²Sga.simf@gmail.com, ³Ellalit@mail.ru⁴, KorenkovPA@mgsu.ru

Abstract. Limit loads when loading a building with an impulse load are limited by the stability of the structure, which is ensured if the forces in internal connections, overloads at a number of critical points during shaking do not exceed predetermined (limit) values. It is easy to obtain an assessment of the stability of a structure using a mechanical and mathematical model of structure vibration. Such a model makes it possible to reproduce, with a sufficient degree of adequacy, the reaction of the structure to external influences. The article considers the issue of calculating a frame-rod structure operating under conditions of application of an extreme load. The theory for solving such a problem is based on the use of a spring-mass model of a real structure. The survivability of a frame-rod structure is estimated by its state in the event of a sudden brittle disconnection of one of the vertical links.

Subject: Calculation of a frame-rod structure operating under conditions of extreme load application.

Materials and methods: The spring-mass scheme of a complex modeling object, which is a building structure, usually contains several tens of discrete masses connected into a common scheme. Oscillations of elements of a building structure are described by second-order differential equations that determine the state of each node of the spring-mass circuit at the next moment of time, depending on the state of this and neighboring nodes at the two previous points in time.

Results: The survivability of the frame is estimated by its condition in the event of a sudden brittle disconnection of one of the vertical links. For this purpose, we present the frame in the form of its spring-mass scheme. Here the total mass of the system is divided into nine lumped masses. Let us first determine the distributed masses of the bar elements (horizontal and vertical). The damping decrements of bonds are usually determined experimentally. From practical experience, the relationship between stiffness and the damping decrement of mechanical systems has the form $h_{ij} \approx 0,01c_{ij}$. The stiffness depends on the cross-sectional area of the rod and the generalized modulus of elasticity. Let's consider the emergency situation of the frame when the first connection is suddenly disconnected. In this case, the support under the corresponding mass disappears. The duration of the force impulse is usually chosen as one quarter of the period of natural oscillations. By studying the oscillatory processes of the system, one can always determine the vertical displacement of two concentrated masses. Knowing the displacement of two masses located horizontally, but in a vertical plane, it is possible, using tables of structural mechanics, to determine the bending moment and normal stresses, which will determine the process of concrete cracking and a decrease in the elastic modulus of the horizontal frame elements.

Conclusions: The use of spring-mass schemes for assessing the survivability of building structures makes it possible to give a fairly accurate assessment of the stress state of the elements of the designed structure and determine measures to prevent a destructive chain reaction in the event of failure of any element. Such models make it possible to determine in time the displacements of structural nodes, their velocities and accelerations, as sources for calculating deformations in the structure. The most complex and uncertain issue is the consideration of stiffness and its change in the oscillatory process, given the pre-compression, flow properties and creep of concrete. In this case, preliminary physical experiments are indispensable.

Keywords: impulse load, structural stability, frame-rod structure, spring-mass scheme.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЗДАНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО АДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МНОГОСЛОЙНОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ РАЗДУВА СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Дядичев В.В., Менюк С.Г., Дядичев А.В., Дядичева Е.А.

ФГАОУ ВО "КФУ им. В.И. Вернадского; Россия, 295000, г. Симферополь, ул. Павленко, 3, корпус 2, к. 306
mr.dyadichev@mail.ru, adyadichev@mail.ru, dyadicheva-e@mail.ru

Аннотация: в статье проанализирована актуальность использования вторичного полимерного сырья в новых строительных изделиях. Рассмотрены основные стадии переработки вторичных полимеров. Отмечены особые перспективы использования технологии соэкструзии с последующим раздувом. Проведен расчет адгезии многослойной заготовки для различных схем нагружения. Исследовано напряженно-деформированное состояние в процессе раздува заготовки, состоящей из трех слоев, из которых два наружных состоят из первичного полимера, а внутренний – из полимера, полученного в процессе переработки отходов.

Предмет исследования: основным путем получения полимерных изделий с заданными свойствами является конструирование многослойных полимерных материалов. Кроме того, использование многослойности расширяет возможности утилизации изделий из полимеров, когда из отходов полимерных материалов формируется внутренний слой в многослойной системе и тем самым решается экологическая проблема переработки отходов. В статье предлагается использование метода соэкструзии с последующим раздувом, как одного из самых эффективных формообразующих методов формования строительных изделий с применением целого ряда смежных технологий. В основе метода лежит непрерывная пластификация полимера в нескольких экструдерах с дальнейшим получением многослойной заготовки в виде трубы и циклическое формование в пресс-форме путем нагнетания в заготовку сжатого воздуха. Целью работы является исследование создания качественного адгезионного соединения при деформировании многослойной заготовки в процессе раздува.

Материалы и методы: свойства многослойной структуры раздуваемой заготовки: перепад давления, пористость, вязкость, взаимопроникновение частиц в слое, интенсивность процессов тепло- и массопередачи зависят от параметров раздува и расхода воздуха. При исследовании процессов раздува под давлением в многослойной структуре необходимо располагать исчерпывающей информацией о поведении и адгезии таких слоев. Важнейшим параметром многослойной структуры является ее динамическое сопротивление. В результате деформации многослойного материала в выдувной форме возникает знакопеременный аэродинамический напор, который оказывает существенное влияние на динамику адгезии многослойной структуры.

Результаты: для совершенствования конструктивных и технологических параметров, для создания новых методик расчета показателей процесса формования многослойных структур разработана функциональная схема оборудования для комбинированной соэкструзии полых полимерных изделий с использованием специального устройства раздува. Определена методика анализа динамического поведения многослойной оболочки, позволяющая определять критические интенсивности напряжений и деформаций сдвига, при которых происходит качественное адгезионное соединение многослойной заготовки при раздуве. На основании уравнений динамики раздува многослойных изделий, учитывающих кинематические, динамические и энергетические условия на поверхностях соприкосновения слоев определены условия, обеспечивающие пластическую деформацию соприкасающихся слоев полимерного материала и хорошую адгезию между слоями первичного и вторичного полимеров при максимальной производительности.

Выводы: определено, что скорость деформации многослойной заготовки необходимо регулировать давлением раздува, а качественное адгезионное соединение слоев обеспечивать рационализацией процесса тепло- и массопереноса.

Ключевые слова: вторичные полимерные материалы, соэкструзия, адгезия, напряженно-деформированное состояние, вязко-пластическая модель, скорость деформации, давление раздува.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастание потребности в полимерных строительных изделиях и упаковке с заданным регулируемым комплексом свойств, требует повышения производительности оборудования с совершенствованием технологии изготовления полимерной продукции. Основным путем получения полимерных изделий с заданными свойствами является конструирование многослойных полимерных материалов. Кроме того, использование многослойности расширяет возможности утилизации изделий из полимеров, когда из отходов полимерных материалов формируется внутренний слой в многослойной

системе и тем самым решается экологическая проблема переработки отходов [1-3].

Благодаря целому ряду ценных эксплуатационных свойств полимерные материалы широко используются в технике и в быту. Однако наряду с ценными качествами, у этих синтетических продуктов имеются и недостатки. Наиболее существенный из них состоит в том, что они, в отличие от многих природных материалов, выполнив свои функции, не уничтожаются достаточно быстро под действием агрессивных факторов окружающей среды – света, тепла, атмосферных газов, микроорганизмов, а продолжают существовать в виде долгоживущих отходов, причиняя в некоторых случаях непоправимый ущерб живой природе [2-5].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В условиях удорожания исходного полимерного сырья пластмассовые отходы становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом. Использование отходов полимеров позволяет существенно экономить первичное сырье (прежде всего нефть) и электроэнергию. С этих позиций рассматриваются следующие стадии оборота полимеров в общественном потреблении: синтез → переработка → модификация → применение → сбор и сепарация отходов → вторичная переработка → повторное применение → сбор и сепарация отходов → и т.д. до окончательной утилизации отходов [6-7].

Переработка вторичного полимерного сырья включает в себя три основные группы процессов: подготовительные, формообразующие и вспомогательные. Подготовительные процессы объединяют операции превращения отходов в сырье (порошок, гранулы), пригодное для последующей переработки в изделия. Формообразующие включают в себя операции обработки давлением для передела полимерного сырья в изделия (прессование, экструзия, соэкструзия, литье под давлением, раздувное формование, пневмо- и вакуумное формование, каландрование). Вспомогательные процессы объединяют отделочные и доводочные операции, например: придание готовым изделиям привлекательного внешнего вида, создание неразъемного соединения из отдельных элементов изделия и другое [8-10].

Созкструзия с последующим раздувом на сегодняшний день – один из самых эффективных формообразующих методов формования изделий с применением целого ряда смежных технологий. В основе метода лежит непрерывная пластификация полимера в нескольких экструдерах с дальнейшим получением многослойной заготовки в виде трубы и циклическое формование в пресс-форме путем нагнетания в заготовку сжатого воздуха. Раздув следует сразу же после загрузки заготовки необходимой длины в пресс-форму в ходе непрерывного соэкструзионного процесса, без остановки экструдеров [11-13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известные способы получения многослойных полимерных систем базируются на использовании обработки давлением их расплавов [14-15]. Для этого разработано специальное оборудование, которое на сегодняшний день не всегда обеспечивает требуемые производительность и качество продукции. Исходя из отмеченных фактов необходимо построение модели напряженно-деформированного состояния многослойной полимерной заготовки в процессе обработки давлением.

В связи с большой номенклатурой выпуска многослойных полимерных объемных изделий и

универсальности расчета вводим допущение о сферической форме дна изделия.

Сначала рассмотрим определение параметров технологического процесса импульсного раздува многослойного дна полимерной емкости.

Одним из важнейших технологических параметров является давление раздува, величина которого должна быть достаточна для уплотнения многослойной структуры и обеспечения прочного адгезионного соединения [16]. Кроме того, давление воздуха поддерживает требуемое взаимное расположение слоев заготовки в полости выдувной формы для быстрого охлаждения изделия, что повышает качество изделий и производительность экструдера [17].

Механические свойства материала многослойной оболочки характеризуются диаграммой напряжение-деформация с линейным упрочнением в пластической области. Адгезия между слоями многослойной оболочки возникает, если деформация каждого следующего слоя выше, чем предыдущего.

Применение достаточно универсальной методики деформирования вязко-пластического материала, которая адекватно характеризует поведение слоев как первичного, так и вторичных полимеров позволяет перейти к исследованию процесса формоизменения многослойных заготовок с учетом технологических факторов, существенно влияющих на качество готовых изделий и производительность процесса в целом.

При формовании многослойных оболочек особое внимание уделяют поведению материала на межслойных поверхностях и кромках. При этом необходимо учитывать межслойные напряжения и деформации поперечного сдвига, поскольку при изготовлении полых изделий из многослойных заготовок методом выдувного формования многослойные материалы подвержены межслойному разрушению.

По мере приближения к боковой поверхности изделия, межслойные напряжения возрастают, приводя к расслоению при пластическом деформировании и дальнейшей эксплуатации. Именно хорошая адгезия между слоями многослойных материалов, включая кромки, обеспечивает высокое качество и долговечность изделий из них.

Свойства многослойной структуры раздуваемой заготовки: перепад давления, пористость, вязкость, взаимопроникновение частиц в слое, интенсивность процессов тепло- и массопередачи зависят от параметров раздува и расхода воздуха. При исследовании процессов раздува под давлением в многослойной структуре необходимо располагать исчерпывающей информацией о поведении и адгезии таких слоев. Важнейшим параметром многослойной структуры является ее динамическое сопротивление. В результате деформации многослойного материала в выдувной форме возникает знакопеременный аэродинамический

напор, который оказывает существенное влияние на динамику адгезии многослойной структуры.

При раздуве многослойных полимерных структур в выдувной форме иглой необходимо учитывать, что воздух из иглы в замкнутом пространстве выходит с некоторой пульсацией.

Уравнения движения частиц полимерной структуры при раздуве материала потоком газа в выдувной форме через выдувную иглу запишутся так (рис. 1):

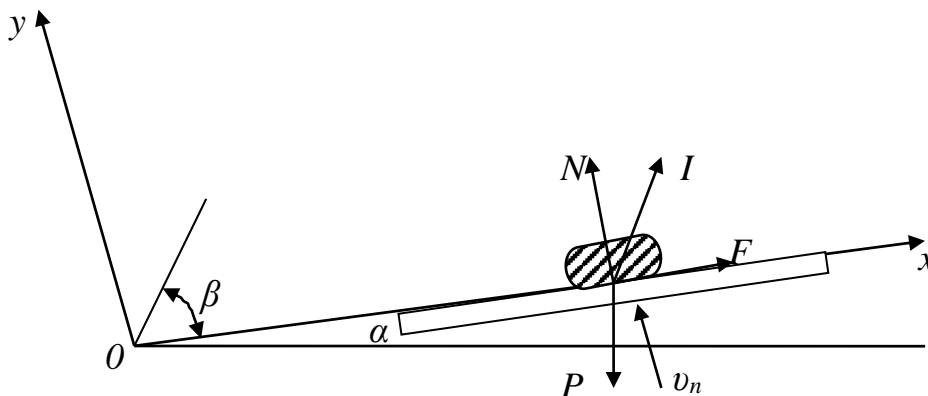


Рис.1. К выводу уравнений движения одиночной частицы полимера при раздуве
Fig.1. On the derivation of the equations of motion of a single polymer particle during blowing

$$\begin{aligned} d^2x/d\tau^2 &= A\omega^2 \cos \beta \sin \varphi - g \sin \alpha, \\ d^2y/d\tau^2 &= A\omega^2 \sin \beta \cos \varphi - g \cos \alpha + P / G_M, \end{aligned}$$

где A – амплитуда колебаний воздуха;

ω – угловая частота колебания воздуха;

P – аэродинамическая сила давления потока воздуха на частицу многослойной структуры;

G_M – масса материала.

Условием движения частиц в выдувной форме при совместном воздействии на многослойную структуру потока воздуха через выдувную иглу является:

$$A \omega^2 = (g \cos \alpha - P/m) [1 / (\sin \varphi \sin \beta)]$$

Образованию адгезионного слоя удовлетворяет равенство:

$$A_{кр} \omega_{кр}^2 = (g \cos \alpha + P / G_M) [1 / (\sin \varphi \sin \beta)],$$

где $A_{кр}$, $\omega_{кр}$ — критические амплитуда и угловая частота взаимопроникновения частиц каждого слоя.

Энергия, необходимая для перевода слоя в адгезионное состояние, подводится в этом случае одновременно воздухом, истекающего из иглы и потоком воздуха уже находящегося в объеме раздуваемой заготовки. Переход многослойной структуры в адгезионное состояние при наложении пульсации потока воздуха может происходить при скоростях газа, более низких, чем при обычной взаимодиффузии.

Рассмотрим методику, согласно которой адгезионная многослойная структура

аппроксимируется объемом воздуха, движущимся в совершающем гармонические колебания замкнутом пространстве многослойной полимерной заготовки в металлической выдувной форме (рис. 2). Для этого случая составлены уравнения, связывающие давление газа под многослойной структурой с ускорением движения этой структуры, объемом воздуха под тремя слоями и проницаемостью слоев.

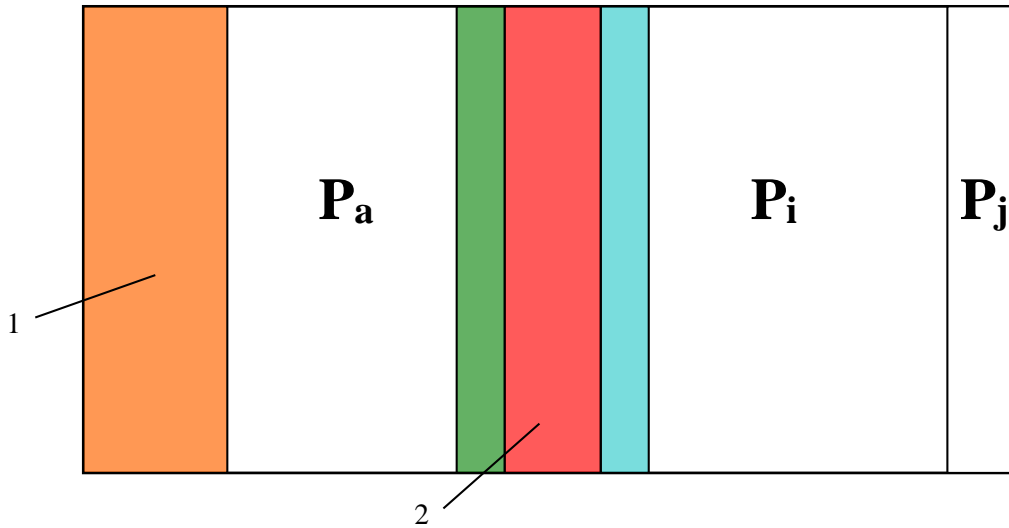


Рис.2. Адгезионная структура при раздуве в выдувной форме:

1 – выдувная форма; 2 – многослойная структура

Fig.2. Adhesion structure when blown in a blow mold:

1 - blow mold; 2 - multilayer structure

При математическом описании процесса были допущены некоторые упрощения: вместо действительно имеющего место политропического процесса сжатия воздуха принят изотермический процесс; не учтены неровность поверхности

полимерной структуры частиц и начальный объем газа в многослойной полимерной заготовке. При уточнении методики дополнительно учитывалась также возможность принудительной фильтрации газа через полимерный слой.

Если многослойная полимерная структура находится в движении ($\tau_0 < \tau < \tau_g$), то

$$\frac{d^2s}{d\tau^2} + \alpha \cdot q + \frac{d^2x}{d\tau^2} + g = 0;$$

$$(s + s^*)(1 - q)^{1/n} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{K_{cl} + K_p \cdot P_j / P_a}{K_{cl} + K_p} \right)^{1/n} G;$$

$$dG/d\tau = (K_{cl} + K_p)P_a q + K_p(P_j - P_a);$$

Если многослойная полимерная структура находится в первоначальном состоянии ($\tau_g < \tau < \tau_0 + T$),

$$s^*(1 - q)^{1/n} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{K_{cl} + K_p \cdot P_j / P_a}{K_{cl} + K_p} \right)^{1/n} G;$$

$$dG/d\tau = (K_{cl} + K_p)P_a q + K_p(P_j - P_a);$$

Начальные и граничные условия для первого перемещения частиц многослойной структуры (начальный момент) имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau = \tau_{o1}, & \quad q = q_{o1} = \frac{P_a - P_o}{P_a} = \frac{K_p(P_a - P_j)}{(K_{cl} + K_p)P_a}; \\ \tau = \tau_{o1}, & \quad s = s_{o1} = 0; \\ \tau = \tau_{o1}, & \quad ds/d\tau = (ds/d\tau)_{o1} = 0; \\ \tau = \tau_{o1}, & \quad d^2s/d\tau^2 = (d^2s/d\tau^2)_{o1} = 0; \end{aligned}$$

а при практически имеющем место установившемся режиме уравнения (3) записываются как:

$$\begin{aligned}
 \tau = \tau_o, \quad q = q_o; \\
 \tau = \tau_o, \quad s = s_o = 0; \\
 \tau = \tau_o, \quad ds/d\tau = (ds/d\tau)_o = 0; \\
 \tau = \tau_o, \quad d^2s/d\tau^2 = (d^2s/d\tau^2)_o = 0; \\
 (2.16) \\
 \tau = \tau_o, \quad s = s_g = 0; \\
 \tau = \tau_o, \quad q = q_g; \\
 \tau = \tau_o + Tm, \quad q = q_o;
 \end{aligned}$$

Решением системы (1) является:

$$q = -\frac{K_p(P_j - P_a)}{(K_{cl} + K_p)P_a} + C_1 \exp\left[-\frac{(K_{cl} + K_p)P_a n}{\rho \cdot s^*} \times \left(\frac{K_{cl} + K_p P_j / P_a}{K_{cl} + K_p}\right)^{1/n} (\tau - \tau_g)\right].$$

При расчетах можно ограничиться решением системы (1) при граничных условиях для первоначального движения многослойной структуры (3).

Система (1) легко преобразуется в одно уравнение:

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho}{\alpha \cdot n} \left[\frac{K_{cl} + K_p}{K_{cl} + K_p P_j / P_a} \right]^{1/n} \left[(s + s^*) \frac{d^3s}{d\tau^3} + \frac{ds}{d\tau} \frac{d^2s}{d\tau^2} + (\alpha \cdot n + g) \frac{ds}{d\tau} + (s + s^*) \frac{d^3s}{d\tau^3} + \frac{ds}{d\tau} \frac{d^2s}{d\tau^2} \right] = \\
 = \frac{(K_{cl} + K_p)P_a}{\alpha} \left[\frac{d^2s}{d\tau^2} - \frac{d^2x}{d\tau^2} - g \right] + K_p(P_j - P_a).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Это уравнение, так же как и система (1), в общем виде неразрешимо. Однако в отдельных случаях можно пренебречь рядом членов, благодаря чему упрощенное уравнение становится разрешимым. В частности, при уменьшении толщины многослойной структуры величины $K_{cl}=K^*/h$ и $\alpha=P_a/(\rho_n h)$ могут неограниченно возрастать, равно как и члены, их содержащие, остальными же членами можно пренебречь. Для рассматриваемого случая:

$$\begin{aligned}
 q = \left[\frac{g}{\alpha} - \frac{A\omega^2}{\sqrt{\alpha^2 + b^2\omega^2}} \sin(\omega\tau_o - \gamma) \right] \exp\left[-\frac{\alpha}{b}(\tau - \tau_o)\right] - \\
 - \frac{g}{\alpha} + \frac{A\omega^2}{\sqrt{\alpha^2 + b^2\omega^2}} \sin(\omega\tau - \gamma) + \frac{K_p(P_a - P_j)}{(K_{cl} + K_p)P_a} \exp\left[-\frac{\alpha}{b}(\tau - \tau_o)\right],
 \end{aligned} \tag{5}$$

где
$$b = \frac{(K_{cl} + K_p)P_a}{\rho} \left[\frac{K_{cl} + K_p P_j / P_a}{K_{cl} + K_p} \right]^{1/n};$$

$$\gamma = \arctg\left\{ \frac{\omega (K_{cl} + K_p)P_a}{\alpha \rho} \left[\frac{K_{cl} + K_p P_j / P_a}{K_{cl} + K_p} \right]^{1/n} \right\};$$

В уравнениях (1 – 5):

A — амплитуда;

g — ускорение свободного падения;

G — масса воздушной прослойки внутри заготовки;

h — толщина полимерной структуры;

$$K_{cl} = K^*/h;$$

K_{cl} — проницаемость полимерной структуры;

K_p — проницаемость воздушной прослойки;

n — показатель политропы (для адиабатического сжатия $n=1,4$);
 P_a, P_i, P_j — давления соответственно над структурой, под структурой и из иглы раздува;
 $q=(P_a-P_i)/P_a$ — безразмерный перепад давления в структуре;
 s^* — начальная толщина газовой прослойки;
 s, x — перемещения части структуры;
 $\alpha = P_a(\rho_n h)$;
 ρ — средняя плотность газа;
 ρ_n — насыпная плотность материала;
 $\rho_n = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3$;
 ρ_1, ρ_2, ρ_3 — насыпная плотность материала первого, второго и третьего слоев соответственно;
 τ — время;
 ω — круговая частота колебаний воздуха.

Такое же решение получают при $n \rightarrow \infty$ (несжимаемый газ), однако сравнение значений $K_{сл}$, α и n показывает, что в действительности упрощение исходной системы уравнений (1) достигается только при больших значениях коэффициентов $K_{сл}$ и α , что и объясняет хорошее соответствие эксперимента и теории при малых толщинах многослойной структуры и толщине каждого слоя.

Решение (5) является более общим и позволяет рассчитать давление как в многослойной структуре в целом так и в каждом отдельном слое, находящемся под действием только исходящего из иглы под давлением пульсирующим воздухом, так и в такой же структуре и слое, на который воздействуют и воздух из иглы, и поток воздуха в объеме раздуваемой заготовки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Гармонические изменения давления в каждом отдельном слое и многослойной структуре в целом создает статическое разряжение под структурой, которое обуславливает «насосный эффект». Абсолютное значение статического перепада давления зависит от параметров пульсации воздуха из иглы, вязкости каждого полимера и геометрических параметров каждого слоя. С ростом

амплитуды пульсации воздуха при раздуве увеличиваются разрежение под слоем и перепад давлений. Пикам разряжения соответствует наибольший «насосный эффект» слоя, который способствует лучшей адгезии частиц в адгезионном слое.

На границах адгезионного соединения в многослойной структуре и изменения толщины каждого слоя существуют две характерные области: область возрастающего перепада давления и постоянных, а в некоторых случаях даже уменьшающихся, глубины и адгезионности, соответствующих раздуваемому слою; область постоянного перепада давления и возрастающей адгезионности, соответствующая пульсораздуваемому слою. Переход из одной области в другую происходит плавно на некотором очень небольшом участке изменения скорости раздува. При дальнейшем увеличении скорости раздува в слое не образуются адгезионные узлы, и многослойная структура раздувается с плохим адгезионным соединением. Следует отметить, что скорость начала пульсораздува, например, для структур из вторичных полимеров, значительно ниже скорости раздува через ниппель.

Для расчета адгезионности раздуваемого слоя предложено уравнение:

$$\frac{1 - \varepsilon_y}{1 - \varepsilon_{н.б}} = 1 + 1,89 \frac{n}{\omega^2} \left(\frac{A^2 \omega^2}{g^2} - 1 \right)^{0,4} \frac{F \rho_{ме} (1 - \varepsilon_y)}{G_M}$$

а для пульсораздуваемого:

$$(1 - \varepsilon_{н.б}) / (1 - \varepsilon) = 0,19 + 0,33(v/v_{н.б}),$$

где $v_{н.б}$ — скорость начала пульсораздува; ε_y и $\varepsilon_{н.б}$ — адгезионность уплотненного слоя и слоя в состоянии начала пульсораздува; уравнения справедливы при $A=0,2 - 1,6$ мм, $\omega=100 - 200$ рад/с, $A\omega^2=(1,1 - 4,8) g$, v до 1,8 м/с, $d\text{Э} = 2,44 - 4,25$ мм.

Исследование взаимопроникновения полимерных материалов в многослойной структуре проводили при толщинах слоя от 0,2 до 0,9 мм,

расходах твердой фазы до 68 кг/ч, скоростях раздува до 2,5 м/с и параметрах пульсации $A = 5 - 10$ мм, $\omega = 50 - 200$ рад/с. Эквивалентный диаметр частиц $d\text{Э}$ составлял 0,5–2,0 мм.

Проникновение твердых частиц по толщине слоя происходило за счет движения частиц структуры, вызванного пульсацией воздуха из иглы и восходящим потоком воздуха. Для определения интенсивности взаимопроникновения составляли

баланс по «меченому» веществу. На основании полученного из материального баланса уравнения

$$\ln \frac{S_1}{x - S_2} = W_F \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)$$

определяли скорость движения частиц в направлении другого слоя. В этом уравнении

$$S_1 = G_2 / (G_1 + G_2);$$

$$S_2 = G_1 / (G_1 + G_2),$$

где G_1 и G_2 — масса частиц в верхней и нижней части слоя; x — концентрация твердых частиц.

Основное влияние на эффективность взаимопроникновения частиц по высоте слоя оказывают амплитуда и частота пульсаций. Полученные результаты можно представить в следующем виде:

$$W_F = 0,38(A\omega^2 / g)(d_3 / h)^{0,2},$$

где W_F — массовая скорость вертикального взаимопроникновения частиц; d_3 — эквивалентный диаметр частиц, составляющий (0,5-2,0) 10^{-6} м; h — толщина слоя.

ВЫВОДЫ

Для совершенствования конструктивных и технологических параметров, для создания новых методик расчета показателей процесса формования многослойных структур разработана функциональная схема оборудования для комбинированной соэкструзии полых полимерных изделий с использованием устройства раздува.

Определена методика анализа динамического поведения многослойной оболочки, позволяющая определять критические интенсивности напряжений и деформаций сдвига, при которых происходит качественное адгезионное соединение многослойной заготовки при раздуве.

На основании уравнений динамики раздува многослойных изделий, учитывающих кинематические, динамические и энергетические условия на поверхностях соприкосновения слоев определены условия, обеспечивающие пластическую деформацию соприкасающихся слоев полимерного материала и хорошую адгезию между слоями первичного и вторичного полимеров при максимальной производительности. Определено, что скорость деформации многослойной заготовки необходимо регулировать давлением раздува, а качественное адгезионное соединение слоев обеспечивать рационализацией процесса тепло- и массопереноса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках научного проекта FZEG-2020-0030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Model of creation a multilayer structure for production of building pipes/V. Dyadichev, A. Kolesnikov, A. Dyadichev, S. Menyukand E. Dyadicheva// MATEC Web Conf., VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2018). – 2018, Vol. 251, Art. No 251 01006 Moscow, Russia, November 14-16, 2018 DOI: 10.1051/mateconf/201825101006.
2. В.В. Дядичев, А.В. Колесников, А.В. Дядичев Совершенствование экструзионного оборудования и технологии переработки вторичных комбинированных полимерных материалов и смесей // Динамика систем, механизмов и машин: Научный журнал. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С.162-167.
3. Lyubomirskiy N.V. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials/ N.V. Lyubomirskiy, S.I. Fedorkin, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina// Malaysian Construction Research Journal (MCRJ). – 2017, Vol. 23, No 3. – Pp. 15-26.
4. Fic S. The Influence of the Natural Aggregate Roughness on the ITZ Adhesion in Concrete/S. Fic, N.V. Lyubomirskiy, D. Barnat-Hunek// Materials Science Forum: «Materials and Technologies in Construction and Architecture. – 2018, Vol. 931. – Pp. 564-567.
5. Gusev A. Luminescent properties of zinc complexes of 4-formylpyrazolone based azomethineligands: Excitation-dependent emission in solution/ A. Gusev, V. Shul'gin, E. Braga, E. Zamnius, G. Starova, K. Lyssenko, I. Eremenko, W. Linert// Journal of Luminescence. – 2018, Vol. 202. – P. 370-376.
6. Gusev A. Synthesis and photophysical properties of Zn(II) Schiff base complexes possessing strong solvent-dependent solid-state fluorescence/ A.N. Gusev, V.F. Shul'gin, E.V. Braga, I. Nemes, B.F. Minaev, G.V. Baryshnikov, Z. Trávníček, H. Ågren, I.L. Eremenko, K. A. Lyssenko, W. Linert// Polyhedron. – 2018.
7. Shul'gin V. Tb(III) complexes with 1-phenyl-3-methyl-4-stearoyl-pyrazol-5-one as a material for luminescence Langmuir–Blodgett films/ V. Shul'gin, N. Pevzner, A. Gusev, M. Sokolov, V. Panyushkin, J. Devterova, K. Kirillov, I. Martynenko, W. Linert// Journal of Coordination Chemistry. – 2018.
8. Yankovskaya V.S. Sorption of cobalt by extraction chromatographic resin on the base of di-(tert-butylbenzo)-18-crown-6/ V.S. Yankovskaya, I.I. Dovhyi, N. A. Bezhin, V.V. Milyutin, N. A. Nekrasova, S.V. Kapranov, V.F. Shulgin// Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry – 2018, Vol. 318, Issue 2. – Pp. 1085–1097.
9. В.В. Дядичев, А.В. Колесников, А.В. Дядичев, Е.А. Дядичева Модель формирования многослойной структуры заданного качества для процесса переработки вторичных строительных и полимерных материалов // Строительство и

техногенная безопасность № 10 (62) – 2018: Научно-технический журнал по строительству и архитектуре – Симферополь: Антикава, 2018. – С. 97 – 102.

10. Малицкова Е.А., Потапов И.И. Переработка отходов пластмасс – М.: Авис Оригинал, 1997. – 159 с.

11. Fogarty J., Rauwendaal C.J., Fogarty D., Rios A. Turbo-Screw, New Screw Design for Foam Extrusion, SPE ANTEC Techn. Papers – 2001.

12. Rauwendaal C. Polymer extrusion. – Munich, Hauser Garduer, 2001. – 777 p.

13. Pape J., Potente H., Obermann C. Influence of Model Simplifications on the Accuracy of Simulation Results in Single Screw Extruders / 15th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Den Bosch, the Netherlands. – 1999.

14. Grooved Feed Single Screw Extruders – Improving Productivity and Reducing Viscous Heating Effects. B. Davis et al., / Polym. Eng. Sci., 1998, vol 38, 7, - p. 1199.

15. Han C.D. Multiphase flow in polymer processing – New York: Academic Press. – 1981.

16. Elemans P. Enhancing Dry-Color Efficiency in Starve-Fed Injection Molding, 58th SPE ANTEC, - 2000. – Pp. 2582-2586.

17. Швецов П.А. Технология переработки пластических масс. – М.: Химия, 1988. – 462 с.

REFERENCES

1. Model of creation a multilayer structure for production of building pipes/V. Dyadichev, A. Kolesnikov, A. Dyadichev, S. Menyukand E. Dyadicheva// MATEC Web Conf., VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2018). – 2018, Vol. 251, Art. No 251 01006 Moscow, Russia, November 14-16, 2018.

2. V.V. Dyadichev, A.V. Kolesnikov, A.V. Dyadichev Improvement of extrusion equipment and technology for processing secondary combined polymer materials and mixtures // Dynamics of systems, mechanisms and machines: A scientific journal. – Omsk: Omsk State Technical University, 2018. – pp.162-167.

3. Lyubomirskiy N.V. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials/ N.V. Lyubomirskiy, S.I. Fedorkin, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina// Malaysian Construction Research Journal (MCRJ). – 2017, Vol. 23, No 3. – Pp. 15-26.

4. Fic S. The Influence of the Natural Aggregate Roughness on the ITZ Adhesion in Concrete/S. Fic, N.V. Lyubomirskiy, D. Barnat-Hunek// Materials Science Forum: «Materials and Technologies in Construction and Architecture. – 2018, Vol. 931. – Pp. 564-567.

5. Gusev A. Luminescent properties of zinc complexes of 4-formylpyrazolone based azomethineligands: Excitation-dependent emission in solution/ A. Gusev, V. Shul'gin, E. Braga, E. Zamnius, G. Starova, K. Lyssenko, I. Eremenko, W. Linert// Journal of Luminescence. – 2018, Vol. 202. – P. 370-376.

6. Gusev A. Synthesis and photophysical properties of Zn(II) Schiff base complexes possessing strong solvent-dependent solid-state fluorescence/ A. N. Gusev, V. F. Shul'gin, E.V. Braga, I. Nemeč, B.F. Minaev, G.V. Baryshnikov, Z. Trávníček, H. Ågren, I.L. Eremenko, K. A. Lyssenko, W. Linert // Polyhedron. – 2018.

7. Shul'gin V. Tb(III) complexes with 1-phenyl-3-methyl-4-stearoyl-pyrazol-5-one as a material for luminescence Langmuir–Blodgett films/ V. Shul'gin, N. Pevzner, A. Gusev, M. Sokolov, V. Panyushkin, J. Devterova, K. Kirillov, I. Martynenko, W. Linert// Journal of Coordination Chemistry. – 2018.

8. Yankovskaya V.S. Sorption of cobalt by extraction chromatographic resin on the base of di-(tert-butylbenzo)-18-crown-6/ V.S. Yankovskaya, I.I. Dovhyi, N. A. Bezhin, V.V. Milyutin, N. A. Nekrasova, S.V. Kapranov, V. F. Shulgin// Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry – 2018, Vol. 318, Issue 2. – Pp. 1085-1097.

9. V.V. Dyadichev, A.V. Kolesnikov, A.V. Dyadichev, E.A. Dyadicheva Model of formation of a multilayer structure of a given quality for the process of processing secondary construction and polymer materials // Construction and technogenic safety No. 10 (62) – 2018: Scientific and Technical Journal of Construction and Architecture – Simferopol: Antiqua, 2018. – p. 97 – 102.

10. Malitskova E.A., Potapov I.I. Recycling of plastic waste – М.: Avis Original, 1997. – 159 p.

11. Fogarty J., Rauwendaal C.J., Fogarty D., Rios A. Turbo-Screw, New Screw Design for Foam Extrusion, SPE ANTEC Techn. Papers – 2001.

12. Rauwendaal C. Polymer extrusion. – Munich, Hauser Garduer, 2001. – 777 p.

13. Pape J., Potente H., Obermann C. Influence of Model Simplifications on the Accuracy of Simulation Results in Single Screw Extruders / 15th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Den Bosch, the Netherlands. – 1999.

14. Grooved Feed Single Screw Extruders – Improving Productivity and Reducing Viscous Heating Effects. B. Davis et al., / Polym. Eng. Sci., 1998, vol 38, 7, - Pp. 1199.

15. Han C.D. Multiphase flow in polymer processing – New York: Academic Press. – 1981.

16. Elemans P. Enhancing Dry-Color Efficiency in Starve-Fed Injection Molding, 58th SPE ANTEC, - 2000. – Pp. 2582-2586.

17. Shvetsov P.A. Technology of plastic mass processing. – М.: Chemistry, 1988. – 462 p.

INVESTIGATION OF THE CREATION OF A HIGH-QUALITY ADHESIVE JOINT DURING DEFORMATION OF A MULTILAYER BILLET IN THE PROCESS OF BLOWING UP CONSTRUCTION PRODUCTS

Dyadichev V.V., Menuk S.G., Dyadichev A.V., Dyadicheva E.A.

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Pavlenko Street 3, Simferopol, 295000, Russian Federation
mr.dyadichev@mail.ru, adyadichev@mail.ru, dyadicheva-e@mail.ru

Abstract: the article analyzes the relevance of the use of secondary polymer raw materials in new construction products. The main stages of processing of secondary polymers are considered. Special prospects for the use of co-extrusion technology with subsequent blowing are noted. The calculation of the adhesion of a multilayer billet for various loading schemes is carried out. The stress-strain state in the process of blowing up a billet consisting of three layers, of which two outer layers consist of a primary polymer, and the inner one consists of a polymer obtained in the process of waste processing.

Subject: the main way to obtain polymer products with specified properties is the construction of multilayer polymer materials. In addition, the use of multilayering expands the possibilities of recycling polymer products, when an inner layer is formed from the waste of polymer materials in a multilayer system and thereby solves the environmental problem of waste recycling. The article suggests the use of the extrusion method followed by blowing, as one of the most effective shaping methods of molding construction products using a number of related technologies. The method is based on continuous plasticization of the polymer in several extruders with further production of a multilayer billet in the form of a pipe and cyclic molding in a mold by pumping compressed air into the billet. The aim of the work is to study the creation of a high-quality adhesive joint during deformation of a multilayer billet in the process of blowing.

Materials and methods: the properties of the multilayer structure of the billet being inflated: pressure drop, porosity, viscosity, interpenetration of particles in the layer, the intensity of heat and mass transfer processes depend on the parameters of inflating and air flow. When studying the processes of inflating under pressure in a multilayer structure, it is necessary to have comprehensive information about the behavior and adhesion of such layers. The most important parameter of a multilayer structure is its dynamic resistance. As a result of the deformation of the multilayer material in the blown form, an alternating aerodynamic pressure arises, which has a significant effect on the adhesion dynamics of the multilayer structure.

Results: to improve the design and technological parameters, to create new methods for calculating the parameters of the molding process of multilayer structures, a functional scheme of equipment for combined co-extrusion of hollow polymer products using a special blowing device has been developed. A technique for analyzing the dynamic behavior of a multilayer shell is defined, which allows determining the critical intensities of stresses and shear deformations at which a high-quality adhesive joint of a multilayer billet occurs during blowing. Based on the equations of the dynamics of the blow-up of multilayer products, taking into account the kinematic, dynamic and energy conditions on the contact surfaces of the layers, the conditions ensuring plastic deformation of the contacting layers of the polymer material and good adhesion between the layers of primary and secondary polymers at maximum performance are determined.

Conclusions: it is determined that the deformation rate of the multilayer billet must be regulated by the inflating pressure, and the high-quality adhesive connection of the layers should be provided by rationalizing the heat and mass transfer process.

Key words: secondary polymer materials, co-extrusion, adhesion, stress-strain state, visco-plastic model, deformation rate, inflating pressure.

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 628.179.34 (628.144.23)

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. ФЕОДОСИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДОВ

Волна В.В., Крымов Р.С., Мельникова Н.С.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
 Институт «Академия строительства и архитектуры»,
 295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181.
 e-mail: 6653949@gmail.com

Аннотация. В статье проведены исследования работы системы подачи и распределения воды г. Феодосия, с целью определения фактических показателей работы насосных агрегатов и трубопроводов, определены возможные причины их изменений, изучены графики водопотребления. На основании полученных результатов были даны рекомендации по поэтапной реконструкции оборудования трубопроводов; устранение потерь воды и частичному ремонту или полной замене трубопроводов.

Предмет исследования. Гидравлические характеристики, технологические параметры и методы расчетов водопроводных сетей, которые связаны с причинами формирования потерь воды при изменении величин свободных напоров.

Материалы и методы исследования: Выполнен анализ методик гидравлического расчета с использованием энергетического совпадения и оптимизация системы водоснабжения города Феодосия с учетом износа трубопроводов. Проведен анализ технического состояния трубопроводов системы водоснабжения г. Феодосия. Выполнен гидравлический расчет водопроводной сети с использованием программного продукта ZuluGIS с учетом износа трубопроводов. Проведен анализ расчёта системы водоснабжения г. Феодосия и определены основные методы оптимизации системы подачи и распределения воды.

Результаты. Представлено техническое обследование состояния трубопроводов системы водоснабжения г. Феодосия на основе статистических данных. Выполнен гидравлический расчет водопроводной сети с использованием программного продукта ZuluGIS. Определены основные методы оптимизации системы подачи и распределения воды г. Феодосия.

Выводы. Выполнение рекомендаций по реконструкции системы водоснабжения г. Феодосия принесет экономический эффект за счет сокращения потерь воды в сетях и сокращения потребления электроэнергии при поддержании минимально необходимого напора.

Ключевые слова: система подачи и распределения воды, потери, геоинформационная система, реновация, удельное водопотребление.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация системы водоснабжения должна быть энергоэффективной и безотказной с учетом рационального использования и охраны водных ресурсов, а также многих других факторов ее работы [1, 2, 3]. Эти факторы относятся в основном к самым дорогостоящим, конструктивно сложным элементам системы водоснабжения населенного пункта, а именно системе взаимосвязанных элементов, в которую входят трубопроводы, насосные агрегаты и регулирующие резервуары [2, 4]. Такой комплекс инженерно-технических сооружений характеризуется многогранностью, изменчивостью параметров и непостоянством работы (если рассматривать небольшие населенные пункты – это большое количество трубопроводов из различных диаметров и материалов труб, уложенные в различные годы, станции с установленным насосным оборудованием, водонапорные башни и контррезервуары). Помимо существующих минусов в работе системы подачи и распределения воды (СПРВ) (техническая ушербность участков, потеря воды из-за аварий, несанкционированных врезок и др.), имеет место несоответствие всевозможных характеристик и схем в новых условиях работы. А это пагубно

отражается на транспортировку требуемого количества воды потребителям, расход электроэнергии, капитальные и эксплуатационные затраты.

Исследованиям работы системы подачи и распределения воды посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Необходимо отметить два наиболее перспективных метода оценки режимов водопотребления: вероятностный и статистический. Но, существующие требования в нормативных документах [1, 3] не дают полностью оценить работу системы для различных уровней обеспеченности. Помимо этого, уровни обеспеченности ни в одном нормативном документе вообще не нормируются.

В 30-е годы прошлого века были проведены первые гидравлические расчеты водопроводных сетей. В современном мире компьютерная техника позволяет рассчитывать неограниченные по объему гидравлические расчеты работы водопроводных сетей в комплексе с насосными агрегатами, напорно-регулирующими емкостями, входящими в состав системы водоснабжения, с максимальным учетом всех факторов водопотребления.

В основном существующие программные комплексы основаны на ГИС-технологии, что позволят более мгновенного и высококачественно

формировать исходные данные, связанные с местоположением объектов водоснабжения, а также формировать геодезию модели. На данный момент существуют такие программные комплексы как WaterCAD®6.0, EPANET, ZuluHydro ООО «Политерм» и др. [12].

Вместе с тем, эти ГИС-системы имеют свои недостатки, а именно:

- не учитывают изменения величин отборов воды от напоров в узлах;
- не ведется пересчет изменений гидравлических сопротивлений во времени;
- отсутствует точность оптимизационных расчётов из-за несовершенства расчетно-математического устройства программы;
- невозможность моделирования изменений дестабилизирующих факторов в процессе эксплуатации.
- не учитывают изменения параметров работы трубопроводов и насосных установок в процессе эксплуатации.

Особенности работы, существующей СПРВ (на примере города Феодосия) выявлены такие [6, 12]:

- уменьшение количества транспортируемой воды (это связано с уменьшением потребления воды промышленностью, установка приборов учета и перехода на двухставочный расчет электроэнергии);
- увеличение утечек, несовершенство подсчета требуемого количества воды, несанкционированные врезки в трубопровод;
- высокая аварийность трубопроводов, насосных агрегатов и запорно-регулирующей арматуры в связи с их техническим износом, несвоевременным профилактическим обслуживанием, а иногда фактически полным его отсутствием;
- увеличение гидравлических сопротивлений труб, ошибки при подборе диаметров, материалов труб, количество водопотребителей и т.д.;
- снижение надежности работы сети и экологической безопасности, обусловлено старением и физической изношенностью трубопроводов и насосного оборудования.

Если рассматривать в целом по Республике Крым, то треть трубопроводов водопроводных

сетей требует полной замены из-за морального износа. Потери питьевой воды в таких сетях в отдельных районах из-за утечек превышают 50 %. Большая доля трубопроводов распределительной сети и водоводов эксплуатируется свыше 35 лет, а это пагубно влияет не только на их гидравлику, но и на надежность и экологическую безопасность.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Источниками водоснабжения городского округа Феодосия Республики Крым служат Феодосийские водохранилище, Субашский водозабор, а также местные скважины. Система водоснабжения в ГО Феодосия централизованная, подача воды осуществляется следующим образом: вода из Феодосийского водохранилища подается на ВОС г. Феодосии, после очистки насосной станцией второго подъема по водоводам подается в г. Феодосию, поселки ГО Феодосии и в г. Судак. Вода от Субашского водозабора подается, минуя ВОС в РЧВ г. Феодосии. Попутно снабжаются села Приветное, Садовое, Насыпное, Ближнее. Водой от собственных скважин снабжаются пгт Щebetовка, пгт Курортное, с. Краснокаменка.

ВОС Феодосии рассчитаны на производительность 100 тыс. куб. м/сутки. Фактическое значение охвата населения централизованным водоснабжением составляет 97,5%. Централизованное водоснабжение отсутствует в селах Виноградное, Пионерское, Узловое. Фактическое водопотребление населением городского округа Феодосия за 2016 год составляет 13,3 тыс. куб м/сутки, удельное фактическое водопотребление населением, охваченным централизованным водоснабжением (примерно 8,5 тыс. чел.), составляет 135 л/сут. чел.

Ожидаемое потребление воды всех видов рассчитано исходя из проектных показателей схемы территориального планирования и перспективной нормы водопотребления (140 – 160 л/сут. чел.) приведено в табл. 1.

Таблица 1. Годовой баланс подачи и реализации воды по группам абонентов на базовый период и расчетный срок 2030 г., тыс. куб. м/год

Table 1. Annual balance of water supply and sale by subscriber groups for the base period and the estimated period of 2030, thousand cubic meters/year

№ п/п	Наименование	Фактическое значение, 2021 г., тыс. куб. м/год			Ожидаемое значение, 2030г., тыс. куб. м/год		
		годовая подача	реализация		годовая подача	реализация	
			население	прочие потребители		население	прочие потребители
1	Феодосия	9550,3	3202,90	640,73	8856,59	5043,66	2484,4

Протяженность водоводов и водопроводных сетей составляет 469,2 км, в том числе нуждающихся в замене – 338 км. Амортизационный

уровень износа водопроводных сетей составляет 72 %, что приводит к аварийности, достигающей

3,3 аварии на км в год. Доля потерь и утечек достигает 59,7 % по отношению к подаче воды.

На период 2020-2021 г. полной замены водопроводной сети требовало 295,93 км или 63%. В худшем состоянии находятся уличные сети, из них нуждаются в замене 66,24% (171,07 км); для внутриквартальных сетей этот показатель составляет – которых 56,8% (27,47 км), а для

водоводов – 59,41% (97,38 км) (рис. 1). Общее количество аварий на водопроводных сетях в течение 2020-2021 годов составляла, соответственно: 305; 302 и 417 или в пересчете на 1 км сети 1,94; 1,83 и 2,17 аварий, что свидетельствует о чрезвычайно высоком уровне аварийности в системе распределения воды.

