

СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

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

№ 38(90) – 2025

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» (ФГАОУ ВО «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 утверждённый ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата наук, доктора наук

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, советник РААСН,
д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского)

Редакционная коллегия:
Абдулгасис У.А., д.т.н., проф. (КИПУ, Симферополь)
Аверкова О.А., д.т.н., проф. (БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород);
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»;
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»;
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»
Невзоров А.Л., советник РААСН, д.т.н., проф. (САФУ им. М.В.
Ломоносова, Архангельск);
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);
Скибин Г.М., д.т.н., проф. (ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова,
Новочеркасск);
Тер-Мартirosян А. З., д.т.н., проф. (НИУ МГСУ, Москва)
Толстой М.Ю., к.т.н., доц. (ИРНИТУ, Ижевск);
Федосов С.В., академик РААСН, д.т.н., проф. (МГСУ, Москва)
Федюк Р.С., советник РААСН, д.т.н., доцент (ДВФУ, Владивосток);
Фесенко Л.Н., д.т.н., проф. (ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова,
Новочеркасск);
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);
Шаленный В.Т., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Строительство»;
Шейна С.Г., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-
Дону);
Щербakov В.И., д.т.н., доц. (ВГТУ, Воронеж);
Югов А.М., д.т.н., проф. (ДонНАСА, Макеевка)

СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

№ 38(90) – 2025
научно-технический журнал

Печатается по решению научно-технического
совета ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
(протокол № 7 от 22.09.2025)

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

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

Адрес редакции: 295006, Республика Крым,
г. Симферополь, ул. Павленко, д. 3
e-mail: rio@napks.ru

Подписан в печать 25.09.2025.
Формат А4.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Гарнитура Times New Roman. Усл.-печ. л. 10,3.
Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет 25.09.2025

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_cfuv@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»
Адрес типографии 295000, Республика Крым,
г. Симферополь, бульвар Ленина, 5/7

Распространяется бесплатно.

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Градостроительство

<i>Сидорова В.В., Аблаев А.Р.</i>	5
АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТУРИСТСКОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ Г. ЕВПАТОРИЯ	

Раздел 2. Строительство

<i>Горохов Т.И.</i>	13
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ ИЗВЕСТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСНО-ГИПСОВОГО МАТЕРИАЛА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРЫ	

<i>Родин С.В., Меннанов Э.М., Богущий Ю.Г., Калафатов, Д.А.</i>	19
ПРОДАВЛИВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ	

Раздел 3. Инженерное обеспечение

<i>Арифов А. М., Бекиров Э. А.</i>	29
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВРЕМЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТЕЙ	

<i>Продоус О.А., Якубчик П.П., Шлычков Д.И.</i>	37
ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМАЯ ТОЛЩИНА СЛОЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОДОПРОВОДОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРЕКРАЩЕНИЯ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	

<i>Дихтярь Т.В.</i>	45
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ	

<i>Зайцев О.Н., Ангелюк И.П., Петренко Д.М.</i>	53
КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ВОЗДУХА	

<i>Царёва О.С., Андреев А.И.</i>	59
РАСЧЕТ НАПОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ ПОДБОРА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА	

<i>Чемодуров В. Т., Литвинова Э. В.</i>	65
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БУНКЕРОВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ	

Раздел 4. Экологическая безопасность

<i>Мовчан С.И., Николенко И.В.</i>	77
МОДЕЛИРОВАНИЕ В АППАРАТАХ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЛОКАЛЬНОГО ВОДООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)	

<i>Список авторов</i>	85
-----------------------	----

<i>Руководство для авторов</i>	86
--------------------------------	----

CONTENT

Section 1. Town planning

<i>Sidorova V.V, Ablaev A.R.</i> ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING CONCEPT OF THE TOURIST ATTRACTION OF YEVPATORIA	5
---	---

Section 2. Construction

<i>Gorokhov T.I.</i> ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE USE OF LIME AS AN ADDITIVE ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF WOOD-GYPSUM MATERIAL THROUGH THE PRISM OF AN ANALYSIS OF CHANGES IN ITS STRUCTURE	13
<i>Rodin S.V., Mennanov E.M., Bogutsky Y.G., Kalafatov D.A.</i> PUNCHING OF REINFORCED CONCRETE FOUNDATION SLABS	19

Section 3. Engineering Support

<i>Arifov A.M., Bekirov E.A.</i> METHOD OF PRELIMINARY CALCULATIONS FOR CREATION OF TEMPORARY RING MODES IN ELECTRICAL NETWORKS 6-10 kV	29
<i>Prodous O.A., Yakubchik P.P., Shlychkov D.I.</i> THE MAXIMUM ALLOWABLE THICKNESS OF THE SEDIMENT LAYER ON THE WALLS OF METAL WATER PIPES OF INFRASTRUCTURE ENGINEERING NETWORKS TO STOP THEIR FURTHER OPERATION	37
<i>Dikhtyar T.V.</i> INVESTIGATION OF THERMAL DEAERATION PROCESSES WHEN WATER TEMPERATURE CHANGES	45
<i>Zaitsev O.N., Angeluck I.P., Petrenko D.M.</i> CRITICAL ANALYSIS OF EXISTING AIR RECOVERY SYSTEMS	53
<i>Tsareva O.S., Andreev A.I.</i> CALCULATION OF UNDERFLOOR HEATING FOR SELECTING A CIRCULATION PUMP	59
<i>Chemodurov V. T., Litvinova E. V.</i> DYNAMIC STRENGTH STUDY OF CYLINDRICAL BULK SILOS UNDER SEISMIC LOAD CONDITIONS	65

Section 4. Environmental safety

<i>Movchan S.I., Nikolenko I.V.</i> MODELING IN WASTEWATER TREATMENT APPARATUS LOCAL WATER TREATMENT EQUIPMENT RECYCLING WATER SUPPLY SYSTEMS (for discussion)	77
<i>List of authors</i>	85
<i>Authors Guide</i>	86

Раздел 1. Градостроительство

УДК 711.455:796.51

АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТУРИСТСКОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ Г. ЕВПАТОРИЯСидорова¹ В.В., Аблаев² А.Р.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181,
E-mail: ¹nucikBBC@yandex.ru, ²ablaev.alim2018@yandex.ru

Аннотация. Город Евпатория, расположенный на берегу Черного моря, на полуострове Крым, имеет давнюю историю, насыщенную культурными и историческими событиями. Евпатория обладает большим историческим потенциалом как туристический город, однако существует проблема отсутствия продуманного туристического маршрута. Множество исторических музеев, памятников и объектов живут отдельной жизнью, что затрудняет туристам ознакомиться с богатым культурным наследием города. Отсутствие координированной туристической инфраструктуры создает проблемы для посетителей, желающих получить полноценное представление о истории и культуре Евпатории. Исследование проводится с целью выявления актуальных проблем, разработки эффективных стратегий и предложения грамотного и комфортного туристического маршрута.

Предмет исследования: Туристическая привлекательность г. Евпатория.

Материалы и методы: исследование построено на комплексном анализе с использованием количественных методов исследования (статистические и библиографические). Применены методы: дедукции, теоретического анализа и синтеза, метод аналогии, графоаналитический метод, сравнительный анализ и системный подход.

Результаты: мировой опыт показывает, что туристические маршруты могут быть эффективным инструментом для увеличения потока туристов в город. Важным является разработка и закрепление подобных маршрутов на законодательном уровне, а также их регулирование, чтобы обеспечить безопасность и качество обслуживания туристов. Доступность маршрутов благодаря развитой инфраструктуре, включая транспортную, гостиничную и другие виды поддержки, также играет ключевую роль в их привлекательности для туристов. Вариативность маршрутов, учитывающая различные особенности территорий и разнообразие развлечений в течение всего года, способствует привлечению широкого круга туристов и созданию устойчивого туристического потока.

Выводы: выявление и учет всех привлекательных маршрутов, достопримечательностей, исторических кластеров и комплексных маршрутов является основой для развития туристической инфраструктуры. Кроме того, необходимо обратить внимание на улучшение транспортной взаимосвязи и пешеходных маршрутов, чтобы обеспечить оптимальное передвижение туристов. Необходимо развивать как программы минимум (создание музея под открытым небом), так и программы максимум (разработку туристических маршрутов на несколько дней) - это важные шаги в привлечении посетителей.

Ключевые слова: туризм, градостроительство, концепция, маршрут, зонирование.

ВВЕДЕНИЕ

Евпатория, один из самых древних городов Крыма, богатый историей и культурой, с множеством уникальных архитектурных памятников и достопримечательностей. Однако, несмотря на это, отсутствие грамотно спланированного общего маршрута для туристов по историческим объектам города создает сложности для путешественников, желающих ознакомиться со всеми его достопримечательностями.

Архитектурно-градостроительная концепция туристской привлекательности г.Евпатория предусматривает создание единого маршрута, включающего в себя все значимые объекты и памятники истории и культуры города. Такой маршрут позволит туристам максимально полно ознакомиться с богатым наследием Евпатории и оценить его красоту, сохраненную веками.

Грамотно спланированный общий маршрут для туристов будет иметь большое значение для развития туристской отрасли Евпатории, ведь он

позволит путешественникам легко и удобно посетить все достопримечательности города за короткий отпуск или даже за один день. Кроме того, такой маршрут способствует сохранению исторического наследия города и его популяризации среди туристов со всего мира.

Цель исследования - разработка новых перспективных туристических маршрутов разной тематики с использованием историко-культурного потенциала округа, включая акцентное благоустройство и архитектурно-градостроительное развитие.

Задачи:

- проанализировать зарубежный и отечественный опыт проектирования;
- определить приоритетные направления и возможности г. Евпатории для развития туристической привлекательности и обоснования архитектурно-градостроительной концепции;
- изучить градостроительную ситуацию и предложить актуальные варианты дальнейшего развития территории;

- разработать рекомендации по основным положениям архитектурно-градостроительной концепции.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Построенные пешеходные туристические маршруты по историческим объектам анализируют Бутаков Н.П., Данилина Н.В., Касьянов В.Ф. в статье «Кластерный подход к формированию туристических маршрутов в городе Новосибирске» [3]. Авторы считают, что разработанные кластеры и туристические маршруты могут представлять собой градостроительные ограничения по стилистике и параметрам новой застройки, формируемой в городе.

В научно-исследовательской работе Сапего Д.А. «Разработка длительного туристического маршрута» рассматривается мировой опыт, и анализируются преграды применения грамотного планирования туристических маршрутов на территории России, исследуются стратегии развития туризма и предлагаются рекомендации по созданию длительных туристических маршрутов. Кроме того, автор исследует потенциал различных регионов России для развития туризма и выявляет возможности для интеграции маршрутов с другими видами отдыха и спорта [11].

В статье Максимова А. И. и Кивал Н. Г. «Организация туристических маршрутов по Приморскому краю» [8] говорится о том, что перспективность регионов внутреннего туризма из-за уникальности и неповторимости природы способствует положительным социальным изменениям и развитию края.

Вопросы длительных туристических маршрутов исследованы в статье Кулакова А.И., Шишканова В.С. и Шишкановой М.А. «Организация пешеходных туристических маршрутов в исторических городах». Авторы демонстрируют результаты исследования устройства пешеходных туристических маршрутов в исторических городах России и зарубежных стран, а также анализируют пешеходный туристический маршрут «Зеленая линия» в Иркутске. Исходя из мирового опыта, выявляют его основные достоинства и недостатки [7].

В научно-практической статье Элипханова С.Б., Гайсумовой Л.Д., Мамадиева А.Х. «Методические основы разработки перспективного туристического маршрута» [6]. Рассмотрены вопросы планирования, разработки и обоснования спланированного туристического маршрута по различным объектам Чеченской Республики. В статье на исследовательском материале раскрывается важность, роль и значение разработки маршрута.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе исследования был применен анализ мировых аналогов, проводились натурные обследования. В работе проанализированы теоретические и практические материалы, касающиеся объекта исследования, разработаны практические рекомендации. В процессе подбора материалов по теме публикации и анализа изученных результатов применены методы теоретического анализа и синтеза, метод аналогии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Евпатория расположена в степной зоне Крыма, на берегу Каламитского залива Чёрного моря. Климат города характеризуется как умеренно-континентальный, с жарким и сухим летом и относительно мягкой зимой. Средняя температура воздуха в июле составляет +23,5°C, в январе +1,3°C. Количество осадков в течение года составляет около 400 мм. Рельеф города преимущественно равнинный, с небольшими возвышенностями [9].

Градостроительная ситуация в Евпатории характеризуется наличием исторического центра, сформировавшегося в средние века, и современных районов, построенных в советское и постсоветское время. Исторический центр города представлен узкими улочками, небольшими площадями и старинными зданиями. Современные районы застроены преимущественно многоэтажными жилыми домами и административными зданиями. По данным из Т. IV «Мероприятия по охране и использованию объектов культурного» [1] в городе насчитывается: объектов культурного наследия федерального значения: 9; объектов культурного наследия регионального значения: 158; выявленных объектов культурного наследия - объектов археологического наследия – 6.

В настоящее время в Евпатории наблюдается тенденция к развитию туризма. В городе открываются новые отели, рестораны и другие объекты туристической инфраструктуры. В связи с этим актуальным становится создание единой архитектурно-градостроительной концепции развития туризма в Евпатории. Следует отметить, что базовыми местами притяжения для туристов в исторической части города являются объекты культурного наследия. Таким образом, приморский курорт имеет огромный потенциал по привлечению туристов и отдыхающих. Обобщенные 20 причин посетить Евпаторию обозначены в Таблице 1.



Таблица 1.
Table 1.

20 причин посетить Евпаторию				
*по данным туристско –информационного центра и Евпаторийского культурно-этнографического центра				
Городу 25 веков. Посетить улочки Старого города. В городе более 70 национальностей.	Малый Иерусалим. Маршрут открыт в 2007 г. Площадь маршрута 2 кв. км. Охватывает храмы 7 конфессий.	Открытие сезона в начале мая. В программе праздника: высадка Посейдона на берег, парад эпох, гала-концерт, мастер-классы и ярмарки, концерты.	Летние вечера. Летом по пятницам на ул. Караимской в 18.00 начинается представление вдоль маршрута «Малый Иерусалим»: стоят «Живые статуи», шествуют артисты на ходулях, выступают творческие коллективы, проводятся мастер-классы, завершает праздник огненное шоу.	Многонациональная. Фестивали национальных культур. Экскурсия кружащихся дервишей в Теккие. В Евпатории официально празднуют христианскую Пасху, Курбан-байрам, Ураза-байрам. Здесь нет национальной вражды, уважается вера и мировоззрение каждого.
Город солнца. 300 солнечных дней в году. Гелиотерапия – лечение солнцем.	Чистый воздух. Морской воздух богат кислородом, озоном, насыщен микроскопическими каплями морской воды. Полезен всем, оздоравливает органы дыхания.	Живые статуи. Весной проходит чемпионат живых статуй. Евпаторийский театр живой скульптуры основан в 2006 году. Возраст актёров от 13 до 57 лет.	Центр досуга. Аквалэнд «У лукоморья», дельфинарий, аквариум, парк динозавров и др.	Веломобильность: 30 км велодорожек, услуги по прокату велосипедов.
Лечение морем. Пляжный сезон 5 месяцев. Вода +23-26 °С, морское дно пологое, отсутствуют приливы и отливы.	Лечебные грязи. Бальнеологический курорт. В 1886 году на берегу Мойнакского озера возведена грязелечебница.	Шоу великанов. Артисты выступают на всех городских праздниках на ходулях высотой 1 м 20 см и 2 м 20 см.	Творческая миля. Каждый вечер на набережной имени Горького и ул. Дувановской под открытым небом выступают местные артисты, фокусники, танцоры, кавер-бэнды, барабанщики.	Ретро- велокруиз. Евпаторийский твидовый ретро-круиз проходит два раза в год: весной и осенью. Участники наряжаются в твидовые костюмы конца XVIII- нач. XIX веков, проезжают по улицам Евпатории. Протяженность маршрута 10 км.
Целебные воды. В Евпатории 3 типа минеральных вод, показанных при хронических заболеваниях ЖКТ, холестеститах, панкреатитах, заболеваниях горла и др. Адреса бюветов: бювет «Евпаторийская» пр. Ленина/ул.Фрунзе, «Керкнитида» ул. Дувановская.	Лечение песком - псаммотерапия показана при болезнях опорно-двигательного аппарата, периферической нервной системы, спазмах сосудов.	Фестивальная причина. Евпатория как центр культуры и искусства: здесь проходят фестивали культуры, истории, кино, музыки. «Земля. Театр. Дети», «Солнечный остров», «Гезлев Къапусы».	Гастрономическая. Здесь можно насладиться вкусом блюд русской, караимской, еврейской, украинской, крымскотатарской, армянской кухонь в многочисленных кафе и ресторанах.	Спортивный центр. Центр паралимпийской и дефлимпийской подготовки. В городе проходят крупные турниры: «Arena Yevpatoria Cup» детско-юношеский турнир по футболу, «Evpatoria open» - международный турнир по синхронному плаванию, Открытое первенство Республики Крым по киокусин-каратэ, Открытый чемпионат Республики Крым по бодибилдингу.

По объективным причинам, ознакомиться со всеми достопримечательностями города за один день невозможно. Проанализировав современный опыт длительных туристских маршрутов, выделены грамотно спланированные последовательные

маршруты, которые позволяют туристам максимально эффективно использовать свое время и ресурсы. Основные результаты анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2.
Table 2.

<p>Страна, город, длительность туристического маршрута</p>	<p>Описание маршрута. Особенности.</p>
 <p>Турция, г. Стамбул. Трёхдневный маршрут.</p>	<p>В первый день туристы могут отправиться на знакомство с исторической частью города. Во второй день туристы могут ознакомиться с современной архитектурой города, посетив небоскреб Сапфир Тауэр и стамбульский музей современного искусства. Здесь они смогут насладиться современными творениями и архитектурными шедеврами Стамбула [5]. В завершение, на третий день туристы отправятся на прогулку и ознакомятся с красивыми пейзажами города, включая Босфор, Топкапы Сараи и дворец Долмабахче.</p>
 <p>Россия, г. Псков. Трёхдневный маршрут.</p> <p>Туристским информационным центром псковской области разработана удобная карта-схема с обозначением объектов ЮНЕСКО, святых, оборонительных сооружений, музеев, парков, велодорожек, интересных мест и проч.</p>	<p>Маршрут по интересным местам г. Пскова и его эко-локациям: фермам, хуторам и усадьбам. Маршрут на 3 дня [4]. Первый день: начинается с Псковского Кремля. Тут можно провести весь день, любуясь видами и изучая богатые экспозиции. Далее путеводитель ведет в Церковь Николая чудотворца. После этого туристы отправляются в церковь Василия Великого на горке. В церкви работает иконописная мастерская, в которой можно сделать икону на заказ для туриста. Далее туристы подходят к памятнику Скобарю, который гуляют в детском парке. И финальный объект первого дня - фермерское хозяйство «сады на Кудебе» - эко-ферма с яблоками и сырами.</p> <p>День второй: посвящается истории Псковской земли и отдых на природе. Далее туристы направляются в деревню Сигово, знакомятся с представителями народности Сито. Финальный маршрут второго дня: деревня Залавье, где на ферме живут страусы.</p> <p>Завершающий третий день маршрута: Печоры и окрестные деревеньки; Псково-Печерский монастырь, мастерская «бумажная мельница», где изготавливается бумага из льна; хлебный хутор, где туристов знакомят традиционными ремеслами.</p> <p>Таким образом, данный маршрут позволяет максимально близко ознакомиться с историей данного города.</p>



Италия, г.Флоренция.
Спланированный четырёхдневный маршрут

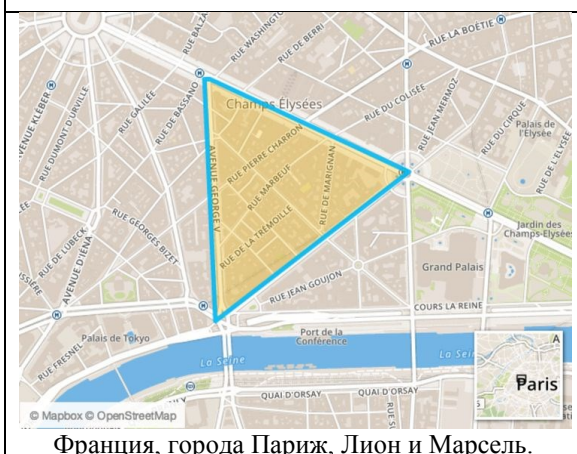
Первый день маршрута начинается с посещения Флорентийского собора (или Дуомо), включая купальню собора и музей Опты. Затем туристы отправляются на площадь Святого Креста, где расположены мастерские Микеланджело, Донателло и др., а также базилика Святого Креста, где находится кладбище гениев. Завершается первый день посещением Галереи Уффици.

Второй день начинается с экскурсии по палаццо Питти и Боболи Гарденс. Затем туристы направляются к благородному округу Ольтрано, где можно посетить художественные галереи, винные бары и магазины сувениров. Остается время на прогулку по Арно на старой плотине.

Третий день начинается с посещения Галереи Академии, где туристы могут увидеть скульптуру Давида Микеланджело и другие произведения искусства. Затем следует экскурсия по кварталу Сан-Лоренцо, где находится рынок Кентрале и церковь Сан-Лоренцо с гробницей Медичи. Вечером туристы могут расслабиться в одном из ресторанов с традиционной тосканской кухней и насладиться местными винами.

Четвертый день: посещение садов Боболи и палаццо Питти; памятника Санта-Кроче, где находится галерея скульптуры и некрополь государей.

В завершение четвертого дня туристы могут отправиться на однодневную экскурсию в город Пизу для посещения площади Мира с наклонной башней [10].



Франция, города Париж, Лион и Марсель.

Актуальность маршрута "Золотой треугольник Франции" остается высокой благодаря его богатой культурной и исторической насыщенности [2]. Основные положительные стороны маршрута включают в себя возможность посетить три знаковых города Франции - Париж, Лион и Марсель, каждый из которых предлагает уникальные впечатления от их архитектуры, кухни и искусства.

Таким образом, гастрономический туристический маршрут предлагает путешественникам уникальную возможность погрузиться в мир французской кулинарии, попробовать блюда из лучших ресторанов и кафе, оценить богатство местных продуктов и узнать о истории кулинарного искусства.

При выборе аналогов для анализа был сделан упор на туристские маршруты, которые предлагают посетителям возможность погрузиться в разнообразие истории и архитектуры города. Это означает, что туристы имеют возможность пройтись по улицам, усеянным старинными зданиями и памятниками, а также увидеть современные архитектурные шедевры. Такие маршруты являются не только способом получить эстетическое удовольствие, но и позволяют лучше понять местную культуру и идентичность.

Преимущество такого подхода заключается в том, что посетители могут полностью погрузиться в мир местной жизни и истории. Это создает неповторимый опыт, позволяя людям не просто пройтись по улицам, а окунуться в атмосферу города и узнать его душу. Такие длительные туристические маршруты способствуют истинному

и глубокому знакомству с местом, что делает путешествие более ярким и запоминающимся.

При изучении научной литературы и нормативно-правовых документов была обнаружена исчерпывающая информация о архитектурно-градостроительной концепции туристской привлекательности города Евпатория. Подробный анализ позволил выявить главные аспекты, определяющие уникальность и привлекательность архитектурного облика Евпатории с точки зрения туристического потенциала. Полученные результаты открывают новые перспективы для развития туристической инфраструктуры города и создания особенной атмосферы, способствующей увеличению притока посетителей.

Архитектурно-градостроительная концепция туристской привлекательности города Евпатория,

ориентированная на длительные маршруты, представляет собой перспективное направление развития туризма в регионе. В настоящее время туризм в Евпатории не развит достаточно, и не всегда продуманные маршруты зачастую не позволяют туристам получить комплексное представление об архитектурных и культурных достопримечательностях города. Грамотно спланированный маршрут позволил бы увеличить поток туристов, а также предоставил бы возможность посетителям увидеть значительно больше объектов за ограниченный период времени.

Расширение туристического маршрута включает в себя балансировку распределения туристических средств равномерно по всему городу, что в свою очередь способствует повышению доходности города в целом. Обширный маршрут предоставляет туристам возможность познакомиться с большим количеством исторических и архитектурных объектов, что привлечет больше посетителей и способствует развитию инфраструктуры туризма в Евпатории.

Продуманный туристический маршрут, включающий разнообразные достопримечательности и архитектурные объекты, сможет обогатить опыт посетителей, увеличив при этом привлекательность города для туристов. Развитие туристической инфраструктуры и продуманные маршруты способствуют созданию благоприятных условий туристического отдыха, что в конечном итоге укрепляет экономику и общий имидж города Евпатории.

ВЫВОДЫ

В заключение, тема разработки туристических маршрутов на несколько дней в городе Евпатория представляется чрезвычайно актуальной и перспективной. Развитие туризма в регионе, в том числе с учетом спланированных маршрутов, обещает привлечь больше посетителей, увеличить доходность города и способствовать развитию инфраструктуры. Кроме того, обширные маршруты позволяют туристам получить более полное представление об архитектурных, культурных и природных достопримечательностях, что делает их пребывание в городе более насыщенным и интересным.

Основными положениями архитектурно-градостроительной концепции туристического развития г.Евпатории являются: развитие пешеходной зоны в историческом центре и вдоль побережья; развитие транспортной инфраструктуры, создавая новые маршруты общественного транспорта и велодорожки; благоустройство пешеходных маршрутов и общественных пространств; расширение и благоустройство зеленых зон города; запрет застройки в зеленых зонах города; реставрация объектов культурного наследия и приспособление под современное использование; принятие единого дизайн-кода города для МАФ, инфографики и

рекламы с учетом исторических стилей. В реализацию концепции должны быть вовлечены: администрация, профильные министерства и департаменты, бизнес-сообщество и местные жители. Рекомендуется применение метода соучаствующего проектирования для максимального учёта мнений, потребностей и интересов всех категорий.