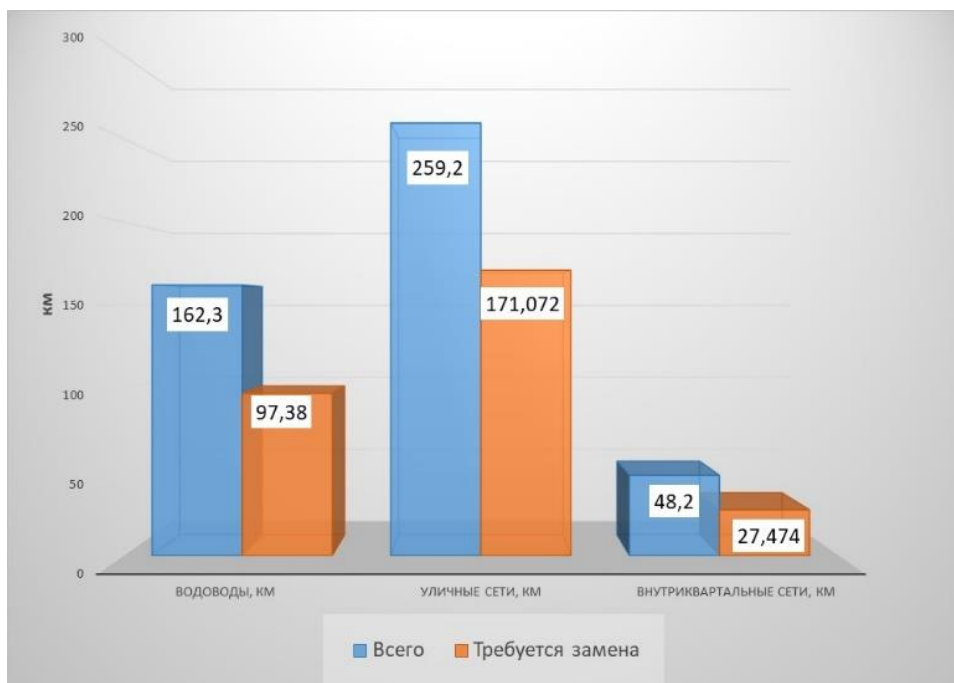


Рис. 1 Техническое состояние водопроводных сетей
Fig. 1 Technical condition of water supply networks

Технико-технологические характеристики распределительных сетей системы централизованного водоснабжения города представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Характеристика сетей по сроку эксплуатации
Table 2. Characteristics of networks by service life

Материал труб	Протяженность трубопроводов сроком службы до, км						Всего
	5 лет	15 лет	25 лет	35 лет	50 лет	> 50 лет	
Сталь	0,00	17,38	23,17	46,33	19,69	9,27	115,837
Чугун	0,00	0,00	0,00	53,16	109,65	169,45	332,259
Полиэтилен	3,76	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00	5,22804
Асбестоцемент	0,00	0,00	0,00	0,00	3,95	11,25	15,2055
Железобетон	0,00	0,00	0,00	0,21	0,28	0,57	1,0604
Всего:	3,764188	18,8394	23,1674	99,7084	133,567	190,5439	469,59

Таблица 3. Характеристика водопроводных сетей по степени износа
Table 3. Characteristics of water supply networks by degree of wear

Материал труб	Протяженность трубопроводов по степени износа, км					Всего
	<25 %	25-50 %	50-75 %	75-90 %	> 90%	
Сталь	10,71	32,14	6,00	3,28	74,24	126,39
Чугун	32,05	96,15	31,55	37,27	126,66	323,67
Полиэтилен	0,84	2,53	0,00	0,00	0,00	3,38
Асбестоцемент	0,00	0,00	0,00	0,13	15,08	15,20
Железобетон	0,00	0,00	0,06	0,53	0,47	1,06
Всего	43,61	130,83	37,61	41,21	216,45	469,70

Из предоставленных материалов видно, что основная часть сети имеет сильный износ и находится в аварийном состоянии. 46,1% трубопроводов имеет износ выше 90%.

Высокая степень износа водопроводной сети приводит:

- к высоким физическим потерям воды в распределительной системе;
- к значительным затратам на ликвидацию повреждений;
- к ухудшению качества транспортируемой воды.

Значительная часть утечек воды вследствие образования свищей носит скрытый характер, что требует дополнительного времени на их выявление, а также значительных средств на их ликвидацию.

Рост повреждений на трубопроводах может привести к неуправляемому процессу водоснабжения из-за вынужденного отключения участков трубопровода, не подлежащих ремонту и как следствие к:

- росту нагрузок на другие участки трубопроводов;
- повышению избыточных напоров;
- увеличению потерь и утечек питьевой воды;
- дополнительным расходам электроэнергии и реагентов;

- нестабильному водообеспечению населения;
- ухудшению качества питьевой воды.

Высокая степень износа водоводов не позволяет использовать естественный перепад высот от ВОС, который составляет 70 м.

В период с 2018 по 2021 гг. Феодосийскому филиалу ГУП РК «Вода Крыма» удалось снизить потери воды в сетях примерно на 15%. Вместе с тем согласно предоставленным филиалом данным, по перекладке водопроводных сетей, за 2021 год было переложено всего 3,5 км трубопроводов. Уменьшение потерь воды достигается путем уменьшения давления в разводящей сети и как следствие уменьшение количества порывов. Такая вынужденная мера негативно сказывается на качестве предоставляемых услуг – не обеспечивается минимальный свободный напор в сети водопровода. Объемы воды, которые непродуктивно расходуются в процессе производственного цикла подготовки питьевой воды, в общем случае можно разделить на несколько категорий, в частности, потери и затраты при подъеме, в распределительной и внутридомовой сетях. Общие объемы потерь воды отдельно по каждой из указанных составляющих приведены на рис. 2.

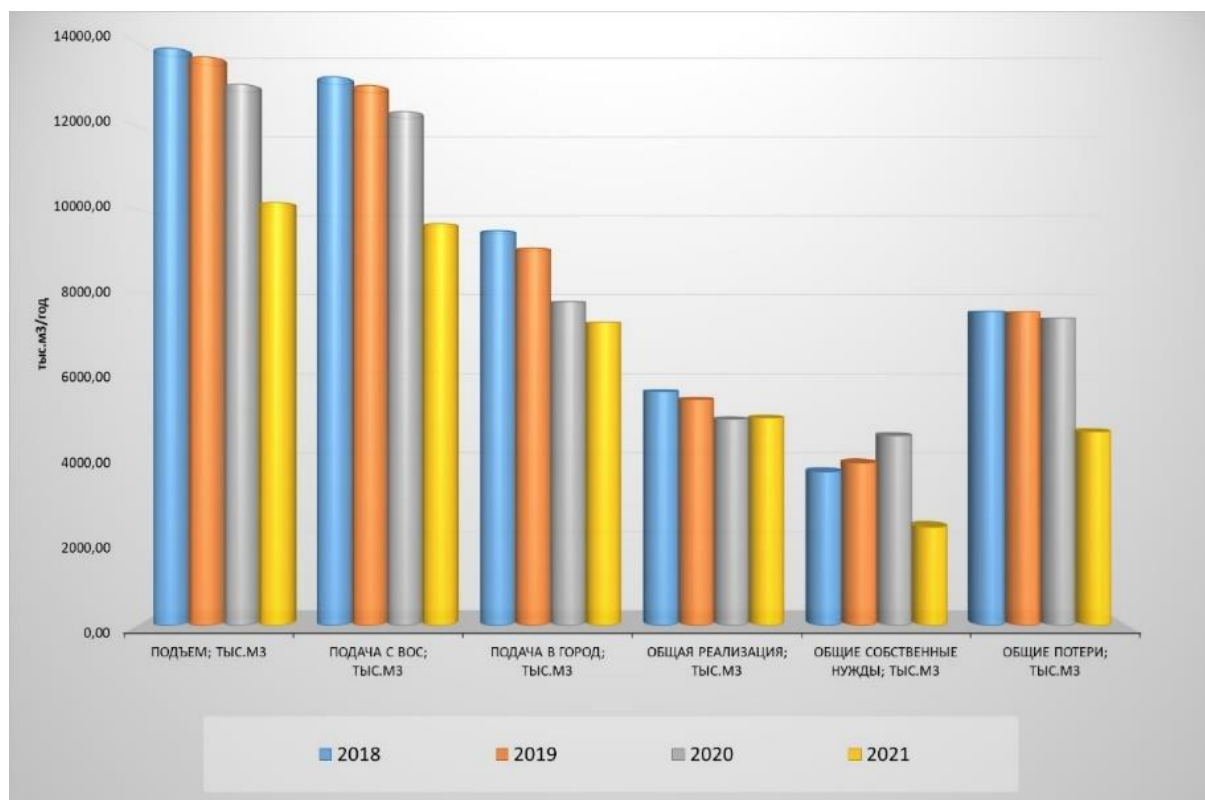


Рис. 2 Технологические потери и затраты воды
Fig. 2 Technological losses and water costs

Характерной особенностью водопроводной сети г. Феодосия является отсутствие или неработающая предохранительная арматура. В условиях дефицита финансирования предохранительная арматура, как правило, используется по остаточному принципу

или только в случае очевидной необходимости. В то же время предохранительная арматура, защищает трубопроводы от негативных воздействий, продлевает срок службы ветхих трубопроводов, что обеспечивает дополнительную отсрочку их замены.

Настоящим исследованием предусмотрено определение наиболее оптимальных путей решения существующих проблем СПРВ г. Феодосия, также рассмотрены возможности использования полученных результатов при проведении оптимизации сетей водоснабжения города Феодосия.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве методов исследований был использован метод энергетического совпадения и метод вероятностного функционирования СПРВ.

Метод энергетического совпадения основан на совмещении двух принципов расчета разветвленной и кольцевой водопроводной сети, который позволяет суммировать все расходы на ответвленных участках и отнести их к узлу, находящемуся на магистральной сети. Потери напора не суммируются как расходы, а считаются как средняя величина для всех тупиковых участков.

В рамках моделирования аварийных режимов систем водоснабжения авторами работ [5, 6] были предприняты попытки «объединения линейных элементов структурного графа в единый (эквивалентный) элемент по ряду субъективных критериев. Далее использование условий множественного эквивалентирования по энергетическому критерию в аналитических задачах возмущенного состояния городских систем водоснабжения привело к разработке так называемого «тупикового» принципа эквивалентирования, который основан на частном условии энергетического эквивалентирования [7]».

$$\sum_{j=1}^{m_z} \sum_{i=1}^{N_{psi}} \int_0^{Q_{ij}} S_{ij} Q_{ij}^\alpha dQ_{ij} = \sum_{j=1}^{m_z} \int_0^{Q_{j\alpha}} S_{j\alpha} Q_{j\alpha}^\alpha dQ_{j\alpha}, \quad (1)$$

где N_{psi} – множество участков сети, отнесенных к Δy_j расчетной зоны, S_{ij} , Q_{ij} – коэффициент гидравлического сопротивления и расчетный расход участка i из множества N_{psi} ; $S_{j\alpha}$, $Q_{j\alpha}$ – то же для эквивалентного участка j ; m_z – множество энергоузлов; α – коэффициент нелинейности в формулах инженерной гидравлики.

Также в исследовании использовался метод, основанный на оценке объемов подачи воды потребителям за определенный интервал времени функционирования СПРВ в условиях случайных процессов как водопотребления, так и возникновения аварийных ситуаций и их восстановления.

Суть этой метода заключается в формировании вероятностного графика водопотребления каждого потребителя воды с учетом вероятностного характера возникновения аварийных ситуаций на любом из участков и определяется коэффициентом работоспособности и простоя.

$$K_z = \frac{T_p}{T_p + T_{ec}} \quad (2)$$

$$K_{np} = \frac{T_{ec}}{T_p + T_{ec}}, \quad (3)$$

T_p – время безотказной работы сети или участка, T_{ec} – время проведения ремонтно-восстановительных работ.

Общая работы каждого трубопровода СПРВ в неработоспособном и работоспособном состоянии равна 1:

$$K_z + K_{np} = 1 \quad (4)$$

Интервал времени в исправном состоянии работы СПРВ зависит от интенсивности отказов и определяется по формуле:

$$T_p = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

Безаварийный режим работы системы водоснабжения:

$$f_{СПРВ} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \gamma_i} \right), \quad (6)$$

Многолетняя эксплуатация системы водоснабжения города Феодосия дала возможность определить фактические расходы воды одним жителем в различных районах города и в разные времена года (рис.3). Исследование этих фактических данных позволяют Феодосийскому филиалу ГУП РК «Вода Крыма» сформировать нормы водопотребления на одного жителя для г. Феодосия. Эти нормы в будущем можно использовать при подсчете требуемых расчетных расходов воды при создании новых водопроводов на перспективу расширения города.

Технологические показатели водопроводной сети получены в результате многолетней паспортизации водоканалом г. Феодосия. Паспортизация осуществлялась путем наружного осмотра трубопроводов, выездами на места аварий, использование архивных данных, гидравлические испытания участков.

Моделирование СПРВ г. Феодосия приближенной к реальной, осуществлялось с использованием классификации шероховатости стенок труб из различных материалов, полученные на основании многочисленных экспериментальных данных различных авторов [8, 9]. Коэффициенты шероховатости были приняты в зависимости от сроков эксплуатации стальных и чугунных труб и диаметров трубопроводов, а также рассматривалось снижение пропускной способности труб в зависимости от продолжительности их работы и образования коррозионных отложений (рис. 4).

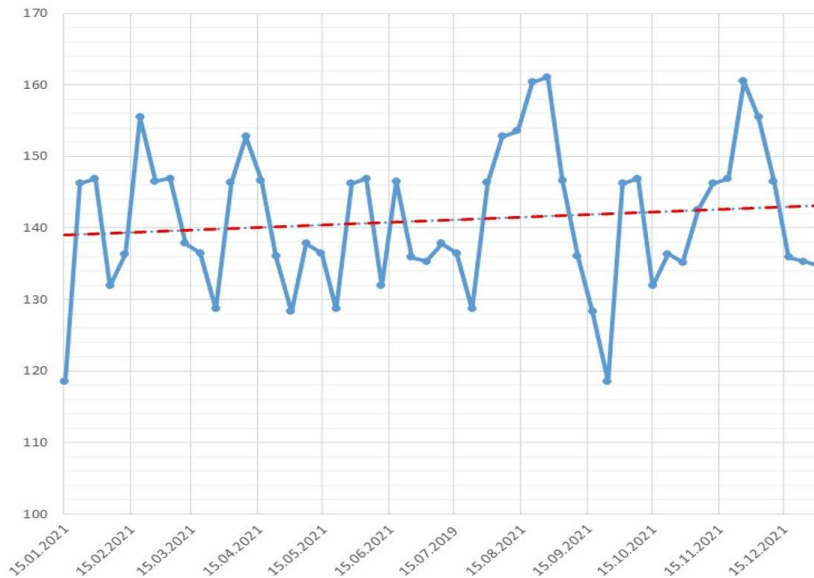


Рис. 3 Изменение удельного водопотребления в течение года
Fig. 3 Change in specific water consumption during the year

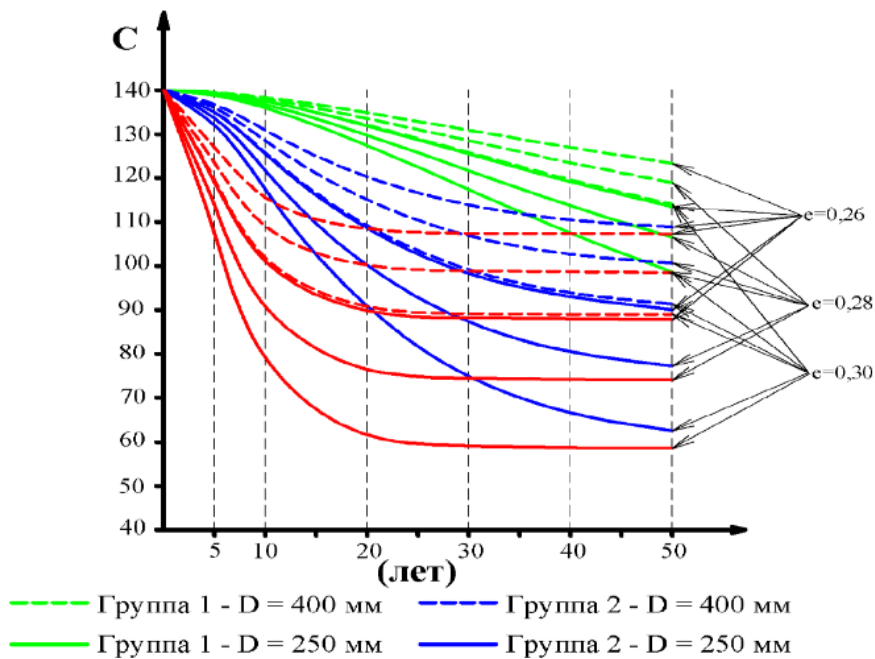


Рис. 4 Математическая модель коррозионного зарастания металлических трубопроводов
Fig. 4 Mathematical model of corrosion overgrowth of metal pipelines

Анализ надежности СПРВ г. Феодосия проводили с использованием геоинформационной системы Zulu. Для этого потребовалось создать расчетно-математическую модель СПРВ г. Феодосия (рис. 5). С развитием информационных и коммуникационных технологий ГИС и систем управления активами, процесс моделирования был значительно улучшен, поскольку информация о топологии и компонентах может быть получена автоматически из ГИС-системы. Данные временного ряда, такие как потребление, производительность насоса, уровни давления или эксплуатационные графики могут быть получены из

систем SCADA. Конечно, ни одна модель не идеальна; любая модель искажает само поведение системы, которое она стремится правильно представить. Таким образом, часто требуется дополнительный этап калибровки, чтобы уменьшить несоответствие между реальными данными и моделью. Калибровка — это процесс корректировки параметров модели до тех пор, пока характеристики модели не будут в разумной степени соответствовать измеренной производительности системы в широком диапазоне рабочих условий.

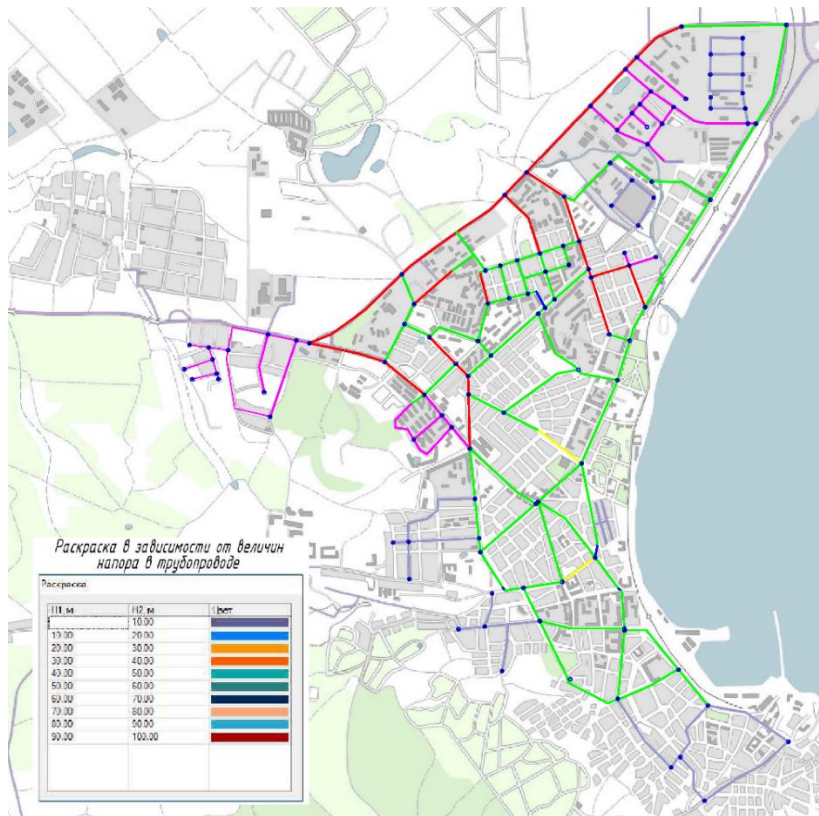


Рис. 7 Изменение давлений в узлах сети в час минимального водопотребления
Fig. 7 Pressure change in network nodes per hour of minimum water consumption

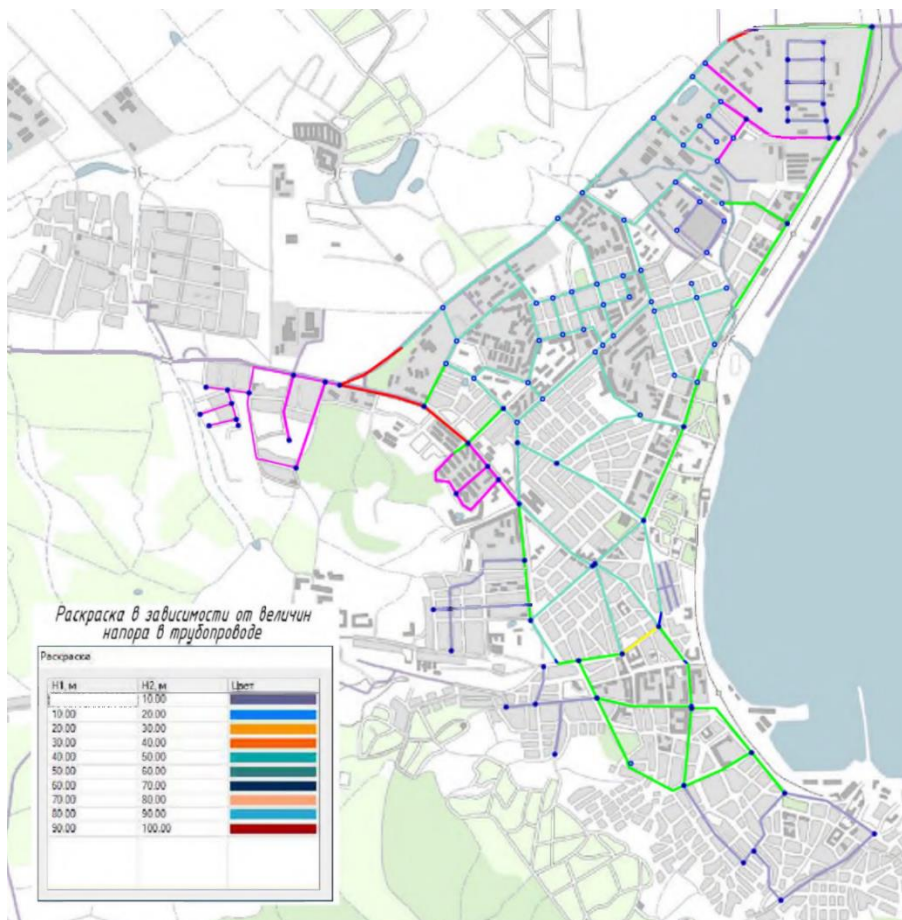


Рис. 8 Изменение давлений в узлах сети в час максимального водопотребления
Fig. 8 Pressure change in network nodes per hour of maximum water consumption

В системах водоснабжения одним из важнейших факторов является зарастание трубопроводов из стальных и чугунных труб, увеличение потерь напора, что сокращает пропускную способность и увеличивает потребление электроэнергии на преодоления дополнительного сопротивления. Увеличение гидравлического сопротивления является следствием увеличения шероховатости внутренней поверхности труб, зависящей срока их эксплуатации.

Результаты расчета показали, что большинство участков пропускают необходимый расход воды, при этом расчетные скорости составили 0,6 – 1,2 м/с. Но на некоторых участках зафиксированы значительные потери напора, что приводит к падению давления воды в соответствующих районах. Далее в расчет вводился коэффициент шероховатости труб, соответствующий продолжительности эксплуатации отдельных участков. Результаты гидравлического расчета показали, значительные изменения в потерях

напора, при этом потери напора увеличиваются почти на всех участках.

Результаты гидравлического расчета водопроводной сети с учетом действительных коэффициентах шероховатости позволяют сделать вывод о том, что в некоторых районах потребитель недополучает воду в часы максимального водопотребления. Это соответствует реальности системы водоснабжения г. Феодосия, а именно на удаленных от источников участках сети отсутствует необходимое давление.

Для того, чтобы рассмотреть предположительный сценарий повреждения участков СПРВ города и какие изменения внесут аварии в потокораспределение в сети был проведен анализ интенсивности отказов участков водопроводной сети города. В результате чего была получена вероятностная модель функционирования системы водоснабжения с учетом износа трубопровода (рис. 9).



Место разрыва: ID=31 Напор: 30.436 м Утечка: 582.557 л/с
Место разрыва: ID=126 Напор: 9.035 м Утечка: 52.901 л/с

Рис. 9 Карта давлений в аварийном режиме

Fig. 9 Pressure map in emergency mode

Гидравлический расчет такой системы показал, что обеспечение требуемым расходом и напором распределительных трубопроводов является проблематичным и приводит к серьезным последствиям, а именно давление у 60% потребителей снизилось ниже допустимого, потребители недополучают воду в количестве 155 м³ в год.

В качестве основных мероприятий по оптимизации работы водоводов и водопроводных сетей г. Феодосия, направленные на повышение надежности и бесперебойности работы системы водоснабжения необходимо рассмотреть установку повысительных насосных станций (ПНС), замену ветхих трубопроводов на новые, реновацию изношенных труб, а также прокладку новых водоводов.

ВЫВОДЫ

Большинство трубопроводов водопроводных сетей города Феодосия находится в состоянии интенсивного старения и износа, перманентных

изменений их параметров и требуют применения оптимизационных мероприятий с целью стабилизации подачи воды, ресурсосбережения и повышения надежности водоснабжения города. Значительное превышение требуемого напора увеличивает аварийность трубопроводов, увеличивает утечки и нерациональные отборы воды. При высокой скорости потока будет наблюдаться повышенная вибрация трубопровода и образование статического электричества, что также негативно влияет на степень износа.

В результате исследований проанализированы методы количественной оценки надежности СПРВ и групповых водопроводов с сетями разветвленного типа. Выбранная методика анализа надежности системы подачи и распределения воды дает возможность оценить качество подачи воды водопотребителям, как для всей системы водоснабжения города, так и для каждого района в отдельности. Если использовать современные автоматизированные геоинформационные инструментальные системы (такие как Zulu), то проведенные расчеты системы подачи и

распределения воды города будут иметь важное значение при определении аварийных участков трубопроводов, на основании которых будут сформированы предложения по устранению аварий и минимизации их последствий. В итоге могут быть разработаны мероприятия по реновации естественного режима системы водоснабжения в целом.

Выполнение рекомендаций по реконструкции СПРВ г. Феодосия принесет ощутимый экономический эффект за счет сокращения потерь воды в сетях и сокращения потребления электроэнергии при поддержании минимально необходимого напора, обеспечивающего требуемое водопотребление в любой момент времени, за счет сокращения затрат на ремонты и обслуживание оборудования и сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Примин О.Г., Храменков С.В. Пути обеспечения надежности функционирования городской водопроводной сети в условиях сокращения водопотребления в г. Москве // Сборник докладов 17-го Ольденбургского форума по трубопроводам. Институт по строительству трубопроводов при Высшей технической школе г. Ольденбург, Германия. – 2013. – т. 20.
2. Храменков С.В. Обеспечение надежности систем водоснабжения и канализации г. Москвы в условиях чрезвычайных ситуаций // ВиСТ. – 2016. – № 1. – С. 2-6.
3. Сомов М.А., Примин О.Г. Технико-экономическое обоснование вариантов обеспечения надежности трубопроводов водопроводной сети // Научно-технический альманах «Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций». – 2001. – № 2-3. – С. 29-36.
4. Примин О.Г., Храменков С.В. Оптимизация восстановления городских водопроводных и водоотводящих сетей // Сборник докладов 6-го Международного конгресса «Вода, экология, технология», Экватек. – 2004.
5. Чупин Р.В., Мелехов Е.С. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – 323 с.
6. Щербаков В.И. Модернизация водопроводной сети на основе оптимизации гидравлических параметров при аварии на магистралях / В.И. Щербаков, Х.К. Нгуен // Вестник МГСУ. – 2015. – № 10. – С. 115-126.
7. Панов, М. Я. Вариационно-топологические метод моделирования и структурно-параметрическая оптимизация гидравлических систем: автореф. дисс. д-ра техн. наук. – Воронеж, 1995. – 49 с.
8. Pipe materials and common pipe roughness values. [Электронный ресурс] – 2018. Режим доступа: <https://www.pipeflow.com/pipe-pressure-dropcalculations/pipe-roughness>.
9. Nikola Jacimovic. A novel method for the inclusion of pipe roughness in the HazenWilliams equation / Jacimovic Nikola, Mirjana Stamenic, Petar Kolendic, Dimitrije Đorđević, Branka Radanov, Ljubisa Vlado // Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade. All rights reserved. FME Transactions. – Vol. 43, № 1, 2015 – P. 35-39.

REFERENCES

1. Primin O.G., Khramenkov St. Ways to ensure the reliability of the functioning of the city water supply network in conditions of reduced water consumption in Moscow // Collection of reports of the 17th Oldenburg Forum on Pipelines. Institute for Pipeline Construction at the Higher Technical School of Oldenburg, Germany. – 2013. -vol. 20.
2. Khramenkov St. Ensuring the reliability of water supply and sewerage systems in Moscow in emergency situations // ViST. – 2016. – № 1. – С. 2-6.
3. Somov M.A., Primin O.G. Feasibility study of options for ensuring the reliability of pipelines of the water supply network // Scientific and technical almanac "Problems of development of transport and engineering communications". – 2001. – №. 2-3. – Pp. 29-36.
4. Primin O.G., Khramenkov St. / Optimization of urban water supply and drainage networks restoration // Collection of reports of the 6th International Congress "Water, Ecology, Technology", Ecwatech. – 2004.
5. Chupin R.V., Melekhov E.S. Development of theory and practice of modeling and optimization of water supply and sanitation systems. Irkutsk: Publishing house of IrSTU, 2011. – 323 p.
6. Shcherbakov V.I. Modernization of the water supply network on the basis of optimization of hydraulic parameters in case of an accident on highways / V.I. Shcherbakov, H.K. Nguyen // Vestnik MGSU. – 2015. – № 10. – Pp. 115-126.
7. Panov, M. Ya. Variational-topological modeling method and structural-parametric optimization of hydraulic systems: abstract. dissertation of the Doctor of Technical Sciences. – Voronezh, 1995. – 49 p.
8. Pipe materials and common pipe roughness values. [Электронный ресурс] – 2018. Режим доступа: <https://www.pipeflow.com/pipe-pressure-dropcalculations/pipe-roughness>.
9. Nikola Jacimovic. A novel method for the inclusion of pipe roughness in the HazenWilliams equation / Jacimovic Nikola, Mirjana Stamenic, Petar Kolendic, Dimitrije Đorđević, Branka Radanov, Ljubisa Vlado // Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade. All rights reserved. FME Transactions. – Vol. 43, № 1, 2015 – P. 35-39.

OPTIMIZATION OF THE WATER SUPPLY SYSTEM IN FEODOSIA, TAKING INTO ACCOUNT
THE WEAR OF PIPELINES.

Volna V. V., Krymov R. S., Melnikova N. S.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Academy of construction and architecture,
181, Kievskaya str., Simferopol, 295050, Russian Federation

Annotation. The article studies the operation of the Feodosiya water supply and distribution system in order to determine the actual performance of pumping units and pipelines, identifies possible causes of their changes, and studies water consumption schedules. Based on the results obtained, recommendations were made for the phased reconstruction of pipeline equipment; elimination of water losses and partial repair or complete replacement of pipelines.

The subject of the study. Hydraulic characteristics, technological parameters and calculation methods of water supply networks, which are associated with the causes of the formation of water losses when the values of free pressures change.

Materials and methods of research: The analysis of hydraulic calculation methods using energy coincidence and optimization of the water supply system of the city of Feodosia, taking into account the wear of pipelines, was carried out. The analysis of the technical condition of pipelines of the water supply system of Feodosia is carried out. Hydraulic calculation of the water supply network using the ZuluGIS software product is performed taking into account the wear of pipelines. The analysis of the calculation of the Feodosiya water supply system is carried out and the main methods of optimizing the water supply and distribution system are determined.

Results. A technical survey of the condition of the pipelines of the Feodosiya water supply system based on statistical data is presented. The hydraulic calculation of the water supply network was performed using the ZuluGIS software product. The main methods of optimization of the Feodosiya water supply and distribution system are determined.

Conclusions. The implementation of the recommendations for the reconstruction of the Feodosiya water supply system will bring an economic effect by reducing water losses in the networks and reducing electricity consumption while maintaining the minimum required pressure.

Key words: water supply and distribution system, losses, geoinformation system, renovation, specific water consumption.

УДК 628.395+004.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДООТВОДЯЩЕЙ СЕТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЕЕ ПОДСВОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ

Орлов В.А.¹, Мельник О.В.¹, Подолян Д.В.¹

«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Россия, г. Москва, пр. Мира, 26,
e-mail: OrlovVA@mgsu.ru, lissa6868@mail.ru, dim.p-2010@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты физического и компьютерного моделирования гидравлических и аэродинамических параметров работы участков безнапорной водоотводящей сети из разных материалов на предмет обеспечения предельно-допустимых концентраций (ПДК) выбросов в атмосферу дурнопахнущих и вредных для здоровья газов при использовании механической нагнетательной системы воздухообмена в подводной части трубопроводов. Требования к аспектам моделирования сводились к тому, чтобы они ясно воспринимались заинтересованными специалистами и однозначно ими трактовались при решении конкретной задачи оценки санитарной безопасности проектируемой и эксплуатируемой канализационной сети. Реализация поставленных задач осуществлялась путем использования специально разработанной автоматизированной программы, а также результатов исследований водно-воздушного режима работы самотечного трубопровода на специально разработанном стенде. В качестве исходных показателей служил стандартный перечень параметров, отвечающих за эффективную работу безнапорной водоотводящей сети, включая наполнение трубопровода, его уклон, плотность воздуха при температуре окружающей среды, концентрации вредных газообразных веществ в подводном пространстве, предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосфере города, величины воздухообмена для нейтрализации негативных компонентов в виде агрессивных газов, выделяемых из сточных вод в концентрациях, превышающих ПДК. По результатам автоматизированных расчетов определена динамика изменения ряда показателей работы самотечной трубопроводной сети, включая продолжительность удаления вредных газов в широком интервале их концентраций, а также в устанавливаемых диапазонах наполнений, имитирующих неравномерные режимы водопотребления в населенных пунктах. По результатам натурных исследований установлены показатели, позволяющие оценить процент выхода воздуха через имитаты колодца и стояка как в случае естественного поступления воздуха в трубопровод, так и при использовании системы его нагнетания в подводное пространство.

Предмет исследования: автоматизированная программа расчета гидравлических и аэродинамических параметров безнапорной трубопроводной сети, гидравлические и аэродинамические исследования водно-воздушного режима работы безнапорных водоотводящих трубопроводов из разных материалов в различные часы суток эксплуатации трубопроводов.

Материалы и методы: материалами исследований являются безнапорные водоотводящие сети, алгоритм моделирования их работы; методы заключаются в создании автоматизированного комплекса, анализе полученных в результате его эксплуатации выводов на предмет противодействия техногенной опасности, а также обосновании необходимости устройства приточной вентиляции по итогам натурных экспериментов на макете водоотводящей сети.

Результаты: разработана компьютерная модель водно-воздушного режима работы безнапорной водоотводящей сети и представлены материалы по результатам эксплуатации новой конструкции гидравлического стенда, базирующиеся на необходимости использования нагнетательной системы вентиляции подводного пространства трубопровода.

Выводы: на базе использования разработанной автоматизированной системы проанализированы возможности управления процессом удаления в атмосферу дурнопахнущих и вредных для здоровья людей газовых компонентов до концентраций ниже их ПДК в атмосфере городов путем применения нагнетательной вентиляции в подводном пространстве трубопровода; по результатам натурных исследований определены показатели водно-воздушного режима работы водоотводящей сети для случаев естественного и искусственного поступления воздуха в подводное пространство самотечного трубопровода.

Ключевые слова: техногенная безопасность, водоотводящие сети, компьютерное моделирование, автоматизированная программа, экспериментальные исследования

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальный режим движения сточной воды в безнапорных водоотводящих сетях с точки зрения их эффективной эксплуатации, включающей предотвращение выделения дурнопахнущих и вредных для здоровья людей газов, обеспечивается поддержанием гидравлических характеристик потока, в частности, самоочищающих скоростей и соответствующих расчетных наполнений для определенных диаметров трубопроводов [1, 2]. При определенных условиях, связанных с прохождением в сточной воде эффективных

анаэробных процессов, которые являются причиной появления неприятных запахов в водоотводящей сети (например, сероводорода, меркаптанов и т.д.), выходящих через люки канализационных колодцев в атмосферу, возникает необходимость принятия мероприятий по борьбе с дурнопахнущими газами [3, 4]. Практика показывает, что в данном случае могут применяться различные способы их эффективного устранения в транспортируемых сточных водах физико-химическими, биологическими, каталитическими, термическими, электроразрядными, строительными и другими методами [5, 6]. При этом нельзя не отметить, что

проблеме борьбы с газообразованием на водоотводящих трубопроводах уделяется значительное внимание на протяжении ряда лет, однако при существовании множества методов очистки газов каждый из них не рассматривается в качестве достаточного [7, 8, 9].

Одним из эффективных путей решения задач по нейтрализации газовых выбросов может являться осуществляемый на практике строительный метод, требующий предварительного детального анализа водно-воздушного режима работы водоотводящей сети, а также использование результатов моделирования с помощью автоматизированных программ [10, 11, 12]. Многовариантное компьютерное моделирование позволяет при работе с массивами исходных величин, таких как материал изготовления, диаметры и протяженности трубопроводных сетей, а также их уклонов и наполнений, интенсивности воздухообмена исследовать и фиксировать весь спектр гидро- и аэродинамических характеристик безнапорной водоотводящей сети при наличии в ее подсводном пространстве вредных газовых примесей [13, 14]. В последствии получаемые результаты позволяют обосновывать соответствующие технические мероприятия по нейтрализации дурнопахнущих газов различного химического состава, обеспечивая доведение их концентраций до значений ниже ПДК при выбросе в атмосферу, что обеспечивает техногенную безопасность. При этом детальный учет проходящих гидро-и аэродинамических процессов наделяет специалиста широким спектром возможностей для внесения коррективов в проектные разработки по санитарной (экологической) безопасности проектируемой

безнапорной водоотводящей сети, в частности, в местах массовых скоплений людей [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом проводимых исследований служили:

-специально разработанная автоматизированная программа анализа техногенной безопасности при наличии в подсводном пространстве трубопроводов из различных материалов вредных для здоровья газов; выборочные данные по одному из вариантов расчета керамического трубопровода представлены ниже (таблица 1);

-макет (лабораторный стенд) безнапорной водоотводящей сети, установленный в лаборатории кафедры «Водоснабжения и водоотведения» НИУ МГСУ для исследования гидравлических и аэродинамических показателей работы водоотводящего трубопровода (рисунок 1).

Создание обоих объектов моделирования водно-воздушного режима работы безнапорного трубопровода позволяет пользователю (проектировщику) анализировать и в конечном итоге рекомендовать наиболее оптимальные решения по уменьшению, предотвращению или нейтрализации газов, выделяющихся в процессе транспортировки сточной воды по трубопроводам и создающих техногенную опасность. Важной составляющей проводимых исследований являлось обобщение полученных в натуре (на стенде) данных и обоснование необходимости принимаемых решений по итогам эксплуатации автоматизированной программы.

Таблица 1. Образец входной информации с численными значениями для одного из варианта расчета при использовании керамического трубопровода

Table 1. Sample of input information with numerical values for one of the calculation options when using a ceramic pipeline

Наименование показателя и его размерность	Численные значения
Протяженность трубопроводной сети, м	350
Диаметр участка сети, м	0,3
Уклон трубопровода	0,0033
Наполнение трубопровода	0,5
Коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$	40
Назначаемый воздухообмен, m^3/c	0,03
Усредненный коэффициент аэродинамического сопротивления, $Нс^2/m^4$	0,44
Наименование вредного газа в подсводном пространстве трубопровода	сероводород
Концентрация вредного газа в подсводном пространстве трубопровода, mg/m^3	4,2
ПДК газообразного вещества в атмосфере города, mg/m^3	0,008
Диаметр стояка над колодцем, м	0,1
Высота стояка, м	5,0
Средняя температура атмосферного воздуха, $^{\circ}C$	20
Коэффициент кинематической вязкости воздуха, $10^6 m^2/c$	15
Плотность воздуха при температуре окружающей среды, $10^6 mg/m^3$	1,205

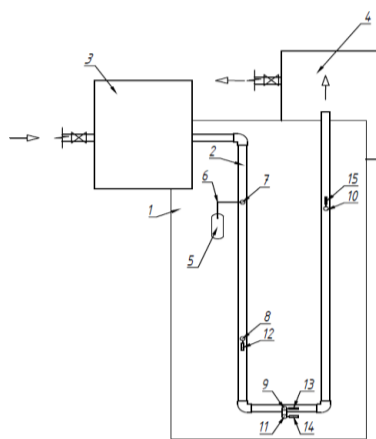


Рис. 1 Схема лабораторного стенда по исследованию водно-воздушного режима работы самотечного трубопровода (слева) и его эскиз в аксонометрии (справа):

1 – столешница, 2 – прозрачный самотечный трубопровод, 3 – накопительная емкость, 4 – приемная емкость, 5 – компрессор, 6 – воздуховод, 7 – имитатор люка смотрового колодца, 8-10 – имитаторы технологических лазов, 11 – имитатор стояка, 12-15 – стационарные анемометры

Fig. 1 Diagram of a laboratory stand for the study of the water-air mode of operation of a gravity pipeline (left) and its sketch in axonometry (right):

1 – table top, 2 – transparent gravity pipeline, 3 – storage tank, 4 – receiving tank, 5 – compressor, 6 – air duct, 7 – inspection well hatch simulator, 8-10 – technological manhole simulators, 11 – riser simulator, 12-15 – stationary anemometers

Исследуемыми на предмет удаления из подводящего пространства трубопроводов дурнопахнущими газами являлись сероводород, аммиак и формальдегид, обнаруженные в разные периоды времени на практике службами эксплуатации водоотводящих сетей соответственно в концентрациях 4,2, 20 и 0,5 мг/м³, которые превышают их ПДК в атмосфере города в несколько раз. При этом задача сводилась к расчету и анализу параметров, позволяющих снизить концентрации указанных газообразных веществ до значений ПДК в атмосфере в конкретном месте выброса их в воздушное пространство. Также необходимо отметить, что расчеты производились для каждого присутствующего в подводящем пространстве газа в отдельности.

В качестве результатов работы автоматизированной программы анализу подлежали выборочные наиболее характерные расчетные параметры из общего их числа, представленных 34-мя позициями, т.е. площадь живого сечения трубы, гидравлический радиус, скорость течения воды в трубе, площадь сечения потока, расход воды, площадь зеркала воды в трубопроводе, объем воздуха в подводящем пространстве трубы, общая масса поступивших в подводящее пространство газообразных веществ, продолжительность удаления газообразных веществ из подводящего пространства трубопровода при принятом воздухообмене в условиях стоячей воды и с учетом увлечения его течением воды и т.д. При этом конструктивными особенностями рассматриваемой в программе физической модели безнапорной водоотводящей сети являлось то, что искусственная подача воздуха в подводящее пространство осуществлялась в начале расчетного

участка сети, а выпуск в атмосферу через колодец и/или стояк осуществлялся путем использования струнаправляющих перегородок в колодце в конце расчетного участка.

Численные значения указанных выше и других расчетных параметров и их взаимозависимость представлена в разделе статьи «результаты и их анализ».

В свою очередь, принцип работы лабораторно-исследовательского стенда (см. рис. 2) состоит в том, что при устанавливаемых наполнениях, фиксируемых по специально нанесенным отметкам на теле прозрачного трубопровода 2, в него из накопительной емкости 3 поступает жидкость, расход которой определяют объемным методом в приемной емкости 4. При движении потока жидкости в подводящее пространство самотечного трубопровода 2 производится нагнетание воздуха из компрессора 5 по воздуховоду 6 с различной интенсивностью. При этом посредством анемометров 12-15 фиксируются скорости (расходы) воздуха в трех точках 8, 9 и 10 на трубопроводе 2 и в верхней части стояка 11. На базе полученных результатов по определению гидравлических и аэродинамических показателей производится анализ эффективности воздухообмена в подводящем пространстве трубопровода 2 при различных наполнениях жидкости в виде процента поступающего в трубопроводную систему воздуха через имитатор люка смотрового колодца 7 и удаляемого из нее воздуха через имитатор стояка 11 и технологический имитатор лаза 9. Имитаторы технологических лазов 8 и 10 служат контрольными точками фиксации скоростей воздуха в подводящем пространстве трубопровода 2. В качестве используемого оборудования и приборной базы

применялись: термоанемометр марки TESTO 405-V1 (прибор для измерения температуры и скорости течения воздуха в подводном пространстве трубопровода); поплавки и секундомер (для определения скорости течения воды); лабораторные компрессоры марки PR-H-7000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В результате эксплуатации автоматизированной программы сравнительному анализу подлежали расчетные данные для двух типов трубопроводов, изготовленных соответственно из керамики и полиэтилена, отличающиеся шероховатостью внутренних стенок труб, т.е. величиной коэффициента Шези, составляющего для керамических труб величину $40 \text{ м}^{0.5}/\text{с}$, а для полимерного трубопровода $60 \text{ м}^{0.5}/\text{с}$. В задачи исследований входило построение графических зависимостей изменения реального времени удаления газообразных веществ при различных наполнениях трубопроводов, отражающих неравномерность водопотребления воды в населенном пункте по часам суток при неизменном

значении воздухообмена. Такая информация обладает определенной ценностью для проектировщиков и эксплуатирующего персонала водоотводящих трубопроводных сетей и является весьма значимой, позволяя предусмотреть соответствующие контрмероприятия по обеспечению техногенной безопасности вблизи мест выхода газов на дневную поверхность.

Сопоставляя результаты расчетных значений, полученных при эксплуатации автоматизированной программы для двух типов трубопроводов, можно сделать соответствующие обоснованные выводы.

Анализ расчетов показал, что общая масса M (мг) вредных газов, выделяемых из воды в подводное пространство трубопровода, уменьшается в зависимости от наполнения h/d и не зависит от материала исследуемого трубопровода (рисунок 2). При этом реальное время удаления T (мин) для трех поступающих в подводное пространство газообразных веществ составляет одну и ту же величину для рассматриваемых материалов трубопроводов и также изменяется лишь в зависимости от наполнения h/d (рисунок 3).

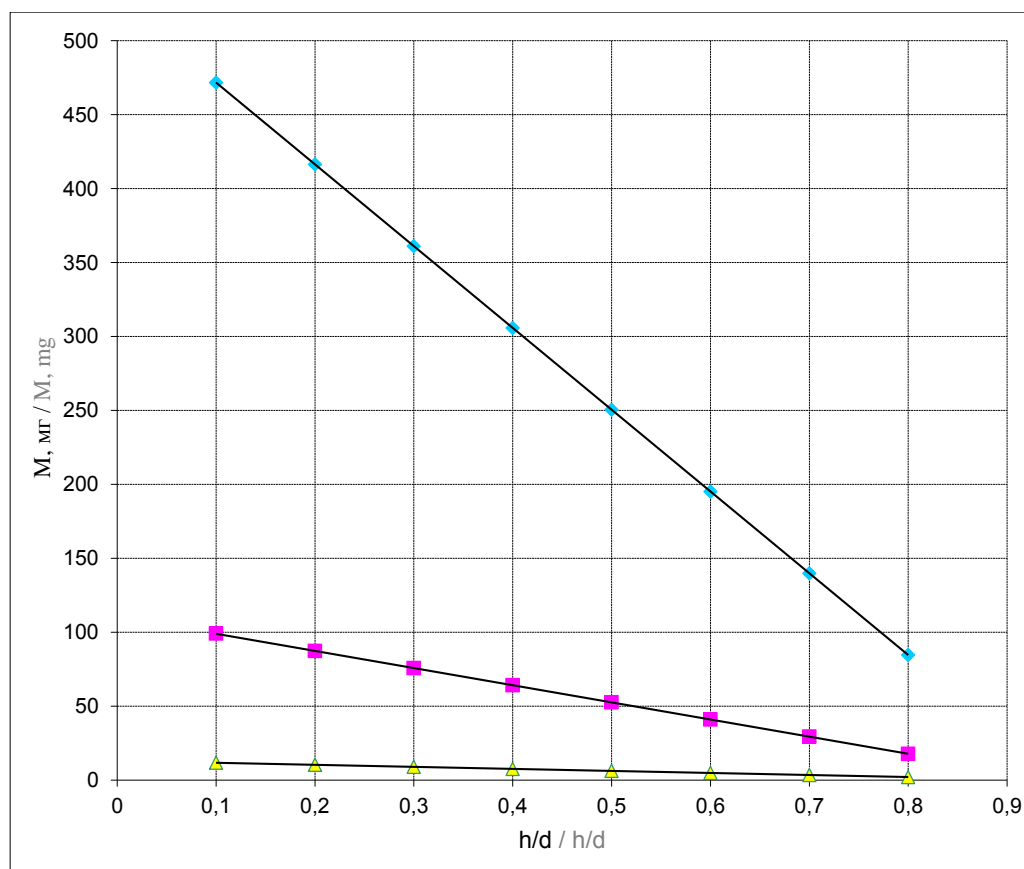


Рис. 2 Графики зависимости изменения массы M (мг) поступающих в подводное пространство газов от наполнения h/d для керамического и полимерного трубопроводов (верхняя кривая – аммиак; средняя – сероводород; нижняя – формальдегид)

Fig. 2 Graphs of the dependence of the change in the mass M (mg) of gases entering the underwater space on the filling h/d for ceramic and polymer pipelines (upper curve - ammonia; middle - hydrogen sulfide; bottom - formaldehyde)

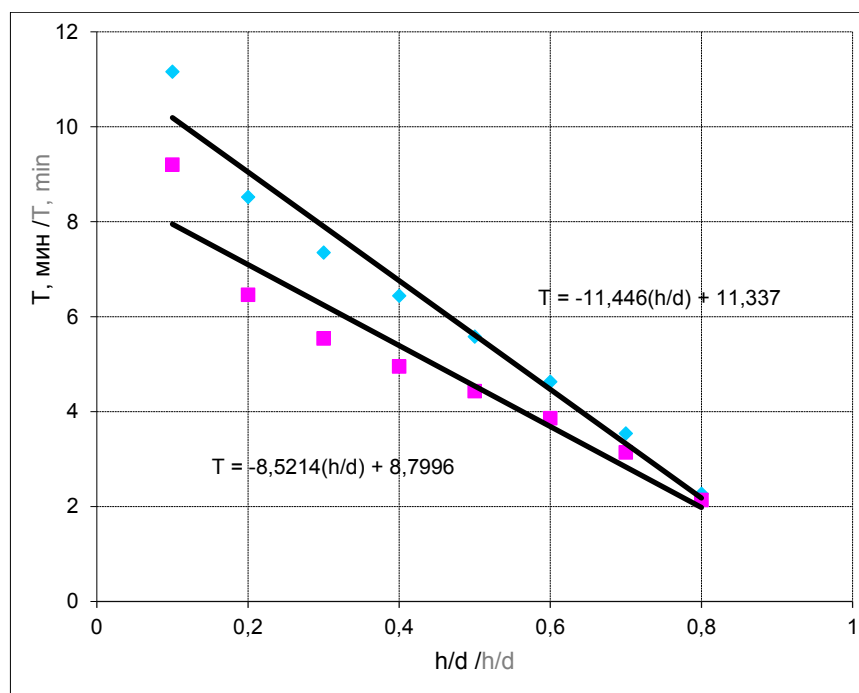


Рис. 3. Реальное время T (минут) удаления газообразных веществ и влаги с учетом увлечения их потоком нагнетаемого воздуха при течении воды в трубопроводе с наполнением h/d (верхняя кривая – керамический трубопровод; нижняя – полимерный)

Fig. 3. Real time T (minutes) of removal of gaseous substances and moisture, taking into account their entrainment by the flow of injected air during the flow of water in the pipeline with filling h/d (upper curve – ceramic pipeline; lower curve – polymer)

В ходе обработки полученных расчетных величин определенное внимание было уделено такому вопросу как влияние назначаемого исследователем воздухообмена на проходящие процессы в подводном пространстве трубопровода. В качестве образца выбран керамический трубопровод диаметром 0,3 м с близким к расчетному наполнением $h/d = 0,6$. Здесь, в частности, анализу подверглись выборочные данные по реальным значениям времени удаления T при двух случаях воздухообмена, т.е. 0,03 и 0,015 $\text{м}^3/\text{с}$. Так было отмечено, что при снижении величины воздухообмена в 2 раза реальное время выноса газов увеличилось в 1,37 раза. Это, с одной стороны, свидетельствует о том, что назначаемая величина воздухообмена (т.е. мощность и конструкция вентиляционного агрегата) может быть снижена или изменена без особых последствий, позволяя сэкономить денежные средства на установку более дешевого вентиляционного оборудования. С другой стороны, при исследовании динамики удаления суммарного количества испаряющейся влаги (воздушно-капельной смеси) из подводного пространства трубопровода, а также стояка было установлено, что для удаления влаги требуется всего лишь 0,59 % от величины назначаемого воздухообмена в 0,03 $\text{м}^3/\text{с}$ и 0,906 % при снижении воздухообмена до 0,015 $\text{м}^3/\text{с}$. Таким образом можно констатировать, что величиной воздухообмена необходимо управлять в широком диапазоне величин для достижения поставленных целей нейтрализации дурнопахнущих газов и удаления влаги при эксплуатации трубопроводов

определенной протяженности и материала изготовления при минимуме денежных затрат.

В качестве промежуточных выводов по анализу расчетных данных можно отметить, что организация нагнетательной системы вентилирования участков самотечных водоотводящих трубопроводов, например, проложенных в местах массового скопления людей (торговые центры, выставки и т.д.), позволяет путем подбора соответствующих по производительности вентиляционных агрегатов в короткие промежутки времени снизить концентрацию выбросов вредных для здоровья людей газов и образовавшихся паров, обеспечив тем самым техногенную безопасность.

Необходимо отметить, что подобные результаты автоматизированного расчета не подлежали анализу в каком-либо виде в предыдущих работах в этой области как авторами, так и другими исследователями, что свидетельствует о новизне подобных подходов к решению задач, связанных с обеспечением техногенной безопасности при эксплуатации водоотводящих сетей.

Базовыми результатами гидравлических и аэродинамических исследований на лабораторном испытательном стенде являлось попределение процента выхода воздуха через имитаты стояка и колодца как при отсутствии нагнетательной системы вентилиации, так и при ее наличии. Все этапы сопровождалось измерением гидравлических и аэродинамических показателей, в частности, скоростей движения воздуха в стоячей и движущейся воде при различных наполнениях воды в трубопроводе (рисунок 4).

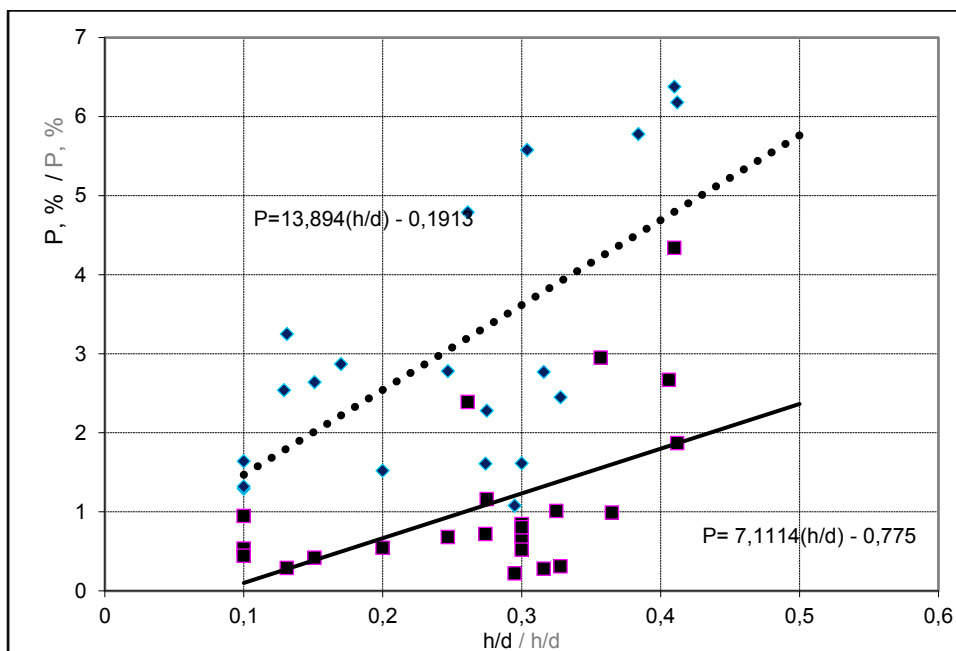


Рис. 4. Сводный график изменения процента P выхода воздуха (с линией тренда) от наполнения h/d для имитаторов колодца ($P=13,894(h/d)-0,1913$) и стояка ($P=7,1114(h/d)-0,775$) при движущейся жидкости с организацией и без организации нагнетательной системы вентиляции подсводного пространства

Fig. 4. Summary graph of the change in the percentage P of the air outlet (with a trend line) from the filling h/d for the well simulators ($P=13,894(h/d)-0,1913$) and the riser ($P=7,1114(h/d)-0,775$) with a moving fluid with and without the organization of the injection ventilation system of the subsurface space

Базовым выводом из экспериментальных стендовых исследований водно-воздушного режима работы самотечного трубопровода (в диапазоне наполнений воды 0,1-0,5) является то, что процент P удаляемого из подсводного пространства дурнопахнущего запаха через стояки и колодцы, не оборудованные специальными конструктивными элементами в виде струенаправляющих перегородок, может составить соответственно 0,1-2,5 % и 1,5-5,7 %, что, несмотря на их незначительные абсолютные величины, может негативно отразиться на здоровье людей, непосредственно находящихся в зоне выхода агрессивных газов. В этой связи при проектировании рекомендуется установка струенаправляющих перегородок в конце расчетного участка в соответствующих колодцах, что позволит удалять дурнопахнущие выбросы в атмосферу с концентрацией ниже ПДК для каждого из рассматриваемых газов.

ВЫВОДЫ

1. По результатам натурных исследований установлено, что стояк и колодец в естественных условиях эксплуатации водоотводящей сети (без вентилирования и с вентилированием подсводного пространства) не позволяют в должной степени обеспечить техногенную безопасность по выносу вредных газов из трубопроводной системы.

2. Разработана автоматизированная система, которая позволяет осуществлять моделирование работы водоотводящей сети, т.е. осуществлять

возможность управления процессом удаления в атмосферу дурнопахнущих и вредных для здоровья людей газовых компонентов при их различных начальных концентрациях в подсводном пространстве трубопроводов.

3. Анализами установлена и проанализирована динамика изменения таких показателей как масса поступающих в подсводное пространство газов в условиях движущейся воды, а также продолжительность их удаления по мере увлечения воздуха течением воды при принятом воздухообмене для трубопроводов из различных материалов.

4. Установлено, что назначаемый воздухообмен позволяет за соответствующий временной интервал удалять вредные для здоровья дурнопахнущие газы при выбросе их через колодец или стояк с одновременным удалением испаряющейся влаги, наличие которой способствует прохождению деструктивных процессов на внутренних стенках трубопроводов.

5. По результатам эксплуатации автоматизированной программы обоснована возможность применения нагнетательной системы вентиляции для нейтрализации агрессивных и вредных для здоровья людей газов (сероводорода, аммиака, формальдегида) с доведением их концентрации при выбросе в атмосферу до значений ниже ПДК в воздухе городской среды при условии установки в канализационных колодцах в конце расчетных участков струенаправляющих перегородок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров С.В., Васильев В.М., Телятникова А.М. Разработка принципиальной модели канализационной сети // Журнал Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 2(67). – С. 168-174.

2. Романов Н.Р. Низкая надёжность, отказы и реконструкция инженерных сетей // Integral. – 2020. – №3. – С. 54–58.

3. Васильев В.М., Малков А.В. Места образования агрессивных газов в канализационной сети // Журнал Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – №1. – С. 66-74.

4. Кофман В.Я. Сероводород и метан в канализационных сетях // Журнал Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 11. – С. 72-78.

5. Рублевская О.Н. Мероприятия по предотвращению распространения неприятных запахов на объектах ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – №10. – С. 46-55.

6. Васильев В.М., Морозов Г.В., Жуков С.В. Проблемы эксплуатации сетей канализации и пути их решения // Журнал Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 7. – С. 44-50.

7. Pochwat K., Kida M., Ziembowicz S. Odours in Sewerage – A Description of Emissions and of Technical Abatement Measures // Environments. – 2019. – (6)89. – Pp. 1-13.

8. Васильев В.М., Морозов Г.В., Жуков С.В. Выбор методов реконструкции самотечных канализационных сетей // Журнал Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 12. – С. 35-41.

9. Wells T., Melchers R.E. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations // Cement and Concrete Research. – 2015. – № 77. – Pp. 82-96.

10. Орлов В.А., Зоткин С.П., Сторожев А.П., Герасимов В.А., Мельник О.В. Моделирование водно-воздушного режима работы безнапорных водоотводящих сетей. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020614973. 2020.

11. Орлов В.А., Мельник О.В., Подолян Д.В. Лабораторно-исследовательский стенд водно-воздушного режима работы самотечной системы водоотведения. Патент РФ на полезную модель № 211835 от 27.06.2022.

12. Ручкина О.И., Дьяков П.П., Россихин В.Ю. Оценка естественной тяги в коллекторе канализационной сети // Construction and geotechnics. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2020. – №2. – С. 78-87.

13. Vasilyev V. Stolbikhin Y. Inspecting and monitoring the technical condition of sewage collectors // Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725-726. – Pp. 1319-1324.

14. Kyoohong P. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: a review //

International Biodeterioration & Biodegradation. 2014. Vol. 95. Pp. 251-261.

15. Wysocka, I.; Gębicki, J.; Namieśnik, J. Technologies for deodorization of malodorous gases // Environ. Sci. Pollut. R. – 2019. – 26. – Pp. 9409-9434.

REFERENCES

1. Fedorov S.V., Vasiliev V.M., Telyatnikova A.M. Development of a basic model of a sewer network // Journal Bulletin of Civil Engineers. – 2018. – № 2(67). – С. 168-174. (In Russian)

2. Romanov N.R. Low reliability, failures and reconstruction of engineering networks // Integral. – 2020. – №3. – С. 54–58. (In Russian)

3. Vasiliev V.M., Malkov A.V. Places of formation of aggressive gases in the sewer network // Journal Water supply and sanitary engineering. – 2017. – №1. – С. 66-74. (In Russian)

4. Kofman V.Ya. Hydrogen sulfide and methane in sewer networks // Journal of Water supply and sanitary engineering. – 2012. – № 11. – С. 72-78. (In Russian)

5. Rublevskaya O.N. Measures to prevent the spread of unpleasant odors at the facilities of SUE Vodokanal of St. Petersburg // Water supply and sanitary equipment. – 2013. – №10. – С. 46-55. (In Russian)

6. Vasiliev V.M., Morozov G.V., Zhukov S.V. Problems of operation of sewerage networks and ways to solve them // Journal of Water supply and sanitary engineering. – 2018. – № 7. – С. 44-50. (In Russian)

7. Pochwat K., Kida M., Ziembowicz S. Odours in Sewerage – A Description of Emissions and of Technical Abatement Measures // Environments. – 2019. – (6)89. – Pp. 1-13.

8. Vasiliev V.M., Morozov G.V., Zhukov S.V. The choice of methods of reconstruction of gravity sewer networks // Journal of Water supply and sanitary engineering. – 2019. – № 12. – С. 35-41. (In Russian)

9. Wells T., Melchers R.E. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations // Cement and Concrete Research. – 2015. – № 77. – Pp. 82-96.

10. Orlov V.A., Zotkin S.P., Storozhev A.P., Gerasimov V.A., Melnik O.V. Modeling of water-air mode of operation of non-pressure drainage networks. Certificate of the Russian Federation on state registration of the computer program № 2020614973. 2020. (In Russian)

11. Orlov V.A., Melnik O.V., Podolyan D.V. Laboratory and research stand of the water-air mode of operation of the gravity drainage system. RF patent for utility model № 211835 dated 06/27/2022. (In Russian)

12. Ruchkinova O.I., Dyakov P.P., Rossikhin V.Yu. Assessment of natural traction in the sewer network collector // Construction and geotechnics. Perm: Perm National Research Polytechnic University. – 2020. – №2. – С. 78-87. (In Russian)

13. Vasilyev V. Stolbikhin Y. Inspecting and monitoring the technical condition of sewage collectors // Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725-726. – Pp. 1319-1324.

14. KyooHong P. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: a review // International Biodeterioration & Biodegradation. 2014. Vol. 95. Pp. 251-261.

15. Wysocka, I.; Gębicki, J.; Namieśnik, J. Technologies for deodorization of malodorous gases // Environ. Sci. Pollut. R. – 2019. – 26. – Pp. 9409-9434.

MODELING THE OPERATION OF THE DRAINAGE NETWORK WHEN USING THE SUPPLY VENTILATION OF ITS SUBSURFACE SPACE TO REMOVE HARMFUL GASES

Orlov V.A.¹, Melnik O.V.¹, Podolyan D.V.¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), 129337, Russia, Moscow, Mira Ave., 26, e-mail: OrlovVA@mgsu.ru, lissa6868@mail.ru, dim.p-2010@yandex.ru

Abstract. The results of physical, mathematical and computer modeling of hydraulic and aerodynamic parameters of the operation of sections of a non-pressurized drainage network made of different materials for ensuring maximum permissible concentrations (MPC) of emissions into the atmosphere of foul-smelling and harmful gases when using a mechanical air exchange injection system in the subsurface part of pipelines are presented. The requirements for various aspects of modeling were reduced to ensuring that they were clearly perceived by interested specialists and unambiguously interpreted by them when solving a specific task of assessing the sanitary safety of the designed and operated sewer network. The implementation of the tasks was carried out by using a specially developed automated program, as well as the results of studies of the water-air mode of operation of the gravity pipeline on a specially designed stand. A standard list of parameters responsible for the efficient operation of a pressure-free drainage network, including the filling of the pipeline, its slope, air density at ambient temperature, concentrations of harmful gaseous substances in the subsurface space, maximum permissible concentrations of harmful substances in the atmosphere of the city, air exchange values for neutralizing negative components in the form of aggressive gases emitted, served as initial indicators from wastewater in concentrations exceeding MPC. Based on the results of automated calculations, the dynamics of changes in a number of indicators of the operation of the gravity pipeline network, including the duration of removal of harmful gases in a wide range of their concentrations, as well as in the established ranges of fillings simulating uneven water consumption regimes in settlements, are determined. Based on the results of field studies, indicators have been established that allow us to estimate the percentage of air output through the simulators of the well and riser both in the case of natural air intake into the pipeline and when using its injection system into the subsurface space.

Subject of research: an automated program for calculating hydraulic and aerodynamic parameters of a non-pressurized pipe network, hydraulic and aerodynamic studies of the water-air mode of operation of non-pressurized drainage pipelines made of different materials at different hours of the day of pipeline operation.

Materials and methods: the research materials are non-pressure drainage systems, algorithms for modeling their operation; the methods consist in creating an automated complex, analyzing the conclusions obtained as a result of its operation for countering man-made hazards, as well as justifying the need for a supply ventilation device based on the results of field experiments on a model of a drainage network.

Results: a computer model of the water-air mode of operation of a non-pressurized drainage network has been developed and materials based on the results of the operation of a new hydraulic stand design based on the need to use an injection ventilation system for the subsurface space of the pipeline are presented.

Conclusions: based on the use of the developed automated system, the possibilities of controlling the process of removing odorous and harmful gas components into the atmosphere to concentrations below their MPC in the atmosphere of cities by using injection ventilation in the subsurface space of the pipeline are analyzed; according to the results of field studies, the indicators of the water-air mode of operation of the drainage network for cases of natural and artificial air intake are determined into the subsurface space of the gravity pipeline.

Key words: technogenic safety, drainage networks, mathematical modeling, automated program

УДК 528.11

ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ И НЕИСКЛЮЧЕННЫХ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОСНОВНЫХ МЕТОДАХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Шуршилин¹ Е.А., Олехнович² Я.А.

¹ФГАОУ ВО «Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29,
e-mail: ¹shurshilin.ea@edu.spbstu.ru; ²olehnovich_yaa@spbstu.ru

Аннотация: любые инженерные изыскания в области строительства (геодезические, геологические, обследование зданий и сооружений и др.) не обходятся без полевых работ, которые в свою очередь не обходятся без полевых измерений и использования различных высокоточных приборов (теодолитов, нивелиров, тахеометров и т. д.). Их использование сопровождается появлением различных погрешностей измерений. Без понимания их природы, причин их возникновения и методов оценки этих погрешностей процесс строительства будет сопровождаться дополнительными рисками: от потери финансов до человеческих жертв. Цель данной работы проанализировать природу погрешностей геодезических измерений через призму теории вероятностей, опираясь на существующие государственные стандарты и нормы, и вывести общие математические закономерности, которым подчиняются погрешности измерений в основных геодезических методах определения координат точек. Опираясь на законы нормального распределения Гаусса и нормы расчёта погрешностей по ГОСТ Р 8.736–2011, в данной научной работе получены эти математические зависимости, выявлена их связь с практическими задачами геодезии. Вопрос оценки погрешностей в общем случае является решенным и имеется обширный объем научной литературы по теории погрешностей и методам их оценки. Задачей исследования является переход от общего к частному: пользуясь основными законами теории погрешностей определить погрешности геодезической съёмки различными методами закрепления координат точек в пространстве. Были проанализированы величины, измеряемые в основных методах геодезии: методе прямоугольных координат, угловых засечек и полярных координат. Полученные в работе зависимости могут найти применение в работах, требующих сверхвысокой точности измерений.

Материалы и методы: анализ научной литературы, математический анализ погрешностей геодезических измерений.

Ключевые слова: геодезия, полевые работы, точность измерений, погрешность, погрешность измерений.

Предмет исследования: погрешности геодезических измерений

Результаты: выведены математические зависимости для определения погрешностей геодезических съёмок различными методами

Выводы: математически подтверждено, что погрешности геодезических измерений зависят от условий конкретного измерения и измеряемых величин. Опираясь на законы теории вероятностей были получены математические зависимости, позволяющие точно оценить возникающие погрешности измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Любые инженерные изыскания в области строительства (геодезические, геологические и др.) сопровождаются полевыми работами, связанными с изучением местности. Для их проведения используются различные приборы фиксации координат точек местности в локальных или общепринятых системах координат с целью составления планов и карт местности для проведения строительных работ. Одним из наиболее важных вопросов при съёмке местности является точность полевых измерений.

Вопрос оценки погрешностей в общем случае является решенным и имеется обширный объем научной литературы по теории погрешностей и методам их оценки. Задачей исследования является переход от общего к частному: пользуясь основными законами теории погрешностей определить погрешности геодезической съёмки различными методами закрепления координат точек в пространстве.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Общие вопросы теории погрешностей являются разрешенными, на эту тему опубликовано

множество научных работ. Тем не менее, вопросы, связанные с исследованием математических зависимостей погрешностей геодезических измерений, являются менее изученными с теоретической точки зрения. Существует пласт научных работ, посвященных повышению точности измерений с применением различных программных комплексов, однако малое количество статей исследуют конкретные математические зависимости, описывающие поведение погрешностей. Полезность изученных материалов для данной работы заключается в получении необходимого математического аппарата и общих представлений о геодезических методах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап исследования предполагает описание общих положений теории вероятностей, математический аппарат которой будет использован для анализа погрешностей и изложение сути основных методов геодезических съёмок.

Второй этап исследования предполагает математический анализ приведенных методов геодезических съёмок, то есть определение величин, на которые возникают погрешности измерений, и

вывод конкретных математических зависимостей, которым эти погрешности

Оценка случайных погрешностей

В прошлых исследованиях авторов было доказано, что снятие координат точек на местности сопровождается появлением случайных погрешностей. Случайные погрешности – это погрешности, которые возникают при повторных измерениях одной и той же величины (например, физических констант), в т. ч. координат точек. В каждом их появлении не наблюдается какой-либо закономерности, правила. Случайные погрешности образуются в результате воздействия множества причин, которые невозможно учесть для каждого отдельного измерения или заранее определить. Для учета случайных погрешностей существуют определенные законы, которые проявляются при многократных измерениях. [1] Случайные погрешности подчиняются закону нормального распределения Гаусса и характеризуются следующими величинами:

1. *Плотность вероятности* случайной величины ρ :

$$\rho(x) = \frac{dn}{n \cdot dx} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x} \quad (1)$$

2. *Среднее значение* $\langle x \rangle$ измеряемой величины x :

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n(n-1)} \quad (2)$$

3. *Дисперсия* – квадрат среднего квадратичного отклонения от среднего значения σ :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

В геодезии величина σ называется *средней квадратичной ошибкой*.

Нормальное распределение Гаусса является графиком зависимости плотности распределения от значения случайной величины $\rho = \rho(x)$ (рис. 1):

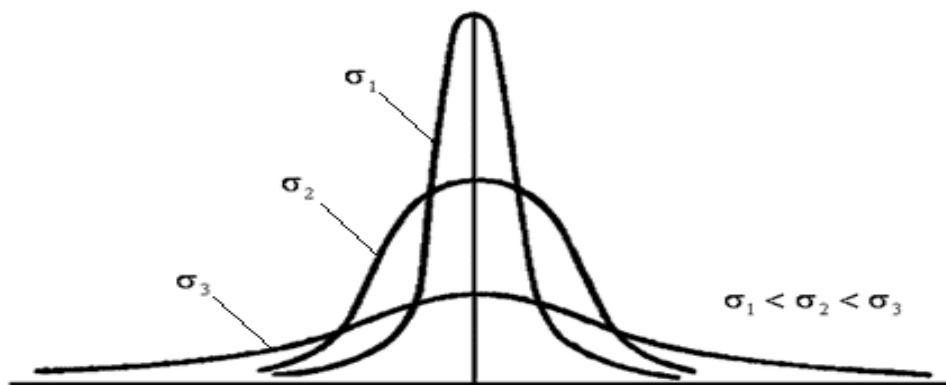


Рис. 1. Нормальное распределение Гаусса. [2]

Fig. 1. Gaussian probability distribution.

Для расчёта погрешностей используется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha N}$, зависящий от доверительной вероятности α (для практических измерений используется значение $\alpha = 0,68$) и числа измерений N и определяемый по таблицам Стьюдента. Погрешность измерения случайной величины определяется как:

$$\Delta x = t_{\alpha N} \cdot \sigma = t_{\alpha N} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{N(N-1)}} \quad (5)$$

Представленные выше зависимости и формулы являются в данном исследовании основным расчетным аппаратом определения погрешностей геодезических съемок.

Методы определения координат точек в пространстве

В геодезии используются три основных метода определения координат точек:

1. *Метод прямоугольных координат.* От стороны разбивочной сети АВ отмеряют перпендикуляр от искомой точки С до разбивочной сети (отрезок СН на рис. 2) и расстояние АН на прямой АВ. Таким же образом закрепляют все необходимые точки местности относительно разбивочной сети.

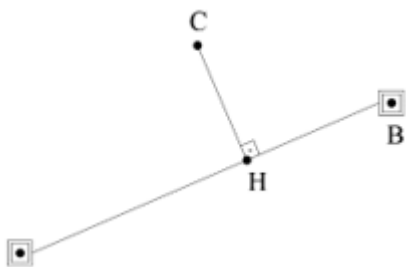


Рис. 2. Метод прямоугольных координат.
Fig. 2. Rectangular coordinates method.

2. *Метод полярных координат.* Сторону АВ принимают за полярную ось, точку А - за начало координат. Чтобы определить положение точки С, измеряют расстояние АС и угол φ между прямыми АВ и АС (рис. 3)

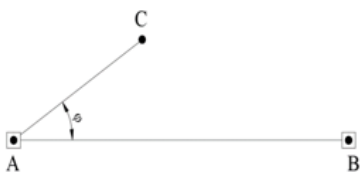


Рис. 3. Метод полярных координат.
Fig. 3. Polar coordinates method.

3. *Метод угловых засечек.* Относительно стороны АВ разбивочной сети измеряют углы между прямыми АС и АВ (угол α на рис. 4) и ВС и АВ (угол β на рис. 4). Метод угловых засечек применяется в случае, когда искомая точка С находится вне досягаемости (на неприступном расстоянии).

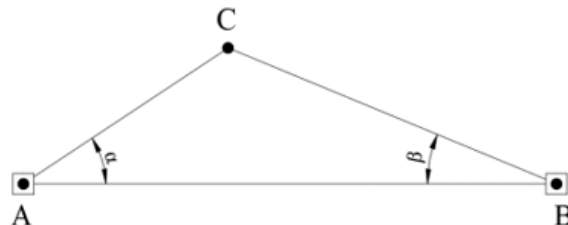


Рис. 4. Метод угловых засечек.
Fig. 4. Method of angular sightings.

Анализ погрешностей методов определения координат точек в пространстве

Каждый из трех описанных выше методов определения координат основывается на использовании различных геодезических приборов (теодолиты, тахеометры, рулетки), что приводит к возникновению погрешностей измерений, природа которых случайна. Поэтому на практике производят два измерения: для угловых измерений по кругу лево (КЛ) и по кругу право (КП), для измерений длин – в прямую и обратную сторону. Потому можно принять, что в полевых работах число измерений $N = 2$. Соответственно, принимая доверительную вероятность $\alpha = 0,68$, постоянной величиной для всех измерений является и коэффициент Стьюдента и принимает значение $t_{\alpha, N} = 1,82$. Из этого следует, что допустимая погрешность на измерение в полевых условиях всякой координаты x может быть определена из выражения (5) как:

$$\Delta x = t_{\alpha, N} \cdot \sigma = t_{\alpha, N} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{N(N-1)}} = [N=2; t_{\alpha, N}=1,82] \approx 1,287 \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2} \quad (6)$$

Так как измерений всего два, то x принимает всего два значения: x_1 и x_2 , следовательно среднее значение координаты $\langle x \rangle$ принимает вид:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (7)$$

Подставим выражение (7) в выражение (6) и получим итоговое выражение для погрешности полевых измерений:

$$\Delta x = 1,287 \sqrt{\sum_{i=1}^2 (x_i - \langle x \rangle)^2} = \left[\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2}{2} \right] = 1,287 \sqrt{\frac{1}{2} (x_1 - x_2)^2} = 0,91 |x_1 - x_2| \quad (8)$$

Практический смысл модуля разности двух измерений координаты заключается в том, что эта величина заявляется в характеристиках прибора как максимально допустимое расхождение между двумя измерениями. При полевых измерениях эту величину принимают за допустимую погрешность, однако, как показало полученное выражение (8), необходимо принимать величину на 9% меньшую, чем заявленное максимально допустимое расхождение. Отметим, что коэффициент 0,91 в выражении (8) является следствием решения этой задачи при конкретно заданном значении доверительной вероятности (и соответственно коэффициента Стьюдента) в общем случае, исходя из выражений (6), (7) и (8) можно сказать, что полученный коэффициент является случаем множества значений некоего коэффициента, характеризующего отношение реальной погрешности к заявленной допустимой разности показаний прибора. Назовём этот коэффициент **коэффициентом расхождения прибора θ** и будем определять как

$$\theta = \frac{t_{\alpha N}}{2}.$$

Влияние погрешности измерения двух координат на погрешности друг друга

Каждый из трех методов определения координат точки на местности предполагает измерение двух величин:

- В методе прямоугольных координат измеряются координаты точки (x ; y);
- В методе полярных координат – расстояние r от полюса до точки и угол φ между этим отрезком и полярной осью;
- В методе угловых засечек – углы α и β .

Очевидно, что погрешность измерения одной из этих величин непосредственно влияет на погрешность измерения другой. Это взаимное влияние погрешностей друг на друга по ГОСТ Р 8.736–2011 называется **неисключенной систематической погрешностью** (далее – НСП). Будем обозначать НСП измерения величины x вследствие влияния погрешности измерения величины y как $\Delta x_{\text{НСП}}$. Тогда, принимая, что НСП вызвана лишь одним фактором, то по ГОСТ Р 8.736–2011 её можно определять как:

$$\Delta x_{\text{НСП}} = \pm \left(|\Delta x| + \left| \frac{\partial x}{\partial y} \times \Delta y \right| \right) \quad (9),$$

Где Δx и Δy – случайные погрешности на измерение координат x и y .

$\frac{\partial x}{\partial y}$ – частная производная функции x , зависящей от y , по координате y .

Тогда общая допустимая погрешность измерений будет определена как:

$$\Delta x_{\Sigma} = \pm \sqrt{\Delta x^2 + \Delta x_{\text{НСП}}^2} \quad (10)$$

Неисключенная систематическая погрешность в методе прямоугольных координат

В методе прямоугольных координат координаты x и y имеют одинаковую размерность длины, потому могут быть определены одним прибором. Тогда, можно утверждать, что в случае, когда разница двух измерений координат равна максимально допустимой (обозначим её как δ), то случайные погрешности измерения координат, согласно выражению (8), примут вид:

$$\Delta x = \Delta y = 0,91\delta \quad (11)$$

Тогда выражение для НСП на координату x примет вид:

$$\Delta x_{\text{НСП}} = \pm 0,91\delta \left(1 + \left| \frac{\partial x}{\partial y} \right| \right) \quad (12)$$

Очевидно, что частная производная $\frac{\partial x}{\partial y}$ в данном случае равна котангенсу угла наклона к оси x прямой, проведенной из начала координат в искомую точку (поскольку зависимость между x и y линейная). Так как метод прямоугольных координат предполагает определение только координат точки, то, чтобы не требовать определения угла наклона с помощью другого измерительного прибора, что повлечет за собой дополнительные погрешности, выразим котангенс угла через отношение x и y :

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{x}{y} = \frac{\langle x \rangle \pm \Delta x}{\langle y \rangle \pm \Delta y} = \frac{\langle x \rangle \pm 0,91\delta}{\langle y \rangle \pm 0,91\delta} \quad (13)$$

Поскольку расхождение δ как правило много меньше усредненных значений координат, то в соотношении (12) им можно пренебречь. Тогда выражение (11) примет вид:

$$\Delta x_{\text{НСП}} = \pm 0,91\delta \left(1 + \left| \frac{\langle x \rangle}{\langle y \rangle} \right| \right) \quad (14)$$

Из выражения (13) следует, что в методе прямоугольных координат максимальная НСП отличается от максимальной случайной

погрешности в $\left(1 + \left| \frac{\langle x \rangle}{\langle y \rangle} \right| \right)$ раз.

Тогда выражение (10) для общей погрешности примет вид:

$$\Delta x_{\Sigma} = \pm \sqrt{\Delta x^2 + \Delta x_{НСП}^2} = \pm 0,91\delta \sqrt{1 + \left(1 + \frac{\langle x \rangle}{\langle y \rangle}\right)^2} \quad (15)$$

Выражение (15) представляет собой выражение максимально допустимой погрешности на координату x в методе прямоугольных координат (в случае, когда расхождение двух измерений координат равно максимально допустимому).

По аналогичным соображениям максимально допустимая погрешность на координату y :

$$\Delta y_{\Sigma} = \pm 0,91\delta \sqrt{1 + \left(1 + \frac{\langle y \rangle}{\langle x \rangle}\right)^2} \quad (16)$$

Неисключенная систематическая погрешность в методе полярных координат

Метод полярных координат является более сложным для анализа с точки зрения НСП, так как предполагает измерение величин разных размерностей (угла и расстояния). Пусть δ – максимально допустимое расхождение между измерениями прибора, используемого для определения расстояния r ; ψ – максимально допустимое расхождение между измерениями прибора, используемого для определения угла φ . Положим, что расхождения между двумя измерениями угла и расстояния равны максимально допустимым расхождениям приборов. Тогда случайные погрешности этих величин:

$$\Delta r = 0,91\delta \quad (17)$$

$$\Delta \varphi = 0,91\psi \quad (18)$$

Предположим, что для оценки НСП в методе полярных координат не обойтись без дополнительного измерения. Необходимо знать проекцию a отрезка r на полярную ось. При этом на измерение проекции a также возникает случайная погрешность. Однако поскольку a имеет размерность длины и может быть определено тем же прибором, что и расстояние r , то эту погрешность можно приравнять к Δr :

$$\Delta a = \Delta r = 0,91\delta \quad (19)$$

Заметим, что погрешность на измерения угла φ , как и сам угол φ , необходимо измерять не в градусах, а в радианах для согласования размерностей НСП.

Т. к. на расстояние r влияют две величины, то, по ГОСТ Р 8.736–2011, НСП после математических преобразований для неё принимает вид:

$$\Delta r_{НСП} = \pm \left(\left| \Delta r \right| + \left| \frac{\partial r}{\partial \varphi} \times \Delta \varphi \right| + \left| \frac{\partial r}{\partial a} \times \Delta a \right| \right)$$

$$r = \frac{a}{\cos \varphi};$$

$$\frac{\partial r}{\partial \varphi} = \frac{a \times \sin \varphi}{\cos^2 \varphi};$$

$$\frac{\partial r}{\partial a} = \frac{1}{\cos \varphi};$$

$$\Delta a = \Delta r;$$

$$\Delta r_{НСП} = \pm 0,91 \left(\delta + \frac{a \times \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \times \psi + \frac{\delta}{\cos \varphi} \right) \quad (20)$$

Вернемся теперь к использованной замене $a = r \cos \varphi$, поскольку при полевых работах погрешности измерения всех величин значительно меньше их самих, то примем, что для средних значений величин выполняется то же самое отношение, а само значение проекции a совпадает со средним (также ввиду малости погрешностей в сравнении с измеряемыми величинами). Тогда:

$$a = \langle \bar{a} \rangle = \langle r \rangle \cos \langle \varphi \rangle \quad (21)$$

Подставим выражение (21) в выражение (20) и от истинных значений перейдем к усредненным значениям определенных величин и получим:

$$\Delta r_{НСП} = \pm 0,91 \left(\delta (1 + \sec \langle \varphi \rangle) + \langle r \rangle \times \text{tg} \langle \varphi \rangle \times \psi \right) \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в выражение (10), получим:

$$\Delta r_{\Sigma} = \pm 0,91 \sqrt{\delta^2 + \left(\delta (1 + \sec \langle \varphi \rangle) + \langle r \rangle \times \text{tg} \langle \varphi \rangle \times \psi \right)^2} \quad (23)$$

Выражение (23) является максимально допустимым значением полной погрешности измерения расстояния до искомой точки в методе полярных координат. Отметим, что полученное выражение позволяет на практике не измерять проекцию a . Эта величина становится мысленным конструктом после учета влияния её погрешности на полевые измерения в общем виде.

Из тех же соображений определим НСП на определение угла φ :

$$\Delta\varphi_{\text{НСП}} = \pm \left(|\Delta\varphi| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial r} \times \Delta r \right| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial a} \times \Delta a \right| \right);$$

$$\varphi = \arccos \frac{a}{r};$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2} \times r};$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial a} = -\frac{1}{\sqrt{r^2 - a^2}};$$

$$\Delta\varphi_{\text{НСП}} = \pm 0,91 \left(\psi + \frac{\delta}{\sqrt{r^2 - a^2}} \left(\frac{a}{r} + 1 \right) \right) \quad (24)$$

Используя те же соображения о близости истинных значений искомых величин к средним, преобразуем выражение (24):

$$\Delta\varphi_{\text{НСП}} = \pm 0,91 \left(\psi + \frac{\delta}{\sqrt{r^2 - a^2}} \left(\frac{a}{r} + 1 \right) \right);$$

$$r = \langle r \rangle;$$

$$\varphi = \langle \varphi \rangle;$$

$$a = \langle a \rangle = \langle r \rangle \cos \langle \varphi \rangle;$$

$$\Delta\varphi_{\text{НСП}} = \pm 0,91 \left(\psi + \frac{\delta}{\langle r \rangle \sin \langle \varphi \rangle} (\cos \langle \varphi \rangle + 1) \right) = \pm 0,91 \left(\psi + \frac{\delta}{\langle r \rangle} (\text{ctg} \langle \varphi \rangle + \text{cosec} \langle \varphi \rangle) \right) \quad (25)$$

Подставляя (25) в (10), получим:

$$\Delta\varphi_{\pm} = \pm 0,91 \sqrt{\psi^2 + \left(\psi + \frac{\delta}{\langle r \rangle} (\text{ctg} \langle \varphi \rangle + \text{cosec} \langle \varphi \rangle) \right)^2} \quad (26)$$

Выражение (26) является выражением максимально допустимой погрешности измерений угла φ в методе полярных координат.

Неисключенная систематическая погрешность в методе угловых засечек

$$\Delta\alpha = \Delta\beta = 0,91\psi \quad (27)$$

Проанализируем теперь возникающие НСП в методе угловых засечек. Поскольку в данном методе измеряются только углы, то положим также, что расхождения между значениями углов α и β по кругу лево и по кругу право достигают максимально допустимого расхождения ψ для используемого прибора:

Рассмотрим теперь модель метода угловых засечек: треугольник ABC с основанием AB, которая является стороной разбивочной сети, углы α и β были определены с помощью прибора с допустимым расхождением значений по КЛ и КП ψ . Третий угол треугольника ABC обозначим γ . (рис. 5).

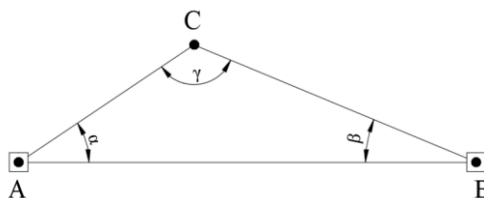


Рис. 5. Модель метода угловых засечек.

Fig. 5. Method of angular serifs.

Положим, что угол γ в идеальных условиях все-таки можно определить с помощью прибора. Тогда погрешность его измерения также, как и погрешности двух других углов, равна:

$$\Delta\gamma = 0,91\psi;$$

Установим зависимости углов друг от друга:

$$\alpha = \pi - (\beta + \gamma);$$

$$\beta = \pi - (\alpha + \gamma);$$

Тогда НСП на определение угла α :

$$\Delta\alpha_{НСП} = \pm \left(|\Delta\alpha| + \left| \frac{\partial\alpha}{\partial\beta} \times \Delta\beta \right| + \left| \frac{\partial\alpha}{\partial\gamma} \times \Delta\gamma \right| \right);$$

$$\alpha = \pi - (\beta + \gamma);$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial\beta} = -1;$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial\gamma} = -1;$$

$$\Delta\alpha_{НСП} = \pm 0,91(\psi + \psi + \psi) = \pm 0,91 \times 3\psi \quad (28)$$

Из тех же соображений получим, что НСП для угла β имеет такое же выражение:

$$\Delta\beta_{НСП} = \Delta\alpha_{НСП} = \pm 0,91 \times 3\psi \quad (29)$$

Используя выражение (29) и (10), получим выражение для максимально допустимой погрешности на определение углов в методе угловых засечек:

$$\Delta\beta_{\pm} = \Delta\alpha_{\pm} = \pm 0,91\sqrt{10}\psi = \pm 2,88\psi \quad (30)$$

ВЫВОДЫ

В ходе исследования было математически установлено, что заявленная производителем погрешность прибора, в сущности, является лишь компонентой (или компонентами, если приборов несколько) реально возникающей погрешности измерения.

Было установлено, что в общем случае погрешность результатов измерения полевых величин находится в зависимости не только от заявленной приборной погрешности, но и конкретных численных значений измеряемых величин. В табл. 1 представлены основные полученные зависимости.

Табл. 1. Основные математические зависимости для определения допустимых погрешностей в основных методах полевых измерений

Table 1. Basic mathematical dependencies for determining permissible errors in the main methods of field measurements

Метод	Определяемые величины	Выражение для погрешности
Прямоугольные координаты	Координата x	$\pm 0,91\delta\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\langle x \rangle}{\langle y \rangle}\right)^2}$
	Координата y	$\pm 0,91\delta\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\langle y \rangle}{\langle x \rangle}\right)^2}$
Полярные координаты	Расстояние r	$\pm 0,91\sqrt{\delta^2 + \left(\delta(1 + \sec\langle\varphi\rangle) + \langle r \rangle \times \text{tg}\langle\varphi\rangle \times \psi\right)^2}$
	Угол φ	$\pm 0,91\sqrt{\psi^2 + \left(\psi + \frac{\delta}{\langle r \rangle}(\text{ctg}\langle\varphi\rangle + \text{cosec}\langle\varphi\rangle)\right)^2}$
Угловые засечки	Угол α	$\pm 0,91\sqrt{10}\psi = \pm 2,88\psi$
	Угол β	$\pm 0,91\sqrt{10}\psi = \pm 2,88\psi$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуршилин Е.А., Олехнович Я.А. Геоинформационные системы в строительстве и анализ точности измерений // Строительство и техногенная безопасность. – № 23(75). – 2021. – С. 49-58.
2. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: метод. указания / сост.: Б.Д. Агапьев, В.В. Козловский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 61 с.
3. Инженерная геодезия. Использование современного оборудования для решения геодезических задач: учеб. Пособие / Е.Б. Михаленко [и др.]; под науч. ред. Е. Б. Михаленко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 98 с.
4. Инженерная геодезия. Разбивочные работы: Учеб. пособие / О.С. Царёва, Т.И. Иванова, Е.А. Перминов, Н.Д. Беляев. – СПб., 2021, 62 с.
5. Инженерная геодезия. Геодезические сети и их развитие: учеб. пособие / Е. Б. Михаленко [и др.]; под науч. ред. Е. Б. Михаленко. – СПб.; Изд-во Политехи, ун-та, 2016. – 79 с.
6. Сурина А.В. Теория вероятностей: Основные формулы: Учеб. пособие. СПб., 2022 –56с.
7. Метрология. Обработка результатов измерений. Учебное пособие / Кошелев С.И. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2017. – 57с.
8. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов / В. Е. Гмурман. – М.: Издательство «Юрайт», 2022. – 479 с.
9. Пособие по геодезическому обеспечению строительства / Е. Р. Аболин [и др.]. – СПб., 2006. – 240 с.
10. Геодезия: учебник для вузов / Е.Б. Ключин [и др.]; под ред. Д. Ш. Михелева. 12-е изд. – М.: Изд. центр «Академия», 2014. – 495 с.
11. Зимин С.С., Мартынов М.В. Численное моделирование полевого эксперимента по усилению грунтов стройной цементацией // Инженерные исследования. – №2(7). – 2022. – С. 3-10.

REFERENCES

1. Shurshilin E.A., Olekhovich Ya.A. Geoinformation systems in construction and analysis of measurement accuracy // Construction and technogenic safety. – № 23(75). – 2021. – С. 49-58.
2. Physics. Practical processing of experimental data: method. indications / comp. : B. D. Agap'ev, V. V. Kozlovsky. – SPb. : Izd-vo Polytechn. un-ta, 2013. – 61 p.
3. Engineering geodesy. The use of modern equipment for solving geodetic problems: studies. Posobie / E. B. Mikhaleiko [et al.]; under nauch. ed. E. B. Mikhaleiko. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. - 98 p.
4. Engineering geodesy. Layout works: Ucheb. posobie / O. S. Tsareva, T. I. Ivanova, E. A. Perminov, N. D. Belyaev. – SPb., 2021, 62 p.
5. Engineering geodesy. Geodetic networks and their development: ucheb, posobie / E. B. Mikhaleiko [et al.]; under nauch. ed. E. B. Mikhaleiko. – SPb.; Polytech Publishing House, University, 2016. – 79 p.
6. Surina A. V. Teoriya probability: Basic formulas: Ucheb. allowance. – SPb., 2022. –56 p.
7. Metrology. Processing of measurement results. Tutorial. / Koshelev S. I. - SPb.: Izd-vo SPbPU, 2017, 57с.
8. Gmurman, V.E. Probability Theory and Mathematical Statistics: A Textbook for Universities / V.E. Gmurman. – Moscow: Yurait Publishing House, 2022. – 479 p.
9. Manual on geodetic support of construction / E. R. Abolin [et al.]. – SPb., 2006. – 240 p.
10. Geodesy: a textbook for universities / E.B. Klyushin [et al.]; ed. D. Sh. Mikheleva. 12th ed. – M.: Izd. Center "Academy", 2014. – 495 p.
11. Zimin S.S., Martynov M.V. Numerical modeling of a field experiment to strengthen soils with slender cementation // Engineering research. – №2(7). – 2022. – С. 3-10.

ESTIMATION OF RANDOM AND NON-EXCLUDED SYSTEMATIC ERRORS IN BASIC METHODS OF GEODETIC MEASUREMENTS

Shurshilin¹ E. A., Olekhovich² Ya. A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Polytechnic Street, 29,
e-mail: ¹shurshilin.ea@edu.spbstu.ru; ²olekhovich_yaa@spbstu.ru

Abstract: any engineering surveys in the field of construction (geodetic, geological, survey of buildings and structures, etc.) cannot do without field work, which in turn cannot do without field measurements and the use of various high-precision instruments (theodolites, levelers, total stations, etc.). Their use is accompanied by the appearance of various measurement errors. Without understanding their nature, the causes of their occurrence and methods for assessing these errors, the process of assessing these errors construction will be accompanied by additional risks: from loss of finances to human casualties. The purpose of this work is to analyze the nature of the errors of geodetic measurements through the prism of probability theory, relying on existing state standards and norms, and to derive general mathematical laws that are subject to measurement errors in the main geodetic methods for determining the coordinates of points. Based on the laws of the normal Gaussian distribution and the norms for calculating errors according to GOST R 8.736–2011, these mathematical dependencies are obtained in this scientific work, their connection with the practical problems of geodesy is revealed. The issue of estimating errors is generally resolved and there is an extensive body of scientific literature on the theory of errors and methods for their evaluation. The task of the study is the transition from the general to the particular: using the basic laws of the theory of errors, to determine the errors of geodetic surveying by various methods of fixing the coordinates of points in space. The values measured in the main methods of geodesy were analyzed: the method of rectangular coordinates, angular serifs and polar coordinates. The dependencies obtained in the work can be used in works that require ultra-high accuracy of measurements.

Materials and methods: analysis of scientific literature, mathematical analysis of errors of geodetic measurements.

Subject of research: errors of geodetic measurements

Results: mathematical dependencies for determining the errors of geodetic surveys by various methods are derived

Conclusions: it is mathematically confirmed that the errors of geodetic measurements depend on the conditions of a particular measurement and the measured quantities. Based on the laws of probability theory, mathematical dependencies were obtained that allow to accurately estimate the resulting measurement errors.

Key words: geodesy, field work, accuracy of measurements, error, measurement error.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ПОЛЯРЗАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Арифов¹ А. М., Бекиров² Э. А.

Физико-технический институт. КФУ им. В. И. Вернадского,
295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.
E-mail: ¹arifov.alim@inbox.ru, ²bekirov.e.a@cfuv.ru.

Аннотация. В работе исследованы факторы оказывающие непосредственное влияние на развитие эффекта потенциально-индуцированной деградации (далее - PID) в фотоэлектрических модулях, последствия данного процесса, а также предложена методика регенерации фотоэлектрических модулей подтвержденная натурными экспериментами позволяющая восстанавливать их характеристики до величин, заявленных заводом изготовителем. Явление (PID) характеризуется потерей мощности фотогальванических модулей под воздействием высокого уровня напряжения возникающего в слое полупроводника между каркасом, стеклянной поверхностью и солнечными элементами. Этот эффект может быть незначительным на ранней стадии, но со временем становится заметным на более поздних стадиях (месяцы, годы), вызывая значительные потери мощности. Однако не всегда легко определить основную причину возникновения данного процесса, особенно нежелательным процесс представляется с той точки зрения, что проекты любых модульных систем по преобразованию солнечной энергии в электрическую, а также крупных солнечных электростанций предполагают функционирование на протяжении не менее, чем 25-30 лет. Непредвиденное значительное снижение их выработки является катастрофой как в техническом, так и в экономическом отношении.

Предмет исследования: эффект поверхностной поляризации, возникающий на фотоэлектрических модулях р и n типа, в следствии появления высокой разности потенциалов между фотоэлементом и алюминиевым каркасом фотоэлектрического модуля, а также исследование обратимости данного процесса.

Материалы и методы: в работе в первые проведены натурные испытания, с использованием разработанного специально для этих целей устройства (преобразователя напряжения), при помощи которого были созданы условия для ускоренного развития (PID) эффекта в фотоэлектрическом модуле, с последующей его регенерацией и проведением анализа полученных результатов.

Результаты: впервые получены результаты натурных испытаний, проведенные на опытных образцах, которые свидетельствуют о том, что процесс поляризационно-индуктивной деградации является обратимым.