Учитывая потенциал региона, развитие туристических маршрутов на несколько дней представляется необходимым шагом для улучшения индустрии туризма в Евпатории. Внедрение этой концепции позволит привлечь больше инвестиций, создать новые рабочие места и стимулировать развитие культурного и социального потенциала города. Таким образом, разработка туристических маршрутов на несколько дней в Евпатории является ключевым аспектом в дальнейшем развитии туристической отрасли, а также способствует укреплению общего имиджа местности как привлекательного туристического направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внесение изменений в генеральный план муниципального образования городской округ Евпатория Республики Крым. Том IV. Мероприятия по охране и использованию объектов культурного наследия. – г.Новосибирск. 2023, 22 с.
2. Золотой треугольник Парижа // www.mansionglobal.com сайт. – URL: <https://www.mansionglobal.com/amp/articles/paris-s-golden-triangle-is-perfect-for-the-french-or-foreign-fashionista-39505>
3. Кластерный подход к формированию туристических маршрутов в городе Новосибирске // cyberleninka.ru сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klasternyy-podhod-k-formirovaniyu-turisticheskikh-marshrutov-v-gorode-novosibirske>
4. Маршрут по интересным местам Псковщины // russia.travel: сайт. – URL: https://russia.travel/national_s_grohotom_po_fermam
5. Маршрут по Стамбулу. Маршрут на 3 дня // russia.travel: сайт. – URL: <https://feramon.net/articles/marshruty-po-stambuluna-3-dnya.html>
6. Методические основы разработки перспективного туристического маршрута // cyberleninka.ru сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osnovy-razrabotki-perspektivnogo-turisticheskogo-marshruta/viewer>
7. Организация пешеходных туристических маршрутов в исторических городах // cyberleninka.ru сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-peshodnyh-turisticheskikh-marshrutov-v-istoricheskikh-gorodah>
8. Организация туристических маршрутов по Приморскому краю // cyberleninka.ru сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya->

peshehodnyh-turisticheskikh-marshrutov-v-istoricheskikh-gorodah

9. Погода в Евпатории // travelest.ru сайт. – URL: <https://travelest.ru/rossiya/krym/evpatoriya/kogda-ekhat-otdykhat-pogoda-temperatura-vozdukha-i-vody>

10. Прогулки по Флоренции // unitalia.ru: сайт. – URL: <https://unitalia.ru/florentsiya-za-1-den-samostoyatelno-marshrut-s-opisaniem/>

11. Разработка длительного туристического маршрута // cyberleninka.ru сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-turisticheskogo-i-turisticheskogo-marshruta>

REFERENCES

1. Amendments to the general plan of the municipal formation of the Evpatoria city District of the Republic of Crimea. Volume IV. Measures for the protection and use of cultural heritage sites. – Novosibirsk. 2023, 22 p.

2. The Golden Triangle of Paris // www.mansionglobal.com the website. – URL: <https://www.mansionglobal.com/amp/articles/paris-s-golden-triangle-is-perfect-for-the-french-or-foreign-fashionista-39505>

3. Cluster approach to the formation of tourist routes in the city of Novosibirsk // cyberleninka.ru the website. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klasternnyy-podhod-k-formirovaniyu-turisticheskikh-marshrutov-v-gorode-novosibirske>

4. Route to interesting places of Pskov region // russia.travel : website. – URL: https://russia.travel/national_s_grohotom_po_fermam

5. The route around Istanbul. Route for 3 days // russia.travel : website. – URL: <https://feramon.net/articles/marshruty-po-stambulu-na-3-dnya.html>

6. Methodological foundations for the development of a promising tourist route // cyberleninka.ru the website. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osnovy-razrabotki-perspektivnogo-turisticheskogo-marshruta/viewer>

7. Organization of hiking trails in historical cities // cyberleninka.ru the website. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-peshehodnyh-turisticheskikh-marshrutov-v-istoricheskikh-gorodah>

8. Organization of tourist routes in the Primorsky Territory // cyberleninka.ru the website. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-peshehodnyh-turisticheskikh-marshrutov-v-istoricheskikh-gorodah>

9. Weather in Yevpatoria // travelest.ru the website. – URL: <https://travelest.ru/rossiya/krym/evpatoriya/kogda-ekhat-otdykhat-pogoda-temperatura-vozdukha-i-vody>

10. Walking in Florence // unitalia.ru : website. – URL: <https://unitalia.ru/florentsiya-za-1-den-samostoyatelno-marshrut-s-opisaniem/>

11. Development of a long-term tourist route // cyberleninka.ru the website. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-turisticheskogo-i-turisticheskogo-marshruta>

ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING CONCEPT OF THE TOURIST ATTRACTION OF YEVPATORIA

Sidorova¹ V.V, Ablav² A.R.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute "Academy of Construction and Architecture",
295493, Republic of Crimea, Simferopol, Kievskaya Street,181,
E-mail: ¹ nucikBBC@yandex.ru, ² ablaev.alim2018@yandex.ru

Abstract. The city of Yevpatoria, located on the Black Sea coast, on the Crimean peninsula, has a long history full of cultural and historical events. Yevpatoria has great historical potential as a tourist city, but there is a problem of the lack of a well-thought-out tourist route. Many historical museums, monuments, and sites live separate lives, making it difficult for tourists to explore the city's rich cultural heritage. The lack of a coordinated tourist infrastructure creates problems for visitors who want to gain a full understanding of the history and culture of Yevpatoria. The research is conducted in order to identify current problems, develop effective strategies and propose a competent and comfortable tourist route.

Subject: The tourist attraction of Yevpatoria.

Materials and methods: The study is based on a comprehensive analysis using quantitative research methods (statistical and bibliographic). The following methods are applied: deduction, theoretical analysis and synthesis, the method of analogy, graphoanalytic method, comparative analysis and a systematic approach.

Results: World experience shows that tourist routes can be an effective tool to increase the flow of tourists to the city. It is important to develop and consolidate such routes at the legislative level, as well as their regulation, in order to ensure the safety and quality of tourist services. The accessibility of the routes due to the developed infrastructure, including transport, hotel and other types of support, also plays a key role in their attractiveness to tourists. The variability of routes, taking into account the different characteristics of the territories and the variety of entertainment throughout the year, helps to attract a wide range of tourists and create a steady tourist flow.

Conclusions: Identification and accounting of all attractive routes, attractions, historical clusters and complex routes is the basis for the development of tourist infrastructure. In addition, attention should be paid to improving transport connectivity and walking routes in order to ensure optimal movement of tourists. It is necessary to develop both minimum programs (the creation of an open-air museum) and maximum programs (the development of tourist routes for several days) - these are important steps in attracting visitors.

Key words: tourism, urban planning, concept, route, zoning.

Раздел 2. Строительство

УДК 691.31

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ ИЗВЕСТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСНО-ГИПСОВОГО МАТЕРИАЛА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРЫ

Горохов Т.И.

ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет,
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2,
E-mail: gorohowt@yandex.ru

Аннотация. Представлено исследование по повышению прочностных показателей древесно-гипсового композитного материала путем добавления в его состав извести. Представлены данные по определению прочностных показателей, таких как прочность на сжатие и на растяжение при поперечном изгибе, выполненных по ГОСТ 23789-2018 "Вяжущие гипсовые. Методы испытаний" для шести образцов-балочек размером 4×4×16 см из древесно-гипсового материала с использованием извести в качестве модифицирующей добавки и без нее. Выполнен анализ полученных результатов, определено оптимального количества вносимой извести. Установлено, что максимальное значение прочности на растяжение при изгибе составляет 1,93 МПа, что соответствует процентному содержанию вносимой извести в количестве 17,5 %. Кроме того, представлены основные реакции, происходящие при затворении гипсового вяжущего при добавлении извести в водной среде, приводящие к изменению структуры материала. Для оценки изменения структуры материала методом ртутной порометрии, основанным на измерении давления для вдавливания несмачивающей ртутной жидкости в поры образца, был выполнен анализ результатов исследования исходного состава и состава с добавлением извести. Получены основные данные по диаметру пор и их количественному распределению в структуре материала. Представлены и проанализированы основные данные значений пористости материала. Сделан вывод о влиянии на прочностные показатели древесно-гипсового композитного материала и изменение его структуры при использовании извести в качестве модифицирующей добавки. Определена область применения полученных результатов для изделий из древесно-гипсового композитного материала с добавлением извести в качестве модифицирующей добавки.

Предмет исследования: повышение прочностных показателей древесно-гипсового композитного материала, обладающего более низкими прочностными характеристиками по сравнению с изделиями из гипса.

Материалы и методы: выполнены испытания по определению прочности образцов как из древесно-гипсового материала с добавлением в состав извести и без нее. Для оценки изменения структуры образцов были проведены исследования методом ртутной порометрии.

Результаты: в образцах древесно-гипсового материала при добавлении извести уменьшается диапазон пор и средние диаметры, а объем введенной ртути становится меньше, что свидетельствует об увеличении его плотности. Уменьшение модального диаметра пор на три порядка, а также уменьшение медианного диаметра почти в 2 раза формирует мелкопористую структуру древесно-гипсового композитного материала при добавлении извести в качестве модифицирующей добавки.

Выводы: полученные результаты могут быть использованы для создания декоративных изделий для отделки помещений, к которым предъявляются более высокие требования по прочностным показателям.

Ключевые слова: гипс, древесно-гипсовый композит, известь, отделочный материал, ртутная порометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение тенденции рынка строительных материалов в пользу доступных и экологических материалов делает актуальным повышение эксплуатационных показателей разработанного древесно-гипсового композитного материала [1]. В виду особенности применяемых компонентов (гипсовое вяжущее и древесные опилки), данный материал по сравнению с изделиями из обычного гипса (без добавления древесных опилок), при более лучших показателях по теплопроводности и доступности, уступает им по прочности [2...4].

Для повышения механических характеристик древесно-гипсового материала возможно использование ряда модифицирующих добавок. Одной из таких добавок может выступать известь, используемая в виде гашеной извести ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Процесс добавления извести в гипс представляет собой смешивание извести с гипсовым вяжущим в определенных пропорциях. При этом после затворения полученной смеси водой протекает реакция, приводящая к образованию карбоната кальция (CaCO_3) и гидратированного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Добавление извести в гипс в качестве добавки значительно повышает его прочностные характеристики. Целью данного исследования является оценка возможности использования извести в качестве модифицирующей добавки для повышения прочностных характеристик древесно-гипсового композитного материала. Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ изменения прочности древесно-гипсового материала от количества добавляемой извести и провести исследование изменения его структуры.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Особенности поведения гипсовых вяжущих с различными свойствами, а также особенности их производства описаны в работах П. Будникова, А. Волженского, И. Передерия, П. Боженова, А. Ферронской, В. Коровякова, А. Бурьянова, В. Белова и других. Значительные исследования в расширении области применения гипсового вяжущего сделаны на базе научных школ МГСУ (МИСИ), ВНИИСТРОМа, КазГАСУ и др.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние модифицирующей добавки и ее процентного содержания на прочностные характеристики готового образца являются главными факторами, определяющими дальнейшие возможности использования древесно-гипсового композитного материала. Прочность древесно-гипсового композита на растяжение при изгибе и на сжатие определялась согласно ГОСТ 23789-2018 для шести образцов-балочек размером 4×4×16 см. В

процессе экспериментов фиксировалась максимальная разрушающая нагрузка, выдерживаемая материалом. Полученные данные усреднялись. Предел прочности на сжатие вычислялся как среднее арифметическое результатов шести испытаний без наибольшего и наименьшего результатов.

Добавление извести для повышения прочностных характеристик образцов древесно-гипсового композитного материала на основе гипсового вяжущего и древесных опилок происходило в определенном проценте от массы гипса, используемого для изготовления образцов требуемых размеров для дальнейшего испытания на прочность. Масса данной добавки заменяла массу гипса в диапазоне от 10 до 27,5 % с шагом 2,5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Данные, полученные в ходе проведения испытаний для определения значения прочности на растяжение при изгибе и прочности на сжатие, систематизировались и были отображены в виде графика на рисунках 1 и 2 соответственно.

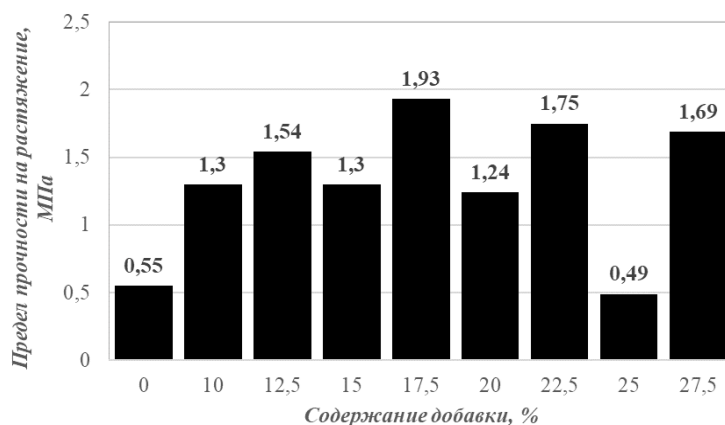


Рис. 1. Влияние процентного содержания извести в древесно-гипсовом композитном материале на прочность на растяжении при изгибе

Fig. 1. Influence of lime percentage in wood-gypsum composite material on flexural tensile strength

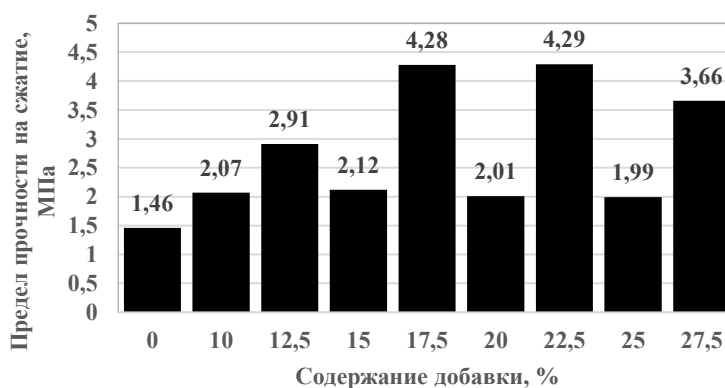


Рис. 2. Влияние процентного содержания извести в древесно-гипсовом композитном материале на прочность на сжатие

Fig. 2. Influence of lime percentage in wood-gypsum composite material on compressive strength

Анализируя график влияние процентного содержания извести в древесно-гипсовом композитном материале на прочность на растяжении при изгибе (рисунок 1), можно сделать вывод, что наблюдается некая параболическая зависимость. Причем ветви параболы опущены вниз. Максимальное значение прочности на растяжение при изгибе соответствует процентному содержанию извести в 17,5 % (1,93 МПа). Таким образом увеличение прочности по сравнению с образцами без добавки составляет 3,5 раза. Также можно заметить, что при добавлении 25 % извести происходит резкое снижение прочностных показателей. Такой результат, по-видимому, является грубой ошибкой и не должен приниматься в расчет.

При анализе графика влияния процентного содержания извести в древесно-гипсовом композитном материале на прочность при сжатии (рисунок 2), видно отсутствие закономерности изменения прочности на сжатие от содержания добавки. Однако стоит отметить, что наибольшее значение предела прочности на сжатие равно 4,28 МПа, получаемое также при добавлении 17,5 % извести.

Положительное действие извести объясняется тем, что она каталитически влияет на ангидрит, который обычно содержится в строительном гипсе.

При затворении гипсового вяжущего с добавлением извести в водной среде происходит ряд ключевых химических реакций, которые ведут к образованию новых фаз. Основные процессы включают следующие химические реакции:

– *гидратация гипса*: гипсовое вяжущее (полугидрат сульфата кальция, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) гидратируется, образуя дигидрат сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

– *диссоциация извести*: известь (гидроксид кальция, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) диссоциирует в воде, образуя ионы кальция (Ca^{2+}) и гидроксильные ионы (OH^-): $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$

– *реакции между ионами*: ионы кальция (Ca^{2+}) из извести взаимодействуют с сульфатными ионами (SO_4^{2-}) из гипса, образуя дополнительный дигидрат сульфата кальция: $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

– *образование кальцита*: гидроксильные ионы (OH^-) могут взаимодействовать с углекислым газом (CO_2) из воздуха, образуя карбонат кальция (CaCO_3), известный как кальцит: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Образующиеся при гидратации и взаимодействии ионов мелкие кристаллы

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и CaCO_3 могут заполнять микропоры и пустоты в структуре гипсового вяжущего, что должно привести к уменьшению общей пористости материала и к улучшению сцепления между частицами гипса и гидратов кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Это в свою очередь должно способствовать формированию более прочной и однородной матрицы. Более плотная структура обладает лучшими механическими свойствами и большей устойчивостью к нагрузкам.

Разброс прочностных характеристик при добавлении извести в древесно-гипсовую смесь может быть связан с неравномерностью распределения добавки. Неравномерное распределение извести в матрице гипсового вяжущего приводит к локальным изменениям структуры материала. В местах с избытком извести могут формироваться области с избыточной концентрацией $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что снижает однородность материала и приводит к возникновению внутренних напряжений, снижающих прочность в отдельных участках, что обусловлено образованием концентраторов напряжений с локальными слабыми зонами.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод о том, что оптимальным процентом извести для изготовления древесно-гипсового композитного материала с повышенными прочностными характеристиками является 17,5 %.

Для изучения особенностей изменения прочностных показателей при добавлении извести и подтверждения сделанных выводов была проведена оценка изменения структуры материала методом ртутной порометрии [5, 6]. Данный способ основан на методе измерения объема пор несмачивающей жидкостью, проникающей под заданным давлением. Величина давления, а также скорость его изменения характеризуют распределение пор в материале [7].

Исследование порометрии проводилось при температуре 20° С, угол наклона ртути составлял 140° при ее значении поверхностного натяжения 480 эрг/см². В результате были определены следующие характеристики: минимальный и максимальный диаметры пор; средний, модальный и медианный диаметры пор; удельная площадь поверхности пор; общая пористость, межчастичная и внутривчастичная пористость.

Результаты распределения пор исходного образца древесно-гипсового материала и образца с добавлением извести представлены на рисунке 3, а и б соответственно.

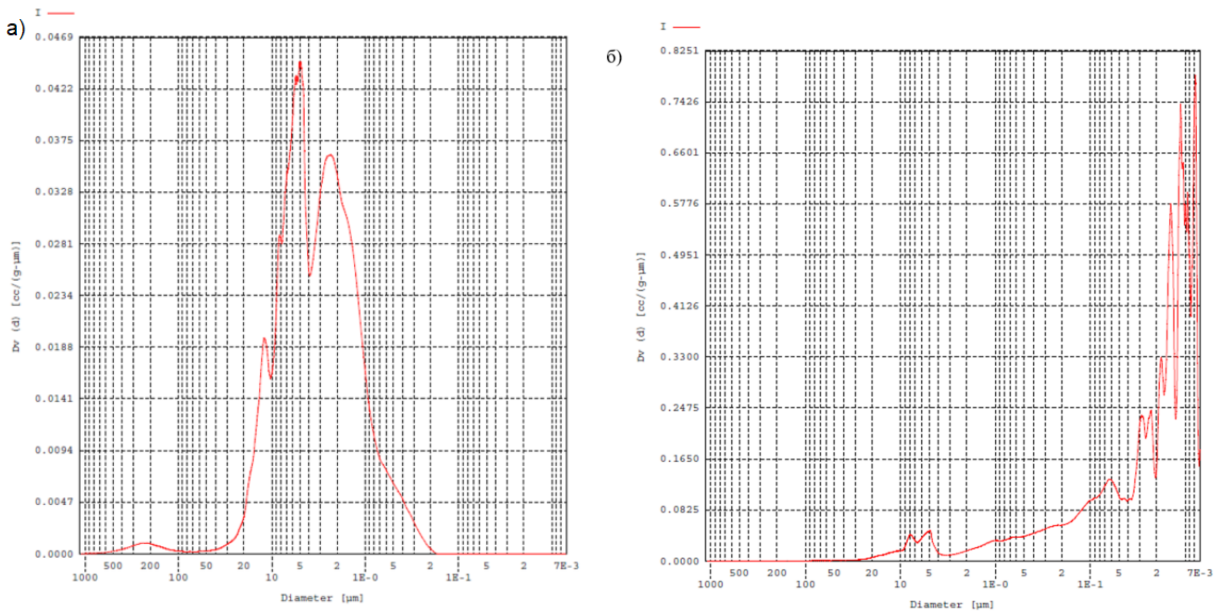


Рис.3. Распределение пор и соотношение их размеров древесно-гипсового материала:
 а) образцы без добавления извести; б) образцы с добавлением извести
Fig. 3. The distribution of pores and the ratio of their sizes of wood-gypsum material:
 а) samples without the addition of lime; б) samples with the addition of lime

Гистограмма распределения пор представлена на рисунке 4.

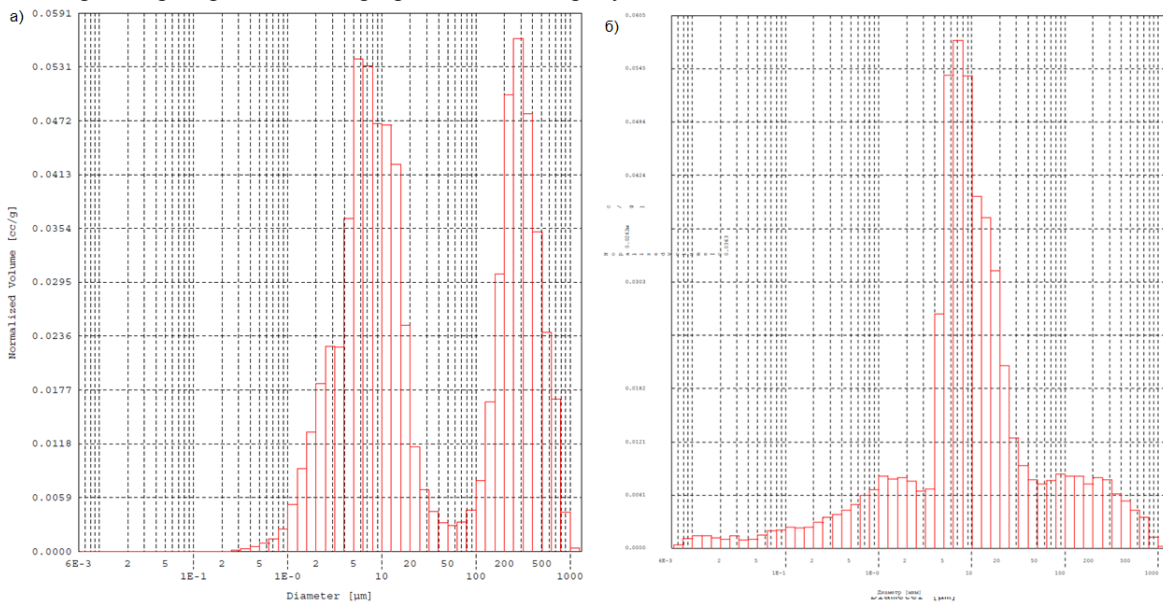


Рис.4. Гистограмма распределения пор древесно-гипсового материала:
 а) образцы без добавления извести; б) образцы с добавлением извести
Fig. 4. Histogram of the distribution of pores of wood-gypsum material:
 а) samples without the addition of lime; б) samples with the addition of lime

Численные значения порометрического анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры образцов
Table 1. The main parameters of the samples

Параметр	Исходный образец	Образец с добавлением извести
Основные параметры образцов		
Масса образца, г	0,5316	0,6800
Объем образца, см ³	1,0000	1,0000
Температура измерений, °С	20	20
Диаметры пор		
Максимальный диаметр пор, мкм	1077,8	1068,83
Минимальный диаметр пор, мкм	0,00710	0,007085
Средний диаметр, мкм·10 ⁻¹	~8,045	~6,068
Модальный диаметр, мкм	~4,89	~0,00782
Медианный диаметр, мкм	~14,58	~8,78
Объемная пористость		
Общий объем введенной ртути, см ³ /г	0,7264	0,5350
Общая пористость, %	~38,62	~36,38
Межчастичная пористость, %	~33,22	~29,56
Внутричастичная пористость, %	~5,39	~6,82
Удельная площадь поверхности, м ² /г	0,3612	3,5267

На основании экспериментальных данных таблицы 1 можно сделать вывод о том, что в образцах древесно-гипсового материала при добавлении извести уменьшается диапазон пор и средние диаметр, а объем введенной ртути становится меньше, что свидетельствует об уплотнении структуры материала, а, следовательно, и об увеличении его плотности. Изменение модального диаметра пор в сторону уменьшения на три порядка, а также уменьшение медианного диаметра почти в 2 раза позволяет говорить о формировании мелкопористой структуры древесно-гипсового композитного материала при добавлении в него извести в качестве модифицирующей добавки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, максимальное значение прочности (1,93 МПа) на растяжение при изгибе соответствует процентному содержанию извести в 17,5 %. Образующиеся при гидратации и взаимодействии ионов мелкие кристаллы CaSO₄·2H₂O и CaCO₃ заполняют микропоры и пустоты в структуре гипсового вяжущего, что подтверждено результатами ртутной порометрии. Полученные результаты могут быть использованы для создания изделий из древесно-гипсового композитного материала, к которым предъявляются более высокие требования по прочностным показателям.

В работе применялось оборудование ЦКП НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Строительные отделочные материалы с фотокаталитическими свойствами для деградации химических поллютантов воздуха / В.М. Бондаренко, Б.А. Бондарев, А.О. Корнеева, А.В. Бондаренко // Современные проблемы строительной науки. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 7 – 11.
2. Патент № 2788603 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/14, С04В 18/26. Древесно-гипсовый композит : № 2022108904 : заявл. 04.04.2022 : опубл. 23.01.2023 / А. В. Ерофеев, Т. И. Горохов, Н. С. Ковалев, С. И. Горохов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тамбовский государственный технический университет".
3. Патент № 2795289 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/14, С04В 18/26. Древесно-гипсовый композит : № : 2022119149 : заявл. 13.07.2022 : опубл. 02.05.2023 / А. В. Ерофеев, Т. И. Горохов, А. А. Морковин, Н. В. Леонов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тамбовский государственный технический университет".
4. Ковалев Н.С. Исследование эксплуатационных свойств древесно-гипсового композита оптимального состава // Н.С. Ковалев, Т.И. Горохов, А.В. Ерофеев, С.И. Горохов // СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА. - 2022. -6 (275) -с 67-72
5. Gorokhov, T.I. Implementation of the mathematical planning of an experiment method in selecting optimal composite material based on gypsum binder filled with wood filings / T.I. Gorokhov, A.V. Erofeev, B.A. Bondarev, A.O. Korneeva // Russian

Journal of Building Construction and Architecture. – 2023. – № 2 (58). – P. 34 – 40.