Выводы: измеренные характеристики параметров на графиках показали явное снижение выработки электрической энергии фотоэлектрического модуля после принудительного применения PID, а затем улучшение характеристик после завершения процесса регенерации. Таким образом, анализ, представленный в этой статье, подтверждается практически экспериментальными результатами.

Ключевые слова: Потенциально-индуцированная деградация; фотоэлектрический модуль; регенерация; поляризационный эффект.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий потребление энергии из возобновляемых источников энергии быстро растет в результате увеличения стоимости ископаемого топлива и увеличения спроса на электроэнергию. Однако растущие экологические проблемы вызывают серьезную озабоченность нашего общества, которой нельзя пренебрегать. Солнечная и ветровая энергия – это два типа возобновляемых источников энергии, которые представляют наибольший интерес для производства экологически чистой энергии. В частности, солнечная энергия привлекает все больше и больше внимания, а подача фотоэлектрической энергии в электрическую сеть растет, поскольку она предлагает множество преимуществ, таких как [1, 2]:

Солнечная энергия – неиссякаемый источник энергии;

Фотоэлементы теперь предлагают повышенную эффективность преобразования энергии и низкую стоимость;

Преобразование энергии может быть достигнуто без дополнительного загрязнения;

Фотоэлементы производят максимальную мощность в полдень, когда потребление энергии достигает своего пикового значения.

По всем этим причинам внедряются крупномасштабные мощные фотоэлектрические установки мощностью от десятков киловатт до нескольких мегаватт [2]. Хотя технологии фотоэлектрических установок быстро развиваются, есть некоторые проблемы, которые могут привести к серьезным потерям мощности. Наиболее распространенными проблемами, о которых сообщают на фотоэлектрических установках (на уровне фотоэлектрических панелей), являются горячие точки на фотоэлектрических панелях и эффект потенциальной индуцированной деградации (PID) [3].

Под термином «горячая точка» мы подразумеваем фотоэлементы внутри фотоэлектрической панели, которые характеризуются повышенным значением температуры из-за возникшего повреждения. Основными причинами возникновения горячих точек в фотоэлектрических панелях являются

несоответствие электрических характеристик фотоэлементов, частичное затенение панели и микротрещины. Когда цепь последовательно соединенных ячеек питает нагрузку, в то время как одна или несколько ячеек повреждены (или затенены), они потребляют часть генерируемой мощности. Энергия, потребляемая неисправными элементами, преобразуется в тепло, вызывая повышение их температуры. На практике эти потери мощности можно ограничить, подключив параллельно шунтирующие диоды от двенадцати до двадцати четырех ячеек для исключения из электрической цепи данных ячеек [4].

Другой проблемой, которая может повлиять на мощность, вырабатываемую фотоэлектрическими панелями, является эффект (PID), при котором энергия, вырабатываемая фотоэлектрической установкой, снижается при наличии эффекта (PID) [4, 5]. Фактором, вызывающим эффект (PID), является высокая разность потенциалов между фотоэлементом и алюминиевым каркасом фотоэлектрической панели из-за большого количества последовательно соединенных панелей и невозможности заземления одной из выходных клемм в цепочке модулей. [6, 7]. Наличие электрического поля между фотоэлементом и алюминиевой рамой, заземленной на землю, вызывает утечку электронов [8, 9]. Это явление можно распознать либо по тепловому изображению фотоэлектрической панели, либо по измерению ее электрических параметров (напряжения и тока) под нагрузкой. Из литературы следует, что данный эффект является обратимым явлением, если его диагностировать и принять меры на первых стадиях [10].

Для борьбы с деградацией фотоэлектрических панелей были предложены различные методы, некоторые из которых связаны с предотвращением явления PID, а другие – с устранением его последствий. PID появляется в цепях фотоэлектрических модулей, где невозможно соединить отрицательный или положительный полюс массива (в зависимости от типа модуля) с заземляющим проводником. Таким образом, использование устройств, позволяющих заземлить фотоэлектрическую панель, является хорошим решением, которое можно применить заранее при создании фотоэлектрической установки. Например, силовые преобразователи с гальванической развязкой [12] или усовершенствованные преобразователи без гальванической развязки позволяющие заземлить клеммы фотоэлектрической панели [13] для предотвращения PID деградации.

С другой стороны, на макроскопическом уровне альтернативным способом предотвращения (PID) является использование специальных фотоэлементов и рамок (поверхность стекла, антибликовое покрытие и т. д.), которые имеют особую молекулярную структуру и значительно сниженный ток утечки [14, 15]. Это решение, как и предыдущее, может иметь ограничения и

повышенную стоимость в случае замены существующих модулей в фотоэлектрическом парке.

Термическая рекуперация – это один из способов решить проблему (PID) [10]. Хранение фотоэлектрических панелей, подвергшихся воздействию (PID), в камерах с температурой около 100 °С приводит к восстановлению фотоэлектрической панели, но вызывает высокие нагрузки на материалы панелей, что может повлиять на величину их дальнейшего срока службы. Воздействие УФ-излучения на панель, пораженную (PID), также оказывает восстанавливающий эффект. Оба решения требуют специального высокотехнологичного подхода и соответствующих высокотехнологичных ресурсов. Еще одним методом устранения явления (PID) является смещение фотоэлементов высоким напряжением с противоположной полярностью, напряжению, вызывающему данное явление (PID). В частности, высокое напряжение может быть приложено между ячейкой и рамой [10, 16, 17].

Для фотогальванического модуля, абсолютный потенциал (по отношению к земле) на положительном электроде или на отрицательном или где-то между ними в цепочке зависит от схемы инвертора. Более того, абсолютный потенциал панели не всегда остается одинаковым и может постоянно изменяться во время работы солнечного модуля, что также зависит от типа инвертора и его внутренней схематехники и компоновки. В низковольтных электрических сетях, нейтраль электрической сети как правило заземлена, поэтому нейтральный проводник имеет потенциал земли, в случае бестрансформаторного инвертора, различные фазы сети попеременно воздействуют на положительный и отрицательный электрод солнечного модуля, поэтому потенциал на положительном и отрицательном электроде постоянно меняется. Если заземлить положительный или отрицательный электрод солнечного модуля в системе с бестрансформаторным инвертором, то выход инвертора может быть закорочен при определенных состояниях инвертора, в связи с чем данный метод заземления без дополнительных доработок и усовершенствований является не приемлемым в системах без гальванической развязки.

В этой статье предлагается новое комплексное решение для регенерации фотоэлектрических ячеек модуля, пострадавших от явления (PID), а также представлено новое электронное устройство, алгоритм работы которого построен на принципе работы умножителя напряжения Кокрофта-Уолтона [22] (далее- Преобразователь напряжения), в целях устранения и искусственного создания (PID) эффекта для исследовательских целей. Преобразователь напряжения обеспечивает четырехступенчатое изменение величины напряжения постоянного тока, что явилось важным аспектом при исследовании скорости и масштаба развития PID-эффекта во время проведения

натурных экспериментов. Более того, по причине компактности и мобильности данного устройства, эффект (PID) исследовался на фотоэлектрических модулях в месте постоянного их расположения, то есть без демонтажа и перемещения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Все типы модулей, которые зависят от пассивации оксидной поверхности, подвержены этому эффекту при работе в поле при высоком напряжении соответствующей полярности, мы называем это «эффектом поверхностной поляризации». Интересно, что этот эффект поверхностной поляризации оказался обратимым, и его можно полностью избежать с помощью надлежащих процедур и заземления модуля. В этой статье обсуждаются наши экспериментальные наблюдения и результаты.

В фотоэлектрических модулях с элементами р-типа должен быть заземлен отрицательный электрод, так, чтобы все модули имели положительный потенциал относительно земли, в этом случае они могут быть полностью восстановлены после деградации, вызванной потенциалом. Панели n-типа также требуют заземления, но только положительной клеммы электрода. Исследования данного вопроса выявляют, как влияет подвижность электронов которая увеличивается по мере роста температуры и влажности среды и как посторонние предметы, вступающие в контакт с поверхностью фотоэлектрического модуля усиливают поляризацию. К основным причинам деградации оборудования принято относить следующие аспекты - особенности структуры строения преобразователя системы (инвертора), строение модуля и влияние внешней среды. Окружающая среда практически не подлежит контролю, в то время как на остальные факторы, приводящие к PID и вызывающие деградацию солнечных панелей, можно влиять в значительной степени.

Было обнаружено, что характеристики высокоэффективных солнечных элементов, в которых в качестве поверхностного пассивирующего слоя используется диоксид кремния/нитрид кремния, который в последующем оказывает влияние на снижение эффективности, когда модули работают под высоким напряжением. Ухудшение производительности происходит из-за заряженных частиц, формирующих ток утечки модуля. Этот заряд истощает легированную поверхность области и тем самым усиливает поверхностную рекомбинацию. Данный эффект в некоторых случаях является полностью обратимым, и его можно избежать, работая с модулями при отрицательных напряжениях относительно земли для верхних поверхностей n-типа и положительных напряжениях для передних поверхностей р-типа. Также известно, что правильно заземленные

системы работают без влияния поляризации поверхности фотогальванических модулей.

Емкостные эффекты играют важную роль в формировании зависимости между напряжением и деградацией солнечных панелей, электрические заряды при миграции ионов, вызываемой конкретными электрическими явлениями, уменьшают коэффициент полезного действия модуля, оказывая воздействие на пластины полупроводника. В любом случае, анализ, проведенный инженерами компании SunPower, свидетельствует о том, что процессы PID поддаются стабилизации в состоянии, присущем каждой разновидности модуля. Эффект поверхностной поляризации, с которым столкнулись сотрудники завода SunPower в 2005г., относится к обратимой разновидности деградации. Он создает стабильное накопление статического заряда на поверхности деталей модуля, которое удается нейтрализовать с возвратом к исходной мощности оборудования.

Развитие данного процесса связано с переходом ионов натрия от фронтального стекла к фотоэлектрическим преобразователям. В фотоэлектрических модулях, соединенных в последовательную цепочку, потенциал увеличивается с каждой последующей панелью в цепочке. При этом ток через них протекает одинаковый.

Напряжение — это разность потенциалов, поэтому по значению величины напряжения мы не можем определить абсолютный потенциал на солнечной панели. Даже если мы знаем, что Фотоэлектрический модуль имеет разность потенциалов 600 В между положительным и отрицательным электродами, не известно, какой потенциал имеют положительный и отрицательный электроды. Это может быть +300 и - 300В, 600 и 0 В, 900 и 300В. В общем случае, потенциал земли принимается как референсный с значением 0В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Регенерация фотогальванических элементов

Предлагаемый метод заключается в использовании преобразователя постоянного тока, который может быть внешне подключен к нескольким фотоэлектрическим панелям, даже если они уже установлены в фотоэлектрическом парке. При регенерации фотоэлементов их максимальная выходная мощность увеличивается за счет восстановления напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и точки максимальной мощности (MPP), близких к их номинальным значениям.

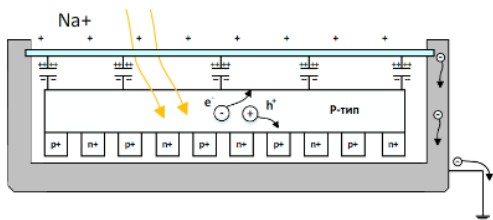
Потенциальная индуцированная деградация в модулях р-типа и n-типа

Фотоэлементы, из которых состоит фотоэлектрическая панель, о чем говорилось ранее

делятся на две категории в зависимости от их структуры. В зависимости от типа полупроводника, используемого в качестве основы для их конструкции, фотоэлектрическая панель может быть как р-типа, так и n-типа. Эффект PID возникает в обоих случаях, но при разных условиях [9]. По этой причине рассмотрим строение фотоэлектрических модулей двух типов, и определим величину PID экспериментально.

При нормальной работе электроны ускоряются в сторону n-области под влиянием потенциального барьера между р-n-слоем и дырками в сторону р-области. На рисунке 1 показано поперечное сечение фотоэлектрической панели р-типа. Группа ячеек опирается на алюминиевую основу и покрыта стеклянной поверхностью и антибликовым покрытием, снижающим отраженное излучение. Эффект (PID) возникает, когда положительный заряд, такой как катионы натрия (Na^+), оседает на поверхности стекла, фотоны произведенные солнечным излучением падают на полупроводник р-типа ячейки, создавая дырки (h^+) и электроны e^- . В случае, если на поверхности накопился положительный заряд (например, диоксид кремния (SiO_2) и на просветляющем покрытии например, нитрид кремния (Si_3N_4) электроны притягиваются к поверхности стекла, соответственно дырки направлены в р+ область. Накопление заряда может быть представлено эквивалентными конденсаторами между ячейками и стеклом [21], как показано на рисунке 1. В результате происходит утечка электронов в землю, а это означает, что обычное направление тока от земли к рамам. Как следствие, возникает отрицательная разность потенциалов между модулями и землей [9]. Этот эффект смещения усиливается при высокой влажности, что снижает импеданс между поверхностью стекла и алюминиевой опорной рамой, увеличивая ток утечки. Алюминиевая рама естественным образом соединена с землей. Ячейки модуля, наиболее подверженные этому явлению, находятся ближе всего к отрицательному полюсу постоянного напряжения, где потенциал напряжения по отношению к земле выше [4, 5].

Рис. 1. Представлен принцип туннелирования подвижных



носителей заряда, электронов из-за эффекта PID в поперечном сечении фотоэлектрической панели р-типа

Fig. 1. The principle of tunneling of mobile charge carriers, electrons, due to the PID effect in the cross section of a p-type photovoltaic panel is presented

Если фотоэлектрические элементы сконструированы из полупроводников n-типа, возникновение явления (PID) аналогично ранее

описанным элементам р-типа. На рисунке 2 показан пример, когда на поверхности стекла накапливается отрицательный заряд, создавая паразитную емкость. Положительный потенциал по отношению к земле-земле теперь присутствует. Как показано на Рисунке 2, утечка противоположна предыдущему случаю, и явление более интенсивно в модулях по направлению к положительному полюсу [9].

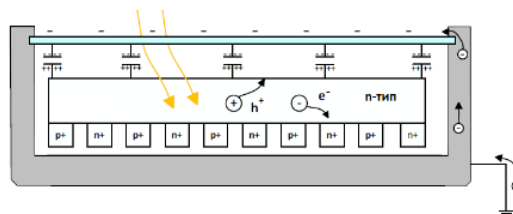


Рис. 2. Представлен принцип туннелирования подвижных носителей заряда, электронов из-за эффекта PID в поперечном сечении фотоэлектрической панели n-типа

Fig. 2. The principle of tunneling of mobile charge carriers, electrons, due to the PID effect in the cross section of an n-type photovoltaic panel is presented

Замкнув накоротко выходные клеммы фотоэлектрических панелей, можно определить разность потенциалов, измерив напряжение между этой общей точкой и алюминиевой опорной рамой.

Регенерация с преобразователем постоянного тока

Как упоминалось ранее, обратный эффект (PID)-регулятора может быть достигнут с помощью электронного преобразователя. Высокое напряжение постоянного тока подается между выходом фотоэлектрической панели и алюминиевой опорной рамой, которая напрямую соединена с землей, как показано на рисунке 3. Полярность напряжения противоположна той, которая вызывает явление PID деградации. Таким образом, потенциал фотоэлектрической панели относительно земли повышается, а ток утечки устраняется путем реверсирования потока электронов обратно к фотоэлементам. Максимальная величина напряжения не должна превышать максимальное напряжение системы, установленное производителем фотоэлектрической панели. Устройство можно подключать для регенерации, когда нет производства энергии, ночью или если панели вручную и полностью покрыты материалом не пропускающим солнечный свет [17]. Процесс регенерации можно даже ускорить, если поверхность стекла влажная, так как импеданс пути выхода e^- снижается [9].

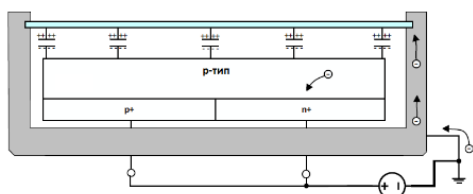


Рис. 3. Представлен принцип регенерации с применением преобразователя напряжения на поперечном сечении фотоэлектрического модуля р-типа, после повреждения PID.

Fig. 3. The principle of regeneration using a voltage converter on the cross section of a p-type photovoltaic module after PID damage is presented.

Наша цель состоит не только в том, чтобы обратить эффект PID на панелях, но и в том, чтобы создать компактное устройство, которое можно легко разместить в любом месте и которое можно применить к любому типу модулей (р-типа или п-типа). В фотоэлектрическом парке выходы фотоэлектрического модуля замыкаются накоротко во время регенерации, а основной инвертор отключается для безопасности от электрической сети постоянного и переменного тока.

Эффект (PID) на ячейках р-типа не возникает, когда напряжение, подаваемое преобразователем, положительное. Таким образом, отсутствует риск повреждения фотоэлектрических модулей из-за длительной поляризации модулей. Это автоматически обеспечивает безопасность системы и снижает сложность управления силовым преобразователем. Преобразователь может быть подключен к нескольким фотогальваническим модулям, которые соединены в электрическую цепь, с целью аналогичного восстановления эффективности для определенного количества модулей.

Искусственное создание PID на фотоэлектрических панелях

Как уже упоминалось, эффект (PID) развивается медленно, и его последствия становятся очевидными в долгосрочной перспективе. Чтобы изучить проблему и проанализировать последствия и ущерб, который он вызывает на фотоэлектрических модулях, предлагается простой метод искусственного создания PID на фотоэлектрических панелях в контролируемых условиях. Используя тот же преобразователь мощности, который используется для регенерации фотоэлементов, и реверсивное выходное напряжение, электрическое поле вызывающее утечку электронов подается на панель. На Рисунке 4 изображен пример искусственного создания (PID), где преобразователь мощности подключен в обратной полярности, по сравнению с Рисунком 3, и поток электронов направляется в таком направлении, чтобы ухудшить параметры фотоэлектрического модуля. В результате на поверхности стекла накапливается положительный

заряд, как и в естественном случае, показанном на рисунке 1.

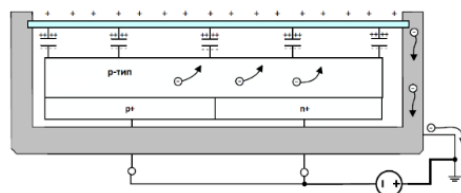


Рис. 4. Представлен принцип осуществления эффекта PID деградации с применением преобразователя напряжения на поперечном сечении фотоэлектрического модуля р-типа.

Fig. 4. The principle of implementation of the effect of PID degradation using a voltage converter on the cross section of a p-type photovoltaic module is presented.

По сравнению с другими решениями, упомянутыми ранее, предлагаемый метод имеет много преимуществ: это не только менее затратное решение, но и отсутствие необходимости в специальном оборудовании для создания высокого напряжения для перемещения катионов на поверхность стекла; прибор портативный и его можно протестировать в любом месте, затеняя поверхность панели; и несколько панелей могут быть подключены параллельно или последовательно для комплексного тестирования.

Описание силового преобразователя

Основными требованиями преобразователя постоянного напряжения являются получение высокого напряжения постоянного тока в условиях малой нагрузки (из-за низких токов утечки), возможность использования малогабаритных полупроводниковых компонентов для снижения стоимости и упрощения управления выходным напряжением. Кроме того, поскольку высокая точность уровня выходного напряжения преобразователя не является основным требованием, преобразователь рассчитан на формирование четырех дискретных уровней напряжения. Правильно собранное устройство работает без особой наладки, сразу после подключения сетевого напряжения 220 В, с частотой сети 50 Гц. Гальваническая развязка на входе устройства также необходима для предотвращения возможных коротких замыканий, поскольку нейтраль распределительной сети и выход постоянного тока преобразователя заземлены.

При создании преобразователя напряжения с целью проведения данной исследовательской работы, как говорилось ранее был принят за основу алгоритм работы умножителя напряжения Кокрофта-Уолтона [22]. Для этого выбрана схема последовательно включенных каскадов однополупериодных выпрямителей, так как она предлагает несколько неоспоримых преимуществ, таких как достаточно высокая нагрузочная способность, использование малогабаритных полупроводниковых компонентов и конденсаторов,

в итоге максимальное напряжение на выходе каскада практически равно удвоенному пиковому входному напряжению.

Коэффициент усиления X_{nl} по напряжению, в преобразователе напряжения с цепочкой каскадов можно рассчитать по формуле (1) [22,24].

$$X_{nl} = \frac{V_{nl}}{E_{pk}} = 2 * n \quad (1)$$

где, E_{pk} — пиковое значение входного напряжения [Вольт], а V_{nl} — среднее значение напряжения [Вольт] ненагруженного выхода.

В нашем случае выходной ток преобразователя не превышает величины от 1 до 5 мА; поэтому падением напряжения на выходе можно пренебречь. Более того, благодаря характеру применения устройства, отсутствуют резкие изменения нагрузки, которые могут повлиять на выходное напряжение преобразователя.

Как описано в [22,24], присутствуют пульсации напряжения на конденсаторах под нагрузкой. Величина пульсаций напряжения ΔV [Вольт] на выходе умножителя для синусоидальной формы выходного напряжения определяется по формуле (2) [22, 24].

$$\Delta V = \frac{I}{fC} \left(\frac{1}{6} n^3 + \frac{1}{4} n^2 + \frac{1}{3} n \right) \quad (2)$$

при $C_1=C_2=C_3=... C_n$;

где, f — частота электрической сети [Гц]; I — выходной ток [Ампер]; n — число каскадов умножителя, C — емкость конденсатора каскада [mf].

Эти пульсации напряжения могут быть очень высокими, если частота источника питания переменного напряжения низкая, или не стабильная. Учитывая, что частота электрической

сети равна 50 Гц, есть два решения по ограничению пульсаций напряжения. Очевидное решение — увеличить общую емкость, а второе решение — подать на умножитель переменное напряжение высокой частоты. В данном устройстве реализовано второе решение для уменьшения общих габаритов. Для этого использован полумостовой инвертор для получения необходимого напряжения переменного тока высокой частоты [23]. Существенным преимуществом предложенной топологии является простота управления. В частности, частота и рабочий цикл полумоста поддерживаются постоянными, а регулировка выходного напряжения осуществляется с помощью релейной цепи, подключенной к выходам каскадов 1-5.

В частности, сетевое напряжение понижается с помощью трансформатора для обеспечения вторичного напряжения 100 В/50 Гц. Затем используется выпрямитель с фильтрующими конденсаторами для получения плавного постоянного напряжения для каскада преобразования постоянного тока в переменный. Последним этапом преобразования мощности является этап умножения напряжения. Пониженное напряжение необходимо для того, чтобы преобразователь выдавал пять различных уровней напряжения на выходе, в диапазоне примерно от 200 В до 1000 В с шагом 200 В. Уровень выходного напряжения можно выбирать самостоятельно при необходимости, контролируя положения контактов реле, подключённых к выходам каскадов умножителя 2–5. Схема разработанного устройства (преобразователя напряжения) показана на рисунке 5.

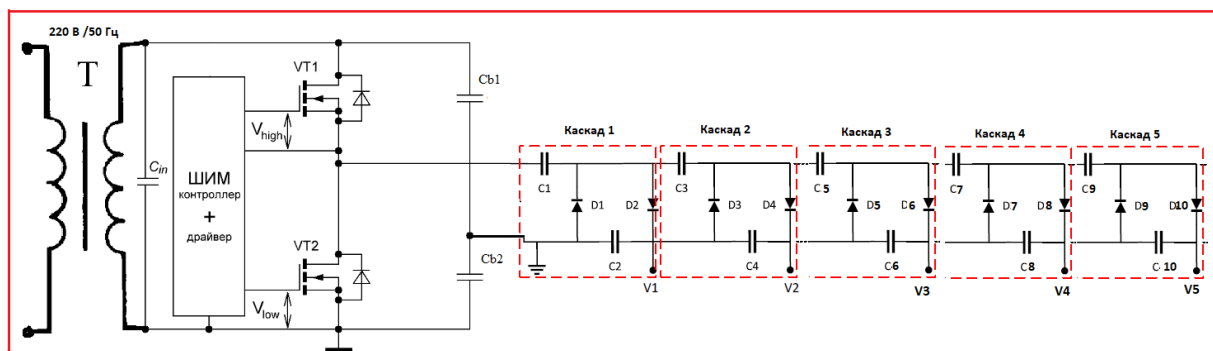


Рис. 5. Представлена электрическая схема разработанного преобразователя напряжения для исследования эффекта PID
Fig. 5. An electrical circuit of the developed voltage converter for studying the PID effect is presented

Для проверки работоспособности предложенного преобразователя результаты моделирования представлены на рисунке 6 (а, б). Емкости полумоста были выбраны исключительно исходя из требуемой величины пульсации напряжения $C_{b1} = C_{b2} = 94$ мкФ, а

емкость каждого каскада C_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) равна 12 мкФ, при этом ток нагрузки равен 5 мА. Полупроводниковые ключи VT 1 и VT 2 управляются импульсами с частотой 20 кГц.

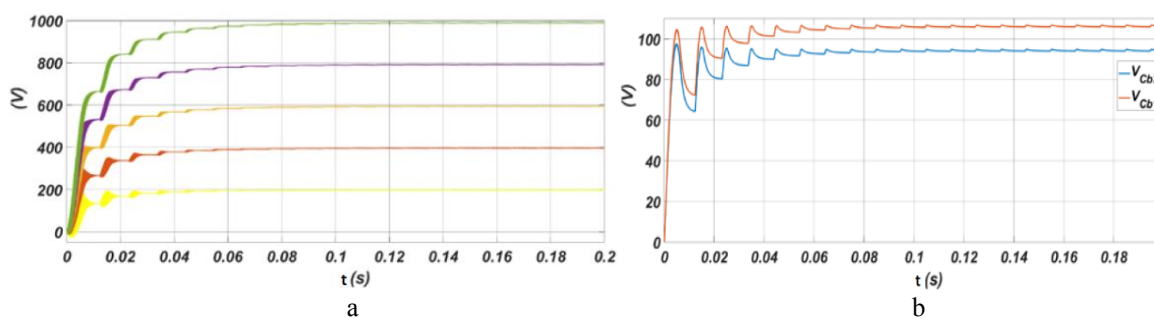


Рис. 6. Результаты полученных форм сигналов от преобразователя напряжения: (а) уровни выходного напряжения преобразователя; (б) напряжения на конденсаторах Cb1 и Cb2
Fig. 6. The results of the received waveforms from the voltage converter: (a) Converter output voltage levels; (b) voltages across capacitors Cb1 and Cb2

Экспериментальная проверка

Предлагаемый преобразователь был реализован и протестирован на реальных фотоэлектрических панелях, чтобы опытно подтвердить явление PID, так и регенерацию фотоэлементов. Это устройство предусматривает в себе измерение выходного напряжения и тока, а также дополнено функциями защиты от перенапряжения и перегрузки по току. Во-первых, устройство было протестировано отдельно, чтобы проверить его работу и возможность подключения. Далее на одной из

фотоэлектрических панелей искусственно создавался эффект PID (далее – PV₂), а другая, здоровая (далее – PV₁), использовалась в качестве «эталонной панели», служившей точкой отсчета для сравнения до и после создания эффекта PID. После деградации ячеек выбранной панели PV₂ в течение 14 дней (336 часов), процесс регенерации следовал в течение такого же периода времени. В ходе процесса были проведены измерения вольт-амперных характеристик (далее – ВАХ) обоих модулей.

Таблица. 1. Технические характеристики преобразователя
Table 1. Specifications of the inverter

№ п/п	Наименование компонентов	Компоненты	Параметры
1	V _{in} ,	Параметры сетевого питания	230 В/50 Гц
2	n1/n2	Первичное/вторичное напряжение трансформатора	230/100 В
3	E _{pk}	Максимальное значение входного напряжение умножителя	100 В
4	V _{n1,2}	Выходное напряжение 2 каскада без нагрузки	370 В
5	V _{n1,3}	Выходное напряжение 3 каскада без нагрузки	580 В
6	V _{n1,4}	Выходное напряжение 4 каскада без нагрузки	770 В
7	V _{n1,5}	Выходное напряжение 5 каскада без нагрузки	965 В
8	P	Мощность устройства	10 Вт
9	C1-C10	Конденсаторы	12 мF
10	Cb1-Cb2	Конденсаторы	94 мF
11	VT1-VT2	Транзисторы	IXTA12N50P

Необходимый уровень напряжения выбирается с помощью переключателя для подключения необходимого активного выходного каскада (V₂, V₃, V₄, V₅). Имеется также индикация, для отображения замкнутой цепи при включении нагрузки на выходные клеммы фотоэлектрического модуля (PV+ и PV-) с показанием уровня выходного напряжения и тока в цепи.

В эксперименте использовались две идентичные ранее не подверженные PID эффекту панели. В таблице 2 приведены подробные характеристики каждой панели. В качестве испытуемого феномена PID была выбран второй

модуль, имеющий несколько более высокие характеристики по мощности, напряжению и току. Это было выбрано для того, чтобы гарантировать, что любое ухудшение электрических характеристик его выхода по сравнению с «эталонным» модулем PV₁, будет связано с эффектами PID. На рисунке 7, показана экспериментальная установка фотоэлектрических панелей. Модуль PV₂ был затемнен во время искусственного создания эффекта PID и при регенерации фотоэлементов. Устройство для создания и регенерации PID было размещено в непосредственной близости с модулем PV₂.



Рис. 7. Представлены фотоэлектрические модули PV₁ и PV₂, использованные в эксперименте.
Fig. 7. The photovoltaic modules PV₁ and PV₂ used in the experiment are presented.

Таблица. 2. Характеристики фотоэлектрических панелей
Table 2. Characteristics of photovoltaic panels

п.№	PV модуль № 1		PV модуль № 2	
1.	P _{m,1}	235 Вт	P _{m,2}	240 Вт
2.	V _{mp,1}	29,6 В	V _{mp,2}	29,8 В
3.	I _{mp,1}	7,95 А	I _{mp,2}	8,08 А
4.	V _{oc,1}	37,1 В	V _{oc,2}	37,4 В
5.	I _{sc,1}	8,56 А	I _{sc,2}	8,63 А
6.	V макс,1=1000 В DC		V макс,2=1000 В DC	
7.	T =45 +/- 2 °С		T =45 +/- 2 °С	

Затем последовали измерения на реальных фотоэлектрических панелях, чтобы проверить результат работы преобразователя, как для создания PID, так и для регенерации фотоэлементов. Сначала были измерены характеристические двух фотоэлектрических панелей (PV₁ и PV₂), в течение нескольких дней в часы пик солнечной радиации. Соответствующие значения мощности показаны штрихпунктирными линиями на рисунках 8 и 9. Далее предлагаемое устройство используется для искусственного создания явления PID на втором

фотоэлектрическом модуле PV₂. Обратная полярность применялась непрерывно в течение двух недель, а затем были проведены новые измерения параметров для обеих панелей. Построенные графики PV₁ и PV₂ для этого случая изображены пунктирными линиями. После этого к модулю PV₂ была применена правильная полярность, чтобы регенерировать фотоэлементы и восстановить их способность вырабатывать энергию, мощность после процесса регенерации изображена сплошными линиями на рисунках 8 и 9.

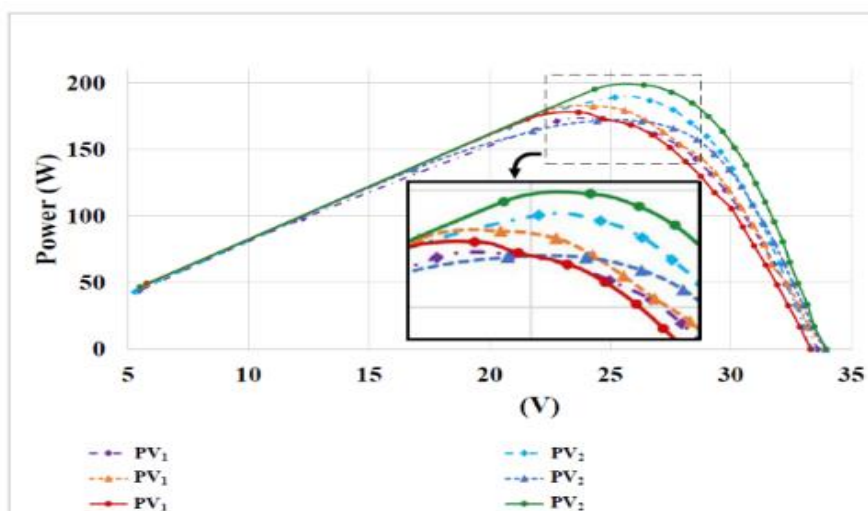


Рис. 8. На графике для сравнения представлены результаты измеренных характеристик мощности и напряжения двух модулей: PV₁ (фиолетовый) и PV₂ (голубой) до PID (пунктирная линия); Панели PV₁ (оранжевый) и PV₂ (синий) с принудительным PID(пунктиром); панели PV₁ (красный) и PV₂ (зеленый) после регенерации PV₂ (непрерывно)
Fig. 8. The comparison graph shows the results of the measured power and voltage characteristics of two modules: PV₁ (purple) and PV₂ (cyan) to PID (dashed line); Panels PV₁ (orange) and PV₂ (blue) with forced PID (dotted line); panels PV₁ (red) and PV₂ (green) after PV₂ regeneration (continuous)

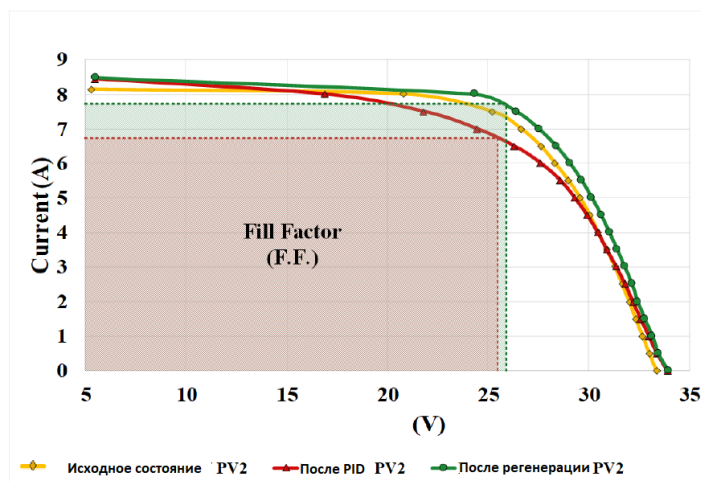


Рис. 9. На графике представлена вольт-амперная характеристика модуля PV₂ до PID, с PID и после регенерации.
Fig. 9. The graph shows the volt-ampere characteristic of the PV₂ module before PID, with PID and after regeneration.

Наблюдая за параметрами (мощности и напряжения) на рисунках 8 и 9 можно сделать важные выводы, если рассматривать только результаты тестируемой панели PV₂, то видно, что после принудительной деградации PID выходная мощность, генерирующей PV₂, снижается, а после регенерации она увеличивается даже выше исходного состояния. Однако результаты могут быть неоднозначными, поскольку коэффициент солнечной радиации не может быть постоянным для всех испытаний. По этой причине PV₁ использовался в качестве «эталонного» модуля для одновременного сравнения характеристик.

До ухудшения характеристик PV₂ его мощность была выше, чем у PV₁, как и ожидалось, исходя из их номинальных характеристик. После имитации PID, уровни тока и напряжения для PV₂ оказались ниже, чем до имитации PID, но выработка энергии PV₁ увеличилась, а это означает, что во время этих измерений было больше величина солнечного излучения. Таким образом, абсолютно точно установлено, что PID был искусственно создан в модуле PV₂ путем поляризации панели с помощью предлагаемого преобразователя напряжения.

После регенерации PV₂ его мощность увеличилась по сравнению с предыдущим измерением, когда он находился в режиме PID. Между тем, PV₁ был измерен ниже, чем ранее. Следовательно, обеспечивается успешная регенерация деградировавших фотоэлементов, поскольку была обнаружена более высокая мощность и больший коэффициент заполнения ВАХ солнечного элемента (fill factor — FF) по

сравнению с предыдущим случаем, даже при более низком солнечном излучении, далее процент деградации, вызванный искусственным эффектом PID i, рассчитывается по формуле (3) следующим образом:

$$PID\ i[\%] = \frac{P_i}{P_n} \cdot 100; \quad (3)$$

где P_i [Вт] – максимальная выходная мощность фотоэлектрического модуля после искусственно созданного PID;

P_n [Вт] – максимальная выходная мощность фотоэлектрического модуля до возникновения PID.

Оставшийся процент деградации из-за PID, который все еще присутствует в фотоэлектрических модулях после цикла регенерации, представлена PID r и рассчитывается следующим образом по формуле (4):

$$PID\ r[\%] = \frac{P_r}{P_n} \cdot 100; \quad (4)$$

где, P_r [Вт] – максимальная выходная мощность фотоэлектрического модуля после регенерации.

Восстановленный процент PID представлен как PID v и рассчитывается следующим образом по формуле (5):

$$PID\ v[\%] = \frac{P_r - P_i}{P_n} \cdot 100; \quad (5)$$

Экспериментальные результаты на MPP показаны на рисунке 3 для трех различных состояний измерений: исходное состояние PV₂, после принудительного PID на PV₂ и после регенерации панели PV₂.

Таблица 3. Экспериментальная точка максимальной мощности (MPP) для эталонного PV₁ и для тестируемого PV₂ до и после возникновения PID и с регенерацией PID

Table 3. Experimental maximum power point (MPP) for reference PV₁ and for test PV₂ before and after PID occurrence and with PID refresh

№ п/п	Вид измерения	Эталонный – PV1	Тестируемый – PV2
1	Измерение PV2 без PID.	172,8 Вт	189,2 Вт
2	Измерение PV2 после искусственного PID.	182,4 Вт	171,4 Вт
3	Измерение PV2 после регенерации.	177,9 Вт	198,3 Вт

ВЫВОДЫ

В этой статье рассмотрены возможные причины возникновения PID, а также новое решение регенерации фотоэлектрических модулей для восстановления характеристик близких к заводским, которые были деградированы из-за явления PID. Это же устройство можно использовать для искусственного создания PID на фотоэлектрических модулях, что делает его пригодным как для промышленных, так и для исследовательских целей. Основными преимуществами по сравнению с обычными методами являются его небольшие размеры и низкая стоимость, простота его работы и его адаптируемость в системах с различными номинальными параметрами, обусловленная возможностью нескольких уровней выходного напряжения. Эффективность предлагаемого устройства и принцип его работы проверены путем проведения экспериментов на фотоэлектрических панелях. PID был успешно создан на панели PV₂, а затем тот же самый модуль был восстановлен. Измеренные характеристики параметров на графиках показали явное снижение выработки энергии фотоэлектрическими элементами после принудительного применения PID, а затем улучшение характеристик после завершения процесса регенерации. Таким образом, анализ, представленный в этой статье, подтверждается практически экспериментальными результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bose, B.K. Global warming—Energy, environmental pollution and the impact of power electronics. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2010, 4, 6–17. [Google Scholar] [CrossRef]
2. European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018. 2014. Available online: https://helapco.gr/wp-content/uploads/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_Medium_Res.pdf (accessed on 8 June 2021).
3. Tur, M.R.; Colak, I.; Bayindir, R. Effect of Faults in Solar Panels on Production Rate and Efficiency. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Nagasaki, Japan, 4–6 December 2018; pp. 287–293. [Google Scholar]
4. Mertens, K. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*, 2nd ed.; John Wiley & Sons Inc.: Chichester, UK, 2014. [Google Scholar]
5. Boulhidja, S.; Mellit, A.; Voswinckel, S.; Lugh, V.; Ciocia, A.; Spertino, F.; Massi Pavan, A. Experimental Evidence of PID Effect on CIGS Photovoltaic Modules. *Energies* 2020, 13, 537. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
6. Understanding Potential Induced Degradation. White Paper-AE. 2013. Available online: https://www.twentezon.nl/wp-content/uploads/2015/08/Advanced-Energy_Understanding-Potential-Induced-Degradation.pdf (accessed on 8 June 2021).
7. Hylský, J.; Strachala, D.; Vyroubal, P.; Pavel, Č.; Vanýsek, P. Effect of negative potential on the extent of PID degradation in photovoltaic power plant in a real operation mode. *Microelectron. Reliab.* 2018, 85, 12–18. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Bauer, J.; Naumann, V.; Grober, S.; Hagendorf, C.; Schutze, M.; Breitenstein, O. On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *Phys. Status Solidi–Rapid Res. Lett.* 2012, 6, 331–333. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Hoffmann, S.; Koehl, M. Effect of Humidity and Temperature on the Potential-Induced Degradation. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2014, 22, 775–783. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Luo, W.; Khoo, Y.S.; Hacke, P.; Naumann, V.; Lausch, D.; Harvey, S.; Singh, J.; Chai, J.; Wang, W.; Aberle, A.; et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: A critical review. *Energy Environ. Sci.* 2017, 10, 43–68. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
11. Sporleder, K.; Turek, M.; Schüler, N.; Naumann, V.; Hevisov, D.; Pöblau, C.; Großer, S.; Schulte-Huxel, H.; Bauer, J.; Hagendorf, C. Quick test for reversible and irreversible PID of bifacial PERC solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2021, 219, 110755. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Christidis, G.C.; Nanakos, A.C.; Tatakis, E.C. Hybrid Discontinuous/Boundary Conduction Mode of Flyback Microinverter for AC–PV Modules. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 4195–4205. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Rajeev, M.; Agarwal, V. Analysis and Control of a Novel Transformer-Less Microinverter for PV-Grid Interface. *IEEE J. Photovolt.* 2018, 8, 1110–1118. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Kapur, J.; Stika, K.M.; Westphal, C.S.; Norwood, J.L.; Hamzavytehrany, B. Prevention of Potential-Induced Degradation With Thin Ionomer Film. *IEEE J. Photovolt.* 2015, 5, 219–223. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Chen, T.-C.; Kuo, T.-W.; Lin, Y.-L.; Ku, C.-H.; Yang, Z.-P.; Yu, I.-S. Enhancement for Potential-Induced Degradation Resistance of Crystalline Silicon Solar Cells via Anti-Reflection Coating by Industrial PECVD Methods. *Coatings* 2018, 8, 418. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
16. Finsterle, T.; Černá, L.; Hrzina, P.; Rokusek, D.; Benda, V. Diagnostics of PID Early Stage in PV Systems. *Energies* 2021, 14, 2155. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Swanson, R.M.; Cudzinovic, M.; DeCeuster, D.; Desai, V. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells. In *Proceedings of the 15th International PVSEC*, Shanghai, China, 10–15 October 2005; pp. 410–411. [Google Scholar]
18. PIDbox Mini—Illumen. Illumen. 2021. Available online: <https://www.ilumen.be/en/all-products/pid-box-mini/> (accessed on 24 June 2021).

19. Vigdu.com. 2021. Available online: <https://www.vigdu.com/anti-pid-residential-systems> (accessed on 24 June 2021).

20. PID Technology—You Have PID Issues Take the PADCON Protection and Solution for This Problem.—PADCON—Future Technologies. Padcon.com. 2021. Available online: https://www.padcon.com/en/effective_PID_technology_for_pv_systems.html (accessed on 24 June 2021).

21. Liu, H.-C.; Huang, C.T.; Lee, W.K.; Lin, M.-H. High Voltage Stress Impact on P Type Crystalline Silicon PV Module. *Energy Power Eng.* 2013, 5, 455–458. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

22. Дольник А.Г., Выпрямители с умножением напряжения (Госэнергоиздат выпуск 146, 1952г).

23. Коростелин А.В. Импульсные источники питания, Элементная база, архитектура и ремонт (2020г).

24. Jochen's High Voltage Page Basic multiplier circuits <http://www.kronjaeger.com/hv/hv/src/mul/>.

REFERENCES

1. Bose, B.K. Global warming—Energy, environmental pollution and the impact of power electronics. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2010, 4, 6–17. [Google Scholar] [CrossRef]

2. European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018. 2014. Available online: https://helapco.gr/wp-content/uploads/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_Medium_Res.pdf (accessed on 8 June 2021).

3. Tur, M.R.; Colak, İ.; Bayindir, R. Effect of Faults in Solar Panels on Production Rate and Efficiency. In Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Nagasaki, Japan, 4–6 December 2018; pp. 287–293. [Google Scholar]

4. Mertens, K. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*, 2nd ed.; John Wiley & Sons Inc.: Chichester, UK, 2014. [Google Scholar]

5. Boulhidja, S.; Mellit, A.; Voswinckel, S.; Lughii, V.; Ciocia, A.; Spertino, F.; Massi Pavan, A. Experimental Evidence of PID Effect on CIGS Photovoltaic Modules. *Energies* 2020, 13, 537. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

6. Understanding Potential Induced Degradation. White Pap.-AE. 2013. Available online: https://www.twentazon.nl/wp-content/uploads/2015/08/Advanced-Energy_Understanding-Potential-Induced-Degradation.pdf (accessed on 8 June 2021).

7. Hylský, J.; Strachala, D.; Vyroubal, P.; Pavel, Č.; Vanýsek, P. Effect of negative potential on the extent of PID degradation in photovoltaic power plant in a real operation mode. *Microelectron. Reliab.* 2018, 85, 12–18. [Google Scholar] [CrossRef]

8. Bauer, J.; Naumann, V.; Grober, S.; Hagendorf, C.; Schutze, M.; Breitenstein, O. On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar

cells. *Phys. Status Solidi—Rapid Res. Lett.* 2012, 6, 331–333. [Google Scholar] [CrossRef]

9. Hoffmann, S.; Koehl, M. Effect of Humidity and Temperature on the Potential-Induced Degradation. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2014, 22, 775–783. [Google Scholar] [CrossRef]

10. Luo, W.; Khoo, Y.S.; Hacke, P.; Naumann, V.; Lausch, D.; Harvey, S.; Singh, J.; Chai, J.; Wang, W.; Aberle, A.; et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: A critical review. *Energy Environ. Sci.* 2017, 10, 43–68. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

11. Sporleder, K.; Turek, M.; Schüler, N.; Naumann, V.; Hevisov, D.; Pöblau, C.; Grober, S.; Schulte-Huxel, H.; Bauer, J.; Hagendorf, C. Quick test for reversible and irreversible PID of bifacial PERC solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2021, 219, 110755. [Google Scholar] [CrossRef]

12. Christidis, G.C.; Nanakos, A.C.; Tatakis, E.C. Hybrid Discontinuous/Boundary Conduction Mode of Flyback Microinverter for AC–PV Modules. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 4195–4205. [Google Scholar] [CrossRef]

13. Rajeev, M.; Agarwal, V. Analysis and Control of a Novel Transformer-Less Microinverter for PV-Grid Interface. *IEEE J. Photovolt.* 2018, 8, 1110–1118. [Google Scholar] [CrossRef]

14. Kapur, J.; Stika, K.M.; Westphal, C.S.; Norwood, J.L.; Hamzavytehrany, B. Prevention of Potential-Induced Degradation With Thin Ionomer Film. *IEEE J. Photovolt.* 2015, 5, 219–223. [Google Scholar] [CrossRef]

15. Chen, T.-C.; Kuo, T.-W.; Lin, Y.-L.; Ku, C.-H.; Yang, Z.-P.; Yu, I.-S. Enhancement for Potential-Induced Degradation Resistance of Crystalline Silicon Solar Cells via Anti-Reflection Coating by Industrial PECVD Methods. *Coatings* 2018, 8, 418. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

16. Finsterle, T.; Černá, L.; Hrzina, P.; Rokusek, D.; Benda, V. Diagnostics of PID Early Stage in PV Systems. *Energies* 2021, 14, 2155. [Google Scholar] [CrossRef]

17. Swanson, R.M.; Cudzinovic, M.; DeCeuster, D.; Desai, V. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells. In Proceedings of the 15th International PVSEC, Shanghai, China, 10–15 October 2005; pp. 410–411. [Google Scholar]

18. PIDbox Mini—Illumen. Illumen. 2021. Available online: <https://www.ilumen.be/en/all-products/pid-box-mini/> (accessed on 24 June 2021).

19. Vigdu.com. 2021. Available online: <https://www.vigdu.com/anti-pid-residential-systems> (accessed on 24 June 2021).

20. PID Technology—You Have PID Issues Take the PADCON Protection and Solution for This Problem.—PADCON—Future Technologies. Padcon.com. 2021. Available online: https://www.padcon.com/en/effective_PID_technology_for_pv_systems.html (accessed on 24 June 2021).

21. Liu, H.-C.; Huang, C.T.; Lee, W.K.; Lin, M.-H. High Voltage Stress Impact on P Type Crystalline

Silicon PV Module. *Energy Power Eng.* 2013, 5, 455–458. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

22. Dolnik A.G., Rectifiers with voltage multiplication (Gosenergoizdat issue 146, 1952).

23. Korostelin A.V. Switching power supplies, Element base, architecture and repair (2020).

24. Jochen's High Voltage Page Basic multiplier circuits <http://www.kronjaeger.com/hv/hv/src/mul/>.

METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF POLARIZATION- INDUCED DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS

Arifov ¹A.M., Bekirov ²E. A.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Physics and Technology Institute,
4, p. Vernadsky, Simferopol, 295007, Russian Federation
E-mail: ¹arifov.alim@inbox.ru, ²bekirov.e.a@cfuv.ru.

Abstract: The paper studies the factors that directly affect the development of the effect of potential-induced degradation (hereinafter referred to as PID) in photovoltaic modules, the consequences of this process, and also proposes a method for regenerating photovoltaic modules, confirmed by field experiments, which allows restoring their characteristics to the values declared by the manufacturer.

The phenomenon (PID) is characterized by the loss of power of photovoltaic modules under the influence of a high voltage level that occurs in the semiconductor layer between the frame, the glass surface and the solar cells. This effect may be insignificant at an early stage, but becomes noticeable over time in later stages (months, years), causing significant power losses. However, it is not always easy to determine the main reason for the occurrence of this process, the process seems especially undesirable from the point of view that the projects of any modular systems for converting solar energy into electrical energy, as well as large solar power plants, assume operation for at least 25-30 years. An unexpected significant decline in their production is a catastrophe, both technically and economically.

Subject: the effect of surface polarization that occurs on p and n type photovoltaic modules, as a result of the appearance of a high potential difference between the photocell and the aluminum frame of the photovoltaic module, as well as the reversibility of this process.

Materials and methods: in this work, full-scale tests were carried out for the first time, using a device (voltage converter) developed specifically for these purposes, with the help of which conditions were created for the accelerated development (PID) of the effect in the photovoltaic module, followed by its regeneration and analysis of the results obtained.

Results: for the first time, the results of full-scale tests were obtained, which indicate that the process of polarization-inductive degradation is reversible.

Conclusions: the measured characteristics of the parameters in the graphs showed a clear decrease in the electric power generation of the PV module after the forced application of PID, and then an improvement in performance after the completion of the regeneration process. Thus, the analysis presented in this article is confirmed by practically experimental results.

Key words: Potentially-induced degradation; photovoltaic module; regeneration; polarizing effect.

УДК 621.311.3:621.316.925.1 (292.471)

АНАЛИЗ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ ВЛ 110 КВ С ОТПАЙКОЙ НА СОЛНЕЧНУЮ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЮ.

Тынчерова¹ Э.Л., Бекиров² Э.А.

Физико-технический институт, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.
e-mail: ¹elmira_simf@mail.ru; ²bekirov.e.a@cfuv.ru

Аннотация. Данная статья посвящена анализу причин замедления в работе дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) воздушной линии (ВЛ) с трехсторонним питанием, одним из питающих концов которой является солнечная электростанция. Анализ выполнен на примере работы ДФЗ ВЛ 110 кВ «Симферопольская – ТЭЦ – Скворцово с отпайкой на ПС Водовод» при одновременном сочетании двухфазного короткого замыкания и обрыва фазы на этой линии. При этом ПС Водовод является схемой выдачи мощности солнечной ЭС «Перово» установленной мощностью 105,56 МВт.

Предмет исследования: поведение дифференциально-фазной защиты в условиях сложной несимметрии на линии с трехсторонним питанием, одним из концов которой является солнечная станция.

Материалы и методы: в работе использовались осциллограммы с регистраторов аварийных событий и микропроцессорных терминалов устройств РЗА. Для обработки и анализа данных использовался математический аппарат теории электрических цепей.

Ключевые слова: комбинированный фильтр, ток манипуляции, ВЧ-сигнал, приемник, передатчик, симметричные составляющие.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Надежность функционирования устройств РЗА ВЛ напряжением 110 кВ и выше с двусторонним питанием, в соответствии с нормативными документами ОАО «ФСК ЕЭС», обеспечивается установкой не менее двух комплектов защит: основного и резервного. В качестве основной защиты ВЛ в отечественной практике релейной защиты традиционно используется дифференциально-фазная высокочастотная защита (ДФЗ)[1,3,6].

Значительный вклад в разработку принципов работы и усовершенствование алгоритмов работы ДФЗ внесли советские и российские ученые. Г.И. Атабековым [4] были выявлены недостатки работы ДФЗ, связанные с возможностью отказов срабатывания защиты по принципу ее действия при однофазном коротком замыкании (КЗ) с обрывом фазы. Исследования работы ДФЗ при сложных видах повреждений были продолжены в работах А.Б. Чернина[7]. В частности, им была показана возможность отказа защиты при определенных параметрах сети. В работах А.И. Левиуша и Н.А. Дони [6] указано на смещение и увеличение зоны блокировки ДФЗ, связанные с использованием высокочастотного канала связи для передачи информации.

Задачи совершенствования алгоритмов функционирования ДФЗ актуальны и связаны прежде всего с обеспечением селективности защиты при сочетании неполнофазного режима и внутреннего КЗ[2,8,9]; обеспечением динамической устойчивости функционирования защиты в переходных режимах; повышением быстродействия защиты; обеспечением возможности совместной работы различных исполнений ДФЗ на концах защищаемой линии [5,11-13].

В связи с активным использованием в современной энергетике нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ) задача анализа поведения ДФЗ на линии с отпайкой на солнечную станцию весьма актуальна. Проведенный анализ причин замедления срабатывания ДФЗ ВЛ-110 кВ с отпайкой на СЭС позволил разработать несколько вариантов технических решений, позволяющих повысить быстродействие и надежность основной защиты линии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема участка сети, на котором произошло рассматриваемое технологическое нарушение, изображена на рисунке 1.

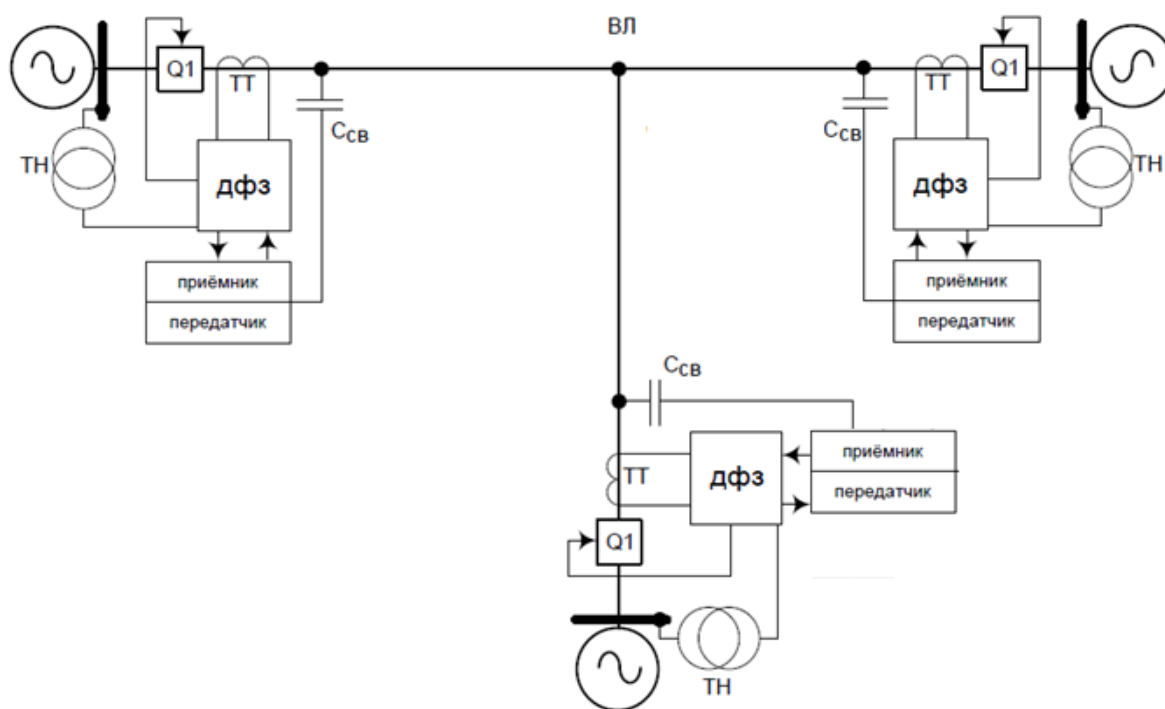


Рис. 2. Взаимодействие полукомплектов ДФЗ на защищаемой линии
Fig. 2. Interaction of half-sets of differential phase protection on the protected line

Уставки измерительных органов для всех полукомплектов данной ВЛ одинаковы и составляют: $I_1=800/1100$ А, $I_2=60/120$ А, где числитель – значение тока соответствующей последовательности, при котором происходит пуск приемопередатчика, а знаменатель – значение тока соответствующей последовательности, при котором происходит срабатывание отключающего органа (при условии определения локализации повреждения в защищаемой зоне). Пуск по 3Ю выведен.

Согласно методу симметричных составляющих [2,7], с учетом фазного множителя a , вектор тока прямой последовательности определяется по формуле:

$$I_1 = (I_A + I_B * a + I_C * a^2) \quad (2)$$

где $a = e^{j120}$, $a^2 = e^{j240}$ – операторы поворота;
 I_A, I_B, I_C – фазные токи фаз А, В, С соответственно.

Вектор тока обратной последовательности определяется по формуле:

$$I_2 = (I_A + I_B * a^2 + I_C * a) \quad (3)$$

Принцип действия ДФЗ поясним на примере двухконцевой ВЛ – рис.3.

При КЗ вне защищаемой зоны (рис. 3, а) ток короткого замыкания на одном конце защищаемой линии идет от шин в линию, а на другом – с линии в

шины. Поэтому токи $I_{1в}$ и $I_{2в}$, проходящие во вторичных цепях от трансформаторов тока (ТТ) к защите, сдвинуты на угол, близкий к 180° , а значит передатчики обоих концов работают не одновременно и ВЧ-импульсы, генерируемые ими, сдвинуты по фазе примерно на полпериода промышленной частоты. Вследствие этого промежутки между импульсами токов высокой частоты передатчика ПС1 заполняются ВЧ-импульсами, приходящими с конца линии ПС2, и оба приемника непрерывно принимают ВЧ-сигналы. При этом в получаемом от приемника сигнале отсутствуют паузы и защита на отключение не действует.

При повреждении в защищаемой зоне токи на обоих концах идут от шин в линию (рис. 3, б). При совпадении по фазе первичных токов по концам линии, угол между вторичными токами $I_{1в}$ и $I_{2в}$ приблизительно равен 0° . При этом передатчики на обоих концах линии работают одновременно и посылаемые ими ВЧ-импульсы примерно совпадают по фазе. В этом случае ВЧ-импульсы накладываются друг на друга, вследствие чего промежутки между ними остаются незаполненными. При перерывах в приеме токов высокой частоты на входе терминала сигнал ВЧ-приема будет нулевым. При превышении паузой величины уставки выдается сигнал о срабатывании [3].

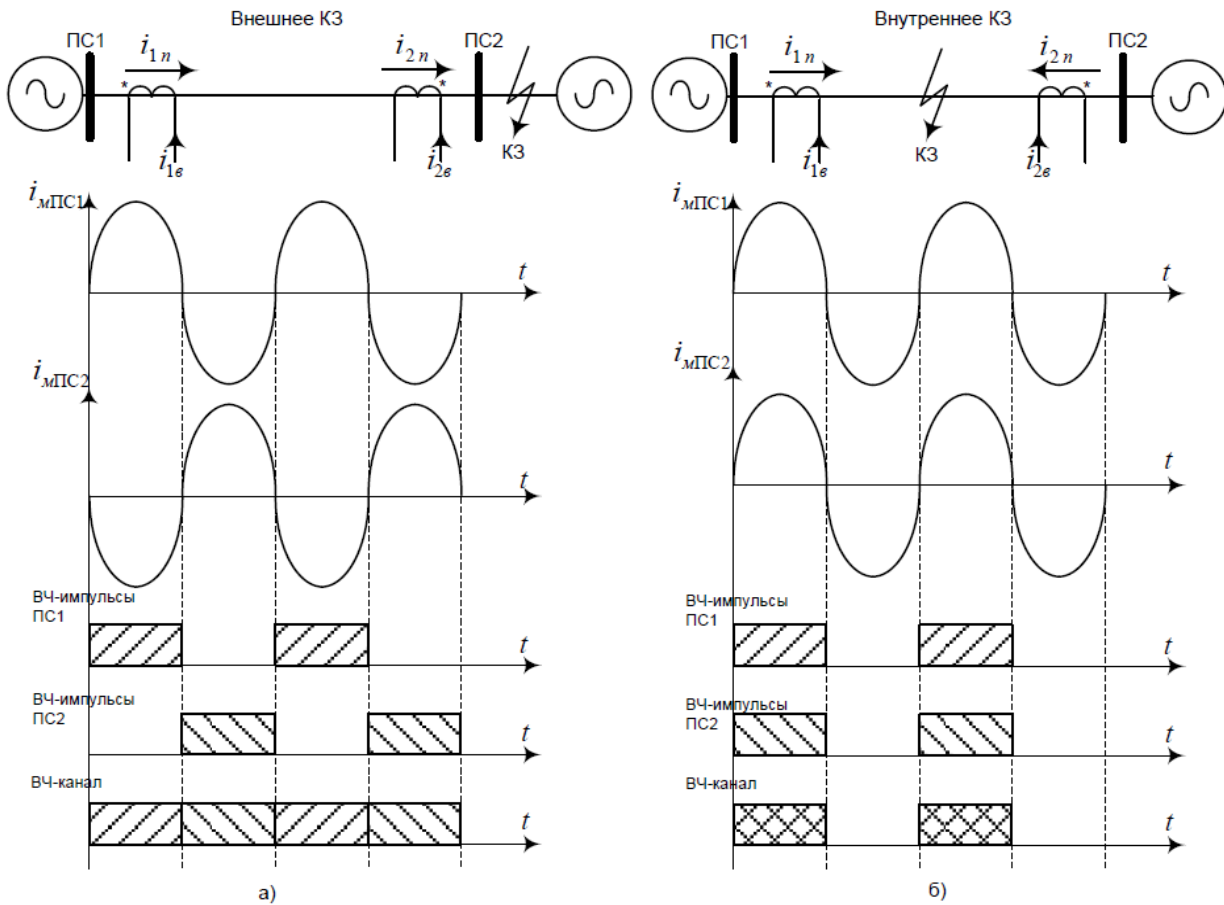


Рис. 3. Действие ДФЗ при различных КЗ: а) внешнее КЗ; б) КЗ на защищаемой линии
 Fig. 3. Action of differential phase protection at various short-circuits:
 a) external short-circuit; b) short circuit on the protected line

Анализ технологического нарушения

По данным представленных ниже осциллограмм, были вычислены и построены вектора токов манипуляции для каждого конца ВЛ в один и тот же момент времени. Для определения взаимного расположения векторов токов манипуляции разных концов ВЛ все векторные диаграммы [10] построены относительно вектора

U_A . Для сравнения параметров режима в один и тот же момент времени со стороны разных подстанций электрические параметры доаварийного и послеаварийного режимов зафиксированы за 3 периода до и 3 периода после начала технологического нарушения соответственно.

Электрические параметры режимов, зафиксированные на подстанциях с трех сторон ВЛ представлены в таблице 1.

Табл.1. Параметры аварийного и доаварийного режимов со стороны ПС 110 кВ Водовод, ПС 110 кВ Саки, Симферопольская ТЭЦ

Tabl.1. Parameters of emergency and pre-emergency modes from the SS 110 kV Vodovod, SS 110 kV Saki, Simferopol CHPP

Объект Режим Эл-й параметр	ПС 110 кВ Водовод		ПС 110 кВ Саки		Симферопольская ТЭЦ	
	Доаварийный режим	Аварийный режим	Доаварийный режим	Аварийный режим	Доаварийный режим	Аварийный режим
U_A кВ	68,84	65,29	66,5	64,1	67,0	64,3
ϕ_A град.	0°	0°	0°	-7°	0°	-6°
U_B кВ	66,94	34,96	66,9	43,8	65,7	40,4
ϕ_B град.	-118°	-176°	-120°	-148°	-119°	-153°
U_C кВ	76,34	37,38	66,8	40,3	66,0	36,3
ϕ_C град.	127°	-174°	120°	130°	119°	135°
$3U_0$ кВ	8,95	8,66	0,7	0,9	2,7	2,8
ϕ_{3U0} град.	170°	-142°	-23°	32°	10°	40°
I_A кА	0,322	0,233	0,09	0,10	0,40	0,28
ϕ_A град.	-16°	-30°	34°	16°	174°	159°
I_B кА	0,481	0,208	0,05	1,10	0,53	3,67

фв град.	-105°	-70°	-123°	-161°	75°	-164°
I _c кА	0,256	0,003	0,10	0,94	0,33	3,68
фс град.	156°	94°	126°	24°	-32°	18°
I ₁ кА	0,333	0,109	0,075	0,61	0,41	2,07
φ ₁ град.	10°	9°	15°	-62°	-168°	-75°
I ₂ кА	0,004	0,032	0,014	0,57	0,006	2,14
φ ₂ град.	-94°	-91°	-8°	106°	150°	109°
I ₁₀ кА	0,451	0,415	0,09	0,11	0,38	0,37
φ _{3ю} град.	-96°	-49°	98°	152°	-93°	-38°
I _{мк} А	-	0,205	-	2,84	-	10,77
φ _м град.	-	-59°	-	103°	-	110°

На осциллограмме с Симферопольской ТЭЦ (рис. 4) видно пропадание токов через 561 мс от начала аварийного режима, что свидетельствует об отключении выключателя данного присоединения. На осциллограмме с ПС 110 кВ Саки (рис. 5) отключение происходит через 665 мс. На обеих упомянутых осциллограммах в момент

возникновения аварии наблюдается значительное увеличение токов по фазам В и С, угол между векторами токов фаз В и С приблизительно 180°, что свидетельствует о двухфазном КЗ на линии, фиксируемом со стороны Симферопольской ТЭЦ и ПС Скворцово.

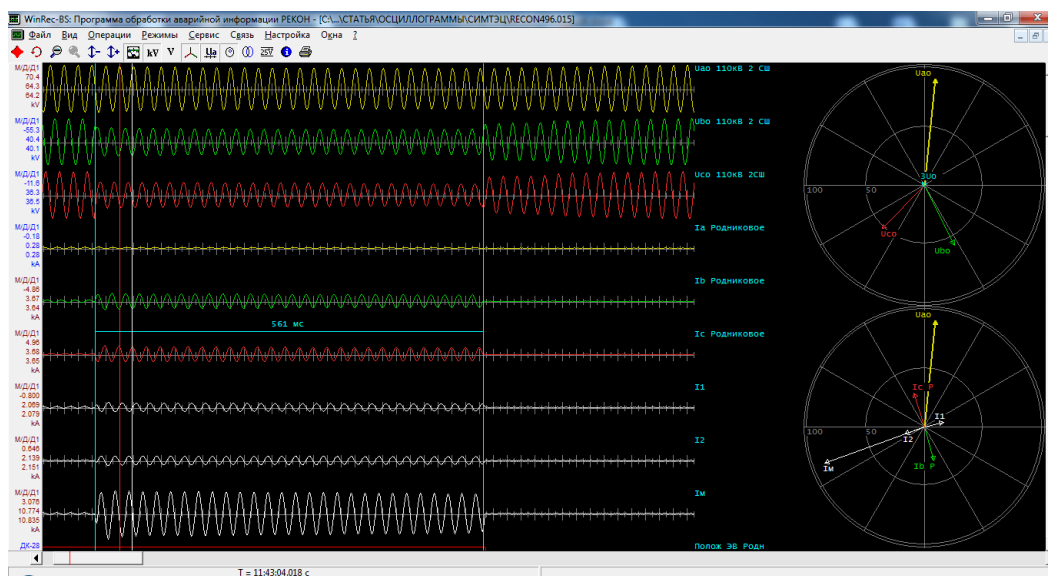


Рис. 4. Осциллограмма с Симферопольская ТЭЦ
Fig. 4. Oscillogram from Simferopol CHPP

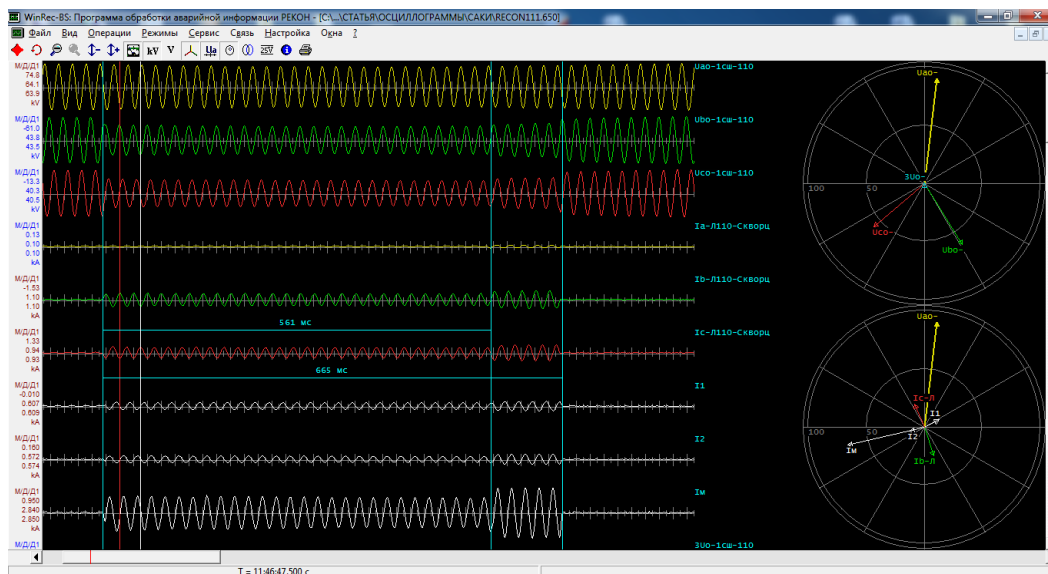


Рис. 5. Осциллограмма со стороны ПС 110 кВ Саки
Fig. 5. Oscillogram from the 110 kV Saki substation side

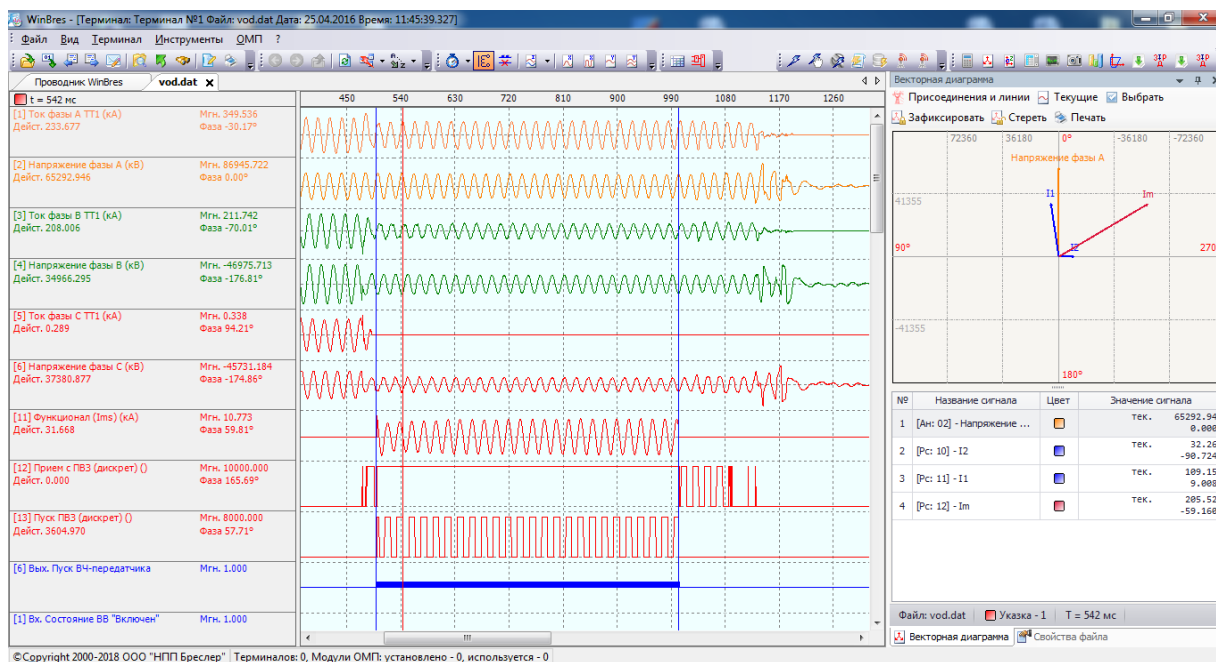


Рис. 6. Осциллограмма со стороны ПС 110 кВ Водовод
Fig. 6. Oscillogram from the 110 kV Vodovod substation side

На осциллограмме со стороны ПС Водовод (рис. 6) видно пропадание тока по фазе С, что свидетельствует об обрыве соответствующего фазного провода ВЛ.

Согласно взаимным расположениям векторов токов манипуляции по концам защищаемой ВЛ видно, что вектор I_M на ПС 110 кВ Водовод находится практически в противофазе по отношению к векторам I_M ПС 110 кВ Саки и Симферопольская ТЭЦ (осциллограмма рис. 7 и электрическая схема рис. 8). Таким образом, исходя из описанного выше принципа работы защиты, полукомплект защиты ДФЗ на ПС 110 кВ Водовод блокирует действие на отключение полукомплектов на других сторонах ВЛ, несмотря на наличие повреждения в защищаемой зоне, что наглядно видно по дискретным сигналам осциллограммы с ПС Водовод (рис. 6).

Сигнал 12 (рис. 6) «Прием с ПВЗ» (ток приема) представляет состояние ВЧ-канала, то есть наложение ВЧ-импульсов посылаемых полукомплектами каждого конца. Если этот сигнал сплошной (без пауз), то защита ни одного полукомплекта сработать не может. Как только в ВЧ-канале появляются паузы достаточной длительности (задается углом блокировки), то полукомплекты каждого конца линии, где уставка отключающего органа достигнута, будут воздействовать на отключение выключателя защищаемой ВЛ.

Сигнал 13 (рис. 6) представляет ВЧ-импульсы посылаемые приемопередатчиком ПС 110 кВ Водовод. Пуск ВЧ-передатчика был осуществлен пусковым органом по I₂ (60,5 А) в момент обрыва фазы С и наброса шлейфа на фазу В. Со стороны ПС Водовод междуфазное КЗ не просматривается из-за обрыва фазы С, а имеет место неполнофазный

нагрузочный режим при пониженном напряжении фаз В и С. При этом выдача мощности со стороны СЭС в систему сокращается в 3 раза и также уменьшается значение I₂, уже недостаточное для пуска ВЧ передатчика. Однако, в соответствии с алгоритмом функционирования органа манипуляции в полукомплекте «Диамант», установленном на ПС Водовод, продолжительность манипуляции при отсутствии пауз в суммарном ВЧ сигнале приемника, составляет 0,5 сек, что подтверждается рис.6. На этом рисунке видно, что после пропадания упомянутого сигнала через 505 мс от начала аварии, в сплошном сигнале 12 появляются паузы, вследствие того, что приемопередатчик на ПС 110 кВ Водовод остановился. Последнее позволяет сработать полукомплектам ДФЗ на ПС 110 кВ Скворцово и Симферопольская ТЭЦ и отключить ВЛ. Отключение происходит не сразу поскольку на работу высоковольтного выключателя требуется время.

Отключение выключателя со стороны ПС 110 кВ Водовод ввиду возврата ДФЗ не производилось. Выдача мощности СЭС прекращается с исчезновением напряжения от системы, поэтому отключение выключателя со стороны ПС Водовод не требуется. Поскольку на СЭС установлены инверторы ведомые сетью, при отключении ВЛ со стороны ПС 110 кВ Скворцово и Симферопольской ТЭЦ исчезает напряжение, подводимое к СЭС, и инверторы отключаются, что видно на осциллограммах (рис. 7). После отключения ВЛ со стороны ПС Скворцово (665 мс от начала КЗ) ток подпитки с ПС Таврия пропадает, а напряжение становится несинусоидальным и в конечном итоге пропадает, ввиду особенностей работы инверторов.

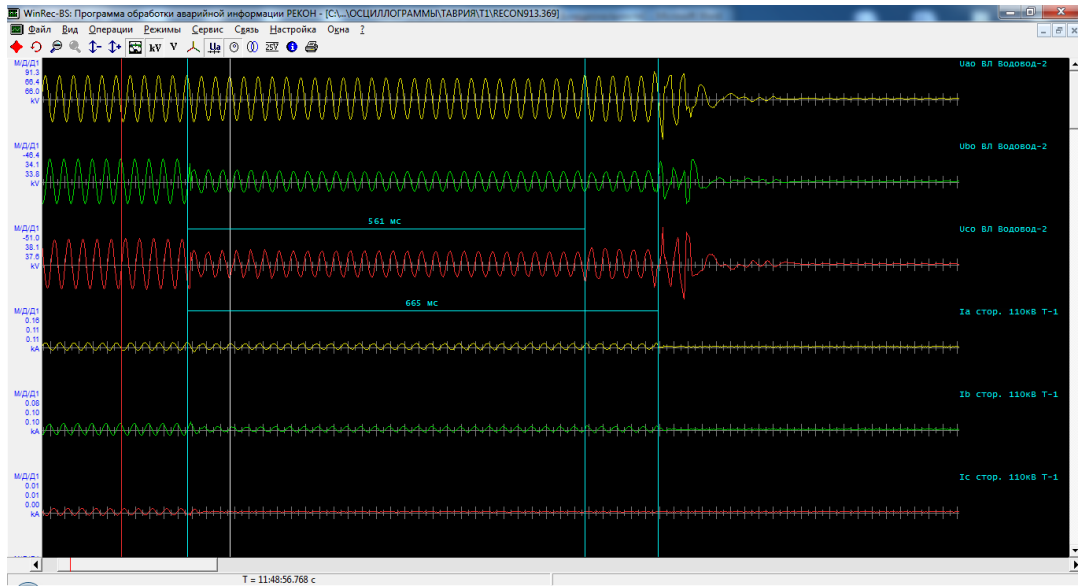


Рис. 7. Осциллограмма со стороны ПС 110 кВ Таврия (1 секция шин)
 Fig. 7. Oscillogram from 110 kV Tavriya AC (1 bus section)

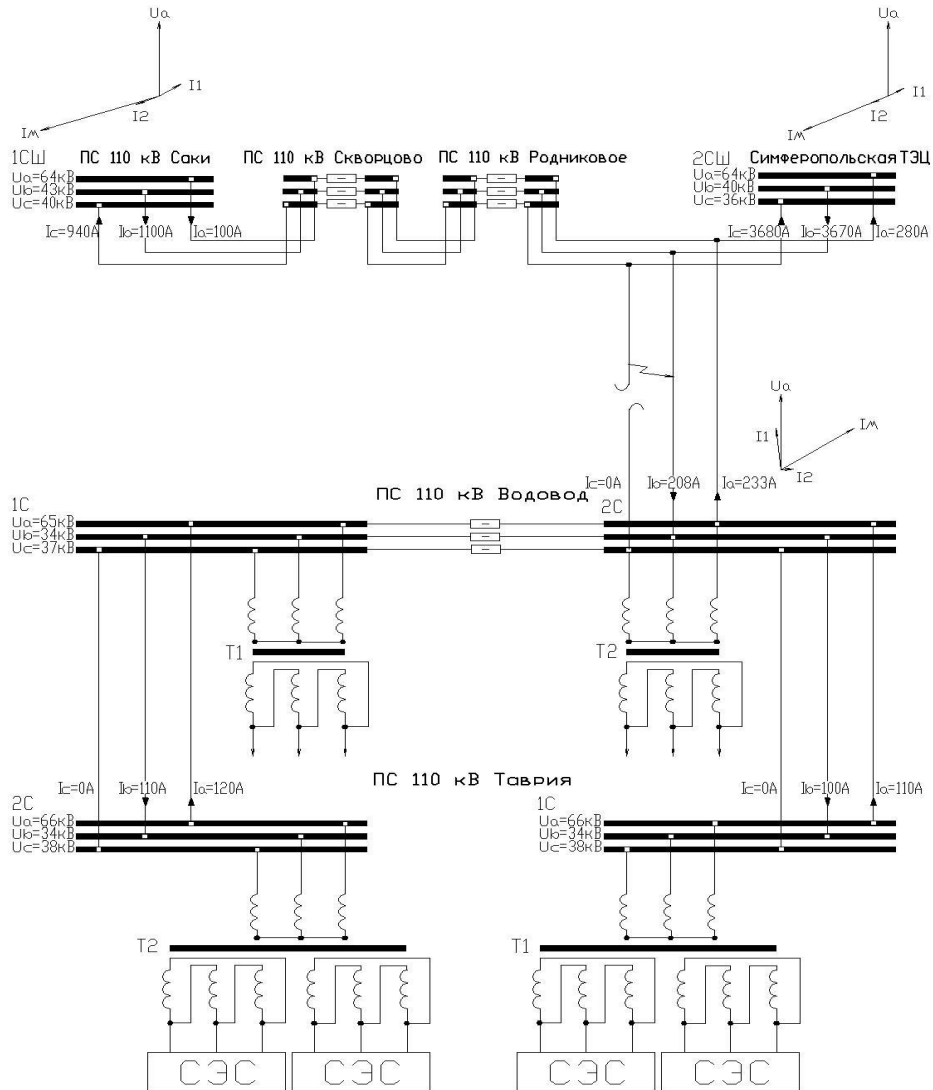


Рис. 8. Распределение токов КЗ и векторные диаграммы токов манипуляции в момент технологического нарушения
 Fig. 8. Distribution of short-circuit currents and vector diagrams of manipulation currents at the moment of technological disturbance

Таким образом исходя из данных осциллограмм можно представить следующую картину аварийного режима, которую отображает рисунок 8.

Из анализа векторных диаграмм следует, что полукомплект ДФЗ на ПС 110 кВ Водовод работал исправно и, согласно фазам токов манипуляции по концам ВЛ, блокировка остальных полукомплектов ДФЗ была правильной, однако повреждение находилось в защищаемой зоне, и защита должна была отключить линию с минимальной выдержкой времени. Причиной различной ориентации вектора тока манипуляции на отпаечной подстанции по отношению к векторам тока манипуляции питающих концов ВЛ стал обрыв фазы С со стороны ПС 110 кВ Водовод, который не просматривался со стороны Симферопольской ТЭЦ и ПС 110 кВ Скворцово. Со стороны питающих концов линии имело место двухфазное КЗ фаз В и С, которое не просматривалось со стороны отпаечной ПС Водовод.

ВЫВОДЫ

1. Работа дифференциально-фазной защиты во многом зависит от параметров сети, а также от места и вида повреждения. Анализ показал, что существует большая вероятность увеличения времени срабатывания ДФЗ или отказа срабатывания защиты при наложении неполнофазного режима работы сети и внутреннего КЗ.

2. В рассмотренном аварийном режиме работы ДФЗ на ВЛ-110 кВ с трехсторонним питанием, одной из сторон которой является схема выдачи мощности СЭС, основной причиной задержки в срабатывании ДФЗ явилась затяжная работа органа манипуляции полукомплекта со стороны СЭС.

3. Для исключения увеличения времени срабатывания ДФЗ из-за блокировки защиты органом манипуляции со стороны подстанции-схемы выдачи мощности СЭС предлагаются следующие варианты технических решений:

- Замена всех полукомплектов ДФЗ защищаемой ВЛ на новые полукомплекты защиты на микропроцессорной элементной базе с наличием функции выявления обрыва, основанной на реле направления мощности нулевой последовательности. При этом в случае обрыва в зоне действия защиты приемопередатчик останавливается, а если выявлен обрыв вне защищаемой зоны то, посредством посылы сплошного ВЧ-сигнала в канале связи блокируются все полукомплекты защит линии.

- Замена полукомплекта ДФЗ со стороны СЭС (или со стороны отпаечной подстанции) на неполный полукомплект, в составе которого есть реле направления мощности. В случае возникновения КЗ за отпаечной подстанцией, остальные полукомплекты заблокируются посредством приема сплошного ВЧ-сигнала от неполного полукомплекта на этой подстанции, а при обрыве в защищаемой зоне приемопередатчик на

отпаечной подстанции не пустится, чем даст разрешение на срабатывание другим полукомплектам ДФЗ. Это решение дешевле предыдущего, но недостатком его является зависимость неполного полукомплекта от цепей напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110- 330 кв. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 9. – М.: Энергия, 1972.

2. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1979. 184 с.

3. Овчаренко Н.И. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий электропередачи напряжением 110-220 кВ ДФЗ-201. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2002. – 72 с.

4. Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.

5. СТО 56947007–29.120.70.241–2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 223 с.

6. Дони Н.А., Левиуш А.И. Особенности микропроцессорной быстродействующей направленной дифференциально-фазной защиты ВЛ 330-750 КВ //Релейная защита и автоматизация. 2013, №2. С.30-46.

7. Лосев С.Б. , Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем - М.: Энергоатомиздат, 1983. 356 с

8. Бобров С.Е. Анализ работы дифференциально-фазной защиты при наложении короткого замыкания на доаварийный неполнофазный режим//Вестник ИГЭУ. – 2018. – №2. – С.1-7.

9. Дорохин Е.Г. Основы эксплуатации релейной защиты и автоматики. Кн.2: Оперативное обслуживание устройств РЗА и вторичных цепей. «Советская Кубань», 2012. – 432 с.

10. Степанов Ю.А. Совершенствование релейной защиты на примерах построения векторных диаграмм. – М.: Энергоатомиздат, 1999. 258с

11. Зацаринная Ю.Н., Рахматуллин Р.Р., Хабибуллин М.Н., Логачева А.Г. Особенности эксплуатации релейной защиты воздушных линий, выполненной на разной элементной базе // Вестник ИГТУ. – 2017. – №2. – С.12-18.

12. Ефремов В.А., Ефремов А.В. НВЧЗ для линий с ОАПВ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 5(50). – С. 76-78.

13. Абоу Накира Ш.С. Повышение эффективности продольной дифференциальной защиты воздушных линий электропередачи //

Научно-технические ведомости СПбГПУ. – № 1. – Том 23. – 2017. – С. 140-156.

REFERENCES

1. Differential-phase high-frequency protection of lines 110-330 kv. Guidelines for relay protection. Issue 9. – M.: Energia, 1972.
2. Averbukh A.M. Primery` raschetov nepolnofaznykh rezhimov i korotkikh замыkaniy. [Examples of calculations of open-phase modes and short circuits]. L.: Energiya. Leningr. otd-nie, 1979. – 184 p.
3. Ovcharenko N. I. Differencialno-faznaya vysokochastotnaya zashhita liniy elektroperedachi napryazheniem 110-220 kV DFZ-201. [Differential-phase high-frequency protection of power lines with a voltage of 110-220 kV DFZ-201] – M.: NTF «Energoprogress», 2002. – 72 p.
4. Atabekov G. I. Teoreticheskie osnovy releinoy zashhity vysokovolnykh setey. [Theoretical foundations of relay protection of high-voltage networks]. – M.: Gosenergoizdat, 1957. – 344 p.
5. STO 56947007-29.120.70.241-2017. Technical requirements for microprocessor relay protection devices. Organizational standard of PAO «FSK EES». – M.: PAO «FSK EES», 2017. – 223 p.
6. Doni N.A., Leviush A.I. Features of microprocessor-based high-speed directional differential-phase protection of 330-750 KV overhead lines // Relejnaya zashhita i avtomatizatsiya. – 2013. – №2. – Pp.30-46.
7. Losev S.B., Chernin A.B. Vychislenie elektricheskikh velichin v nesimmetrichnykh rezhimakh elektricheskikh system [Calculation of electrical quantities in asymmetric modes of electrical systems]. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 356 p
8. Bobrov S.E. Analysis of the operation of differential-phase protection when a short circuit is applied to a pre-emergency open-phase mode // Vestnik IGEU. – 2018. – №2. – Pp.1-7.
9. Dorokhin E.G. Osnovy` ekspluatatsii relejnoy zashhity` i avtomatiki. [Fundamentals of operation of relay protection and automation]. Book 2: Operational maintenance of RPA devices and secondary circuits. «Sovetskaya Kuban`», 2012. – 432 p.
10. Stepanov Yu. A. Sovershenstvovanie relejnoy zashhity` na primerakh postroeniya vektornykh diagramm. [Improvement of relay protection on examples of constructing vector diagrams]. – M.: Energoatomizdat, 1999. 258 p.
11. Zatsarinnaya Yu.N., Rakhmatullin R.R., Khabibullin M.N., Logacheva A.G. Features of the operation of relay protection of overhead lines, made on a different element base // Vestnik IGTU. – 2017. – №2. – Pp.12-18.
12. Efremov V.A., Efremov A.V. NVCHZ for lines with OAPV // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. – 2018. – № 5(50). – Pp. 76-78.
13. Abou Nakira Sh.S. Improving the efficiency of longitudinal differential protection of overhead transmission lines. // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. – № 1. – Том 23. – 2017. – Pp. 140-156.

ANALYSIS OF OPERATION AND TECHNICAL SOLUTIONS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF DIFFERENTIAL-PHASE PROTECTIONS OF 110 KV POWER LINE WITH A TAP TO A SOLAR POWER PLANT.

Tyncherova² E.L., Bekirov¹ E.A.,

Physical-Technical Institute. V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
295007, Republic of Crimea, Simferopol, ave. Academician Vernadsky, 4.
e-mail: ¹bekirov.e.a@cfuv.ru; ²elmira_simf@mail.ru

Abstract. This article is devoted to the analysis of the reasons for the slowdown in the operation of differential-phase protection (DPZ) of an overhead line (OL) with a three-way supply, one of the supply ends of which is a solar power plant. The analysis was performed on the example of the operation of the DFZ of the 110 kV overhead line "Simferopolskaya - CHP - Skvortsovo with a tap at the Vodovod substation" with a simultaneous combination of a two-phase short circuit and phase failure on this line. At the same time, the Vodovod substation is a power distribution scheme for the Perovo solar power plant with an installed capacity of 105.56 MW.

Subject. The behavior of differential-phase protection in conditions of complex asymmetry on a three-way power line, one of the ends of which is a solar station.

Materials and methods: oscillograms from emergency event recorders and microprocessor terminals of relay protection devices were used in the work. For data processing and analysis, the mathematical apparatus of the theory of electrical circuits was used.

Key words: combined filter, manipulation current, RF signal, receiver, transmitter, symmetrical components

Раздел 4. Экологическая безопасность

УДК: 556.18 + 626/627

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ ЕСТЕСТВЕННОГО СТОКА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ И Г. СЕВАСТОПОЛЯНиколенко И.В.¹, Каримов Э.А.², Боков С.А.³, Авдеева Д.В.⁴^{1,3,4} ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181.¹ e-mail: nikoshi@mail.ru² Симферопольский филиал ГБУ РК «Крыммелиоводхоз»² e-mail: karimov_ervin@mail.ru

Аннотация. В статье выполнена оценка степени наполнения водохранилищ естественного стока Крымского полуострова в 2021 и 2022 г. и анализ потерь водных ресурсов, для обоснования возможных способов решения проблем дефицита водных ресурсов в Крыму в периоды маловодных лет. Несмотря на разблокирование Северо-Крымского канала и восстановление подачи на полуостров Крым днепровской воды для вододефицитных периодов региона необходим поиск методов обеспечения водной безопасности на основе современных технологий по снижению потерь водных ресурсов. Представлены сводные графики потерь водных ресурсов за счет фильтрации и испарения. Проведен анализ полученных результатов и показана возможность дальнейших исследований с целью нахождения наиболее рациональных методов сокращения потерь водных ресурсов. Проведен анализ полученных результатов, а также даны рекомендации по возможности их реализации.

Предмет исследования. Степень наполнения водохранилищ естественного стока Крымского полуострова в 2021 и 2022 г., а также потери водных ресурсов из этих водохранилищ, для обоснования способов решения проблем обеспечения водной безопасности Республики Крым и города Севастополя в периоды с дефицитом осадков.

Материалы и методы исследования: Выполнен сбор, систематизация, статистическая обработка и анализ закономерностей степени наполнения водохранилищ естественного стока Крымского полуострова в течении 2021 и 2022 годов по информации Государственного комитета по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым. Проведен анализ потерь водных ресурсов в этих водохранилищах, как факторов, влияющих на возникновения дефицита водных ресурсов на полуострове, на основе которого выполнена оценка способов его решения.

Результаты. Установлены факторы, влияющие на степень наполнения водохранилищ естественного стока Крымского полуострова, а также обоснована необходимость анализа потерь водных ресурсов из них. Выполнена оценка потерь на испарения и фильтрации из водохранилищ естественного стока Крымского полуострова. Установлены значения фактических величин потерь воды на испарения из Симферопольского водохранилища.

Выводы. Выполненный анализ наполняемости водохранилищ естественного стока Крыма за многолетний период, потерь воды в 2021-2022 годах показал, что дефицит воды наиболее часто возникает при двух и более маловодных годах подряд, когда приток в водохранилища меньше годового водозабора. Исследования закономерностей степени наполнения водохранилищ естественного стока Крымского полуострова за многолетний период установлено, что одним из способов решения проблем дефицита водных ресурсов в Крыму является снижение потерь водных ресурсов на испарение. Для оценки способов решения проблем дефицита водных ресурсов путем сокращения испарения воды с поверхности водохранилищ естественного стока необходимо исследование потерь воды на испарение различными экспериментальными методами, а также расчетными формулами, учитывающими большинство факторов, влияющих на потери на испарение воды.

Ключевые слова: водные ресурсы, потери, дефицит, водохранилище естественного стока, наполнение, испарение.

ВВЕДЕНИЕ

Водный кризис – данное словосочетание становится все более актуальным во многих регионах Земли. Учеными определены такие факторы вододефицита, такие как нерациональное использование водных ресурсов, антропогенная нагрузка на объекты пресной воды, недостаточная эффективность водоочистки, а также потери водных ресурсов по причинам их фильтрации и испарения с зеркал водохранилищ. Определением дефицита по воде страны или региона в других исследованиях принимается удельная водообеспеченность менее 1000 м³ в год или 2740 л на человека в день при котором нехватка воды становится серьезным препятствием для устойчивого развития, то есть для

производства продовольствия, экономического развития и защиты природных систем [1].

Несмотря на разблокирование Северо-Крымского канала (СКК) в марте 2022 года при проведении специальной военной операции и восстановление подачи на полуостров Крым днепровской воды необходим поиск методов обеспечения водной безопасности в периоды с дефицитом осадков на основе современных водных технологий. Система водопользования на основе использования днепровской воды, подаваемой по СКК, разрабатывалась и создавалась на основе водных технологий середины и конца прошлого века. На данный момент водохранилища естественного стока являются одним из основным источником водоснабжения для Крыма, и они имеют годовую сезонную и территориальную

неравномерность, то вопросы учета воды, а также сокращения потерь воды из водохранилищ являются актуальными.

Собственные водные ресурсы Республики Крым (РК) весьма ограничены, а восстановление доступа днепровской воды по Северо-Крымскому каналу позволяет эффективно решать проблемы сельскохозяйственного водопользования, а также обеспечения водной население Восточного Крыма. В связи с ярко выраженной территориальной и сезонной неравномерностью осадков и речного стока – одного из основных источников пресной воды – для ее сезонного накопления и дальнейшего использования на территории Крымского п-ова сооружено 15 водохранилищ естественного стока общим полным объемом до 253.0 млн. м³. Из этих водохранилищ осуществляется водоснабжение населенных пунктов Южного берега Крыма, Симферополя и Севастополя [3]. Из наливных водохранилищ СКК идет водоснабжение населенных пунктов Керченского полуострова, Феодосийско-Судакского региона.

Особенностью Крымского полуострова являются его природно-климатических условия, которые в маловодные годы создают локальные дефициты водных ресурсов для обеспечения нужд питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. В эти периоды засуха, высокая температура воздуха, ветровая нагрузка лишь усугубляет данную проблему повышая показатели испарения с поверхностей зеркал водохранилищ. В силу этих факторов РК является одним из регионов Российской Федерации где вопросы дефицита водных ресурсов могут стоять чрезвычайно остро. В результате сильнейшего вододефицита в 2021 году стали применяться графики подачи воды населению. После введения ограничений на подачу воды ситуация изменилась. Количество людей, имеющих возможность принять душ несколько раз в день сократилось до 8,4%, стали принимать душ 1 раз в день - 60,7%; один раз в 2...3 дня – 19,6%; раз в 4 дня и реже – 11,3%. Изменилась частота мытья рук – 12,5% жителей города, из-за ограничения доступа к воде, стали мыть руки реже [2]. В связи с этим рассматриваются самые различные доступные способы экономии водных ресурсов, сокращения их потерь, а также совершенствование методов их добычи.

Таким образом, контроль за количеством водных ресурсов РК, их расходами, а также применение этих данных для будущих технических разработок и методов решения «водной проблемы» региона является первостепенной задачей для гарантированного обеспечения водой населения региона, а также ведения промышленной и рекреационной деятельности. Для минимизации потерь воды с поверхностных источников, необходимо в первую очередь провести анализ наполняемости Крымских водохранилищ, а также рассмотреть возможные причины изменения объема воды в них.

Объектом исследования настоящей статьи являются водохранилища естественного стока РК, которые являются источниками централизованного водоснабжения (ИЦВ) г. Симферополя, г. Севастополя, г. Алушты и населенных пунктов, расположенных на Южном Берегу Крыма (ЮБК). К водохранилищам, питающих г. Симферополь относятся: Симферопольское; Партизанское; Аянское, питающих г. Севастополь – Чернореченское; питающих населенные пункты, расположенные на южном берегу Крыма – Загорское и Счастливленское; питающих г. Алушта – Изобильненское и Кутузовское.

Предмет исследования: Анализ наполнения водохранилищ естественного стока Республики Крым; Испарение и фильтрация из водохранилищ естественного стока Республики Крым.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнялась на основе данных сводок о ходе наполнения, испарения и фильтрации водохранилищ естественного стока, предоставленных Государственным бюджетным учреждением (ГБУ) РК Крымское управление водного хозяйства и мелиорации. Одной из основных проблем государственного мониторинга водных объектов, для разработки мероприятий по повышению эффективности их использования является ограничение доступности информации о результатах анализа мониторинга водных объектов [4]. По разным источникам потребность Крыма в водных ресурсах составляет от 1,5 до 2 млрд м³/год [5]. По данным атласа «Минеральные ресурсы Крыма» потребность в воде на 2000 г. составляла 2649,1 тыс м³ /сут., то есть 0,97 млрд м³/год. Наибольшая потребность в воде населением и экономикой Крыма за прошедшие 30 лет была отмечена в 1990 г. – 3,9 млрд м³/год [6].

С целью учета количества водных ресурсов, его анализа и исследования зависимостей наполнений водохранилищ естественного стока, которые являются ИЦВ городов Крыма, построены графики временного хода их фактического наполнения за 2021-2022 год, которые представлены на рис. 1 – рис. 4.