6. Стородубцева, Т.Н. Анализ влияния изменения температуры на древесный полимерный композиционный материал / Т.Н. Стородубцева, Б.А. Бондарев, А.О. Корнеева // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж. – 2021. – С. 334 – 339.

7. Проектирование состава строительных композитов с учетом термодинамической совместимости высокодисперсных систем горных пород / А. С. Тутьгин, А. М. Айзенштадт, В. С. Лесовик [и др.] // Строительные материалы. – 2013. – № 3. – С. 74-75.

REFERENCES

1. Bondarenko, V.M. Building finishing materials with photocatalytic properties for the degradation of chemical pollutants in the air / V.M. Bondarenko, B.A. Bondarev, A.O. Korneeva, A.V. Bondarenko // Modern problems of construction science. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference. - 2017. – pp. 7-11.

2. Patent No. 2788603 C1 Russian Federation, IPC C04B 28/14, C04B 18/26. Wood-gypsum composite : No. 2022108904 : application 04.04.2022 : published 23.01.2023 / A.V. Erofeev, T. I. Gorokhov, N. S. Kovalev, S. I. Gorokhov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University".

3. Patent No. 2795289 C1 Russian Federation, IPC C04B 28/14, C04B 18/26. Wood-gypsum composite : No. : 2022119149 : application 07/13/2022 : published 05/02/2023 / A.V. Erofeev, T. I. Gorokhov, A. A. Morkovin, N. V. Leonov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University".

4. Kovalev N.S. Investigation of the operational properties of wood-gypsum composite of optimal composition // N.S. Kovalev, T.I. Gorokhov, A.V. Erofeev, S.I. Gorokhov // BUILDING MATERIALS, EQUIPMENT, TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY. - 2022. -6 (275) -.from 67-72

5. Gorokhov, T.I. Implementation of the mathematical planning of an experiment method in selecting optimal composite material based on gypsum binder filled with wood filings / T.I. Gorokhov, A.V. Erofeev, B.A. Bondarev, A.O. Korneeva // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2023. – № 2 (58). – P. 34 – 40.

6. Storodubtseva, T.N. Analysis of the effect of temperature changes on wood polymer composite material / T.N. Storodubtseva, B.A. Bondarev, A.O. Korneeva // Modern machines, equipment and IT solutions of the timber industry: theory and practice. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. – Voronezh. 2021. pp. 334-339.

7. Designing the composition of building composites taking into account the thermodynamic compatibility of highly dispersed rock systems / A. S. Tutygin, A.M. Aisenstadt, V. S. Lesovik [et al.] // Building Materials. - 2013. – No. 3. – pp. 74-75.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE USE OF LIME AS AN ADDITIVE ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF WOOD-GYPSUM MATERIAL THROUGH THE PRISM OF AN ANALYSIS OF CHANGES IN ITS STRUCTURE

Gorokhov T.I.

Tambov State Technical University,
392000, Tambov, Sovetskaya str., 106/5, room 2, gorohowt@yandex.ru

Abstract. A study on increasing the strength parameters of wood-gypsum composite material by adding lime to its composition is presented. Data on the determination of strength indicators, such as compressive and tensile strength in transverse bending, made in accordance with GOST 23789-2018 "Gypsum binders. Test methods" for six 4×4×16 cm beam samples made of wood-gypsum material using lime as a modifying additive and without it. The analysis of the obtained results was performed, and the optimal amount of lime applied was determined. It was found that the maximum value of flexural tensile strength is 1.93 MPa, which corresponds to the percentage of lime applied in the amount of 17.5%. In addition, the main reactions occurring during the sealing of gypsum binder when lime is added in an aqueous medium, leading to a change in the structure of the material, are presented. To assess the change in the structure of the material by mercury porometry, based on measuring the pressure for pressing non-wetting mercury liquid into the pores of the sample, the analysis of the results of the study of the initial composition and the composition with the addition of lime was performed. Basic data on the diameter of pores and their quantitative distribution in the structure of the material have been obtained. The basic data of the porosity values of the material are presented and analyzed. The conclusion is made about the effect on the strength parameters of the wood-gypsum composite material and the change in its structure when lime is used as a modifying additive. The scope of application of the obtained results for products made of wood-gypsum composite material with the addition of lime as a modifying additive is determined.

Materials and methods: Tests were performed to determine the strength of samples made only of wood-gypsum material, as well as samples of wood-gypsum material with the addition of lime. To assess the changes in the structure of the samples, studies using mercury porometry were carried out.

Results: in the samples of wood-plaster material, the pore range and average diameters decrease when lime is added, and the volume of introduced mercury becomes smaller, indicating an increase in its density. The decrease in the modal pore diameter by three orders of magnitude, as well as the decrease in the median diameter by almost two times, forms a fine-pored structure in the wood-plaster composite material when lime is added as a modifying additive.

Conclusions: The results obtained can be used to create decorative products for interior decoration, which are subject to higher requirements in terms of strength.

Key words: gypsum, wood-gypsum composite, lime, finishing material, mercury porometry.

ПРОДАВЛИВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ

Родин¹ С.В., Меннанов² Э.М., Богуцкий³ Ю.Г., Калафатов⁴ Д.А.ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181E-mail: ¹sv_rodin@mail.ru, ²mennanov.elmar@mail.ru, ³bogutskiyg@mail.ru, ⁴jafer90@mail.ru

Аннотация. В статье приведено объяснение вторичного характера образования пирамиды продавливания как следствие истинного хрупкого разрушения плитных железобетонных конструкций – дробления, среза или смятия бетона с учетом местных напряжений и концентрации изгибающих моментов, а для фундаментов дополнительного перераспределения контактных напряжений в грунтовом основании и поперечных сил, что позволяет с достаточной обоснованностью свести всё разнообразие видов хрупкого разрушения с образованием различных форм пирамид продавливания к трем – дроблению, срезу и смятию бетона. Выполнены экспериментальные исследования с крупномасштабными железобетонными моделями фундаментов на песчаном основании, которые позволили изучить параметры совместной работы фундамента и грунта, и установить геометрические и прочностные факторы (вылет консолей, высота плиты фундамента, армирование, прочность бетона), играющие важную роль в формировании процесса хрупкого разрушения фундамента в виде продавливания.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние фундаментов при хрупком разрушении в виде продавливания.

Материалы и методы: проведены экспериментальные исследования по получению продавливания фундаментных плит, испытано 49 крупномасштабных образцов фундаментных плит размерами 1x1x0,1 м и 29 плит размером 2x2 м высотой сечения от 0,08 м до 0,4 м. Опыты проводили в железобетонном лотке размером 4x4x3(h) м, высота слоя песка составляла 2,2-2,4 м. Силовое оборудование позволяло нагружать фундаментные плиты усилием до 4000 кН, применяемая регистрирующая аппаратура, в том числе специально разработанная для исследований фундаментов, обеспечивала с высокой точностью проводить измерения принятых параметров системы «грунтовое основание-фундамент».

Результаты: проанализированы методы расчета плит на продавливание и направления совершенствованию расчетов хрупкой прочности. Экспериментально изучено влияния основных параметров конструкций фундаментов на песчаном грунтовом основании на хрупкую прочность при продавливании. Обосновано образование различных форм пирамиды продавливания как вторичного процесса разрушения от дробления, среза или смятия бетона, предложены конструктивные решения по уменьшению влияния концентрации напряжений и усилий в приопорной зоне площади нагружения.

Выводы: расчет фундаментов на продавливание по формуле 8.87 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» часто не позволяет с достаточной точностью получить значения хрупкой прочности (прочности на продавливание), опытные величины могут значительно превышать расчетные, причем превышение непостоянно. Для фундаментных плит минимально наблюдавшийся коэффициент перед правой частью формулы равен 1,3. Действительным механизмом хрупкого разрушения плит можно считать дробление, срез сжатой зоны и смятие бетона под опорой, с последующими (вторичными) образованиями пирамиды продавливания. В случае дробления сжатой зоны наилучшие результаты дает расчет критического сочетания главных напряжений в приопорной части плиты.

Ключевые слова: продавливание, железобетон, фундамент, перераспределение, основание, грунт, исследование, срез, дробление, смятие.

ВВЕДЕНИЕ

Метод расчета прочности железобетонных плитных конструкций на продавливание основан на предложении об отрыве пирамиды продавливания от плитной части конструкции, при этом прочность на продавливание оценивают как суммарную по боковой поверхности пирамиды в пределах рабочей высоты сечения конструкции [5,9,10,13,20].

Продавливание плит с образованием пирамиды продавливания наблюдалось в опытах при действии нагрузки, распределенной по квадратной, прямоугольной и круглой площадке. Расчетные формулы, как и в СП [13], основаны на определении нагрузки, воспринимаемой при отрыве пирамиды от плиты. Вместе с тем в [10,15] эмпирический коэффициент перед правой частью формулы меняется от 1,0 до 2,5; в [5,9,16,17] отмечено, что на

прочность при продавливании влияет не только бетон, но и арматура; в [5,7] указано, что при переходе от балки к плите наблюдаются переходные формы хрупкого разрушения; при соотношении ширины плиты к ширине площадки передачи нагрузки не менее 7-ми образуются пирамиды продавливания, а при меньших соотношениях наблюдаются переходные формы.

Экспериментальные исследования фундаментов свидетельствуют о наличии запасов прочности в опытных разрушающих нагрузках и их теоретических значениях, определенных в соответствии с положениями норм проектирования. В последнее время выдвинуто значительное количество предложений по уточнению расчета фундаментов по наклонным сечениям и на продавливание, учитывающих специфику их работы совместно с грунтовым основанием, которые отличаются не только математическим

аппаратом, но и подходом к решению проблемы и часто оказываются не корректными.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Проектирование фундаментов требует наиболее точного определения особенностей напряженного состояния системы «грунтовое основание–фундамент». Многочисленные исследования конструкций плитных фундаментов свидетельствуют о значительных запасах прочности в значениях опытных разрушающих нагрузок и их теоретических значений на продавливание, которые описаны в работах Ю.Н.Мурзенко и др. [10], С.И.Политова и др. [16], Н.Н.Коровина, А.В.Ступкина [9], А.С.Залесова, К.Е.Ермуханова [7], А.Н.Тетиора, С.В.Родина [14], А.А.Цесарского [15].

В процессе исследования железобетонных плит и отдельно стоящих фундаментов с учетом упругопластических свойств грунтового основания были предложены методы расчета при действии сосредоточенной нагрузки, нагрузок, распределенных по квадратной, прямоугольной и круглым площадкам [8,10,12,17]. Механизм разрушения фундаментов при продавливании до сих пор не изучен. Подтверждением этому служит несовпадение мнений в различных странах о причинах разрушения и методике расчета. Согласно [13] расчет столбчатых фундаментов на продавливание в России осуществляют в предположении отрыва пирамиды с боковыми гранями, начинающимися у колонны и наклоненными под углом 45°. Аналогичная система принята по нормам США [18]. Расчет на продавливание по нормам ЕКБ [19] выполняют из условия обеспечения прочности на отрыв фигуры, начинающейся у колонны и имеющей сложную конфигурацию, с углом наклона граней, равным 30°. При расчете по нормам выше указанных стран эпюру контактных давлений под подошвой фундамента принимают прямоугольной. Опыты некоторых авторов [8,9,14,15,20] свидетельствуют о наличии значительного запаса прочности фундаментов, влиянии процентов армирования, образования и развития наклонных трещин на несущую способность и других отклонений от принятой системы расчета. В исследованиях [10,16,17] приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований столбчатых фундаментов на продавливание при действии внешней нагрузки без эксцентриситета и с эксцентриситетом. Отмечено, что: процесс трещинообразования начинается с возникновения нормальных трещин в сечениях по коротким граням колонны, а у внецентренно нагруженных фундаментов – по грани колонны со стороны эксцентриситета внешней силы; момент появления нормальных трещин соответствует уровню нагрузки 20-40% разрушающей; высота сжатой зоны бетона в нормальных сечениях по граням колонны превышает высоту сжатой зоны,

рассчитанную по [13]; процесс деформирования и разрушения сопровождается постоянным перераспределением напряжений в бетоне; при нагрузках, близких к разрушающим, напряжения по высоте сжатой зоны выравниваются, как в нормальных, так и в наклонных сечениях, что определяет переход от разрушения по наклонному сечению к изгибному разрушению; конфигурация граней пирамиды продавливания имеет криволинейный характер с углом наклона, меняющимся в широких пределах (10°-83°); размеры конструкции качественно влияют на механизм разрушения, схемы трещинообразования, напряжения в арматуре и бетоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с требованиями строительных норм Российской Федерации [13] расчет фундаментов на продавливание необходимо производить при действии на них (нормально к плоскости элемента) местных, концентрированно приложенных усилий - сосредоточенных силы и изгибающего момента. При этом расчетное поперечное сечение принимают расположенным вокруг зоны передачи усилий на элемент на расстоянии нормально к его продольной оси.

Расчет элементов на продавливание при действии сосредоточенной силы производят из условия 8.87 [13].

$$F \leq F_{b,ult} , \quad (1)$$

где F – предельное усилие, воспринимаемое бетоном:

$$F_{b,ult} = R_{bt} \cdot A_b , \quad (2)$$

где A_b – площадь расчетного поперечного сечения, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от границы площади приложения сосредоточенной силы с рабочей высотой сечения h_0 :

$$A_b = U h_0 , \quad (3)$$

где U – периметр контура расчетного поперечного сечения;

h_0 – приведенная рабочая высота сечения, определяемая как среднеарифметическое значение рабочих высот сечений для продольной арматуры двух взаимно перпендикулярных направлений.

Расчет фундаментов на продавливание при совместном действии сосредоточенных силы и изгибающего момента производят из условия

$$\frac{F}{F_{b,ult}} + \frac{M}{M_{b,ult}} \leq 1 , \quad (4)$$

где M – сосредоточенный изгибающий момент, учитываемый при расчете на продавливание;

$F_{b,ult}$, $M_{b,ult}$ – предельные сосредоточенная сила и изгибающий момент, которые могут быть восприняты бетоном в расчетном поперечном сечении при их раздельном действии.

$$M_{b,ult} = R_{bt} \cdot W_b \cdot h_0 , \quad (5)$$

где W_b – момент сопротивления расчетного контура поперечного сечения.

Сопротивление продавливанию в соответствии с нормами проектирования стран Евросоюза [19] определяется в зависимости от расчетного периметра u , расположенного на расстоянии $2d$ (d – рабочая высота сечения) от границ зоны передачи нагрузки. При этом считается, что угол наклона боковых граней пирамиды продавливания может варьироваться в зависимости от толщины фундамента, но должен быть не менее $26,6^\circ$. Для центрально нагруженного фундамента продавливающая сила $V_{Ed,red}$ определяется как разница между сосредоточенной вертикальной силой V_{Ed} , передаваемой надфундаментной конструкцией, и вертикальной силой ΔV_{Ed} , вызванной отпором грунта без учета собственного веса фундамента.

$$v_{ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud}, \quad (6)$$

Сопротивление фундамента продавливанию определяется из условия:

$$v_{Rd} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} \frac{2d}{a} \geq 0,4 f_{ctd} \frac{2d}{a}, \quad (7)$$

где γ_c - коэффициент надежности по бетону;

k - коэффициент, зависящий от соотношения сторон грузовой площади;

f_{ck} - нормативная цилиндрическая прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток;

f_{ctd} - расчетное сопротивление бетона при растяжении;

a - расстояние от низа колонны до контрольного периметра;

ρ - приведенный коэффициент армирования:

$$\rho = \sqrt{\rho_y + \rho_x} \leq 0,02, \quad (8)$$

где ρ_y, ρ_x - коэффициенты армирования сечения вдоль оси y и x , соответственно.

Для внецентренно нагруженных фундаментов:

$$v_{ed} = \frac{V_{ed,red}}{ud} \left[1 + k \frac{M_{ed}u}{V_{ed,red}W} \right], \quad (9)$$

где M_{ed} - изгибающий момент;

W - момент сопротивления контрольного периметра.

В соответствии с требованиями Американских строительных норм [18] расчет фундаментов на продавливание необходимо выполнять по трем условиям:

$$V_u \leq \begin{cases} \left(2 + \frac{4}{\beta} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \\ \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \\ 4 \sqrt{f'_c} b_0 d \end{cases}, \quad (10)$$

где V_u – продавливающая сила;

f'_c – прочность бетона сжатию;

α_s – коэффициент, зависящий от расположения фундамента (крайнего ряда, среднего ряда или угловой).

Первое из условий учитывает влияние коэффициента β , выражающего соотношение сторон площадки продавливания, второе – влияние отношения рабочей высоты сечения d к периметру контура расчетного поперечного сечения b_0 , третье условие устанавливает предельное значение продавливающей силы. При этом считается, что расчетное поперечное сечение расположено вокруг зоны передачи усилий на расстоянии не менее половины рабочей высоты сечения от границы указанной зоны.

Анализируя существующие теории и методики расчета отдельно стоящих фундаментов при хрупком разрушении, можно сделать вывод, что они основываются на зависимостях различных факторов: в расчетных формулах учитываются различные эмпирические коэффициенты, различные прочностные характеристики материалов, различные формы тел продавливания. Поэтому для изучения характера разрушения плитных фундаментов и разработки теории расчета, наиболее точно соответствующей фактической работе фундаментов под нагрузкой, необходимо проведение экспериментальных исследований.

С целью экспериментального обоснования положений рассматриваемого метода нами были проведены многочисленные опыты по получению продавливания фундаментных плит, испытано 49 крупномасштабных образцов фундаментных плит размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,1$ м и 29 плит 2×2 м высотой сечения от 0,08 м до 0,4 м. В рассмотрение были включены четыре фактора, существенно влияющие на хрупкую прочность плит: вылет консоли (расстояние от грани плиты до грани монолитной вышележащей ступени), высота плиты, коэффициент армирования подошвы плиты и класс бетона по прочности на сжатие. Каждый из факторов имел пять параметров [12,17], охватывающих все встречающиеся в практике случаи и гарантирующих потерю прочности плит по одному из видов хрупкого разрушения (таблица 1).

Опыты проводили в железобетонном лотке размером $4 \times 4 \times 3$ (h) м (рис.1), заполненном песком $M_k = 1,4$, высота слоя составляла 2,2-2,4 м, перед очередным испытанием песок раскапывали и послойно уплотняли до достижения объемной массы $1,65-1,7$ т/м³.

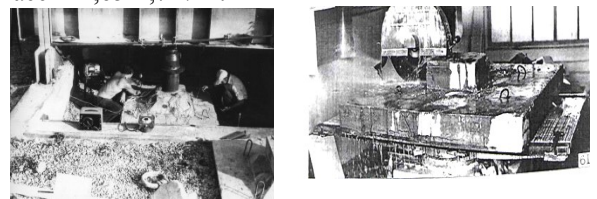


Рис. 1. Оборудование для проведения экспериментальных исследований

Fig. 1. Equipment for conducting experimental research

Нагрузку передавали центрально с установленной выдержкой на каждой ступени одним или двумя гидродомкратами 1000 кН и 2000 кН. В процессе возрастания уровня внешнего усилия, вплоть до разрушения фундамента, изучали деформации бетона, стержней арматурной сетки, трещинообразование, деформации поверхности плитной части, общую осадку конструкции и контактные напряжения в грунтовом основании.

Деформации бетона сжатой зоны и стержней арматурной сетки замеряли тензорезисторами с базой 20 и 50 мм с регистрацией показаний на цифровом измерителе деформаций ИДЦ-1. Прогобы поля плиты – индикаторами часового типа с диапазоном измерений от 0-10 мм. Осадку плит – прогибомерами марки 6ПАО с диапазоном измерений от 0-100 мм; контактные напряжения электротензометрическими месдозами. Фиксацию начала трещинообразования проводили методом акустической эмиссии, используя серийные пьезопреобразователи 150 кГц или высокочувствительные микрофоны [17]. Контроль ширины раскрытия трещин по граням плиты проводили с использованием микроскопа МПБ-3 с диапазоном измерений от 0-0,7 мм, контроль развития трещин на подошве плиты и ширину их раскрытия проводили специально разработанными датчиками [1]. После испытаний часть образцов фундаментных плит, для изучения траектории внутреннего трещинообразования, в сечении по грани нагрузочной ступени, распиливали на камнерезном станке дисковыми пилами с алмазными резами (рис.1).

В отличие от приведенных другими исследователями испытаний [9,10,11,15] нами было сосредоточено внимание на области плиты, примыкающей к нагрузочной ступени в зоне хрупкого разрушения. В этой зоне характерны следующие особенности напряженно-деформированного состояния (НДС), рисунок 2: действие местных напряжений от колонны (нагрузочной ступени) σ_y и σ_z ; концентрация изгибающих моментов M_y , увеличивающаяся при уменьшении площади опирания нагрузочной ступени и приводящая к дополнительным напряжениям в арматуре σ_s ; концентрация поперечных сил Q , как следствие перераспределения контактных давлений (рис.2), приводящая к концентрации касательных напряжений τ_{zy} ;

При ограничении горизонтальных перемещений опорных зон плит – действие дополнительного распора, влияющего на наклон изостат; при действии сосредоточенных усилий на контакте (плиты при испытании на пруженных стендах) – влияние этих усилий на наклон изостат, а также на распределение деформаций и напряжений.

Известно, что трещины в хрупких телах делятся на трещины нормального отрыва и сдвига [6] и в неперearмированных железобетонных конструкциях распространяются с некоторым

приближением в направлении изостат [14], то есть являются трещинами отрыва. На рисунке 3 показаны схемы образования наклонных трещин.

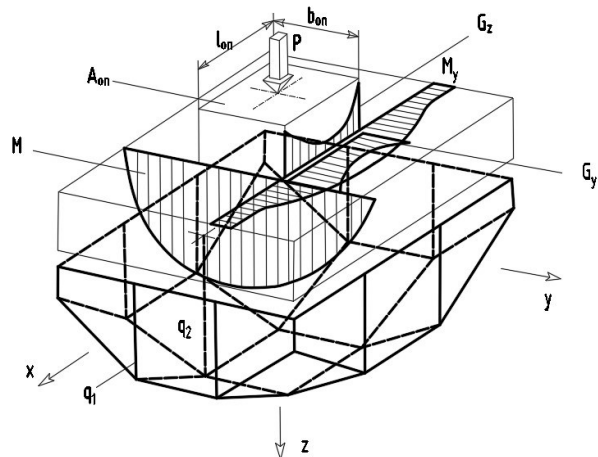


Рис.2. Эпюры, характеризующие напряженно-деформированное состояние фундамента
Fig. 2. Diagrams characterizing the stress-strain state of the foundation

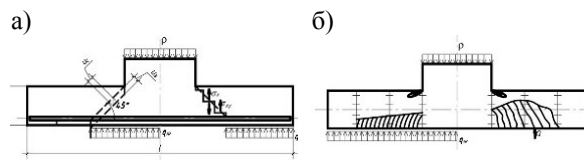


Рис.3. Схемы образования наклонных трещин и траектории главных напряжений (изостаты) а-пирамида продавливания по СП [13] (слева) и действие усилий в сечении под углом 45° (справа); б-сравнительные схемы образования и направления трещин при распределенной по основанию нагрузке (контактные давления от грунта, слева) и от сосредоточенной силы (например, при испытаниях на пружинных стендах, справа)

Fig. 3. Schemes of inclined crack formation and trajectories of principal stresses (isostats)

При одновременном отрыве всей поверхности пирамиды (рис.3,а) должен происходить отрыв u_o и сдвиг u_c в трещине, что невозможно, исходя из описанных выше положений. И действительно, отрыву пирамиды в опытах предшествует раскрытие трещин в растянутой зоне [9,10,14,15].

На рисунке 4 обобщены применяемые методы расчета на продавливание выдвинутые зарубежными и отечественными учеными: а-предложение М.Герцог [20]; б-предложение Рохлина И.А., Попова О.С. [11]; в-предложение Ю.Н.Мурзенко, А.А.Цесарского [10,15]; справа показаны экспериментально полученные схемы трещинообразования, предшествующие продавливанию.

Изучение траекторий распространения внутренних трещин [14] показывает, что во всех описанных в литературе случаях «продавливания», в том числе и с «перевернутой» пирамидой, трещины распространяются с некоторым приближением в направлении изостат (за исключением некоторых опытов, в которых был получен срез сжатой зоны. При больших

перемещения колонны (опорной нагрузочной ступени) играют роль касательные усилия на контакте арматуры и бетона, отклоняющие изостаты и трещины вблизи арматуры вдоль рабочей арматуры.