На рис.1 показан временной ход суточных значений фактического наполнения водохранилищ ИЦВ г. Симферополя и его районов в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. Из анализа представленных зависимостей установлено, что в январе 2022 года фактическое наполнение Симферопольского водохранилища было в 5,4 раза больше чем в январе 2021 года, Партизанского – в 6 раз, Аянского – 24,4 раза. Это обусловлено тем, что 2020 год был на Крымском полуострове маловодным, что сократило фактические объемы наполнения этих водохранилищ практически до уровня мертвого объема. Для рассмотренных водохранилищ естественного стока 2022 год характеризовался активным увеличением фактического объема

наполнения в январе и феврале, а 2021 год - в июне и июле. Поэтому для Симферопольского водохранилища в объемы наполнения в начале марта 2022 года были в 9.8 раз больше, чем 2021 году, для Партизанского в начале февраля – в 6,4 раза больше. В Аянском водохранилище до середины мая 2022 года был заполнен полный проектный объем – 3,9 млн. м³, поэтому максимальное отношение уровня фактического

наполнения по сравнению с 2021 годом был в начале года, а в марте - августе объемы наполнения этого водохранилища были практически одинаковы. К октябрю 2022 года уровень фактического наполнения в Симферопольском водохранилище был больше 2,6 раза, чем в 2021 году, в Партизанском в 1,4 раза больше, а в Аянском в 1,6 раза меньше.

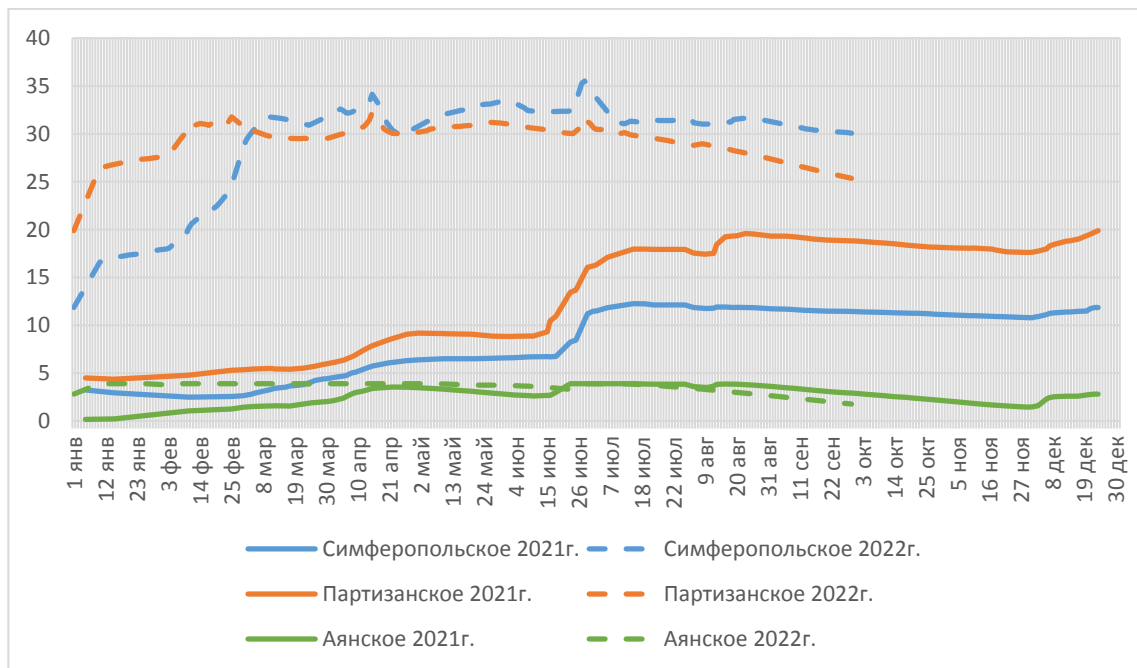


Рис.1 Временной ход фактического наполнение водохранилищ, ИЦВ г. Симферополя в млн. м³
Fig.1 Time course of actual filling of reservoirs, SCWS of Simferopol in million m³

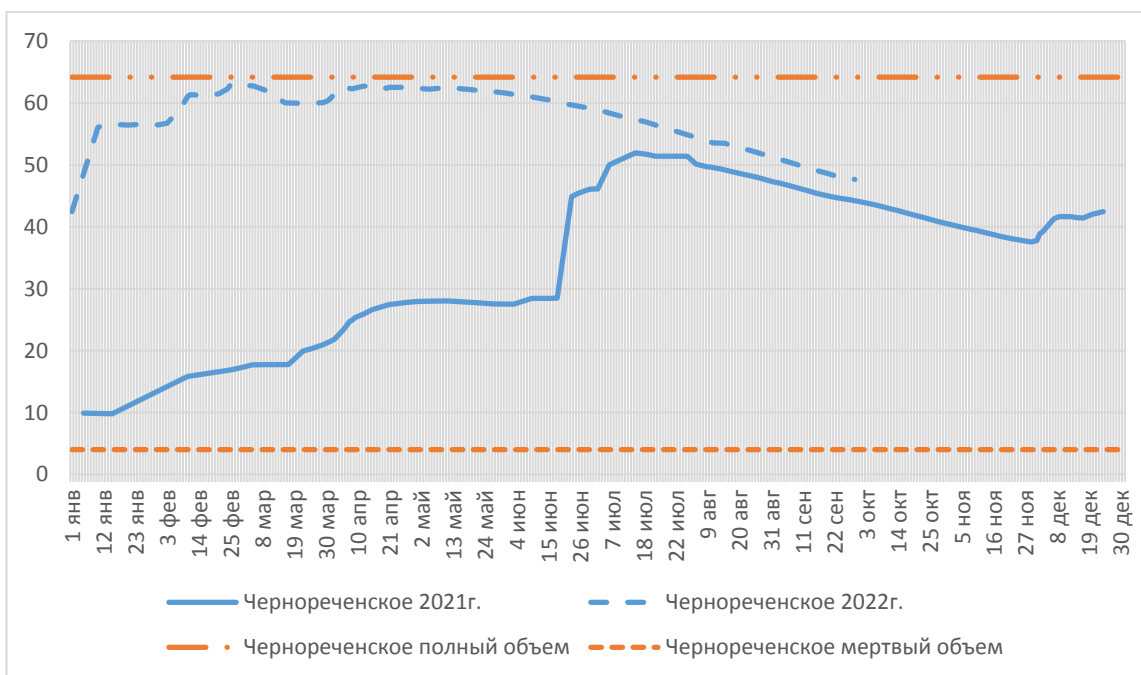


Рис. 2. Временной ход фактическое наполнение Чернореченского водохранилища, ИЦВ Севастополя (млн. м³)
Fig. 2. Time course actual filling of the Chernorechensk reservoir, SCWS of Sevastopol (million m³)

На рис. 2 показан временной ход суточных значений фактического наполнения Чернореченского водохранилища, самого крупного водохранилища на Крымском полуострове – ИЦВ г. Севастополя и его районов в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. Из анализа представленных зависимостей установлено, что в начале 2022 года фактическое наполнение Чернореченского водохранилища было в 4,4 раз больше чем в начале 2021 года. Это обусловлено тем, что летом 2021 года Чернореченское водохранилище получило большой приток, в 2020 год был на Крымском полуострове маловодным, что сократило фактические объемы наполнения водохранилища полного проектного объема 64 млн. м³ до фактического наполнения в 10 млн. м³. В январе-феврале 2022 года Чернореченское водохранилище пополнилось в конце февраля до 63 млн. м³ – практически до полного проектного объема. В виду зимнего притока 2022 г. в конце февраля фактический объем наполнения был больше в 3,7 раза чем в конце февраля 2021 г. Июнь – июль 2022 года характеризовался активным увеличением фактического объема наполнения Чернореченского водохранилища, что обеспечило наполнение более 50 млн. м³ до практически полного проектного объема. С этого периода объем фактического наполнения в 2021 и 2022 годах Чернореченского водохранилища уменьшался, но объем наполнения 2021 года был на 10 % больше.

На рис.3 показан временной ход суточных значений фактического наполнения Загорского и Счастливенского водохранилищ ИЦВ городов и поселков ЮБК в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. Из анализа представленных зависимостей установлено, что в январе 2022 года фактическое наполнение Загорского водохранилища было в 11,2 раза больше чем в январе 2021 года, а в Счастливенском водохранилище – в 4 раза больше. В начале 2021 года фактическое наполнение этих водохранилищ находилось на уровне мертвого объема. Показатели фактических объемов воды в Счастливенском и Загорском водохранилищ могут изменяться, так как они связаны между собой водоводом. Так, в случае снижения уровня воды в Счастливенском водохранилище, из которого непосредственно происходит водоснабжение Большой Ялты через туннель, перекачивается вода из Загорского водохранилища с помощью насосной станции 1-го подъема по водоводу. Полный проектный объем Загорском водохранилище составляет 27,85 млн. м³. С середины 2021 года фактическое наполнение находится на уровне 23...24 млн. м³ и держится на этом уровне до октября 2022 года. До конца июня 2022 года фактическое наполнение Счастливенского водохранилища было больше, чем этот показатель в конце июня 2021 года. До октября 2021 и 2022 года фактическое наполнение Счастливенского водохранилища снижалось до 5,8 и 5,2 млн. м³ соответственно.

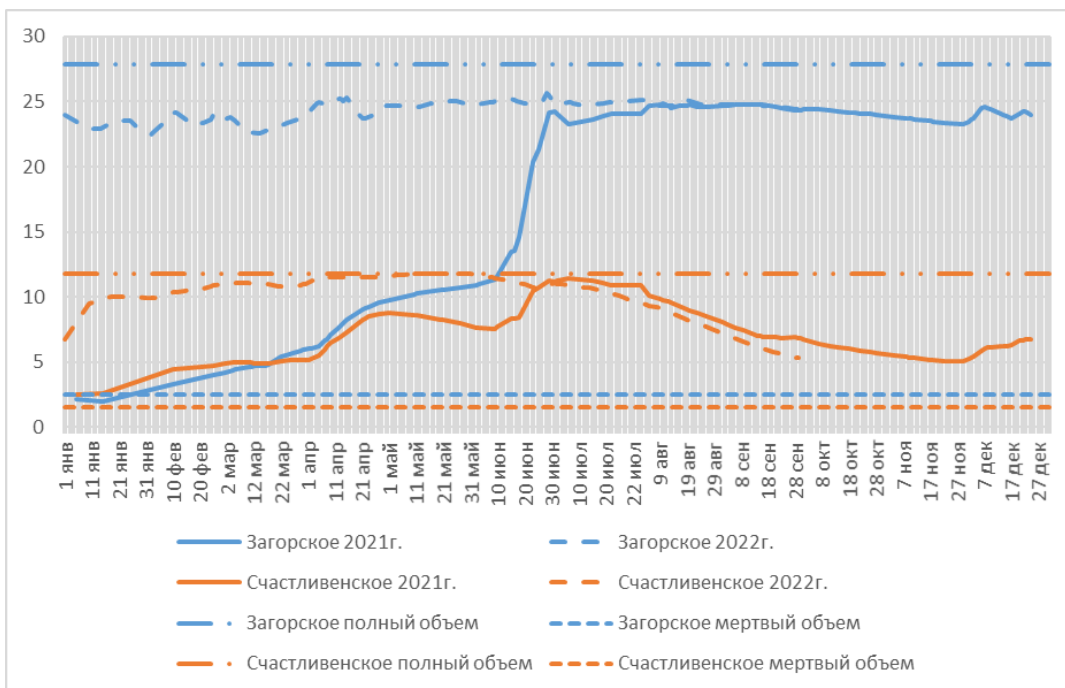


Рис. 3. Временной ход фактического наполнение водохранилищ, ИЦВ населенных пунктов, расположенных на ЮБК (млн м3).

Fig. 3. The time course of the actual filling of reservoirs, the SCWS of settlements located on the SCC (million m3).

На рис.4 показан временной ход суточных значений фактического наполнения Изобильненского и Кутузовского водохранилищ,

которые подают воду в г. Алушту в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. Из анализа представленных зависимостей установлено, что в январе 2022 года

фактическое наполнение Изобильненского водохранилища вдвое превышало наполнение в январе 2021 г. В годы малой водности основной источник водоснабжения г. Алушты, Изобильненское водохранилище, покрывает потребности городского округа только на 40 %, и оно является одной из главных артерий города. Объем воды к концу 2021 года вырос в 2,15 раза, а к июлю 2022 года объем воды увеличился до 12 млн. м³, с середины июня по сентябрь 2022 года фактическое наполнение достигало 90% от полного

проектного объема. Кутузовское водохранилище, полный объем которого составляет 1,11 млн. м³ используется в основном для полива сельскохозяйственных культур. В летний период 2021 г. фактическое наполнение этого водохранилища достигало максимальных значений в 0,927 млн. м³, к концу 2021 года объем воды составил 0,505 млн. м³, а с марта по август 2022 года фактическое наполнение достигало полного проектного объема в 1,11 млн. м³.

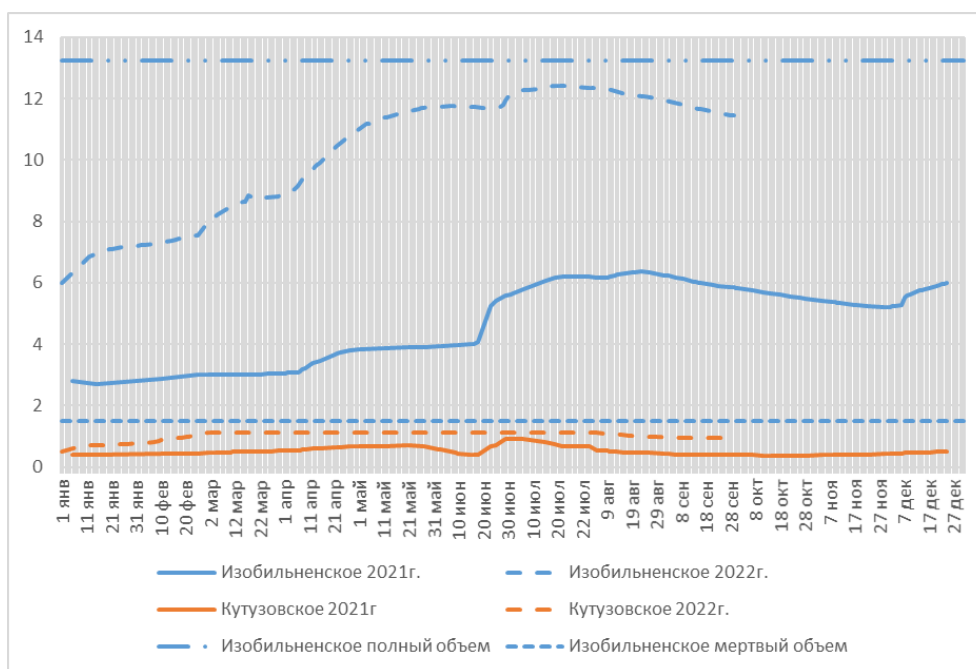


Рис 4. Временной ход фактического наполнение водохранилищ, ИЦВ Алушты (млн м³)
Fig. 4. The time course of the actual filling of reservoirs, Alushta's SCWS (million m³)

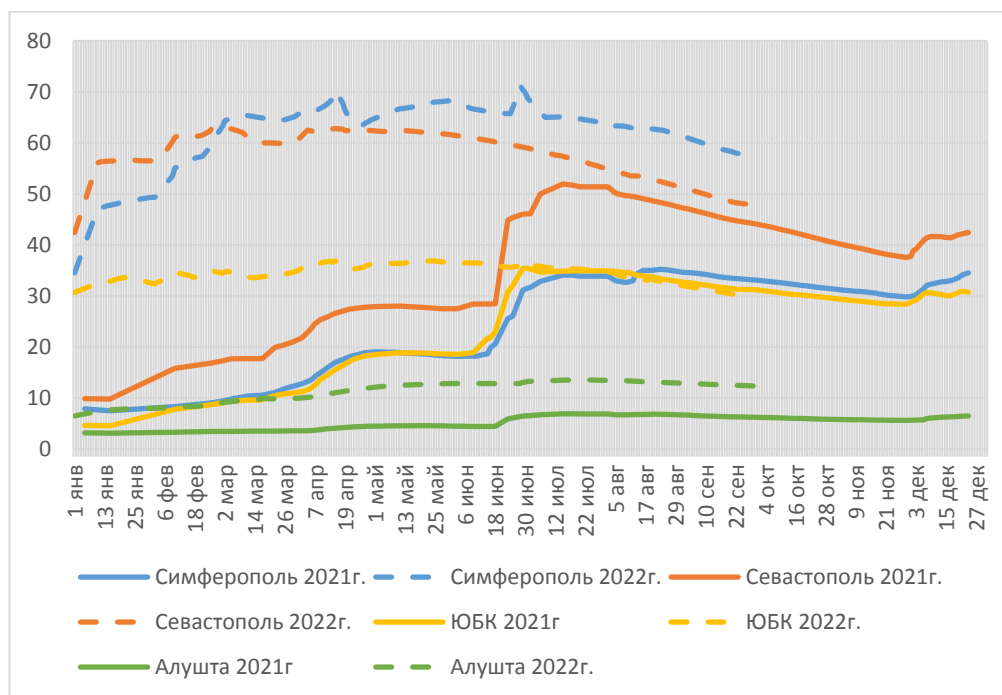


Рис 5. Временной ход фактического суммарного наполнения водохранилищ естественного стока, которые являются ИЦВ городов Крыма в млн м³
Fig. 5. The time course of the actual total filling of natural runoff reservoirs, which are the SCWS of Crimean cities in million m³

На рис.5 представлен временной ход суточных значений фактического наполнения водохранилищ естественного стока, которые являются ИЦВ городов ЮБК, Симферополя, Севастополя и Алушты в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. В результате выполненного анализа представленных зависимостей установлено, что фактический объем наполнения водохранилищ ИЦВ Симферополя в январе 2022 года был в 6 раз больше чем в январе 2021 года, для городов ЮБК – в 7,4 раза больше, а для Алушты в 2,4 раза больше. Для ИЦВ Севастополя – Чернореченскому водохранилищу анализ по сведениям представленным на рис. 2 выполнен ранее. Основной приток в водохранилища естественного стока в 2021 году произошел в летние месяцы, а в 2022 году фактические объемы наполнения дополнительно увеличивался за счет притока первого квартала. Эти увеличения фактического наполнения водохранилищ естественного стока в 2021 году были заметными для ИЦВ Симферополя, Севастополя и городов ЮБК. Для водохранилищ естественного сток городов ЮБК увеличения фактических объемов наполнения в 2022 года были не такими большими, так как в эти периоды процент наполнения этих водохранилищ достигал 90% и большую часть обильного притока уходила в технологический сброс. Такой характер фактического наполнения

водохранилищ естественного стока объясняется тем, что водные ресурсы по территории Крымского полуострова распределены крайне неравномерно ввиду различных, в том числе сложных форм рельефа, высотной поясностью Крымских гор, разнообразием климатических зон, сочетанием южного географического положения полуострова и влиянием морей и заливов. При этом распределение осадков по полуострову неравномерно как по временам года, так и по его регионам [9, 11, 12].

На рис.6 представлен временной ход суточных значений степени наполнения в процентах от полного проектного объема водохранилищ естественного стока, которые являются ИЦВ городов Крыма в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. В результате анализа представленных зависимостей установлено, что на начало 2021 года объем воды во всех ИЦВ, питающих г. Симферополь было менее 20 % от полного проектного объема. При этом Аянское водохранилище летом 2021 года было заполнено на 100 %, в Симферопольском водохранилище уровень воды с лета держался на отметках 30...34 % от полного объема, в Партизанском водохранилище – на отметках 50...58 %. В 2022 году из-за большого зимнего и весеннего притока степень наполнения водохранилищ достигли 90 %, что пришлось выполнять технологические сбросы.

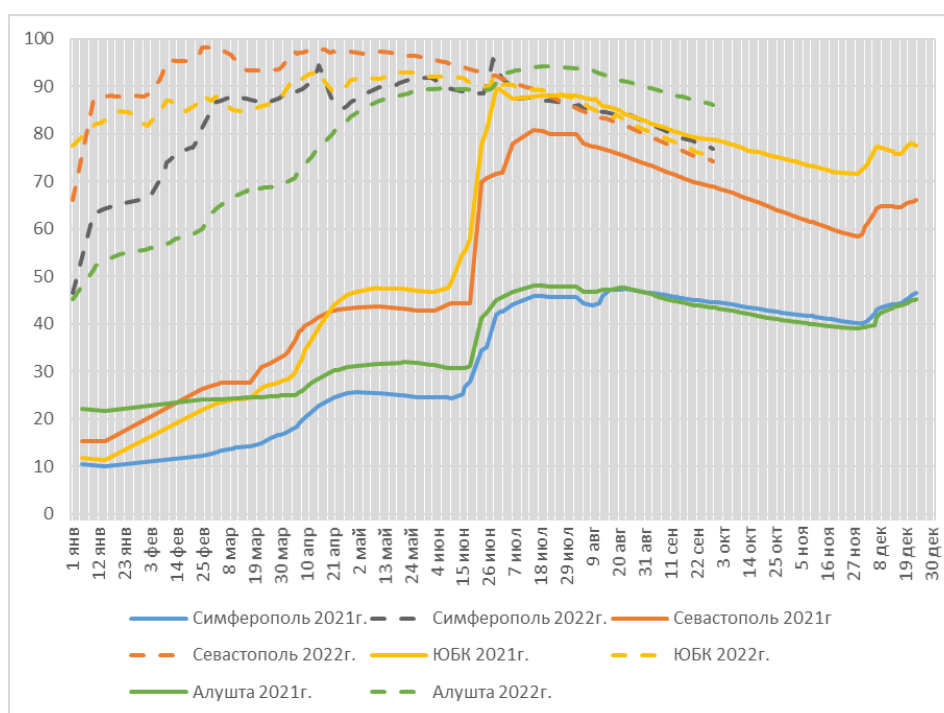


Рис.6. Временной ход график степени наполнения в % водохранилищ естественного стока, которые являются ИЦВ городов Крыма

Fig.6. The time course of the degree of filling in % of natural runoff reservoirs, which are the SCWS of the cities of the Crimea

Объем воды в Чернореченском водохранилище на начало 2021 года составлял 15,4% от полного проектного объема, а к лету данный показатель возрос до 81%. Учитывая, что Чернореченское водохранилище естественного стока является

крупнейшим на Крымском полуострове, приток за первую половину 2021 года был значительным и составил до 42 млн. м³. На конец года процент наполнения водохранилища держался на отметке 63...66% от полного объема. Максимальное

наполнение в 63 млн. м³ было достигнуто в первом квартале 2022 года и составило 98% от полного объема.

Для городов ЮБК Загорское и Счастливенское водохранилища являются ИЦВ. В начале 2021 года они были наполнены на 10 %, а к середине лета их степень наполнения достигла 90 %. При этом процент наполнения Счастливенского водохранилища достигал 95% летом 2021 года, а в Загорском водохранилище поддерживался на уровне 85...88% от полного объема за счет технологического сброса притока.

Степень наполнения водохранилищ естественного стока ИЦВ Алушты на начало 2021 года составлял 22% от полного проектного объема, а к середине лета данный показатель возрос до 48% и на этом уровне находился до конца года. Обильный приток первой половины 2022 года обеспечил увеличение степени наполнения водохранилищ естественного стока ИЦВ Алушты до 89%.

Выполненный анализ степени наполнения водохранилищ естественного стока, которые являются ИЦВ городов Крыма показал, что к середине 2022 года они были наполнены на 85...90%. Такие высокие уровни фактического наполнения обеспечены большими осадками 2021 и 2022 года, которые существенно были больше чем за предыдущие три года. Из-за угрозы переполнения на некоторых водохранилищах естественного стока выполнялся технологический сброс [7, 8, 9]. Циклические изменения по сумме атмосферных осадков в 2019 и 2020 г. на Крымском полуострове создали вызвали аномально малый приток в наливные водохранилища, что привело к серьезным проблемам нехватки пресной, в том числе и питьевой воды. Поэтому фактическое наполнение всех водохранилищ естественного стока Крыма с декабря 2020 года по март 2021 года были на уровне 33 млн. м³ и степени наполнения в 13 %, что стало для этого периода минимальными за последние 40 лет наблюдений. Абсолютный минимальный уровень фактического наполнения всех водохранилищ естественного стока Крыма в 22 млн. м³ был в сентябре и октябре 1994 года, что составляло степень наполнения 9 % от полного проектного объема.

При обосновании режимов рационального использования водных ресурсов Крымского полуострова необходимо учитывать долгосрочное прогнозирование характеристик атмосферных осадков с определением оптимальных параметров систем сбора и очистки поверхностных стоков. Необходимо учитывать выводы ведущих ученых мира в области водных ресурсов, которые еще в 2008 году доказали, что в 21-ом веке изменяется «стационарность», как основополагающая концепция, согласно которой гидрологические системы изменяются и колеблются в пределах известного набора границ на основе многолетних наблюдений [1]. С другой стороны, следует предположить, что изменилась не «стационарность»

гидрологических процессов, а выявилось увеличение изменчивости в связи с увеличением периода наблюдений и влияние дополнительных факторов, которые ранее не наблюдались или не учитывались. Перспектива глобального потепления, вызванного накоплением в атмосфере углекислого газа и других поглощающих тепло газов, вводит в глобальную водную систему новые неуправляемые факторы. Это, в свою очередь, увеличивает испарение и осадки, что, как правило, делает жаркие сухие районы более сухими, а прохладные влажные – более влажными. Прогноз изменения климата, сделанный рядом научных коллективов мира, показывает доминирующие тенденции изменения характеристик и режимов осадков в Крыму и в Причерноморье в целом [10].

На рис. 7 показан суммарный годовой приток в водохранилища естественного стока на Крымском полуострове за период с 1983 по 2020 г., представленные по информации Государственного комитета по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым. Средний приток за этот период в водохранилища естественного стока составил 270 млн м³. Тенденция постепенного снижения притока воды в водохранилища естественного стока продолжается. Анализ, представленных на рис. 7 значений годового притока в водохранилища естественного стока, показал, что они могут отличаться более чем в 6 раз. Максимальный приток за рассмотренные 38 лет был в 1997 г. и составил 628 млн. м³, а минимальный приток – 97 млн. м³ был в 1994 г. Эти экстремальные значения соответственно в 2,3 раза больше среднего притока за рассмотренный период и в 2,8 раза меньше среднего. Приток в водохранилища естественного стока с величиной в 1,4...1,6 раза больше среднего значения появляется с периодичностью 5..7 лет.

Анализ представленных на рис. 7 данных позволяет сделать вывод, что риск дефицита воды на Крымском полуострове возникает при двух и более маловодных годах подряд, когда приток в водохранилища естественного стока в течении двух лет меньше годового водозабора. Наиболее характерными примерами стали вододефицитные 1994 и 2020 годы. Из представленной на рис. 7 зависимости видно, что годовой приток в водохранилища естественного стока в 2021 году впервые приблизился к отметке среднеегодового притока за последние 4 года, а годовой приток в 2020 году стал самым минимальным с 1994 года.

Вопрос преодоления вододефицитных периодов на Крымском полуострове с большой вероятностью будет оставаться важным на протяжении ближайших десятков лет. Поэтому рассматриваются различные пути решения водной проблемы [11, 12]. Природно-климатических условия Крымского полуострова обуславливают потери воды за счет ее испарения с поверхностей водохранилищ, а также фильтрационные потери.

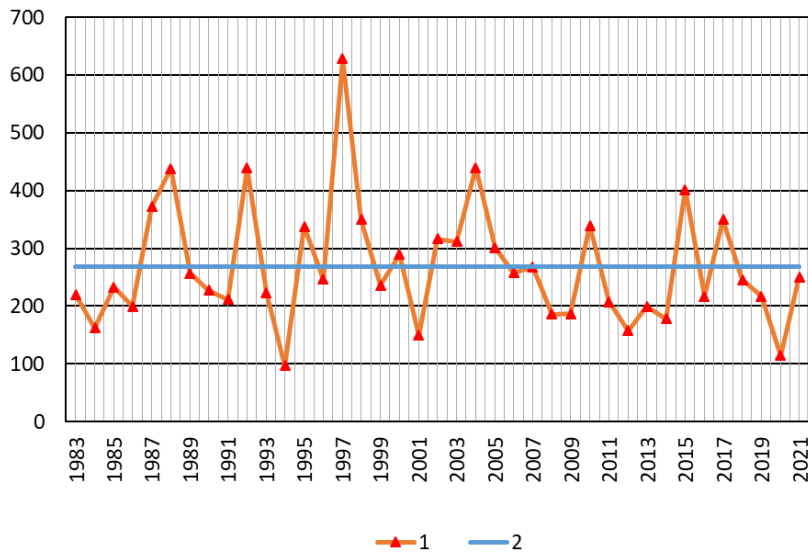


Рис. 7. Суммарный годовой приток (млн. м³) в водохранилища естественного стока Крымского полуострова за 1983-2021 г.: 1 – приток в водохранилища естественного стока; 2 – среднегодовое значение притока в водохранилища естественного стока [9].

Fig. 7. The total annual inflow (million m³) to natural runoff reservoirs of the Crimean Peninsula for 1983-2021: 1 – inflow to natural runoff reservoirs; 2 – average annual inflow to natural runoff reservoirs [9].

В соответствии с положениями Водной стратегии Российской Федерации, одни из основных задач, определяющих направления развития водохозяйственного комплекса, – повышение рациональности использования водных ресурсов, а также ликвидация их локальных дефицитов [4]. Поиск методов решения задач обеспечения водной и водно-экологической безопасности Крымского п-ова должен основываться на современных подходах к водопользованию в вододефицитных регионах с

учетом научной обоснованности водохозяйственных решений и принципов интегрированного управления с ориентацией на собственные водные ресурсы региона [13]. Поэтому в данной работе выполнен анализ потерь водных ресурсов, который связан с испарениями и фильтрацией из водохранилищ естественного стока, для поиска путей их снижения для надежного обеспечения водной безопасности Крымского полуострова.

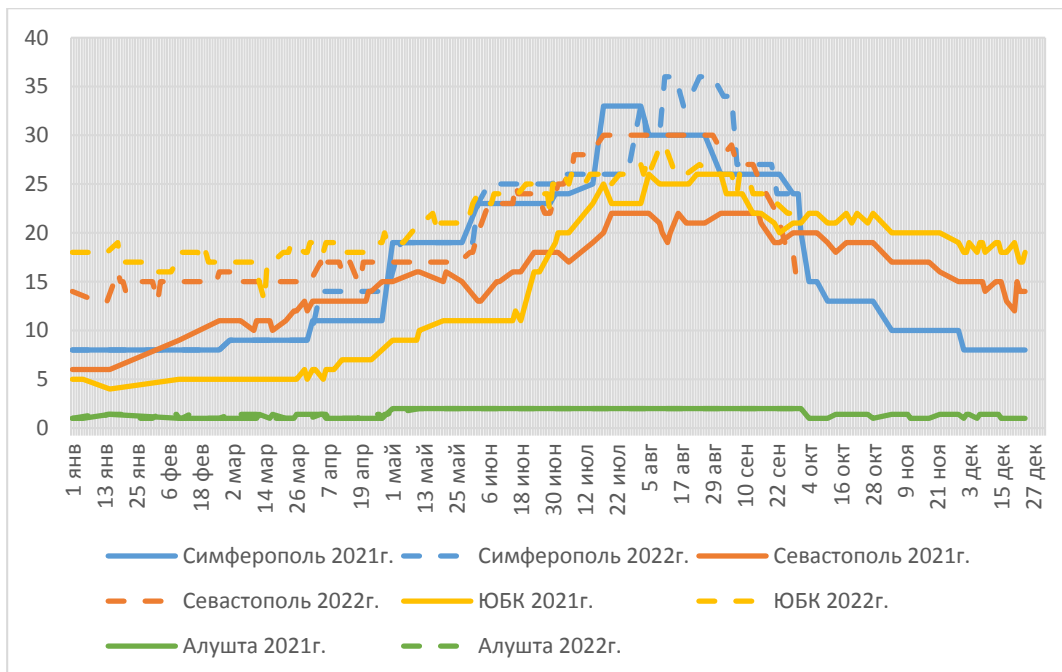


Рис. 8. Временной ход потерь на испарения и фильтрации из водохранилищ естественного стока ИЦВ городов Крыма в тыс. м³

Fig. 8. The time course of losses on evaporation and filtration from natural runoff reservoirs SCWS of Crimean cities in thousand m³

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 8 представлен временной ход суточных значений потерь на испарение и фильтрацию из водохранилищ естественного стока ИЦВ городов Крыма в 2021 году и за 9 месяцев 2022 года. В результате анализа представленных зависимостей установлено, что максимальные потери водных ресурсов, вызванные этими причинами, наблюдаются в летние месяцы.

Максимальные потери величиной 36 тыс. м³ установлены в августе 2022 года в водохранилищах естественного стока ИЦВ Симферополя и превышают показатели потерь воды в 2021 году на 3 тыс. м³. Согласно графику, на рис 5 на 24 августа 2022г. суммарное наполнение водохранилища естественного стока ИЦВ Симферополя составляло 62,5 млн. м³, тогда как на аналогичную дату в 2021г.

данный показатель был 35,2 млн. м³. Показатели потерь воды на испарение и фильтрацию из водохранилищ естественного стока ИЦВ для Севастополя и городов, расположенных на южном берегу Крыма в 2022 году также увеличились по сравнению с 2021 годом. Для Севастополя Данный показатель увеличился с 22 тыс. м³ в 2021 году до 30 тыс. м³ в 2022 году. Для водохранилищ на южном берегу Крыма с 26 тыс. м³ в 2021 году до 29 тыс. м³ в 2022 году.

На основании выполненного анализа потерь на испарения и фильтрации из водохранилищ естественного стока ИЦВ городов Крыма можно сделать вывод что увеличение потерь воды в 2022 году увеличилось в том числе из-за более высокой наполняемости водохранилищ, а также с увеличением площадей зеркал водохранилищ.

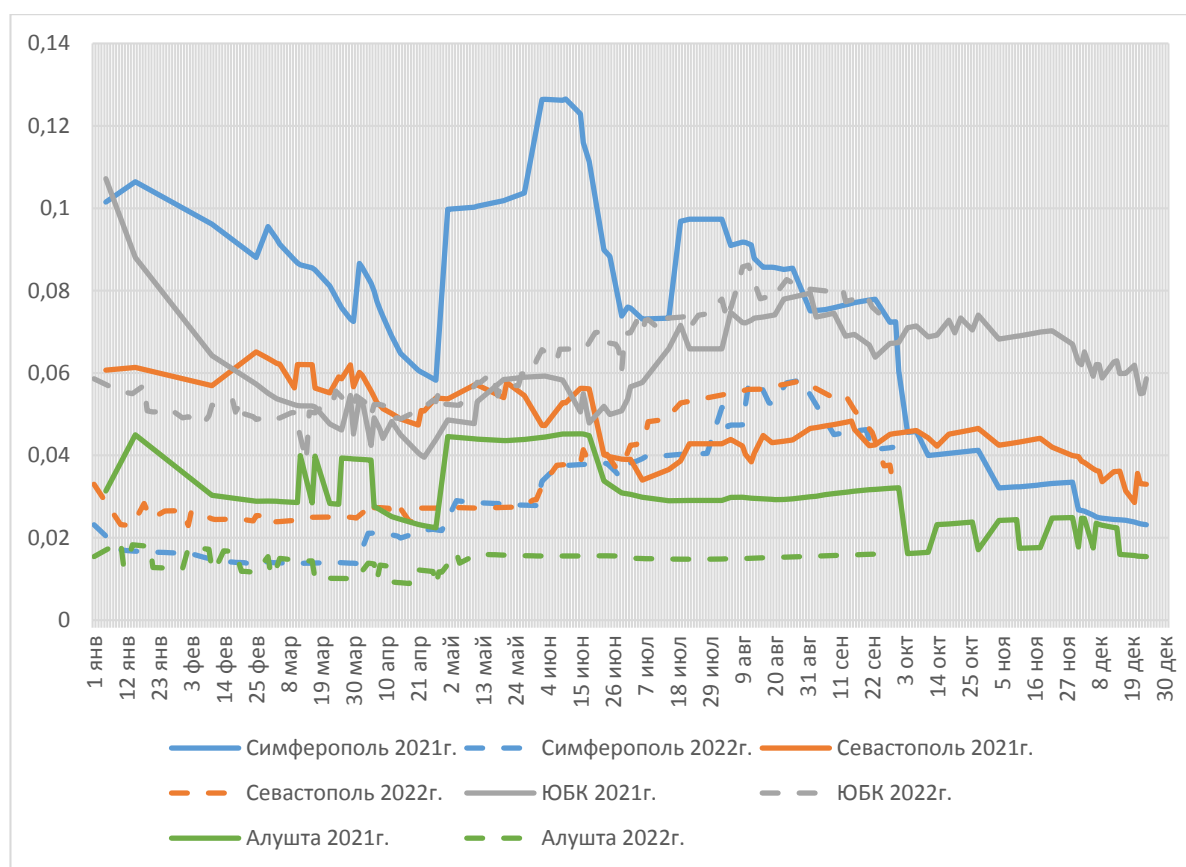


Рис. 9. Временной ход относительных суммарных потерь воды на испарение и фильтрацию по отношению к суммарным фактическим объемам наполнения водохранилищ естественного стока ИЦВ городов Крыма (%)

Fig. 9. The time course of the relative total water losses for evaporation and filtration in relation to the total actual volumes of filling reservoirs of natural runoff SCWS of Crimean cities (%)

Анализ представленного временного хода суммарных потерь воды на испарение и фильтрацию показал, что ежесуточно потери воды могут достигать около 0,05% от суммарного фактического объема наполнения водохранилищ естественного стока Крымского полуострова. Резкое увеличение отношения суммарных потерь воды на испарение и фильтрацию по отношению к суммарным объемам в водохранилищах, питающих г. Симферополь в 2021 году является следствием

того, что в начале мая произошло увеличение испарения и фильтрации в водохранилищах в следствии увеличения температуры окружающей среды, тогда как резкое увеличение наполнения воды в водохранилищах происходило в июне 2021 года. Наибольшие потери воды происходят в летние месяцы, что показывает о большом влиянии на потери фактора испарения, ввиду увеличения температуры воздуха и температуры воды в самих водохранилищах. Представленные зависимости

показывают лишь суммарные потери на фильтрацию и испарение, что требует дальнейших исследований для выявления потерь воды с учетом каждого фактора.

В качестве примера рассмотрим на рис. 10 временной ход среднедекадной температуры воздуха и гистограммы величин испарения с поверхности Симферопольского водохранилища, предоставленный ГБУ РК Крымское управление водного хозяйства и мелиорации за май-сентябрь 2022 г. Из анализ представленных данных следует, что в зависимости от изменения температуры

испарение с водохранилища увеличивается пропорционально. При увеличении температуры в летний период возросли потери на испарение, а в сентябре, когда температура воздуха упала, также снизилось испарение. За рассмотренный период май – сентябрь 2022 г. суммарное испарение составило для Симферопольского водохранилища 586,3 мм или 5863 м³/га, а с учетом площади водохранилища не менее 300 га, то суммарные потери воды на испарения составили 1,8 млн. м³, что больше водопотребления г. Симферополя за неделю из трех водохранилищ естественного стока.

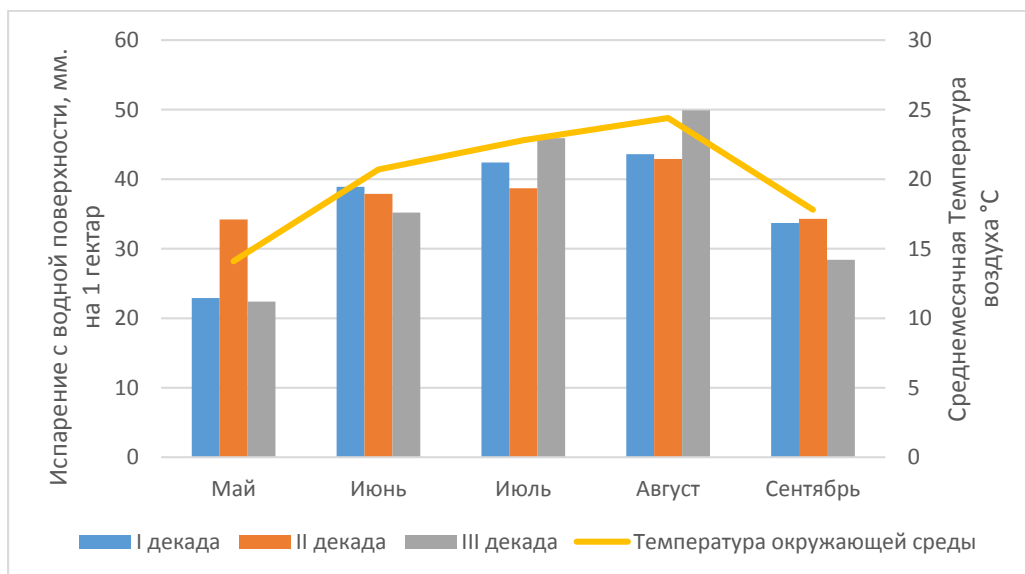


Рис. 10. Временной ход среднедекадных значений температуры воздуха и гистограммы величин испарения с водной поверхности Симферопольского водохранилища в мае-сентябре 2022 г.

Fig. 10. The time course of the average decadal values of air temperature and the histogram of evaporation values from the water surface of the Simferopol reservoir in May-September 2022

Ежегодно солнечная энергия поднимает с земной поверхности около 500 тысяч кубических километров воды – 86% из океанов и 14% с суши. Часть этой вводы выпадает на Землю в виде дождя и снега, но в других таких пропорциях. Ветер и погода переносят на сушу около 9% паров, поднятых с моря [13]. Перспектива глобального потепления, вызванного накоплением в атмосфере углекислого газа и других поглощающих тепло газов, вводит в глобальную водную систему новые неуправляемые факторы. Изменения режима осадков, обусловленные глобальным потеплением, для многих регионов России могут стать неблагоприятными, так как окажет негативное влияние на приток воды в водохранилища, а также изменит условия испарения воды с поверхностей водохранилищ. Поэтому в настоящее время необходимы комплексные оценки режимов наполнения водохранилищ естественного стока как источника водоснабжения, а также потерь воды, связанных с испарением для разработки экономически обоснованных рекомендаций по водным технологиям для обеспечения рационального использования водных ресурсов, с учетом новых документов территориального

планирования, новой нормативной базы Российской Федерации по вопросам водоснабжения и водоотведения. Для вододефицитных периодов Крымского полуострова, связанных с цикличностью и изменениями режимов осадков, сохраняется проблема поиска методов обеспечения водной безопасности на основе современных подходов по геоинформационным и водным технологиям, том числе с обеспечением экологической устойчивости водных объектов.

Для количественной оценки испарения воды с поверхностей водохранилищ в настоящее время применяются различные модели, которые реализуются в различных расчетных зависимостях. Наибольшее применение в настоящее время получили формулы В.К. Давыдова, Б.Д. Зайкова, А.П. Браславского и З.А. Викулиной, А.П. Браславского и др. Большая часть этих зависимостей была основана на обработке результатов экспериментальных исследований, проведенных в середине прошлого века. Проверка точности различных формул по оценке испарения с водной поверхности, проведенная в Государственном гидрологическом институте показала, что наиболее оптимальной является

формула Б.Д. Зайкова по определению средней многолетней величины испарения (в мм/сут) с открытой водной поверхности водоемов:

$$E_B = 0,14 \cdot (e_0 - e_{200}) \cdot (1 + 0,72 \cdot w_{200})$$

где e_0 – максимальная упругость пара при температуре поверхности воды, мб; e_{200} , w_{200} – влажность воздуха (мб) и скорость ветра (м/с) на высоте 200 см над поверхностью воды.

Эта зависимость представлена как расчетная формула, представленной в приказе МПР РФ от 30 ноября 2007 г. N 314 «Об утверждении Методики расчета водохозяйственных балансов водных объектов».

Таким образом одной из причин потерь воды из водохранилищ естественного стока Крымского полуострова является неконтролируемый процесс испарения с водной поверхности. Эти процессы зависят от нескольких факторов, наиболее важными из которых являются метеорологические условия. Для нахождения истинного значения испарения требуется провести сбор и статистическую обработку условий испарения с учетом гидрометеорологических условий, выполнить расчеты по наиболее применяемым расчетным зависимостям и сравнить расчеты с официальными данными, а также в выполнить сравнительный анализ данных, полученных по расчетным формулам с экспериментальными данными с плавучего испарителя.

ВЫВОДЫ

Выпавший анализ наполняемости за многолетний период, потерь воды водохранилищ естественного стока Крыма в 2021-2022 годах показал, что дефицит воды наиболее часто возникает при двух и более маловодных годах подряд, когда приток в водохранилища меньше годового водозабора из водохранилищ для коммунально-бытового водоснабжения. Однако за 2021 и 2022 года объем всех водохранилищ существенно увеличился.

Сводный график испарения и фильтрации водохранилищ, Крыма показал значение фактора испарения с поверхностей, а также показал значение потерь воды на испарение и фильтрацию. График отношения потерь воды на испарение и фильтрацию по отношению к объемам воды в водохранилищах показал, что около 0,05% воды ежедневно тратится на испарение и фильтрацию. Суммарные потери воды на испарения с поверхности Симферопольского водохранилища за май – сентябрь 2022 г. составили 1,8 млн. м³, что больше водопотребления г. Симферополя за неделю из трех водохранилищ естественного стока.

Для оценки способов решения проблем дефицита водных ресурсов путем сокращения испарения воды с поверхности водохранилищ естественного стока необходимо исследование потерь воды на испарение различными

экспериментальными методами, а также расчетными формулами, учитывающими большинство факторов, влияющих на потери на испарение воды.

Представленные результаты на основе фактических данных показывают, что актуальность данной проблемы, а также необходимость в продолжении исследований в данных направлений. Также требуется разработка и внедрение современных автоматизированных систем контроля за наполнением, контролем расхода и потерь воды, которые позволят создать основы современных методов сокращения потерь воды, а также повысит контроль за реальными расходами водных ресурсов.

Дальнейшие исследования по анализу изменения данных факторов, а также получение зависимости фактических потерь от них может стать ключом к выявлению наиболее эффективных методов сокращения потерь водных ресурсов с поверхностью водоемов Крымского полуострова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Postel S. The last oasis. Facing water scarcity. – London: Earthscan Publications Ltd., Worldwatch Institute, 1992. – 226 p
2. Козуля С.В., Гребенюк В.П., Новик А.Ю.. Водоснабжение Крыма, как фактор, влияющий на здоровье населения (засуха 2020 года) // Научный электронный журнал «Матрица научного познания». – 2020. – № 11-2/2020. – С. 358.
3. Итоги работы Государственного комитета по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым за первое полугодие 2015 // Государственный комитет по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым. Отчеты о деятельности Госкомводхоза. Статистические данные. Электронный ресурс: режим доступа. <http://gkvod.rk.gov.ru/rus/info.php?id=617775> (Дата обращения 09.09.2022).
4. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2009 г. N 1235-р. Электронный ресурс: режим доступа <http://government.ru/docs/10049/> (дата обращения 10.03.2022 г.).
5. Е.П. Каюкова, Т.А. Барабошкина, И.И. Косинова. Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Статья 1// Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2014. – № 4.
6. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе в 2014 году». – Симферополь. – 2015. – 136 с.
7. Николенко И.В., Копачевский А.М., Каримов Э.А. Анализ наполнения водохранилищ естественного стока для обоснования путей решения проблем обеспечения водной безопасности Республики Крым и города Севастополя // Водные ресурсы. – 2022. – Том 49. – № 4. – С. 407-422.
8. I.V. Nikolenko, A.M. Kopachevskii, E.A. Karimov. Analysis of the Filling of Naturally Flowing

Reservoirs for Substantiating Ways to Solve the Problems of Water Supply Security in the Republic of Crimea and City of Sevastopol // *Water Resources*. – 2022. – Vol. 49. – № 4. – Pp. 567-581.

9. Николенко И.В., Каримов Э.А., Мельникова Н.С. Оценка способов решения проблем дефицита водных ресурсов в Крыму // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2022. – № 25(77). – С. 103-115.

10. Бедрицкий А. И. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствия на территории Российской Федерации. – Москва, 2008. – 28 с.

11. Боков В.А., Павлюк Н.Я., Устюгов Д.Л. Актуальные вопросы изучения природно-ресурсного потенциала Крыма // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*. – 2021. – Том 7(73). – № 1. – С. 128-153.

12. Данилов-Данильян В.И. Научное обеспечение водной безопасности Крыма: проблемы и решения/В. И. Данилов-Данильян, М.А. Козлова, В.О. Полянин, И.В. Чесноков // *Водные ресурсы*. – 2022. – Том 49. – № 4. – С. 363-371.

13. Николенко И.В., Копачевский А.М. Основные направления разработки комплекса мер по решению проблем дефицита воды в Крыму // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2021. – № 21(73). – С. 147-160.

14. Postel S. *Replenish: The Virtuous Cycle of Water and Prosperity*. – London: Earthscan Publications Ltd., Island Press; 2nd None ed. edition, 2017. – 316 p.

REFERENCES

1. Postel S. *The last oasis. Facing water scarcity*. – London: Earthscan Publications Ltd., Worldwatch Institute, 1992. – 226 p.

2. Kozulya S.V., Grebenyuk V.P. Novik A.Y. Water supply of the Crimea as a factor affecting the health of the population (drought in 2020) // *Scientific electronic journal «Matrix of scientific knowledge»*. – 2020. – № 11-2/2020. – Pp. 358.