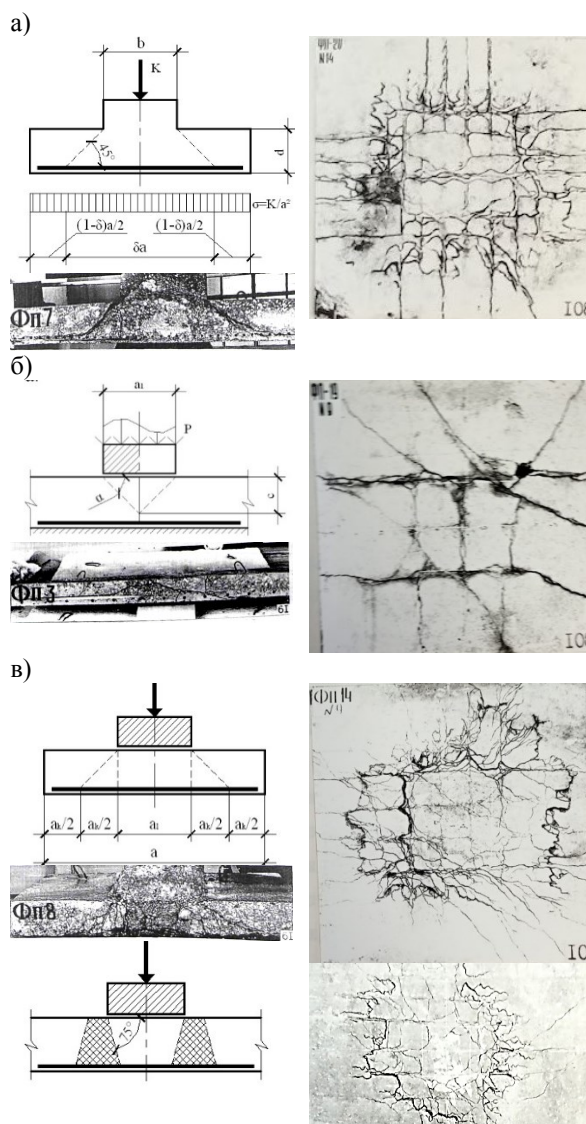


Рис.4. Схемы трещинообразования
Fig. 4. Cracking patterns

Данные различных опытов по получению продавливания [8-11,14,15] не противоречат друг другу. Угол наклона трещин и развитие обратной «пирамиды» зависят от описанных выше особенностей НДС в каждом отдельном случае. Преобладание (по величине) напряжений от изгиба или от местного сжатия, нормальных сил или касательных, в различной степени влияет на наклон и распределение изостат.

Случаи образования обратной «пирамиды» (рис. 4 в) объясняется действием касательных напряжений на контакте штампа и плиты аналогично испытанию кубика на сжатие (рисунок 4 б) и концентрацией усилий в стальной опорной плите при изгибе фундаментной плиты и таким образом, действием на фундаментную плиту раздельных сосредоточенных на малой площадке

усилий (рисунок 4 в). В обоих случаях трещины не отклоняются значительно от изостат.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Построение областей трещинообразования и изостат для некоторых случаях хрупкого разрушения подтверждает сделанный ранее анализ (рис. 3,5). Полученные нами схемы внутренних трещин соответствует сделанному анализу. На рисунке 5 приведены схемы разрушения фундаментов: а, б – при дроблении сжатой зоны; в-при дроблении и срезе сжатой зоны; г - при смятии бетона.

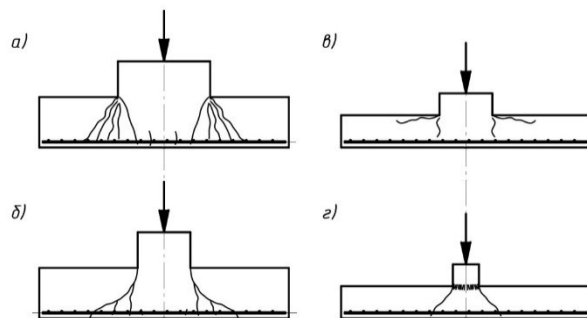


Рис.5. Схемы трещинообразования, предшествующие продавливанию железобетонных плит
Fig. 5. Crack formation patterns preceding the penetration of reinforced concrete slabs

«Пирамиды» продавливания были получены после дробления сжатой зоны, ее среза и смятия под колонной (рис. 5). Во всех случаях имело место хрупкое перемещение колонны относительно плиты (при срезе – мгновенное, при дроблении и смятии – постепенное). Нагрузки, соответствующие разрушению, превышали нагрузки продавливания по СП [13] в 1,3-3,1 раза (чаще в 1,6-2,0 раза). Степень превышения зависела от параметров плит (табл.1).

Приведенный анализ позволяет объяснить «продавливание» в [5,7] при уменьшении размера колонны. При этом резко возрастает концентрация изгибающих моментов, а следовательно, и сжимающих напряжений у колонны, что наряду с местными напряжениями вызывает подкол сжатой зоны наклонной трещиной.

Таким образом, действительным механизмом хрупкого разрушения плит можно считать дробление, срез сжатой зоны и смятие бетона под опорой, с последующими (вторичными) образованиями «пирамиды» продавливания. В случае дробления сжатой зоны наилучшие результаты дает расчет критического сочетания главных напряжений в приопорной части плиты [12,14,17].

Чем больше процент армирования, тем большее влияние арматуры на отклонение изостат вблизи нее. Этим и объясняется различие в направлении трещин в разных опытах (вплоть до откола всей сетки горизонтальной трещиной) (рис.6).



Рис.6. Схема трещинообразования при больших процентах армирования
Fig. 6. Crack formation pattern at high reinforcement percentages

В виду того, что напряжения σ_y и σ_z концентрируются в углах площадки, передающей внешнюю нагрузку на плиту, очевидно, что это место в плитах в первую очередь подвержено хрупкому разрушению. Расчет хрупкой прочности рекомендуется выполнять для угловых зон стыка нагрузочной площади (колонны) и плиты в сжатой зоне бетона с учетом концентрации $M_u, Q, \sigma_y, \sigma_z$ и τ_{zy} – начало трещинообразования считается хрупким разрушением. Нами выполнены расчеты с целью проверки соблюдения условия (16) по образованию наклонных трещин для этих зон плит и даны конструктивные предложения по снижению концентрации напряжений в этих зонах (рис. 7).

При этом сначала вычисляют:

$$\sigma_z = n \cdot \frac{P}{A_{on}}, \quad (11)$$

где n - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения σ_z и σ_y по грани опоры: $n = 1,3 \dots 1,5$.

Затем определяют:

$$\sigma_y = \frac{n \cdot \sigma_s \cdot A_s}{2 \cdot b_{on} \cdot \left(h_0 - \frac{M}{\sigma_s \cdot A_s} \right)}, \quad (12)$$

где b_{on} - ширина опоры;

$$M = 0,167 \cdot [0,5 \cdot (l - b_{on}) - f \cdot (0,9 \cdot h_0 + a)]^2 \times \left\{ \frac{3 \cdot P}{l} \cdot \lambda_s \cdot [0,5 \cdot (l - b_{on}) - f \cdot (0,9 \cdot h_0 + a)] \cdot l \cdot P \right\} \quad (13)$$

причем λ_s - удлинение в арматуре в зоне образования пластического шарнира:

$$\lambda_s = 0,05 \text{ см} \quad [14];$$

f - коэффициент трения между подошвой плиты и грунтом основания [17];

A_ϕ - площадь подошвы фундамента;

S - осадка фундамента.

Далее находят τ_{zy} , принимая с некоторым допущением их распределение над трещиной равномерным:

$$\tau_{zy} = \frac{Q \cdot \sigma_y}{n \cdot \sigma_s \cdot A_s}, \quad (14)$$

Для установления Q находят объемные эпюры контактных давлений в зоне опорной площадки (рис. 1):

$$Q = \frac{0,5 \cdot q_1 \cdot b_{on} \cdot (l - b_{on})}{l} + 0,25 \cdot \left(\frac{q_2}{l} - \frac{q_1}{l} \right)^2 \cdot b_{on} \cdot (l - b_{on}), \quad (15)$$

После этого определяют величину главных растягивающих и главных сжимающих напряжений в бетоне сжатой зоны:

$$\sigma_{mt} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{zy}^2}$$

И проверяют условие: при главных сжимающих напряжениях $\sigma_{mc} > 0,5 \cdot R_{b,ser}$:

$$\sigma_{mt} \leq 2 \cdot R_{bt,ser} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{mc}}{R_{b,ser}} \right), \quad (16)$$

Принятые коэффициенты условий работы 0,5 и 2,0 для главных сжимающих σ_{mc} и главных растягивающих σ_{mt} напряжений приняты для классов бетона по прочности на сжатие не выше В30, что соответствует применяемому классу бетона для фундаментных плит.

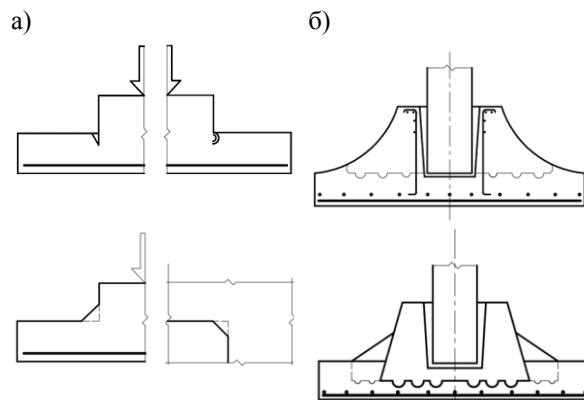


Рис.7. Конструктивные решения по снижению концентрации напряжений в сжатых зонах плитных фундаментов:

а-устройство деформируемых вставок [3]; б-выполнение сжатых зон из более прочных бетонов и многогранной конфигурации [2,4]; в-устройство втулок

Fig. 7. Design solutions for reducing stress concentration in compressed areas of slab foundations

Расчет плит по предлагаемой методике показал, что при нагрузках, близких к разрушающим, в сжатой зоне образуются трещины – условие (16) по образованию трещин не соблюдается.

Расчет с учетом перераспределения эпюры контактных давлений, действия касательных напряжений по контакту фундаментной плиты и грунтового основания, распределения σ_y, σ_z и момента M_u в сжатой зоне бетона ранее испытанных плит (табл.1 строки 1, 4 и 5) показал, что при нагрузках, близких к разрушающим, в сжатой зоне образуются трещины. Начало образования трещин происходит в зонах концентрации σ_y, σ_z и M_u в углах опорной площадки. При росте нагрузки происходит трещинообразование в остальных участках контура.

Таблица 1. Характеристика образцов фундаментов и результаты испытаний
Table 1. Characteristics of foundation samples and test results

№ п/п	Параметры образцов							Нагрузки (в кН), соответствующие:					$\frac{P}{F}$
	Размер в плане, м	Опорная площадка, см	h, см	$\frac{h}{l - b_{оп}}$	Прочность бетона, МПа	As, см ²	Класс арматуры	гидравлическому	Раздроблению бетона сжатой зоны	среза бетона сжатой зоны	смятию бетона	опытные значения P	
1	2x2	30x30	32	0,38	38,7	58,5	A400	1590	3540	6900	3540	2450	1,54
2	-/-	40x40	8	0,1	31,7	7,9	A240	202	74	819	5200	445	2,2
3	-/-	30x30	16	0,19	20,7	15,4	A400	315	433	1122	1931	882	2,8
4	-/-	40x40	24	0,3	20,7	43,3	A400	775	1988	2764	3433	1050	1,36
5	-/-	40x40	32	0,4	12,3	14,7	A400	925	1627	2803	2060	1340	1,45
6	-/-	50x50	32	0,43	20,0	54,3	A400	1583	2746	5540	5175	3750	2,37
7	-/-	60x60	24	0,34	32,1	40,0	A400	1546	1869	6321	11832	2690	1,74
8	-/-	70x70	24	0,37	31,7	26,0	A400	1859	1483	7564	15893	4050	2,18
9	-/-	30x30	8	0,09	51,2	10,2	A400	204	139	1025	4770	344	1,69
10	-/-	50x50	16	0,21	25,8	33,1	A400	520	1105	1859	5391	1076	2,07
11	-/-	60x60	16	0,23	42,4	5,0	A400	997	235	4526	15552	1384	1,39
12	-/-	60x60	24	0,34	29,8	33,1	A400	1474	2166	5850	10950	2460	1,67
13	1x1	25x25	10	0,27	15,5	7,0	A240	134	181	426	990	300	2,24
14	-/-	25x25	10	0,27	14,0	7,0	A240	125	196	387	900	209	1,67
15	-/-	40x40	10	0,33	17,6	7,5	A240	252	315	323	2793	750	2,98
16	-/-	40x40	10	0,33	20,0	7,5	A240	188	244	265	131	336	3,1

ВЫВОДЫ

1. Приведено объяснение вторичного характера образования пирамиды продавливания как следствие истинного хрупкого разрушения плитных конструкций при передаче нагрузки по ограниченной площади – дробления, среза или смятия бетона с учетом местных напряжений и концентрации изгибающих моментов, а для фундаментов и поперечных сил позволяет с достаточной обоснованностью свести все разнообразие формы хрупкого разрушения с образованием различных «пирамид» к трем – дроблению, срезу и смятию бетона.

2. Так как смятие бетона обычно исключается при относительно больших площадях колонн, а срез сжатой зоны наблюдается для фундаментов из низкопрочных бетонов, то основной формой хрупкого разрушения при действии ограниченной по площади нагрузки на плиту является дробление сжатой зоны.

3. Анализ проведенных нами опытов с большой выборкой крупномасштабных моделей фундаментов показывает, что формула 8.87 [13] часто не позволяет получить значения хрупкой прочности (прочности на продавливание), опытные величины могут значительно превышать расчетные, причем превышение непостоянно. Для фундаментных плит минимально наблюдавшийся коэффициент перед правой частью формулы равен 1,3.