3. Itogi raboty Gosudarstvennogo komiteta po vodnomu hozyajstvu i melioracii Respubliki Krym za pervoe polugodie 2015 // *Gosudarstvennyj komitet po vodnomu hozyajstvu i melioracii Respubliki Krym. Otchety o deyatelnosti Goskomvodhoza. Statisticheskie dannye. Elektronnyj resurs: rezhim dostupa <http://gkvod.rk.gov.ru/rus/info.php?id=617775>*.

4. Vodnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27 avgusta 2009 g. N 1235-r. Elektronnyj resurs: rezhim dostupa <http://government.ru/docs/10049/>.

5. E.P. Kayukova, T.A. Baraboshkina, I.I. Kosinova Resource potential of Crimean fresh waters. Article 1 // *Bulletin of the VSU. Series: Geology*. – 2014. – № 4.

6. State report «On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Republic of Crimea and the federal city of Sevastopol in 2014». – Simferopol. – 2015. – 136 p.

7. Nikolenko I.V., Kopachevsky A.M., Karimov E.A. Analysis of the filling of natural runoff reservoirs to substantiate ways to solve the problems of ensuring water security of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol // *Water Resources*. – 2022. – Том 49. – № 4. – Pp. 407-422.

8. I.V. Nikolenko, A.M. Kopachevsky, E.A. Karimov. Analysis of the Filling of Naturally Flowing Reservoirs for Substantial Ways to Solve the Problems of Water Supply Security in the Republic of Crimea and City of Sevastopol // *Water Resources*. – 2022. – Vol. 49. – № 4. – Pp. 567-581.

9. Nikolenko I.V., Karimov E.A., Melnikova N.C. Assessment of ways to solve the problems of water scarcity in Crimea // *Construction and technogenic safety*. – 2022. – № 25(77). – Pp. 103-115.

10. Bedritsky A.I. *Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. – Moscow, 2008. – 28 p.

11. Bokov V.A., Pavlyuk N.Ya., Ustyugov D.L. Topical issues of studying the natural resource potential of the Crimea // *Uchenye zapiski V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. – 2021. – Том 7(73). – № 1. – С. 128-153.

12. Danilov-Danilyan V.I. Scientific provision of water security of Crimea: problems and solutions/V. I. Danilov-Danilyan, M. A. Kozlova, V. O. Polyaniin, I.V. Chesnokov // *Water Resources*. – 2022. – Том 49. – № 4. – Pp. 363-371.

13. Nikolenko I.V., Kopachevsky A.M. The main directions of the development of a set of measures to solve the problems of water scarcity in the Crimea // *Construction and technogenic safety* – 2021. – № 21(73). – Pp. 147-160.

14. Postel. S. *Replenish: The Virtuous Cycle of Water and Prosperity*. – London: Earthscan Publications Ltd., Island Press; 2nd None ed. edition, 2017. – 316 p.

ANALYSIS OF WATER RESOURCE LOSSES FROM NATURAL RUNOFF RESERVOIRS OF THE REPUBLIC OF CRIMEA AND SEVASTOPOL

Nikolenko I.V., Karimov E.A., Bokov S.A., Avdeeva D.V.

^{1, 3, 4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Academy of construction and architecture,
181, Kievskaya str., Simferopol, 295050, Russian Federation

¹ e-mail: nikoshi@mail.ru

² Simferopol branch of “Krymmeliiovodkhoz”

² e-mail: karimov_ervin@mail.ru

Abstract. The article deals with the evaluation of the degree of filling of reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula in 2021 and 2022 and analyzes the loss of water resources for the substantiation of the possible ways to solve the problems of water scarcity in Crimea during periods of low-water years. Despite the unblocking of the North Crimean Canal and the restoration of the supply of Dnieper water to the Crimean Peninsula for water-deficient periods of the region, it is necessary to search for methods of ensuring water security based on modern technologies to reduce water resources losses. Summary graphs of water resource losses as the result of filtration and evaporation are presented. The analysis of the obtained results was performed, as well as recommendations on the possibility of their implementation were given.

Subject of research. The degree of filling of reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula in 2021 and 2022, as well as the loss of water resources from these reservoirs, to substantiate ways to solve the problems of ensuring water security of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol during periods with the rainfall deficit.

Materials and methods of research: The collection, systematization, statistical processing and analysis of the patterns of the degree of filling of reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula were carried out during 2021 and 2022 according to the State Committee for Water Management and Land Reclamation of the Republic of Crimea. The analysis of the losses of water resources in these reservoirs as factors influencing the occurrence of water scarcity on the peninsula, on the basis of which an assessment of ways to solve it was carried out.

Results. The factors influencing the degree of filling of reservoirs of the natural flow of the Crimean Peninsula are established, and the necessity of analyzing the losses of water resources from them is justified. The estimation of losses on evaporation and filtration from reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula was carried out. The actual values of water losses due to evaporation from the Simferopol reservoir have been established.

Conclusions. The analysis of the filling of reservoirs of the natural runoff of the Crimea over a long period and water losses in 2021-2022 showed, that water scarcity most often occurs in two or more low-water years in a row, when the inflow into reservoirs is less than the annual water intake. A research of the regularities of the degree of filling of reservoirs of the natural runoff of the Crimean Peninsula over a long period have established that one of the ways to solve the problems of water scarcity in the Crimea is to reduce the loss of water resources for evaporation. To assess the ways to solve the problems of water scarcity by reducing the evaporation of water from the surface of natural runoff reservoirs, it is necessary to study the evaporation losses of water by various experimental methods, as well as calculation formulas that take into account most of the factors affecting the evaporation losses of water.

Key words: water resources, losses, scarcity, reservoirs of the natural runoff, filling, evaporation.

УДК 628.1+612.0

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ПИТЬЕВЫХ ВОД
В РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯНиколенко¹ И.В., Котовская² Е.Е., Луд³ Н.В.Институт «Академия строительства и архитектуры», КФУ им. В.И. Вернадского»,
Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181,
e-mail: ¹nikoshi@mail.ru; ²elevkot@gmail.com; ³ludn_83.83@mail.ru

Аннотация. В статье выполнен анализ качественного состава воды из подземных источников ряда районов Республики Крым (РК), характеризующихся высоким содержанием жесткости, высокой минерализацией или общим солесодержанием, повышенным содержанием хлоридов и сульфатов. Потребление воды с превышением показателей ПДК жителями этих районов на ежедневной основе может приводить к угнетению желудочной секреции, нарушению обмена веществ, способствует возникновению мочекаменной болезни. Составлены карты 3-х районов РК, с нанесением значений превышения ПДК различных качественных показателей в каждом из населенных пунктов. Полученная картина показывает районы с превышением в 2...5 раз нормативных требований.

Предмет исследования: качественные показатели питьевых вод подземных источников, влияющие на здоровье человека, с оценкой способов кондиционирования, для обеспечения требований, предъявляемых к водам подземных источников централизованного питьевого водоснабжения.

Материалы и методы исследования: Выполнен сбор, систематизация, статистическая обработка и анализ качественного состава воды из подземных источников ряда районов РК, а также сравнение полученных результатов со статистическими данными по структуре заболеваемости населения. В работе применены методы математической статистики, позволяющие выполнить количественную оценку факторов, оказывающих влияние на здоровье населения РК от употребления воды с превышением показателей ПДК.

Результаты: Результаты исследований позволяют получить карты превышения ПДК по населенным пунктам 3-х северных районов Республики Крым, в которых потребляется вода подземных источников и получена количественная оценка риска заболеваний от употребления воды некондиционного качества.

Выводы: Определены факторы, оказывающие негативное воздействие на здоровье жителей Республики Крым, в зависимости от принадлежности источников централизованного водоснабжения.

Ключевые слова. подземные источники, система централизованного водоснабжения, ПДК, общая минерализация, хлориды, сульфаты.

ВВЕДЕНИЕ

Вода – наиболее важный из природных ресурсов, вовлекаемых в хозяйственную деятельность человека, который по объему ежегодного использования превосходит все вместе взятые другие добываемые ресурсы. Потребности человечества в воде для разных целей непрерывно растут, увеличивая антропогенное давление на водные ресурсы и экосистемы в целом. Вода, отвечающая санитарно-гигиеническим и эпидемиологическим требованиям, является одним из неперенных условий сохранения здоровья людей. Поэтому здоровье населения находится в прямой зависимости от состава природных вод в источниках, из которых осуществляется регулярное водоснабжение. Гармонизация потребностей человека с потребностями здоровой окружающей среды потребует анализа способов использования воды и управления ею. Это требует анализа влияния качественного состава воды на различные сферы деятельности человека, в том числе на его здоровье, а также на экосистемы регионов для корректировки моделей водопользования.

Здоровье современного человека неотъемлемо связано с водой, продуктами, лекарствами им потребляемыми, а также парфюмерными и гигиеническими средствами им применяемыми, все то, что попадает тем или иным способом в организм

человека или контактирует с ним. Человеческий организм достаточно сложная система, которая еще 100 лет назад не взаимодействовала и с 80 % процентами современных наименований продуктов, косметических средств, лекарств, а также современным качеством питьевой воды. Организм человека во времени адаптировался к современным условиям развития общества, смирился с диктуемыми правилами и условиями питания. Благодаря достижениям современной медицины человек стал жить дольше, если еще 100 лет назад средняя продолжительность жизни в России составляла 32 года, то в 2020 г. данное значение составило 73 года, разница в 2,28 раза. Увеличение продолжительности жизни обусловлено повышением социальных стандартов в условиях жизни и трудовой деятельности, появлением современных средств и методов лечения в медицине, отсутствием войн и т.д. Человек живет дольше, но при этом к достижению определенного возраста приобретает значительное количество хронических заболеваний, отчасти к появлению которых косвенно причастны стандарты лечения, направленные на перевод острой фазы практически любого заболевания в ремиссию, что по сути и является хронической формой заболевания, и при определенных благоприятствующих обстоятельствах хронические болезни обостряются. Практически у каждого человека к 40 годам имеется

2...3 хронических заболевания; к 50 годам их уже становится – 4...5; к 60 годам – 6...7; и т.д. все это снижает качество жизни человека, практически подчиняет его жизнь графику принятия лекарственных препаратов, а также ритму измерений давления, температуры; уровня содержания глюкозы и т.д., все это приносит дискомфорт в жизнь человека и снижает его трудоспособность, физическую активность и качество жизни, хронически больной человек не может ощущать себя счастливым.

Таким образом, вода является продуктом или ресурсом, без которого человек не может прожить, обеспечить сельскохозяйственное и промышленное производство, а также экологическую безопасность регионов проживания. Человеку вода нужна для утоления жажды, обеспечения водно-электролитического баланса, поддержания чистоты тела, жилища, рабочего места, содержания домашних животных, полив овощных культур, в производственных процессах и т.д. В соответствии требованиями национальных СанПиНов и стандартов качество воды оценивается по многим параметрам, величины которых зависят от назначения воды, категорий потребителей. Состав исходной природной воды из источников водопользования, а также требования к ее качественному составу обуславливают технологические и технические решения по их обеспечению.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всю территорию Республики Крым (РК) условно можно разделить на три-четыре района, в каждом из которых питьевая вода по своему качественному составу может таить в себе угрозу для здоровья населения как *мгновенного действия, так и отсроченного по мере накопления (продолженного действия)*, в зависимости от характера источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, и соответственно по различным критериям качественного состава.

К первому району с качественными показателями питьевой воды, не удовлетворяющими требованиям *СанПиН 2.1.3684-21* [1] следует отнести населенные пункты: Краснопереконского, Джанкойского, Нижнегорского, Советского Раздольненского, Черноморского районов, в которых основным источником водоснабжения являются подземные источники. Перечень населенных пунктов, в которых источником водоснабжения являются подземные источники приведены в таблице 1. В вышеперечисленных районах качественные показатели питьевой воды из централизованных водопроводов не всегда удовлетворяют требованиям по таким показателям как: *общее солесодержание; жесткость общая; содержание хлоридов и сульфатов.*

Второй район, это населенные пункты, в которых источниками централизованного питьевого водоснабжения являются поверхностные источники на основе водохранилищ зарегулированного естественного стока, сведения о которых приведены в таблице 2. На формирования химического состава воды в условиях зарегулированного стока в последнее время существенное влияние оказывает практически бесконтрольная застройка селитебной части их водосборной площади. Например, для части г. Симферополь источником централизованного водоснабжения (ИЦВ) является Симферопольское водохранилище, и в связи с интенсивной застройкой Салгирской долины дачными массивами, коттеджными поселками, поселками депортированных народов, которые зачастую не имеют централизованной канализацией, что способствует поступлению сточных вод от ям с выгребом вместе с грунтовыми водами в водные объекты, питающие Симферопольское водохранилище, что может потенциально способствовать распространению различных желудочно-кишечных заболеваний таких как: *дизентерия; сальмонеллез; холера; брюшной тиф; кишечная палочка; лептоспироз; болезнь вибрионов* и т.д.

Не соблюдение границ зоны санитарной охраны первого пояса ИЦВ может также привести к распространению таких вирусов как: *гепатит А; гепатит Е; острое желудочно-кишечное заболевание; полиомиелит; полиомавирусная инфекция.* Купание в неразрешенных водоемах приводит к нежелательному контакту с некоторыми видами водорослей, которые способствуют возникновению болезни - *десмодезмы.* Еще одним грозным заболеванием, которым может заболеть человек после контакта с загрязненной водой является заражение паразитическими червями, например: *дракункулез.* Попадание в организм человека не очищенной воды может привести к поражению организма простейшими микроорганизмами, которые могут вызывать: *амебиаз; криптоспориоз; циклоспориоз; лямблиоз; микроспориоз; наэглериоз (первичный амёбный менингоэнцефалит).*

К третьему условному району можно отнести опять же часть г. Симферополь, г. Керчь, г. Феодосия, населенные пункты Ленинского района, Перечень населенных пунктов, ИЦВ которых являются наливные водохранилища, наполняемые водами Северо-Крымского канала (СКК) приведены в таблице 3. В связи с возобновлением подачи воды от СКК для заполнения водохранилищ – источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Феодосия, г. Керчь, г. Симферополь, и где предусматривается ее дальнейшая очистка на водопроводных очистных станциях (ВОС) данных населенных пунктов. Воды Днепра несут в себе множество потенциальных угроз, которые также характерны, как и для вод

водохранилищ естественного стока, а также характеризуются особенностями физико-химического состава, который при дальнейшей обработке не снижает потенциальной угрозы здоровью населения, а способствует образованию дополнительных соединений в процессе обеззараживания, и которые также могут оказывать негативное влияние на здоровье человека.

К **четвертому району** в той или иной степени можно отнести всю территорию Республики Крым, за исключением населенных пунктов, где был осуществлен капитальный ремонт или выполнено новое строительство систем водоснабжения населенных пунктов, где в течении последних нескольких лет по программе *ФЦП* осуществлялись работы по прокладке водопроводных сетей и подключению потребителей к новым кольцевым водопроводным сетям населенных пунктов, выполнялся капитальный ремонт водозаборных узлов из подземных источников, с переоснащением насосно-силового, измерительного, предохранительного и запорно-регулирующего оборудования. Во многих населенных пунктах, расположенных на территории РК, также является проблемой общий износ трубопроводов систем централизованного водоснабжения, который способствует образованию свищей, приводящих к возникновению порывов и аварийных ситуаций. Наличие свищей способствует подосу загрязненных сточных вод в трубопроводы при транспортировке водопроводной воды.

Целью настоящей работы является получение практических рекомендаций к единому подходу в оценки факторов риска, оказывающих влияние на здоровье населения Республики Крым (РК).

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- выполнить анализ систем водоснабжения населенных пунктов на территории РК, с определением источников питания населенных пунктов;

- собрать и систематизировать материалы по качественному составу питьевых вод в Раздольненском, Джанкойском, Красноперекопском районе, с целью получения карт населенных пунктов РК, с нанесенными метками качественного состава воды, превышающего предельно допустимые концентрации по жесткости, общему солевому содержанию, содержанию хлоридов и сульфатов.

- обобщить обработанные результаты с целью количественного определения факторов, оказывающих значительное воздействие на здоровье населения РК.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Проблемы качественного состава вод подземных источников населенных пунктов РК. Всего на Крымском полуострове выделено, оценено и эксплуатируется 11 месторождений подземных вод, которые охватывают 78 участков [2-3].

Более 86% утвержденных запасов Крыма приходится на три месторождения, наиболее крупным из них соответствует южная часть **Северо-Сивашского артезианского бассейна**, расположенного в границах Красноперекопского, Джанкойского, Первомайского, Раздольненского, Черноморского и Красногвардейского районов. Масштабными гидрогеологическими районами являются **Белогорский артезианский бассейн** и **Альминский артезианский бассейн** (рис. 1) [2-3].

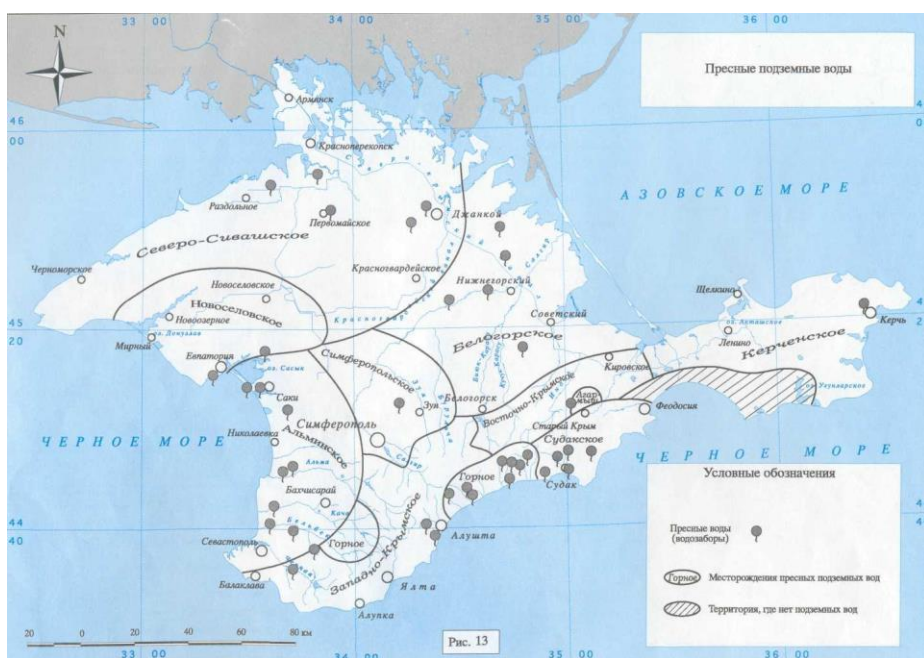


Рисунок 1 – Месторождения подземных вод Республики Крым [19]
Figure 1 – Underground water deposits of the Republic of Crimea [19]

Вода подземных источников данного горизонта характеризуется повышенными показателями соледержания (общая минерализация), а также повышенным содержанием общей жесткости. Ежедневное потребление воды с такими показателями приводит: к изменению обмена веществ; способствует возникновению желчнокаменной и мочекаменной болезни [3-7], которые приносят ужасные страдания больным, снижают качество жизни, ограничивают трудоспособность, и приводят к частой госпитализации пациентов.

Применение воды с повышенной жесткостью в бытовых и производственных целях способствует накопению на стенках теплообменных аппаратов, что снижает теплопроводность аппаратов [9]. Одной из наиболее

распространенных проблем является снижение уровня грунтовых вод, вызванное тем, что грунтовые воды используются быстрее, чем их восполняет природа. Интенсивное использование подземных вод влечет за собой уменьшение давления в водоносном горизонте, что в свою очередь вызывает «подсасывание» соленых вод из морских водных объектов.

В РК часть северных, центральных и западных районов и городов получают воду из подземных источников, перечень которых, с указанием числа жителей в каждом представлен в таблице 1. Подсчет данных, приведенных в таблице 1 показал, что суммарное число жителей в населенных пунктах РК, получающих воду из подземных источников, составляет 1 млн 40 тысяч 193 человека.

Таблица 1. Число жителей РК, проживающих в населенных пунктах с потреблением воды из подземных источников

Table 1. The number of residents of the RC living in settlements with water consumption from underground sources

№	Наименование населенного пункта	Число жителей, человек
	г. Бахчисарай	26090
1.	Бахчисарайский район	87739
	г. Белогорск	16298
2.	Белогорский район	60631
	г. Джанкой	37410
3.	Джанкойский район	64107
4	Кировский	51423
5	Красногвардейский	83287
	г. Красноперекоск	24660
6	Красноперекоспский район	23402
7	Нижнегорский	43827
8	Первомайский район	30640
9	Раздольненский	29888
10	Сакский район	76977
	г. Саки	24289
11	Черноморский район	30715
	г. Армянск	21239
	Городской округ Армянск включает г. Армянск с населением	23545 (21239)
12	Симферопольский район (часть)	165337
13	Советский район	30987
	г. Евпатория	108149
<i>Итого: 1 040 193 человек</i> - постоянно проживающих в зоне потребления воды из подземных источников		

Неблагоприятное санитарно-эпидемиологическое состояние водных объектов – источников централизованного питьевого водоснабжения- водохранилищ естественного зарегулированного стока.

В Крыму источниками централизованного питьевого водоснабжения являются как подземные, так и поверхностные источники, последние в свою

очередь подразделяются на водохранилища естественного зарегулированного стока так и на наливные водохранилища, с заполнением от СКК, работа которого в последнее время была возобновлена. Перечень населенных пунктов источниками водоснабжения, которых являются воды водохранилищ естественного зарегулированного стока на территории РК представлены в таблице 2, с указанием количества

жителей, потребляющих воду из данных источников, с указанием проектной и фактической производительности и технологической схемы ВОС. Часть перечисленных водохранилищ находится на балансе ГУП РК «Вода Крыма» со строгим соблюдением зон санитарной охраны первого пояса соблюдением всех прибрежно-

защитных полос, а часть водохранилищ находится на балансе управления оросительных систем и имеют сельскохозяйственное назначение, рыбохозяйственное назначение другие виды назначения, не только для водоснабжения населенных пунктов [8].

Таблица 2. Сведения о водохранилищах естественного стока РК и технологических схемах, установленных на них ВОС

Table 2. Information about natural flow reservoirs of the RC and technological schemes installed on them by WTP

Город, назначение водохранилища, (число жителей ИЦВ, для которых оно является основным)	Наименование, год ввода в эксплуатацию,	Объем млн. м ³	Названия рек	Сведения о технологических схемах ВОС, производительности и качественном составе воды
1	2	3	4	5
Водоснабжение г. Симферополя (352363), а также орошение земель сельскохозяйственного назначения.	Симферопольское, 1956 г.	36	Салгир	ВОС «Петровские скалы» (1959 г. реконструкция 1986 г.) ГО-СФ, $Q=80$ тыс. м ³ /сут. Смесители вихревые вертикального типа (2 секции $6 \times 7 \times 5,5$ (h)); ГО (5 секций $6 \times 45 \times 4,5$ (h)), со встроенными КХО (5 секций $6 \times 9 \times 4,5$ (h)); СФ (6 шт. $6 \times 9,5$ м.). Первичное обеззараживание УФ, вторичное обеззараживание гипохлоритом натрия.
Водоснабжение г. Симферополя, пгт Почтовое (3086), с. Малиновка (336), с. Новопавловка (683), с. Приятное Свидание (426), с. Тополи (609), с. Перово (3890), с. Дубки (2256), с. Залесье (1063), с. Новониколаевка (375), с. Фонтаны (2681)	Партизанское, 1966 г.	34,4	Альма	ВОС «Приятное свидание» (1974 г.) ГО-СФ, $Q=80$ тыс. м ³ /сут Смеситель вихревой вертикального типа ($4 \times 7 \times 5,5$ (h) состоит из 2 секций); ГО (10 секций $6 \times 45,6 \times 4,5$ (h)), со встроенными КХО (10 секций $6 \times 9 \times 4,5$ (h)). СФ (10 шт. с габаритами 6×9 м.)
Водоснабжение г. Симферополя, с. Доброе (3000), с. Андрусово (886), с. Заречное (2022), с. Лозовое (1889), с. Пионерское (5534).	Аянское, 1956 г.	3,9	Аян	Аянский гидроузел УФ-обеззараживание, обеззараживание гипохлоритом натрия. $Q=20$ тыс. м ³ /сут.
Водоснабжение г. Севастополя (522 057)	Чернореченское, 1956 г.	64,2	Черная	Севастопольские ВОС ГО-СФ, $Q=126$ тыс. м ³ /сут. В составе ВОС работают два блока: 1-й блок состоит из 2 очередей. Суммарная производительность первого блока - $Q=63$ тыс. м ³ /сут. В составе сооружений 1-го блока 1-й очередь (1954 г.) – ГО (6 секций) и СФ (8 шт.), 2-й очереди (1968) – ГО (4 секции) и СФ (6 шт.). Производительность 2-го блока (1980 г.) - $Q=63\ 000$ м ³ /сут. Включают ГО со встроенными КХО (8 секций с габаритами: $6 \times 40 \times 3,8$ (h)), и СФ (9 шт. с габаритами: $7,5 \times 5$ м.)
Водоснабжение г. Алушта (52318)	Изобильное, 1979 г.	13,25	Улу-Узень	Алуштинские ВОС (1974 г.) ГО-СФ. $Q=43$ тыс. м ³ /сут Построены по принципу деблокирования: ГО, со встроенными КХО (5 секций. с габаритами $6 \times 57,6 \times 3,7$ (h)), отделены от зала СФ (8 шт. с габаритами 6×6 м.) и размещены на расстоянии 10 м от здания главного корпуса, что соответствует п.16.7 СП 31.13330.2021. Обеззараживание гипохлоритом натрия.
	Кутузовское, 1986 г	1,1	Демерджи	

1	2	3	4	5
Водоснабжение г. Ялта (79457), пгт Гаспра (3086), г. Алушка (8017), пгт Кореиз (5692), пгт Симеиз (2703), пгт Никита (2313), п Олива (316), пгт Виноградное (1508), пгт Ливадия (837), пгт Отрадное (730), пгт Советское (679), пгт Голубой Залив (625), пгт Кацивели (541), пгт Восход (481), п Даниловка (472), пгт Парковое (410), с Оползневое (401), пгт Береговое (390), пгт Санаторное (229), пгт Понизовка (220), пгт Горное (147), пгт Курпаты (138), п Высокогорное (134)	Счастливые-1, 1964 г	12	Бельбек (приток – Манатра)	Ялтинские ВОС Спиральные отстойники-СФ $Q=102 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ Двухступенчатая схема состоит из 2-х спиральных открытых отстойников и скорых фильтров однослойных и двухслойных.
	Счастливые-2		Бельбек	
	Ключевское		Бельбек	
с. Верхоречье (1126), с. Синапное (293)	Загорское, 1980 г.	27,8 5	Кача	Обеззараживание при помощи хлора. Хлораторная, работающая на жидком хлоре.
Орошение земель с/н (Белогорский район)	Тайганское, 1938 г.	13,8	Биюк-Карасу	В данный момент вода по руслу р. Биюк-Карасу поступает в открытое русло СКК для заполнения каскада водохранилищ Керченского полуострова.
с. Чернополье (1251) (Белогорский район)	Белогорское, 1970 г.	23,3	Биюк-Карасу	В данный момент вода по руслу р. Биюк-Карасу поступает в русло СКК для заполнения каскада водохранилищ Керченского полуострова Фильтровальная станция с системой обеззараживания полностью разграблена вода поступает в водопроводную сеть села без очистки и обеззараживания.
Водоснабжение пгт Зуя (6230), с. Крым Роза (1755), с. Вишневое (249)	Балановское, 1974 г.	5, 07	Зуя	1 - я очередь ВОС пгт Зуя построена в 2013 г. $Q_{\text{проект}}=2 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$
Орошение земель с/н (Белогорский район)	Льговское, 1978 г.	2,2	Мокрый Индол	
Орошение земель с/н (Бахчисарайский район)	Альминское, 1926 г.	6,2	Альма	
	Бахчисарайское 1935 г.	6, 89	Кача	

Симферопольское, Аянское водохранилища построены на реках Салгир и Аян, формирующие Салгирскую долину, на территории которой проживает более 15 тысяч человек и количество жителей постоянно увеличивается за счет внутренней миграции населения РФ. Теплый климат, живописные места, фруктовые деревья, близость к Черноморскому побережью способствует все большему увеличению миграционного потока.

Население переезжает из различных уголков страны на территорию РК и, в частности, обустроивает свои жилища в Салгирской долине, оборудуя их септиками, ямами с выгребом, и зачастую на небольшом расстоянии от которых на территории частного домовладения располагают и

скважину, при помощи которой забирают воду с небольшой глубины, гордо именуя «автономным водоснабжением» и «автономной канализацией» [8]. Все это приводит к неблагоприятному санитарному состоянию источников централизованного питьевого водоснабжения оказывает негативное влияние на качественные показатели воды и способствует их бактериальному заражению, а кроме бактерий в воде могут находиться вирусы, и простейшие агенты, кольчатые черви и водоросли. Таким образом согласно данных, приведенных в таблице 2, в зоне водоснабжения из поверхностных источников естественного стока на территории РК проживает более 1 069 119 человек.

Повышенное содержание органических соединений в водохранилищах РК, заполняемых водой Северо-Крымского канала. Воды, из наливных водохранилищ, заполняемых Северо-Крымским каналом, таят в себе множество угроз, обусловленных тем, что в бассейне реки Днепр проживает более 30 млн. человек, расположено множество городов с развитой промышленностью. Несмотря на разблокирование СКК в марте 2022 года при проведении специальной военной операции (СВО) и восстановление подачи на полуостров Крым днепровской воды необходим поиск методов обеспечения водной безопасности на основе современных водных технологий. Система водопользования на основе использования днепровской воды, подаваемой по СКК, разрабатывалась и создавалась на основе водных технологий середины и конца прошлого века. Поэтому в настоящее время необходима комплексная оценка возможности использования воды Северо-Крымского канала как источника водоснабжения, с разработкой экономически обоснованных рекомендаций по водным технологиям для выполнения реконструкции ВОС приоритетных направлений, с учетом новых документов территориального планирования, новой нормативной базы Российской Федерации по вопросам водоснабжения и водоотведения. Следует учитывать, что днепровская вода в СКК подается с сопредельной территории, где проводится СВО, и необходимо учитывать риски от возможных преднамеренных террористических действий и по загрязнению воды. Указанные обстоятельства требуют особого внимания при выполнении работ, связанных с использованием воды СКК в питьевых целях. Наливные водохранилища, питаемые СКК, являются источником водоснабжения для части г. Симферополь, г. Феодосии, г. Керчь, и ряда населенных пунктов Ленинского района (таблица 3).

Таким образом в зоне водоснабжения из поверхностных источников наливного типа заполнения водоснабжение потенциально может осуществляться для 309 183 человек. (В период с 2014 года в данные населенные пункты вода поступает частично из Белогорского и Тайганского водохранилищ естественного стока по руслу р. Бююк-Карасу и частично от Нежинского, Новогригорьевского и Просторненского водозабора. Обобщенные данные распределения населения РК по виду источника водоснабжения представлены в таблице 4, а также на рисунке 2 в виде диаграммы.

Повышенное содержание органических соединений в водохранилищах РК, заполняемых водой СКК. При обеззараживании хлором обрабатываемой воды и при наличии в ней органических соединений образуются сложные хлорорганические соединения, которые оказывают негативное влияние на здоровье человека. Если в ближайшее время появится возможность введения в действие водопроводных очистных сооружений, работающих на воде наливных водохранилищ, из СКК, транспортирующего воды реки Днепр, в бассейне которой проживают свыше 30 млн. человек.

Применение хлора в процессе водоподготовки приводит к образованию более 500 наименований хлорорганических соединений (ХОС) [10-11]. Количество ХОС, которые образуются в питьевой воде определяется уровнем загрязнения источников питьевого водоснабжения органическими веществами природного и антропогенного происхождения, а также дозами хлора. При этом ХОС практически не удаляются на последующих стадиях водоподготовки и способствуют повышению эпидемиологической опасности питьевой воды [14]. Хлорорганические токсиканты обладают канцерогенными, мутагенными, тератогенными свойствами, эмбриотоксичностью, генотоксичностью вызывают аллергические реакции, угнетение нервной системы, нарушение обмена веществ человека [11]. ХОС вызывают гепатоксические действия, могут поражать почки, центральную нервную и эндокринную систему, органы зрения. Причиной появления ХОС является содержание природных органических соединений (ПОС). Наличие в воде органических веществ оказывает влияние прямым или косвенным образом на такие процессы, как подвижность тяжелых металлов и гидрофильных органических соединений, кинетику агрегации коллоидных примесей [14].

Вторичные продукты хлорирования имеют низкую степень биоразложения и не приводят к бактериальному росту в распределительной сети, являются причиной появления в питьевой воде токсичных хлорорганических соединений [11]. Остаточное содержание органических загрязнений способствует образованию комплексных соединений, с теми металлами, с которыми взаимодействует вода [14]. Например, в качестве коагулянтов на многих водоочистных станциях используют сернокислый алюминий. Наличие органических соединений в воде провоцирует рост повышенных концентраций остаточного алюминия в воде, прошедшей очистку на ВОС.

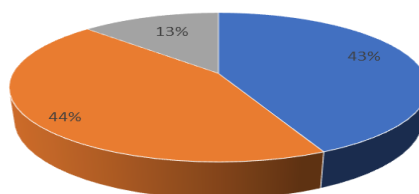
Таблица 3. Сведения о наливных ИЦВ РК и технологических схемах, установленных на них ВОС
Table 3. Information about the liquid-filled SCWS of the RC and the technological schemes installed on them WTP

Город, назначение водохранилища, количество жителей ИЦВ, для которых оно является источником	Название водохранилищ, год ввода в эксплуатацию	Объем млн. м ³	Источник наполнения	Сведения о технологических схемах подготовки воды на ВОС, их производительности и качественному составу воды
1	2	3	4	5
Водоснабжение г. Старый Крым (9973), с. Тутовское (132), с. Первомайское (2880), с. Жемчужина Крыма (265), с. Изобильное (233), с. Изюмовка (1128) и орошение.	Старо-Крымское, 1957 г.	3,15	Частично р. Чорох-Су, воды СКК В данный момент пополнение за счет естественных осадков	Старокрымские ВОС (1983 г.) ОВО-СФ $Q_{\text{проект}}=20 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ $Q_{\text{факт}}=9 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ Вертикальный смеситель далее поступает в ОВО (4 шт. 3 рабочих и 1 резервный (10,5×9×5,5(h)), СФ (5 шт. 6×6 м.). Хлораторная на жидком хлоре.
г. Феодосия (67902), г. Судак (16784), пгт Коктебель (2807), пгт Наниково (438), пгт Орджоникидзе (2572), пгт Приморский (12560), с. Береговое (2377), с. Степное (57), с. Насыпное (1581), с. Ближнее (2779), с. Подгорное (276), с. Южное (318)	Феодосийское, 1971 г. Фронтное, 1978 г.	15,37 35	Наполнение водохранилищ осуществляется из СКК. В настоящее время подача воды в водохранилища ведется за счет переброски воды из Белогорского и Тайганского водохранилищ по руслу р. Би-юк-Карасу, а также подача артезианских вод Нежинского, Просторненского, Новогригьевского подземного водозабора в открытое русло СКК	Феодосийские ВОС (1975 г.) Обрабатываемая вода поступает на микрофилтры, затем в дырчатые смесители, а далее на КО-3 с водовоздушной промывкой (16 шт. с габаритами 8×8 м.). $Q=100 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$
с. Уварово (852), с. Батальное (1275), с. Южное (79), с. Виноградное (1044), с. Семисотка (1583), с. Ильичево (1844), с. Останино (1327), с. Кирово (807), с. Ленинское (1657), с. Луговое (906), с. Ерофеево (129), с. Красногорка (827), с. Королево (104), с. Каменское (254)	Ленинское (Юз-Макское), 1972 г.	7,7		Ленинские ВОС (1976 г.) $Q_{\text{проект}}=40 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.};$ $Q_{\text{факт}}=10 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ ГО-СФ Смеситель, совмещенный с промежуточным резервуаром, 5-секционный ГО, со встроенной КХО, 8 СФ, хлораторная, склад коагулянта, 2 РЧВ $W=1000 \text{ м}^3$.
с. Марьевка (591), с. Пташкино (23), с. Челябиново (785)	Сокольское, 1972 г.	2,26		Сокольские ВОС ОВО-СФ $Q_{\text{проект}}=3 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.};$ $Q_{\text{факт}}=0,4 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Смеситель, ОВО (1 шт.), СФ (3 шт.), хлораторная, 2 РЧВ $W=400 \text{ м}^3$.
Симферополь г. Севастополь	Межгорное, 1989 г.	50	Поступление воды от СКК прекращено, объект законсервирован.	Межгорные ВОС «Жаворонки» (1990 г.) ГО-СФ. Перегородчатые смесители (3 шт. 9×45×6,0(h), КХО (3 шт. по 5 секций 12×24×6,0(h)), встроенные в ГО (3 шт. по 5 секций 12×36,5×6,0(h)), СФ (15 шт. 12×12 м.). $Q_{\text{проект}}=225 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.};$ $Q_{\text{факт}}=0$

1	2	3	4	5
Для создания подпора	Зеленоярское, 1975 г.	3,02	Наполнение водохранилищ осуществляется из СКК. В настоящее время подача воды в водохранилища ведется за счет переборки воды из Белогорского и Тайганского водохранилищ по руслу р. Биюк-Карасу, а также подача артезианских вод Нежинского, Простор-ненского, Новогригьевского подземного водозабора в открытое русло СКК	Предназначено для аккумуляции воды из СКК для бесперебойной работы НС-3, подающей воду в Керченское водохранилище
г. Керчь (150573)	Станционное, (Керченское) 1975 г. Данные качественного состава, приведены в таблице А.1.9	24		Керченские ВОС (1976 г.) КО-1 $Q_{проект}=100 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$; $Q_{факт}=40 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ Аванкамера с микрофилтрами, смесители коридорного типа, КО-3 (10 шт.) с двухслойной песчаной загрузкой, реагентный блок; хлораторная со складом жидкого хлора.
с. Белинское (368), с. Верхнезаморское (86), с. Нижнезаморское (92), с. Станционное (136), с. Песочное (156), с. Чистополье (1706), с. Горностаевка (2080), с. Новониколаевка (1138)	Станционное, (Керченское) 1975 г. Данные качественного состава, приведены в таблице А.1.9			Станционные ВОС (1982 г.) ОВО-СФ $Q_{проект}=20 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$; $Q_{факт}=4 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ Смеситель вихревого типа, ОВО коридорного типа (4 шт.), СФ (4 шт.), склад коагулянта, хлораторная, 2 РЧВ $W=2000 \text{ м}^3$
г. Щелкино (10328), с. Калиновка (2278), с. Мысовое (429), с. Азовское (41), с. Заводское (211), с. Семеновка (280)	Самарлинское 1978 г.	8,09		Самарлинские ВОС (1982 г.) ОВО-СФ $Q_{проект}=20 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$ Смесители, ОВО, СФ.

Таблица 4. Распределение числа жителей РК в зависимости от источника централизованного питьевого водоснабжения
Table 4. Distribution of the number of residents of the RC depending on the source of centralized drinking water supply

Наименование источника водоснабжения	Суммарное число жителей
Количество населения, потребляющего воду из подземных источников	1 040 193
Количество человек, получающих воду от поверхностных источников естественного стока	1 069 119
Количество человек, получающих воду из поверхностных источников наливного типа	309 138
Суммарное количество жителей в РК и г. Севастополь	2 418 450



- Количество населения, потребляющего воду из подземных источников
- Количество человек, получающих воду от поверхностных источников естественного стока
- Количество человек, получающих воду из поверхностных источников наливного типа

Рис. 2. Распределение населения РК по источникам водоснабжения
Fig. 2. Distribution of the population of the RC by water supply sources

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Как отмечалось в части районов РК водоснабжение осуществляется из подземных источников, характеризующихся высокой минерализацией, повышенным содержанием жесткости, а также повышенным значением содержания хлоридов и сульфатов. Превышение данными показателями предельно допустимых концентраций является факторами риска для здоровья населения, потребляющего воду данного качества. Рассмотрим ситуацию по данным показателям в северных районах Республики Крым: Раздольненском, Джанкойском и Красноперкопском.

Характеристика водоносного горизонта, служащего для водоснабжения Раздольненского района РК. Источники водоснабжения расположены в водоносном горизонте мэотис-понтических отложений, который на значительной территории не имеет разделяющего водоупора и составляет с нижележащим водоносным горизонтом сарматских отложений единый водоносный комплекс. Питание его осуществляется, в основном, за счет инфильтрации атмосферных осадков. В пределах Равнинно-Крымского артезианского бассейна (Причерноморский артезианский бассейн) водоносный горизонт в мэотис-понтических отложениях является основным эксплуатационным на территории Раздольненского, Джанкойского, Нижнегорского, Кировского, Советского, северной части Красногвардейского районов, а также на площади Красноперкопского района, где эксплуатируется наиболее водообильная верхняя гидродинамическая зона мэотис-понтических отложений в составе сармат-мэотис-понтического водоносного комплекса, для которого характерна четко выраженная вертикальная гидрохимическая зональность: фиксируются слои с различным содержанием солей. Верхний слой в отложениях понта и верхов мэотиса, мощностью 5,0...30,0 м, с минерализацией 0,4...1,0 г/л, средний слой – в отложениях мэотиса-верхней части сармата с мощностью 46 м с минерализацией 1,0...3,0 г/л и нижний слой в отложениях среднего сармата с минерализацией > 3,0 г/л. При приближении к соленым озерам воды нижних слоев комплекса с застойным режимом достигают минерализации 10,0...18,5 г/л. Для большинства скважин, эксплуатирующих данный горизонт, характерен стабильный темп роста минерализации за 2011 - 2015 гг. что обусловлено подтягиванием некондиционных вод из нижележащих отложений, приходящееся на период максимального водоотбора. Так же качество воды в водных объектах района формируется под влиянием загрязнений, поступающих с атмосферными осадками, неочищенными сточными водами предприятий, поверхностным стоком с территории населенных пунктов, сельхозугодий, а также эрозии почв. В нарушение требований Водного кодекса РФ

в водоохраных зонах водных объектов размещена неканализованная жилая застройка населенных пунктов, производственные и сельскохозяйственные объекты, свалки ТКО, кладбища, проводится опрыскивание садов ядохимикатами. На основе изучения состояния системы водоснабжения Раздольненского района РК следует выделить несоответствие качества воды в источниках СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" [1] по минерализации, жесткости и хлоридам, что является основной проблемой в области водоснабжения Раздольненского муниципального района и входящих в него сельских поселений. Система водоснабжения Раздольненского муниципального района РК и входящих в него сельских поселений Березовское, Ручьевское, Кукушкинское, Славновское, Славянское, Чернышевское, осуществляется по типовой схеме, при которой типовым решением является схема подача воды от насосной станции, расположенной на скважине, в водонапорную башню (стандартным объемом 10 м³ или 25 м³) или непосредственно в водопроводную распределительную сеть населенного пункта.

В 27 селах Раздольненского района эксплуатируются локальные системы водоснабжения на базе отдельных скважин (Стерегущее, Аврора, Славянское, Кукушкино, Огни, Чернышево, Кропоткино, Портовое, Ботаническое, Кумово, Максимовка, Камышное, Ручьи, Федоровка, Огородное, Коммунарное, Ветрянка, Красноармейское, Овражное, Зимино, Северное, Новоселовское, Чехово, Березовка, Ульяновка, Нива, Рылеевка) (рисунок 3). *Села Червоное, Сенокосное, Молочное, Волочаевка, Ковыльное, Серебрянка, Воронки, Соколы, Бахчевка, Орловка и пгт. Раздольное обеспечиваются услугой централизованного холодного водоснабжения от Кумовского водозабора.* Село Орловка на данный момент получает воду из артезианской скважины, расположенной вблизи с. Молочное

Водоснабжение пгт. Раздольное осуществляется совместно от Кумовского водовода, и водозаборных скважин, расположенных на территории пгт. Раздольное. Жители сел Славное, Котовское и Каштановка получают воду из собственных артезианских скважин, построенных и оборудованных на придомовых участках. Услуги централизованного водоснабжения населению коммунальным предприятием не предоставляется.

Данные качественных показателей подземной воды в Раздольненском муниципальном районе РК и входящих в него сельских поселений свидетельствуют о превышении ПДК СанПиН 1.2.3685-21 [1] по трем основным показателям: сухому остатку (минерализации), жесткости и хлоридам. При децентрализованном водоснабжении повсеместно отмечается расположение колодцев в непосредственной близости к дворовым уборным и

поглощающим ямам, что вызывает угрозу бактериального загрязнения питьевой воды и загрязнения нитратами. Очистка воды в сельских поселениях Раздольненского муниципального района не производится. Отсутствие систем водоподготовки в большинстве населенных пунктов, обусловлено высокими показателями качества используемых подземных вод и недостатком финансирования для создания систем водоподготовки.

Высокий удельный вес проб с отклонениями от санитарных норм в подземных источниках Раздольненского района связан с повышенным уровнем общей минерализации и жесткости воды из скважин эксплуатируемого подземного водоносного горизонта. В подземных источниках этого района кратность превышений нормативов достигает 2...3 ПДК. Группа скважин водозабора

района находятся в сложных гидрогеохимических условиях, где пресные воды в разрезе или отсутствуют, или их мощность не превышает 5...10 м, а минерализация с глубиной увеличивается до 10 и более, г/л. Скважины находятся в переходной зоне от минерализованных вод к пресным. Все это обуславливает подтягивание минерализованных вод при эксплуатационном водоотборе по площади и в разрезе, что было установлено в период разведочных работ.

На основании лабораторных данных Красноперекопского филиала ГУП РК «Вода Крыма» в Раздольненском районе фоновыми значениями основных регламентируемых нормативным требованиям показателей качества артезианских вод, используемых для хозяйственно-питьевых целей, представлены в таблице 5.

Таблица 5. Показатели качества артезианских вод
Table 5. Quality indicators of artesian waters

№	Показатели качества	Ед. измерения	Концентрация
1	Сухой остаток	мг/л	690...3500
2	Хлориды	мг/л	240...1200
3	Сульфаты	мг/л	350...720
4	Общая жесткость	мг-экв/л	8,7...35,2

Важной характеристикой химического состава подземных вод является общая минерализация (то есть суммарное содержание растворенных веществ), определяемая как сухой остаток, получаемый при выпаривании воды при температуре 105...110°C. Как правило, величина сухого остатка больше, чем сумма наиболее распространенных ионов, поскольку кроме них в сухой остаток входят и другие компоненты, (например, Fe^{2+} , Al^{3+} , CO_2^{2-} и другие).

Возможность практического использования воды во многих случаях определяется ее жесткостью. Слишком жесткая вода вызывает в организме накопление солей (склерозы). В соответствии с положениями СанПиН [1], в питьевой воде общее содержание хлоридов не должно превышать 350 мг/дм^3 , а сульфатов не более 500 мг/дм^3 . При употреблении питьевой воды, при наличии сульфатов и хлоридов превышающие нормы, нарушается водно-солевой баланс, угнетается желудочная секреция. Увеличенная концентрация сульфатов может давать слабительный эффект, однако человеческий организм со временем адаптируется и перестает реагировать на них. Для наглядного представления масштаба потребления воды населением Раздольненского района несоответствующей требованиям СанПиН [1], данные лабораторного

анализа по показателю жесткости по населенным пунктам разделили на ПДК с получением шкалы $1 < \text{ПДК} < 2$; $2 < \text{ПДК} < 3$; $3 < \text{ПДК} < 4$; $4 < \text{ПДК} < 5$; с соответствующей цветовой интерпретацией и нанесли на карту Раздольненского района.

Полученная карта позволила увидеть ряд населенных пунктов с превышением ПДК в 4 раза, некоторое количество с превышением ПДК в 3 раза и большая часть населенных пунктов потребляет воду с превышением ПДК в диапазоне от 1 до 2.

Качественные показатели воды в Джанкойском районе. Для водоснабжения города Джанкоя и всех сельских населенных пунктов Джанкойского района используют воду артезианских источников глубиной 100...120 м, расположенных на территории соответствующих населенных пунктов.

Качественные показатели питьевой воды в источниках централизованного питьевого водоснабжения населенных пунктов Джанкойского района представлены в таблице 6. Значения показателей по жесткости были пересчитаны в предельно-допустимы концентрации по данному элементу, в следствие чего значения по ПДК получились в промежутках $1 \leq \text{ПДК} \leq 2$; $2 \leq \text{ПДК} \leq 3$; $3 \leq \text{ПДК} \leq 4$; $4 \leq \text{ПДК} \leq 5$, полученные значения нанесли на карту Джанкойского района;

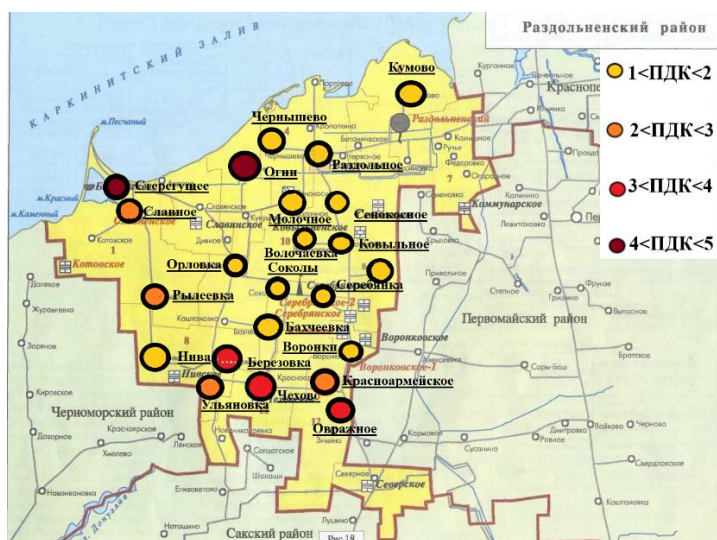


Рис. 3 Карта превышения ПДК по жесткости в населенных пунктах Раздольненского района
Fig 3 Map of exceeding the maximum permissible hardness in the settlements of the Razdolnensky district

Таблица 6. Показатели качества воды в скважинах для забора артезианских вод по населенным пунктам Джанкойского района [15]

Table 6. Indicators of water quality in wells for artesian water intake in the settlements of Dzhankoy district [15]

Место отбора проб	Показатель:						
	Общая жесткость, мг-экв/л	Сухой остаток, мг/дм ³	Кальций, мг/дм ³	Магний, мг/дм ³	Хлориды, мг/дм ³	Сульфат, мг/дм ³	Азот нитратный, мг/дм ³
с. Лобаново	26,5	2293,4	17	9,5	928,6	579,4	15
с. Источное	24,5	2235,4	13	11,5	780,9	719,5	23
с. Тутовое	24,1	2246,2	16,4	7,8	676,2	800,5	15
с. Марьино	33	2811,8	21	12	847,5	1079,4	33
с. Жилино	29	2495,4	19,5	9,5	933,2	761,2	27,2
с. Ковыльное	19	1643	12,2	6,8	620,7	400,6	2
с. Новокрымское	29	2520,6	18	11	1142,7	530	26,1

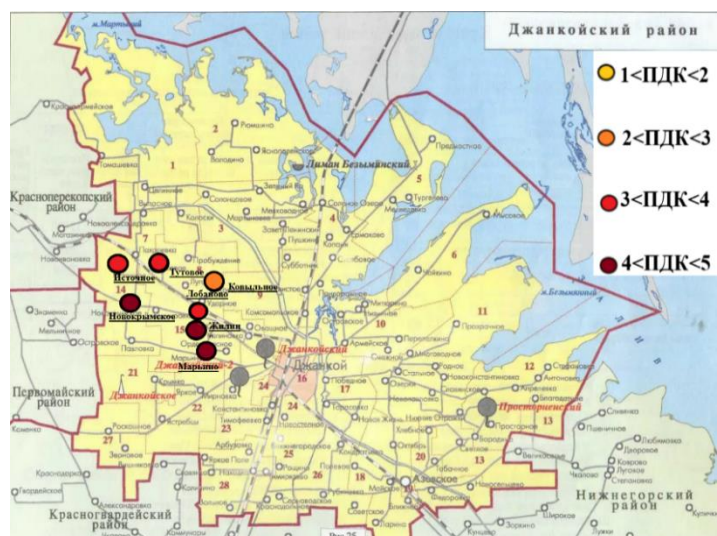


Рис. 4 Карта превышения ПДК по жесткости в населенных пунктах Джанкойского района
Fig. 4 Map of exceeding the maximum permissible hardness in the settlements of the Dzhankoy district

Анализ показателей, представленных на рис. 4 показал, что вода подается в населенные пункты с превышением ПДК от 4 до 5.

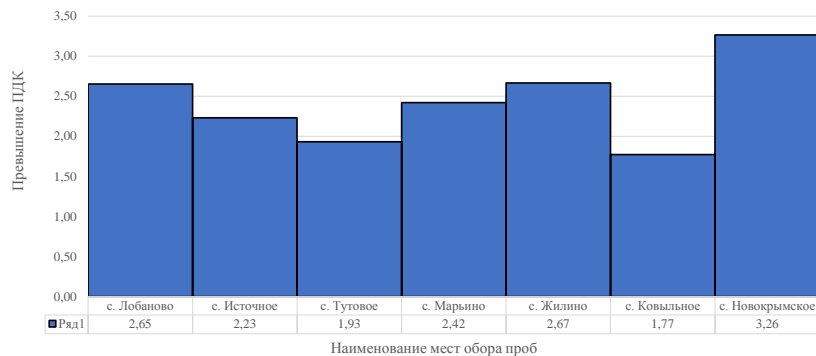


Рис. 5 Гистограмм превышения ПДК по хлоридам в населенных пунктах Джанкойского района
 Fig. 5. Histograms of the excess of the MPC for chlorides in the settlements of the Dzhankoy district

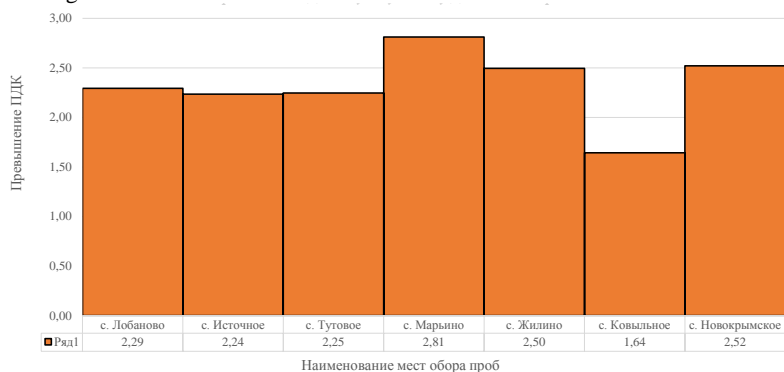


Рис. 6 Гистограмм превышения ПДК по сухому остатку в населенных пунктах Джанкойского района
 Fig. 6 Histograms of the excess of the MPC by dry residue in the settlements of the Dzhankoy district

Выполненный анализ показателей, представленных на рис. 5-6, показал, что превышение хлоридов в диапазоне от 1,8 до 3,2 ПДК, превышение 1,5 до 2,7 по сухому остатку в источниках водоснабжения Джанкойского района.

район находится в переходной зоне, где артезианские воды с сухим остатком до 2 г/л севернее линии сел Совхозное-Почетное-Танковое сменяются на воды с минерализацией 2 г/л и более. Основные показатели добываемых вод соответствуют фоновым природным значениям.

Анализ проб подземных вод Красноперекопского района. Красноперекопский

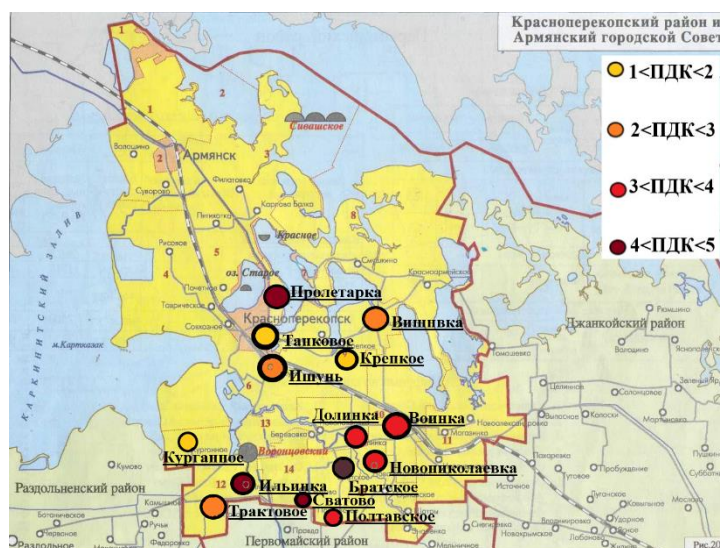


Рис. 7 Карта превышения ПДК по жесткости в населенных пунктах Красноперекопского района
 Fig. 7 Map of exceeding the maximum permissible hardness in the settlements of Krasnoperekopsky district

Графический анализ рис. 7, полученной карты показал, что вода подается в населенные пункты с превышением ПДК от 4 до 5. На рис. 8 представлена гистограмма превышения ПДК по хлоридам в населенных пунктах Красноперекопского района.

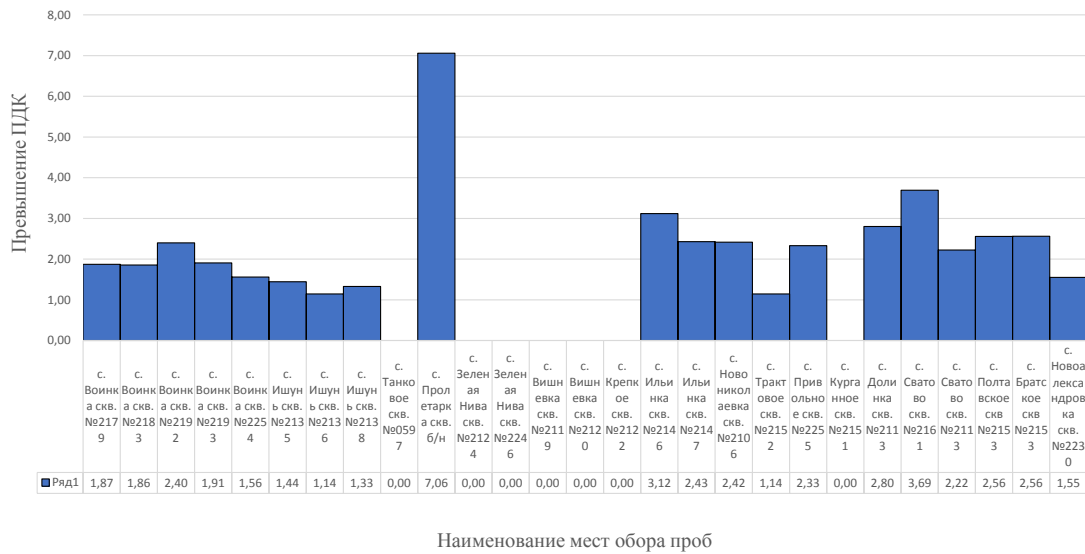


Рис. 8 Гистограмм превышения ПДК по хлоридам в населенных пунктах Красноперекопского района
 Fig. 8 Histograms of the excess of the MPC for chlorides in the settlements of the Krasnoperekopsky district

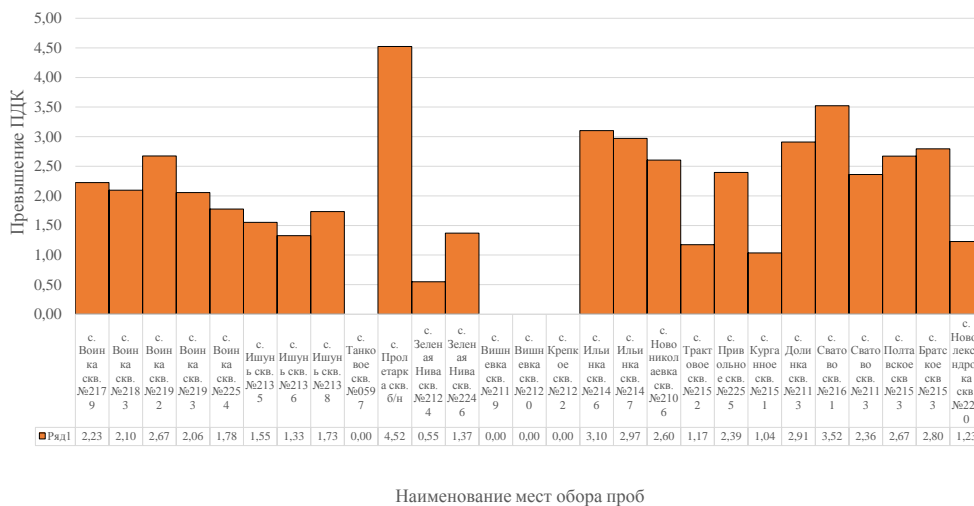


Рис. 9 Гистограмм превышения ПДК по сухому остатку в населенных пунктах Красноперекопского района
 Fig. 9 Histograms of excess MPC by dry residue in settlements of Krasnoperekopsky district

Графический анализ рис. 8-9, показал превышение хлоридов в диапазоне от 1,8 до 3,2 ПДК, превышение 2,5 до 4,5 по сухому остатку в источниках водоснабжения Красноперекопского района.

ПДК свидетельствует о том, сколько человек может употреблять воду не кондиционного качества [16]. С целью выявления тех или иных факторов воздействия на здоровье человека была рассмотрена таблица качественного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

С целью поиска взаимосвязи между качественным составом воды, а также

заболеваниями населения, проживающего на территории РК, было составлено обращение в управление статистики Республики Крым, которое позволило получить данные по заболеваемости населения по категориям международной классификации болезней по РК в период с 2000 по 2007 год. В сводке были приведены данные по количеству впервые зарегистрированных случаев заболевания населения по классам болезней в РК, в абсолютных значениях, а также в показателях заболеваемости на 100 тысяч населения, полученные данные, были обработаны и представлены графически на рисунке 10.

Графический анализ данных представленных на рисунке 10 позволяет заключить, что на первом

месте по заболеваемости находится болезни органов дыхания (со средним показателем 21 000 на 100 000); на втором месте - травмы (со средним показателем 5 000 на 100 000 населения, отравления и некоторые другие последствия в результате действия внешних сил; на третьем месте – болезни кожи и подкожной клетчатки (со средним показателем 4 000 на 100 000 населения), на четвертом месте болезни мочеполовой системы (со средним показателем 3 800 на 100 000 населения); пятую строку разделяют болезни системы кровообращения (со средним показателем 3 000 на 100 000 населения). Показатель обращения с

новообразованиями находится на уровне 800 на 100 000. Структура онкологических заболеваний представлена на рис. 11.

Анализ данных представленных на рис. 11 показывает, что на первом месте в структуре онкологических заболеваний находится рак кожи (21%), на втором месте – рак трахеи бронхов и легких (14%), на 3 - месте рак желудка (8 %); рак обводного кишечника - (6%) и рак прямой кишки – (6 %). На рисунке 3.9 представлена диаграмма распределения структуры онкологических заболеваний по городам и районам РК.

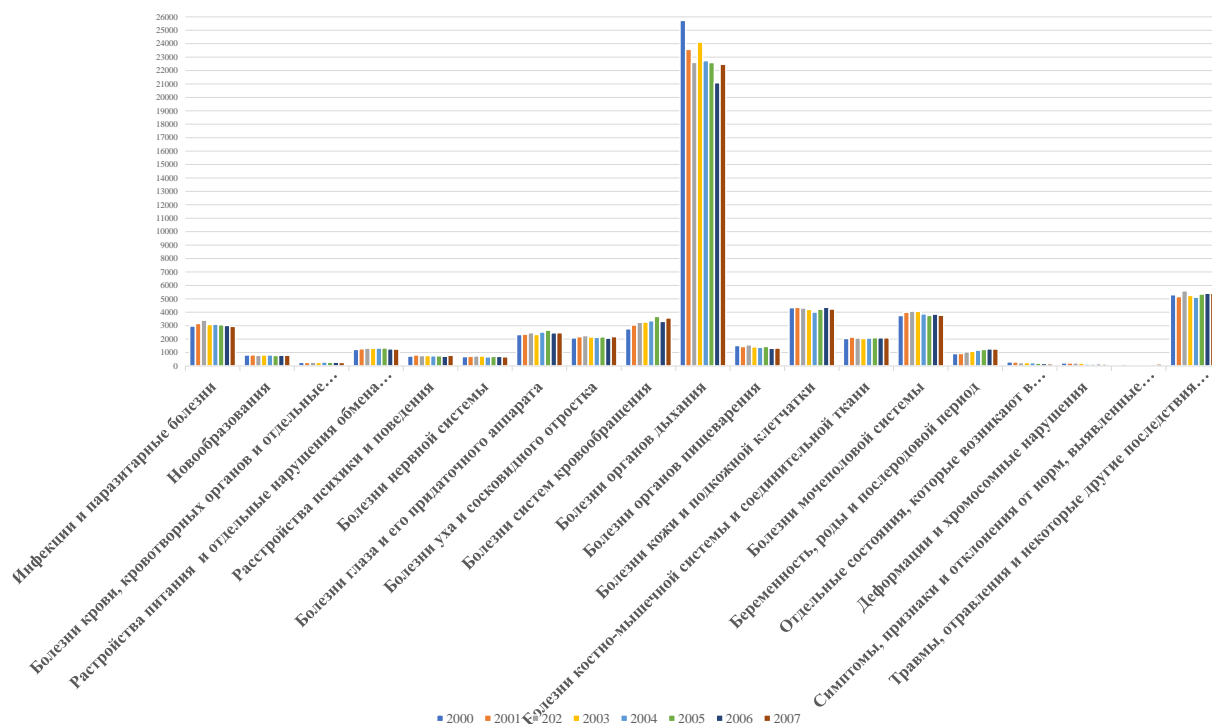


Рис. 10 Структура заболеваний в РК на 100 тысяч жителей в период с 2000...2007 год
Fig. 10 The structure of diseases in the RC per 100 thousand inhabitants in the period from 2000...2007

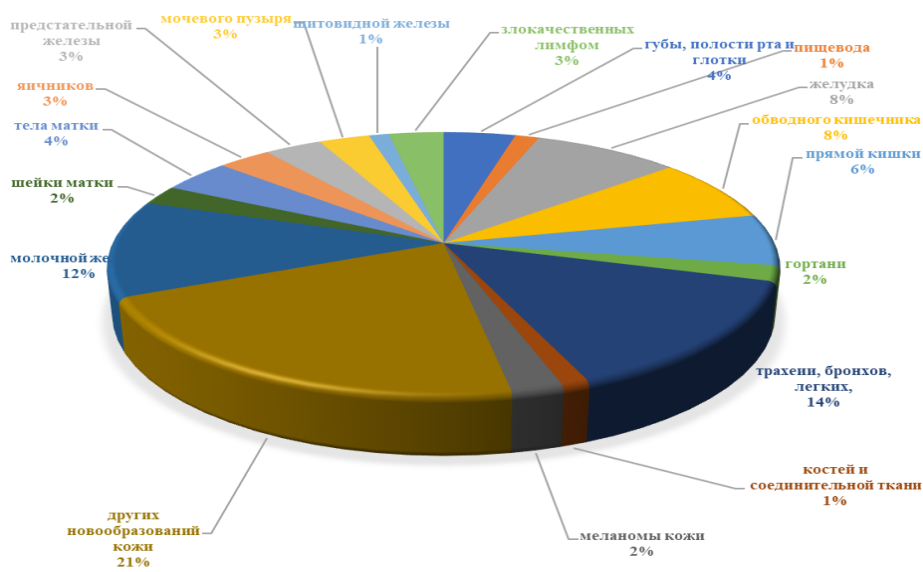


Рис. 11 Структура онкологических заболеваний в РК за 2007 год
Fig. 11 Structure of oncological diseases in the RC for 2007 year

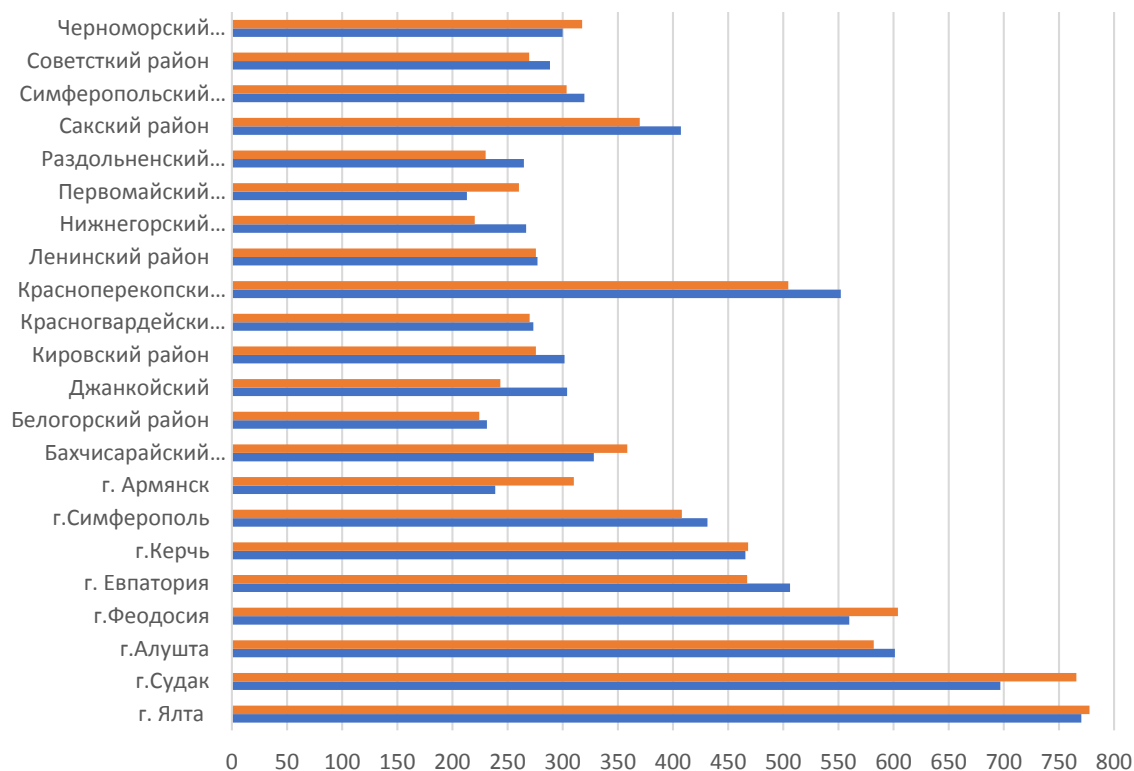


Рисунок 12 – Диаграмма распределения онкологических заболеваний по городам и районам РК
Figure 12 – Diagram of the distribution of oncological diseases by cities and districts of the RC

Анализ данных приведенных на рис. 12 показал, что наибольшее количество выявленных онкологических заболеваний соответствует приморским городам РК (городам, расположенным на Черноморском побережье: г. Ялта, г. Алушта, г. Судак, г. Евпатория, что обусловлено воздействием солнечных радиационных лучей, что также подтверждается в аналитической справке министерства здравоохранения РК (2014 год) [17]. В таблице 7 представлена выборка по количеству зарегистрированных случаев мочекаменной-болезни (МКБ) на территории РК и г. Севастополь.

Таблица 7. Выборка из таблицы заболеваемость МКБ по РК и г. Севастополь [17]
Table 7. Sample from the table of the incidence of ICD in the RC and Sevastopol [17]

РЕГИОН	ЗАРЕГИСТРИРОВАНО БОЛЬНЫХ С ДИАГНОЗОМ МКБ (ВЗРОСЛЫЕ)			ЗАРЕГИСТРИРОВАНО БОЛЬНЫХ С ДИАГНОЗОМ МКБ (ВЗРОСЛЫЕ) НА 100 ТЫСЯЧ НАСЕЛЕНИЯ			ЗАРЕГИСТРИРОВАНО БОЛЬНЫХ С ДИАГНОЗОМ МКБ, УСТАНОВЛЕННОЕ В ПЕРВЫЕ В ЖИЗНИ (ВЗРОСЛЫЕ) НА 100 ТЫСЯЧ НАСЕЛЕНИЯ		
	2005	2016	ПРИРОСТ	2005	2016	ПРИРОСТ	2005	2016	ПРИРОСТ
РЕСПУБЛИКА КРЫМ	-	11002			712,1			2190	
Г. СЕВАСТОПОЛЬ	-	4231	1321,6					682	

Определяем дозу общего соледождения, поглощаемую с питьевой водой по выражению [21]:

$$ADD = DW * C / BW = 2 \text{ л} * 2 \text{ г/л} / 70 \text{ кг} = 0,05714 \text{ г/кг}; \quad (1)$$

где DW – количество потребляемой воды человеком в питьевых целях, C – концентрация общего соледождения в питьевой воде, BW – средняя масса человека

Определяем величину риска при пероральном путях поступления воды высокой минерализации [21]:

$$RISK = RISKW = 0,05714 * 1 = 0,05714, ; \quad (2)$$

это значит 57 140 на 1 миллион человек, что соответствует 5 140 на 100 тысяч человек.

Потенциально-количество заболевших людей на территории РК, потребляющих воду из подземных источников, как было определено ранее составляет (рис. 2 – 43%) $5140 \cdot 0,43 = 2210,2$ на 100 тысяч человек, что хорошо коррелирует с данными, представленными в таблице 7, в которых данная величина составляет 2190 человек, у которых фиксировалось заболевание МКБ на территории РК.

ВЫВОДЫ

1. Вся территорию РК условно можно разделить на 4 района в зависимости от рисков, которые могут возникать от потребления воды того или иного качества. К первому району отнесли населения проживающее в Красноперекоском, Джанкойском, Советском, Кировском, Первомайском, Черноморском, Раздольненском, Сакском, Красногвардейском, Нижнегорском, Белогорском, Бахчисарайском районе всего в данной зоне проживает 1 040 193 человек; ко второму району относятся районы, в которых проживает население, для которых источниками водоснабжения являются водохранилища естественного стока и при ненадлежащем соблюдении зон санитарной охраны могут служить источниками заражения населения бактериями, вирусами, простейшими. В зоне водоснабжения из поверхностных источников проживает 1 069 119 человек; к третьему району относятся районы, в которых проживает население, источниками водоснабжения которых является наливные водохранилища, заполняемые водой СКК, и это составляет 309 138; к четвертому району можно отнести практически всю территорию, с плохим, аварийными сетями, за исключением только тех населенных пунктов, где было проведены капитальные ремонты сетей водоснабжения по государственной программе ФЦП.

2. Выявлены основные факторы, оказывающее негативное влияние на здоровье населения РК, которые связаны с показателями качества воды в ИЦВ, а также определены значения риска при пероральных путях поступления воды высокой минерализации.

3. Высокий удельный вес проб с отклонениями от санитарных норм в подземных источниках Раздольненского, Красноперекоского, Джанкойского района связан с повышенным уровнем общей минерализации и жесткости воды из скважин эксплуатируемого подземного водоносного горизонта. Кратность превышений нормативов достигает 2...5 ПДК.

4. Регулярное употребление воды ненормированного качества приводит к образованию конкрементов в почках и способствует возникновению у человека мочекаменной-болезни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.1.4.1074-01. Государственные санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения [Текст]. – М.: Минздрав России, 2002. – 111 с.
2. Лущик, А.В. Обзор формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов в Крыму / А.В. Лущик, Н.В. Горбатюк, Т.А. Иваненко // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – №6(58). – С. 99-106.
3. Лущик, А.В. Водоотбор и его влияние на подземные воды пригодные для хозяйственно-питьевого водоснабжения в Крыму / А.В. Лущик, Н.В. Горбатюк, В.И. Мороз // Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – № 2(54). – С. 83-91.
4. Безруков Е.А. Влияние жесткости питьевой воды на возникновение мочекаменной болезни и химической состав камней у жителей городов Кумертау и Мелеуз Республики Башкортостан / Е.А. Безруков, В.С. Саенко, Ф.Х. Кантимеров, Д.Ф. Кантимеров, Ю.Г. Аляев // Медицинский вестник Башкортостана: сб. науч. тр. – 2015. – Том 10, №3 – С. 83-87.
5. Сяндюкова Д.Р. Влияние загрязненной водной среды на экологию здоровья населения / Д.Р. Сяндюкова, М.В. Асташина // Яковлевские чтения-2022: Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения. Сборник докладов участников XVII международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева. Москва. – 2022. – С. 210-216.
6. Титова С.Н. Медико-социальные аспекты заболеваемости хроническим пиелонефритом взрослого населения и пути совершенствования профилактики: дис. ... на соиск. учён. степени кандидата медицинских наук: спец. 14.02.03 – Общественное здоровье и здравоохранение / С.Н. Титова. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко», 2020. – 210 с.
7. Арингазина А.М. Хроническая болезнь почек: распространенность и факторы риска (обзор литературы). / А.М. Арингазина, О.Ж. Нарманова, Г.О. Нускарбаева, Ж.А. Таргаева, Е.С. Мендыбаев // Анализ риска здоровью: сб. науч. тр. – 2020. – №2. – С. 164-174.
8. Котовская, Е.Е. Оценка качественных показателей источников централизованного питьевого водоснабжения г. Симферополя и их влияния на технологию очистки [Текст] / Е.Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – №7(59). – С. 73-81.
9. Возная Н.Ф. Химия воды и микробиология. – М. Высш. школа 1979 г. 341 с.
10. Гончарук, В.В. Состояние источника централизованного водоснабжения и его влияние на

качество питьевой воды / В.В. Гончарук, Н.А. Клименко, В.Ф. Скубченко, В.В. Медведовский // Химия и технология воды. – 2005. – 27, № 6. – С. 559-589.

11. Васильева, А.И. Образование тригалогенметанов в процессе водоподготовки на водозаборе г. Уфы / А.И. Васильева, Л.Г. Цыпышева, Л.И. Кантор // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 4. – С. 25-28.

12. Глоба, Л.И. Качество воды р. Днепр и ее предварительная биологическая очистка / Л.И. Глоба, П.И. Гвоздяк, Н.И. Подорван, В.А. Костюк // Химия и технология воды. – 2004. – 26, № 1. – С. 95-105.

13. Драгинский, В.Л. Обеспечение качества питьевой воды в свете новых нормативных требований / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева // Водоснабжения и санитарная техника. – 2004. – № 9. – С. 21-26.

14. Чувиллин, В.Н. Повышение барьерной роли водопроводных очистных сооружений г. Самары / В.Н. Чувиллин, А.К. Стрелков, П.Г. Быкова, А.Д. Смирнов // Водоснабжение и санитарная техника – Москва, 2006. – №9, часть 2. – С. 9-12.

15. Устойчивый Крым. Водные ресурсы [Текст] / В.С. Тарасенко, Б.И. Боровский, З.В. Тимченко и др. – Симферополь: «Таврида», 2003. – 413 с.

16. Самбурский Г.А. Разработка и совершенствование теоретических и методологических принципов формирования технологической и нормативной базы обеспечения качества питьевой воды в Российской Федерации: дис. ... на соиск. учён. степени доктора технических наук: спец. 03.02.08 – Экология (химическая технология) (технические науки); 05.23.04 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов / Г.А. Самбурский. – Москва: РАВВ, 2022. – 210 с.

17. Итоговый отчет о состоянии здоровья населения и организации здравоохранения Республики Крым по итогам деятельности отрасли в 2014 году, Симферополь, 2014. – 13 с.

18. Данилов-Данильян, В.И. Биосфера и цивилизация / В.И. Данилов-Данильян, И.Е. Рейф под общ. ред. В.И. Данилов-Данильян. – М.: Энциклопедия, 2016 – 432 с.

19. Карта подземных вод Крыма. Схема из книги «Гидрогеология СССР», том 8. Ред.: В.Г. Ткачук. Издательство Недр.

20. Розенталь, О.М. Риск-ориентированный контроль качества водф: Монография. / О.М. Розенталь. – М.: Научный мир, 2017. – 268 с.

21. Сынзыныс, Б.И. Экологический риск: Учебное пособие для вузов/ Б.И. Сынзыныс, Е.Н. Тянтова, О.П. Мелехова Под ред. Г.В. Козьмина. – М.: Логос, 2005. – 168 с.

centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems [Text]. – М.: Ministry of Health of Russia, 2002. – 111 p.

2. Luschnik, A.V. Overview of the formation of groundwater of the main exploited aquifers in the Crimea / A.V. Luschnik, N.V. Gorbatyuk, T.A. Ivanenko // Construction and technogenic safety. – 2017. – №6(58). – Pp. 99-106.

3. Luschnik, A.V. Water sampling and its effect on groundwater suitable for domestic drinking water supply in the Crimea / A.V. Luschnik, N.V. Gorbatyuk, V.I. Moroz // Construction and technogenic safety. – 2016. – №2(54). – Pp. 83-91.

4. Bezrukov E.A. The influence of drinking water hardness on the occurrence of urolithiasis and the chemical composition of stones in residents of the cities of Kumertau and Meleuz of the Republic of Bashkortostan / E.A. Bezrukov, V.S. Saenko, F.H. Kantimerov, D.F. Kantimerov, Yu.G. Alyaev // Medical Bulletin of Bashkortostan: collection of scientific tr. – 2015. – Том 10, №3– Pp. 83-87.

5. Syundyukova D.R. The influence of polluted aquatic environment on the ecology of public health [Text] / D.R. Syundyukova, M.V. Astashina // Yakovlev readings-2022: Water supply and sanitation systems. Modern problems and solutions. Collection of reports of participants of the XVII International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S.V. Yakovlev. Moscow. – 2022. – Pp. 210-216.

6. Titova S.N. Medical and social aspects of the incidence of chronic pyelonephritis in the adult population and ways to improve prevention: dis. ...on the job. learned. degree of Candidate of medical sciences: spec. 14.02.03 – Public health and healthcare / S.N. Titova. – Voronezh: Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, 2020. – 210 p.

7. Aringazina A.M. Chronic kidney disease: prevalence and risk factors (literature review). [Text] / A.M. Aringazina, O.Zh. Narmanova, G.O. Nuskarbayeva, Zh.A. Targaeva, E.S. Mendybaev // Health risk analysis: collection of scientific tr. – 2020. – № 2. – Pp. 164-174.

8. Kotovskaya, E.E. Assessment of the quality indicators of the sources of centralized drinking water supply in Simferopol and their impact on the purification technology [Text] / E.E. Kotovskaya // Construction and technogenic safety. – 2017. – № 7(59). – Pp. 73-81.

9. Voznaya N.F. Water chemistry and microbiology. – М. Higher School, 1979. – 341 p.

10. Goncharuk, V.V. The state of the centralized water supply source and its impact on the quality of drinking water [Text] / V.V. Goncharuk, N.A. Klimenko, V.F. Skubchenko, V.V. Medvedovsky // Chemistry and technology of water. – 2005. – 27, № 6. – Pp. 559-589.

11. Vasilyeva, A.I. Formation of trihalomethanes in the process of water treatment at the water intake of Ufa

REFERENCES

1. SanPiN 2.1.4.1074-01. State sanitary and epidemiological rules and regulations. Drinking water. Hygienic requirements for the water quality of

[Text] / A.I. Vasilyeva, L.G. Tsypysheva, L.I. Kantor // Water supply and sanitary equipment. – 2004. – № 4. – Pp. 25-28.

12. Globa, L.I. The water quality of the Dnieper River and its preliminary biological purification / L.I. Globa, P.I. Gvozdyak, N.I. Podorvan, V.A. Kostyuk // Chemistry and technology of water. – 2004. – 26, № 1. – Pp. 95-105.

13. Draginsky, V.L. Ensuring the quality of drinking water in the light of new regulatory requirements / V.L. Draginsky, L.P. Alekseeva // Water supply and sanitary engineering. – 2004. – № 9 – pp. 21-26.

14. Chuvilin, V.N. Increasing the barrier role of water treatment facilities in Samara / V.N. Chuvilin, A.K. Strelkov, P.G. Bykova, A.D. Smirnov // Water supply and sanitary equipment – Moscow, 2006. – № 9, Part 2. – Pp. 9-12.

15. Sustainable Crimea. Water resources / V.S. Tarasenko, B.I. Borovsky, Z.V. Timchenko, etc. – Simferopol: «Tavrida», 2003. – 413 p.

16. Sambursky G.A. Development and improvement of theoretical and methodological principles for the formation of technological and regulatory framework for ensuring the quality of drinking water in the Russian Federation: dis. ...on the job. learned. degrees of Doctor of Technical Sciences: spec. 03.02.08 – Ecology

(chemical technology) (technical sciences); 05.23.04 Water supply, sewerage, construction systems of water resources protection / G.A. Sambursky. – Moscow: RABBI, 2022. – 210 p.

17. Final report on the health status of the population and the health organization of the Republic of Crimea on the results of the industry in 2014, Simferopol, 2014. – 13 p.

18. Danilov-Danilyan, V.I. Biosphere and civilization / V.I. Danilov-Danilyan, I.E. Reif under the general editorship of V.I. Danilov-Danilyan. – M.: Encyclopedia, 2016 – 432 p.

19. Map of the underground waters of the Crimea. Diagram from the book «Hydrogeology of the USSR», volume 8. Editor: V.G. Tkachuk. Nedra Publishing House.

20. Rosenthal, O.M. Risk-oriented quality control of vodf: Monograph / O.M. Rosenthal. – M.: Scientific world, 2017. – 268 p.

21. Synzynys, B.I. Ecological risk: A textbook for universities/ B.I. Synzynys, E.N. Tiantova, O.P. Melekhova, edited by G.V. Kozmin. – M.: Logos, 2005. – 168 p.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE QUALITATIVE COMPOSITION OF DRINKING WATER IN THE REPUBLIC OF CRIMEA ON THE HEALTH OF THE POPULATION WITH AN ASSESSMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS TO IMPROVE IT

Nikolenko I.V., Kotovskay E.E., Lud N.V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Academy of construction and architecture,
181, Kievskaya str., Simferopol, 295050, Russian Federation

Annotation. The article analyzes the qualitative composition of water from underground sources in a number of districts of the Republic of Crimea (RC), characterized by high hardness content, high mineralization or total salinity, high content of chlorides and sulfates. Water consumption exceeding the MPC by residents of these areas on a daily basis can lead to suppression of gastric secretion, metabolic disorders, contributes to the occurrence of urolithiasis. Maps of 3 districts of the RC have been compiled, with the values of exceeding the MPC of various qualitative indicators in each of the settlements. The resulting picture shows areas with an excess of 2...5 times the regulatory requirements.

Subject of research: qualitative indicators of drinking water from underground sources affecting human health, with an assessment of air conditioning methods to meet the requirements for the waters of underground sources of centralized drinking water supply.

Materials and methods of research: Collection, systematization, statistical processing and analysis of the qualitative composition of water from underground sources in a number of districts of the RC, as well as comparison of the results obtained with statistical data on the structure of morbidity of the population. The paper uses methods of mathematical statistics that allow to perform a quantitative assessment of the factors that affect the health of the population of the Republic of Kazakhstan from drinking water in excess of MPC indicators.

Results: The results of the research make it possible to obtain maps of the excess of the MPC for settlements in 3 northern regions of the Republic of Crimea, in which water from underground sources is consumed and a quantitative assessment of the risk of diseases from the use of substandard quality water is obtained.

Conclusions: The factors that have a negative impact on the health of residents of the Republic of Crimea, depending on the affiliation of centralized water supply sources, have been identified.

Key words. underground springs, centralized water supply system, MPC, general mineralization, chlorides, sulfates.

СПИСОК АВТОРОВ

- Ажермачев С. Г. к.т.н., доцент Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Бардина Г.А. старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург
- Бекиров Э.А. д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Бекиров Э.А. д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Гамаюнова О.С. к.т.н, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
- Гамаюнова О.С. к.т.н, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
- Дядичев А.В. Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского
- Дядичев В.В. д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Ермакова Е. С. старший преподаватель, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Заборова Д.Д. м.н.с., Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
- Каримов Э.А. Симферопольский филиал ГБУ РК «Крыммелиоводхоз», г. Симферополь
- Кореньков П.А. к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Коряковцева Т.А. к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
- Котовская Е.Е. старший преподаватель, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Крымов Р. С. старший преподаватель, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Литвинова Э.В. к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Николенко И.В. д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Олехнович Я.А. старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург
- Подолян Д.В. обучающийся, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
- Радаев А.Е. Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург
- Тынчерова Э.Л. к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Чемодуров В.Т. д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
- Шуршилин Е.А. Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого , г. Санкт-Петербург

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Прием статей в редакцию и состав сопроводительных документов

Прием статей для публикации в журнале осуществляется в постоянном режиме. Процесс рассмотрения статьи, рецензирования и редакционно-издательской обработки занимает достаточно длительное время, в связи с чем поступившая и допущенная редколлегией к публикации статья будет, как правило, опубликована не ранее, чем через 4 месяца со дня ее поступления. Датой поступления статьи будет считаться дата ее получения от автора в окончательном варианте после всех доработок и исправлений по замечаниям рецензентов и редактора.

Просим авторов тщательно готовить свои материалы с целью сокращения сроков их рассмотрения и обработки.

Неправильно оформленные материалы не рассматриваются, не рецензируются и не возвращаются! Также не возвращаются авторам рукописи статей и электронные копии на локальных носителях. При этом редакция по собственной инициативе в переговоры с авторами не вступает.

1.1. Прием статей на рассмотрение и рецензирование осуществляется через онлайн систему приема статей.

Прием статей на рассмотрение и рецензирование через онлайн систему приема статей производится на сайте журнала по адресу: <https://stroyjournal-asa.ru>. Инструкция по использованию системы доступна на сайте. Автор имеет возможность следить за продвижением статьи в редакции в личном кабинете и получает соответствующие уведомления по электронной почте.

Все поступившие в редакцию статьи проходят обязательное двойное слепое рецензирование. По результатам рецензирования автору сообщается решение о публикации, замечания рецензента и редактора или решение об отклонении статьи.

1.2. Прием к публикации окончательного варианта статьи. Окончательный (после внесения правки по замечаниям рецензентов и редактора) вариант статьи автор также загружает через систему или направляет на электронный адрес ger_bilenko@cfuv.ru для ее редактирования, корректуры, верстки и публикации в журнале.

1.3. Прием пакета сопроводительных документов осуществляется через онлайн систему приема статей и по электронному адресу ger_bilenko@cfuv.ru.

Автор, пройдя регистрацию в системе, загружает статью в формате .doc или .docx, форматированную по шаблону (см. п. 2), вместе с файлами отсканированных документов: экспертного заключения о возможности опубликования в открытой печати (далее – экспертного заключения) и информации об авторах статьи.

Экспертное заключение оформляется по требованиям, установленным в организации – работодателе автора. Редакция исходит из того, что авторы добровольно предоставляют сведения о себе в анкете автора в требуемом объеме и составе (в соответствии с правилами для публикаций научных статей в журналах, включенных в Перечень ВАК) для их открытого опубликования. Также к загружаемой статье может быть приложен файл отсканированной внешней (т.е. из сторонней организации) рецензии (1 экз.), оформленной и заверенной в организации по месту работы рецензента. Оригинал рецензии присылать в редакцию по почте не требуется.

Сопроводительные документы можно направить по электронной почте по адресу ger_bilenko@cfuv.ru. Все вопросы и пожелания относительно пакета документов необходимо отправлять на этот адрес электронной почты редакции.

Пакет оригиналов сопроводительных документов, включающий информационную карту статьи на публикацию сведений об авторе и экспертное заключение, должен поступить в редакцию по почте не позднее 3 недель со дня уведомления автора (письмом на адрес электронной почты) о положительном решении по поводу публикации статьи.

Бланки сопроводительных документов и требования:

Информация об авторах статьи. Информация об авторах статьи загружается в систему OJS или отправляется на адрес электронной почты ger_bilenko@cfuv.ru в электронном виде в виде файла с расширением .doc или .docx;

Бланк экспертного заключения и авторской справки (только для авторов – работников КФУ им. В.И. Вернадского (распечатывается и заполняется вручную))

Бланк экспертного заключения и Внешняя рецензия – загружается в систему OJS или отправляется на адрес электронной почты ger_bilenko@cfuv.ru в сканированном виде (файл PDF).

2. Требования к оформлению статей

Статья будет рассмотрена редколлегией и рецензентами только при условии полного соответствия ее оформления изложенным ниже требованиям, предъявляемым к публикациям в научных журналах, индексируемых международными базами научного цитирования.

Все статьи, поступившие в редакцию журнала, получившие положительную оценку рецензентов и рекомендованные к публикации, проходят обязательную редакционную обработку (редактирование, корректуру, техническое редактирование). Внесение правки по замечаниям редактора согласовывается с автором.

Датой поступления статьи в редакцию считается дата поступления и регистрации в редакции окончательного авторского оригинала с учетом всех внесенных изменений по замечаниям рецензентов и редактора.

Общие требования для подготовки статей

Объем статьи, включая таблицы, рисунки и фотографии должен быть не менее 6 страниц и не превышать 10 страниц.

Шрифт. Нормальный Times New Roman (TNR), размер шрифта – 10 пт, одинарный интервал; интервал шрифта – обычный (без растяжения или уплотнения). Варианты шрифта в тексте статьи: типа курсива или жирного шрифта допускаются, подчеркивание слов и предложений не допускаются.

Параметры страницы: верхнее поле – 2,5 см, нижнее – 2,5 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см.

Таблицы. Таблица озаглавляется словом Таблица 1 (шрифт – обычный TNR 10 пт, по центру) со следующим за ним номером с точкой. Далее помещается название таблицы с прописной буквы (не более 3-х строк), без заключительной точки. Ниже приводится название таблицы на английском языке. Размер таблиц и рисунков не должен превышать размер В5 (12,5 × 19,5 см). Шрифт заголовков столбцов и строк, содержания таблицы – обычный TNR 9 пунктов. Таблицы нумеруются арабскими цифрами.

Рисунки и графики. Рисунки и графики озаглавляются словом Рис.1 (шрифт – обычный TNR 9 пунктов) со следующим за ним номером с точкой. Рисунки выполняются в графических редакторах, совместимых с Word и размещаются по тексту. Под рисунком помещается подпись на русском и английском языках. Короткая подпись центрируется, а если длинная – форматируется с абзацем первой строки. Качество рисунков и графиков должно обеспечивать прочтение и тиражирование. Рисунки и графики нумеруются арабскими цифрами.

Формулы. Формулы набираются в редакторе формул Equation или Math Type. Использовать для набора формул графические объекты, кадры и таблицы запрещается. Формула располагается по центру строки, номер формулы (в круглых скобках, TNR 10 пт) – по правому краю страницы, от окружающего текста отделяется пустыми строками. Формульное окно принудительно растягивать или сжимать нельзя. Применение единиц измерений в международной системе СИ – обязательно.

Обязательный порядок статьи.

- **УДК** в левом верхнем углу страницы, шрифт TNR 12 пт, прописными буквами
- **Название статьи шрифт** TNR 12 пт все прописными.
- **Имя и фамилия** автора(ов), шрифт обычный TNR 12 пт.
- **Место работы** авторов, шрифт обычный TNR 9 пт., адрес места работы, e-mail
- **Аннотация статьи (Abstract)** 200 – 250 слов, шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Предмет исследования (Subject of research)**: шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Материалы и методы (Materials and methods)**: шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Результаты (Results)**: шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Выводы (Conclusions)**: шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Ключевые слова (Key words)** до 6 слов и словосочетаний, необходимых для поиска или классификатора, шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Текстовая часть**. Статья должна содержать следующие разделы:
 - ВВЕДЕНИЕ;
 - АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ;
 - МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ;
 - РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ;
 - ВЫВОДЫ;
 - СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

Заголовки разделов набираются строчными буквами, шрифт TNR 11 пунктов и центрируются.

В конце статьи размещается **Название статьи, Имя и фамилия автора(ов), Место работы авторов, Аннотация статьи, Предмет исследований, Материалы и методы, Результаты, Выводы, Ключевые слова** на английском языке с сохранением редакторских требований, указанных выше к каждому структурному элементу статьи.

Рекомендации по подготовке аннотации статьи

Аннотация выполняет следующие основные функции:

- дает возможность читателю быстро оценить основное содержание статьи с тем, чтобы решить, следует ли ему обращаться к ее полному тексту;
- предоставляет читателю самую общую информацию о статье, устраняя необходимость чтения ее полного текста в случае, если статья представляет для читателя второстепенный интерес;
- используется в научных, библиотечных и поисковых информационных системах.

Аннотация к статье должна быть:

- информативной (не содержать общих слов);
- содержательной (отражать основное содержание статьи);
- структурированной (следовать логике изложения материала в статье);

Аннотация должна включать в себя:

- предмет и цель работы (если они не следуют из названия статьи);
- используемый метод или методы исследования;
- основные результаты исследования;
- отличия данной публикации от других, схожих по теме;
- область применения результатов;
- выводы, рекомендации, перспективы развития работы.

В аннотации следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...», «автор полагает...» и т.д.), а также сложных грамматических конструкций. Аннотацию следует писать как можно более лаконичным, точным и простым языком. Должна быть понятна широкому кругу читателей, поэтому не должна изобиловать научными терминами. Следует избегать общеизвестных сведений и штампов. Аннотация не должна включать в себя цитаты из текста статьи. В аннотации обычно используются конструкции констатирующего характера (автор анализирует, доказывает, излагает, обосновывает и т. д.), а также оценочные стандартные словосочетания (уделяет основное внимание, важный актуальный вопрос, проблема, детально анализирует, убедительно доказывает).

Список литературы оформляется на русском и английском языках.

Библиографическое описание выполняется по:

- ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание;
- ГОСТ 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления;
- ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов;
- Регламент включения научных журналов в Российский индекс научного цитирования. – М., 2008.

Не менее 12 источников, с ссылками на статьи в предыдущих выпусках сборника «Строительство и техногенная безопасность», в которых не участвовали авторы представленной статьи.

Рекомендации по подготовке списка литературы

- Цитирование двух или более источников под одним номером, одного и того же источника под разными номерами не допускается.
- Во всех источниках необходимо указывать фамилии и инициалы всех авторов.
- Ссылки на книги, переведенные на русский язык, должны сопровождаться ссылками на оригинальные издания с указанием выходных данных оригинального издания.
- Ссылки на книги должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название книги, город, год, количество страниц.

- Ссылки на статьи в журналах должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год, том (если указан), номер, страницы (первая и последняя, разделенные тире).
- Ссылки на сборники (конференции, симпозиумы) должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название сборника (конференции, симпозиума), город (место проведения), год, том (если указан), номер (если указан), количество страниц.
- Ссылки на статьи в сборниках (материалах конференций, симпозиумов) должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название статьи, название сборника (конференции, симпозиума), город (место проведения), год, том (если указан), номер (если указан), страницы (первая и последняя, разделенные тире).
- Ссылки на электронные ресурсы удаленного доступа должны содержать следующую обязательную информацию: название ресурса, режим доступа, дата обращения.
- В инициалах авторов между именем и отчеством пробел не ставится.
- В заголовке описания запятая после фамилии автора перед его инициалами может быть опущена.
- Если в документе один, два или три автора, то в сведениях об ответственности (т.е. за косой чертой после названия документа) они могут не повторяться.
- При наличии **четырёх и более** авторов в сведениях об ответственности (т.е. за косой чертой после названия документа) приводят фамилии **всех** авторов.
- Допускается предписанный знак точку и тире, разделяющий области библиографического описания, заменять точкой.
- Допускается не использовать квадратные скобки для сведений, заимствованные не из предписанного источника информации.

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать в список литературы ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНиПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях или расчетах или аргументации лучше делать непосредственно по тексту статьи.
2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.
3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.
4. Самоцитирование, т.е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных показателей автора.