4. Наиболее точные результаты представляя расчет критического сочетания главных напряжений в приопорной части (в углах стыка с колонной), в случае двух или трехосного напряженного состояния и дает возможность получать более близкие к фактическим расчетные значения разрушающих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР № 697804 : Датчик для измерения размеров раскрытия трещин в деталях / Тетиор А.Н., Борисов М.И., Родин С.В. — 1979. — Оpubл. 15.11.1979, Бюл. № 42.
2. А. с. 857360 СССР, М.Кл.3 Е 02 D 27/42 . Фундамент под колонну / С.В. Родин, А.Н. Тетиор, В.И. Редькин (СССР). - № 2849580/29-33; заявл. 10.12.79; опубл. 23.08.81, Бюл. №31.
3. А.с. СССР № № 846686 : Объемный строительный элемент/ Тетиор А.Н., Жуков С.П., Родин С.В. — 1981. — Оpubл. 15.07.1981, Бюл. № 26.
4. Пат. № 20119 Україна, Фундамент під колону/ Родін Д. С.– МПК E02D 27/00 (2006)/ заявник Національна академія природоохоронного та курортного будівництва. — № 200607274 ; заявл. 30.06.2006 ; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
5. Гвоздев А.А., Залесов А.С., Ермуханов К.Е. Переходные формы между разрушением по наклонному сечению и продавливанием // Бетон и железобетон, 1980. № 3.– С. 27-28.
6. Зайцев Ю.В. Развитие трещин в хрупком материале при кратковременном сжатии. – Известия вузов. Строительство и архитектура, 1974. – С.25-30.
7. Залесов А.С., Ермуханов К.Е. Переход от разрушения по наклонному сечению к продавливанию. – В сб.: Поведение бетона и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности. – М.: НИИЖБ, 1980. – С. 66-84.
8. Залесов А.С., Тетиор А.Н., Родин С.В., Лехно А.М. Прочность плитных фундаментов по наклонным сечениям // Бетон и железобетон.-1987. - №10. – с. 45-46.
9. Коровин Н.Н. Ступкин А.В. Продавливание железобетонных плит колонной // Бетон и железобетон. - 1978. - №8. - С. 36-38.

10. Мурзенко Ю.Н., Евтушенко С.И., Анищенко Е.Ю. Результаты экспериментальных исследований совместной работы моделей железобетонных фундаментов под колонны зданий и песчаного основания // Сб. IV Междунар. науч.-практ. конф.: Моделирование. Теория, методы и средства. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. - ч. 4. - С. 43-49.

11. Рохлин И.А., Попова О.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных плит при продавливании: Материалы к третьей Всесоюзной конф. – Новосибирск – Киев, 1973. – С. 59-60.

12. Силовое взаимодействие фундаментов мелкого заложения с грунтовым основанием: монография / С.В. Родин, Э.М. Меннанов, Ю.Г. Богущий; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. – Симферополь: Ариал, 2024. – 258 с.

13. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции». Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003». [Текст]. – М.: Минстрой России, 2018. – 143 с.

14. Тетиор А.Н., Родин С.В. О механизме хрупкого разрушения столбчатых фундаментов. – Бетон и железобетон, 1982. № 9. – С. 43-44.

15. Цесарский А.А. К расчету прочности железобетонных фундаментных плит на продавливание. – В сб.: Исследование напряженно-деформированного состояния оснований и фундаментов. – Новочеркасск: Новочеркасский ПИ, 1971. – С. 41-44.

16. Экспериментальные и теоретические исследования работы плитных фундаментов: монография / С.И. Политов, С.И. Евтушенко, Д.А. Калафатов; Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. - Новочеркасск: Лик, 2024.- 198 с.

17. Экспериментальные исследования работы столбчатых фундаментов на моделях: монография / С.В. Родин, С.И. Евтушенко, Д.А. Калафатов; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. – Новочеркасск: Лик, 2024. – 183 с.

18. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318-05. U.S.A. - 2005. - 1445 p.

19. Design of Concrete Structures: Eurocode 2: EN 1992-1. - Brussel. - 2001. - 230 p.

20. Herzog M. Einfluss der Spanngliedordnung auf den Durch Stnzwiderstand vorgespannter Flachdecken nach Versuchen // Beton und Stahlbetonbau. – 1979. – 2. – p. 294-296.

REFERENCES

1. A. s. USSR Patent No. 697804: Sensor for Measuring the Opening of Cracks in Parts / Tetior A.N., Borisov M.I., Rodin S.V. — 1979. — Published on November 15, 1979, Bulletin No. 42.

2. A. s. 857360 USSR, M.K1.3 E 02 D 27/42 . Foundation for a Column / S.V. Rodin, A.N. Tetior, V.I.

Redkin (USSR). - No. 2849580/29-33; applied for 10.12.79; published on 23.08.81, Bulletin No. 31.

3. A. s. Patent No. 846686: Volumetric Building Element/ Tetior A.N., Zhukov S.P., Rodin S.V. — 1981. — Published on July 15, 1981, Bulletin No. 26.

4. Pat. No. 20119 Ukraine, Foundation for a column/ Rodin D. S.– IPC E02D 27/00 (2006)/ applicant National Academy of environmental and resort construction. - No. 200607274; declared. 30.06.2006; publ. 15.01.2007, Byul. № 1.

5. Gvozdev A.A., Zalesov A.S., and Yermukhanov K.E. Transitional Forms between Slanting Section Failure and Punching // Concrete and Reinforced Concrete, 1980. No. 3. pp. 27-28

6. Zaitsev Yu.V. Development of cracks in brittle material under short-term compression. – Izvestiya vuzov. Construction and architecture, 1974. – Pp.25-30.

7. Zalesov A.S., Yermukhanov K.E. Transition from destruction along an inclined section to punching. – In the collection: Behavior of concrete and elements of reinforced concrete structures under the influence of different durations. – М.: NIIZhB, 1980. – Pp. 66-84.

8. Zalesov A.S., Tetior A.N., Rodin S.V., Lekhno A.M. Strength of slab foundations along inclined sections // Concrete and reinforced concrete. - 1987. - No. 10. - pp. 45-46.

9. Korovin N.N. and Stupkin A.V. Pushing of Reinforced Concrete Slabs by a Column // Concrete and Reinforced Concrete. - 1978. - No. 8. - Pp. 36-38.

10. Murzenko Yu.N., Yevtushenko S.I., Anishchenko E.Yu. Results of experimental studies of the joint operation of models of reinforced concrete foundations for building columns and a sandy base // Sat. IV Int. scientific-practical conf.: Modeling. Theory, methods and means. - Novocherkassk: YURGTU, 2004. - Part 4. - P. 43-49.

11. Rokhlin I.A., Popova O.S. Experimental Study of the Stress-Strain State of Reinforced Concrete Slabs during Pushing: Materials for the Third All-Union Conference. Novosibirsk-Kiev, 1973, pp. 59-60.

12. Force Interaction of Shallow Foundations with Soil Base: Monograph / S.V. Rodin, E.M. Mennanov, Yu.G. Bogutsky; V.I. Vernadsky Crimean Federal University. – Simferopol: Arial, 2024. – 258 p.

13. SP 63.13330.2018 "Concrete and reinforced concrete structures". Basic provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003". [Text]. – Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2018. – 143 p.

14. Tetior A.N., Rodin S.V. On the mechanism of brittle failure of pile foundations. – Concrete and reinforced concrete, 1982. No. 9. – Pp. 43-44.

15. Tsesarsky, A.A. Calculation of the Strength of Reinforced Concrete Foundation Slabs for Pushing Through. In the collection: Research of the Stressed and Deformed State of Bases and Foundations. Novocherkassk: Novocherkassk Polytechnic Institute, 1971, pp. 41-44.

16. Experimental and theoretical studies of the operation of slab foundations: monograph / S.I. Politov, S.I. Yevtushenko, D.A. Kalafatov; V.I.

Vernadsky Crimean Federal University. - Novochoerkassk: Lik, 2024.-198 p.

17. Experimental studies of the performance of pile foundations on models: monograph / S.V. Rodin, S.I. Yevtushenko, D.A. Kalafatov; V.I. Vernadsky Crimean Federal University. – Novochoerkassk: Lik, 2024. – 183 p.

18. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318-05. U.S.A. - 2005. - 1445 p.

19. Design of Concrete Structures: Eurocode 2: EN 1992-1. - Brussel. - 2001. - 230 p.

20. Herzog M. Einfluss der Spanngliedordnung auf den Durch Stnzwiderstand vorgespannter Flachdecken nach Versuchen // Beton und Stahlbetonbau. – 1979. – 2. – p. 294-296.

PUNCHING OF REINFORCED CONCRETE FOUNDATION SLABS

Rodin¹ S.V., Mennanov² E.M., Bogutsky³ Y.G., Kalafatov D.A.⁴

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493
E-mail: ¹sv_rodin@mail.ru, ²mennanov.elmar@mail.ru, ³bogutskiyyg@mail.ru, ⁴jafer90@mail.ru

Abstract. The article provides an explanation of the secondary nature of the formation of a crushing pyramid as a consequence of the true brittle failure of slab reinforced concrete structures – crushing, shearing, or crushing of concrete, taking into account local stresses and the concentration of bending moments, and for foundations, the additional redistribution of contact stresses in the soil foundation and lateral forces, which allows us to reasonably reduce the variety of types of brittle failure with the formation of various forms of crushing pyramids to three: crushing, shearing, and crushing of concrete. Experimental studies were conducted with large-scale reinforced concrete foundation models on a sandy base, which allowed for the study of the parameters of the foundation and soil interaction and the determination of geometric and strength factors (console span, foundation slab height, reinforcement, and concrete strength) that play an important role in the formation of the foundation's brittle failure process, such as punching.

Subject of research: stress-strain state of foundations during brittle failure in the form of crushing.

Materials and methods: Experimental studies were conducted to obtain the penetration of foundation slabs, and 49 large-scale samples of foundation slabs measuring 1x1x0.1 m and 29 slabs measuring 2x2 m with a cross-section height ranging from 0.08 m to 0.4 m were tested. The tests were conducted in a 4x4x3(h) m reinforced concrete tray, with a sand layer of 2.2-2.4 m. The power equipment allowed for loading the foundation slabs with a force of up to 4000 kN, and the recording equipment, including specialized equipment for foundation research, provided high-precision measurements of the parameters of the soil-foundation system.

Results: The methods of calculating the plates for the crushing and directions of improving the calculations of brittle strength are analyzed. The influence of the basic parameters of the foundations structures on the sandy soil base on the brittle strength during crushing is experimentally studied. The formation of different forms of the crushing pyramid as a secondary process of destruction from crushing, shearing or crushing of concrete is substantiated, constructive solutions are proposed to reduce the influence of the concentration of stresses and forces in the area of loading near the support.

Conclusions: The calculation of foundations for продавливание according to formula 8.87 of SP 63.13330.2018 "Concrete and Reinforced Concrete Structures" often does not allow for sufficient accuracy in obtaining values of brittle strength (продавливающей strength), and the experimental values may significantly exceed the calculated values, with the excess being inconsistent. For foundation slabs, the minimum observed coefficient before the right-hand side of the formula is equal to 1.3. The actual mechanism of brittle failure of slabs can be considered to be crushing, shear of the compressed zone and crushing of concrete under the support, with subsequent (secondary) formations of the pyramid of the push-through. In the case of crushing of the compressed zone, the best results are given by the calculation of the critical combination of the principal stresses in the near-support part of the slab.

Key words: punching, reinforced concrete, foundation, redistribution, base, soil, research, cutting, crushing, crumpling.

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 621.316

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВРЕМЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 КВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТЕЙ

Арифов¹ А. М., Бекиров² Э. А.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Физико-технический институт.
295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.
E-mail: ¹arifov.alim@inbox.ru, ²bekirov.e.a@cfov.ru.

Аннотация. В работе предложен метод предварительного расчета для определения возможности включения трансформаторов на параллельную работу и создание временных кольцевых режимов в электрических сетях 6 - 10 кВ, с целью обеспечения перевода электрического питания потребителей без перерывов в электроснабжении.

Предмет исследования: кольцевой режим работы линий электропередачи (ЛЭП) в электрически не связанных распределительных сетях 6-10 кВ.

Материалы и методы: в работе впервые предложен метод создания кольцевых режимов ЛЭП в электрических сетях 6-10 кВ, получающих электрическое питание от разных питающих центров, между которыми отсутствует возможность создания временной электрической связи путем включения секционного выключателя или отдельной шунтирующей связи (ремонтной перемычки), для последующего создания кольцевого режима.

Результаты: получены результаты, позволяющие осуществить предварительную оценку возможности создания кольцевого режима ЛЭП 6-10 кВ между электрически не связанными центрами питания (ЦП).

Выводы: предложенный в работе метод, предварительных расчетов установившихся режимов позволяет произвести оценку возможности создания кратковременного кольцевого режима, в электрически не связанных распределительных сетях 6-10 кВ.

Ключевые слова: кольцевой режим; параллельная работа трансформаторов; надежность; переток мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой создания кольцевых режимов ЛЭП в электрических сетях напряжением 6-10 кВ является организация режимов между двумя трансформаторами, включенными на раздельную работу, между которыми отсутствует возможность предварительного обеспечения электрической связи между обмотками низшего класса напряжения (НН), но при этом обмотки высшего класса напряжения (ВН) имеют электрическую связь.

Как известно данный режим допускается создавать в случае предварительного обеспечения работы трансформаторов или автотрансформаторов на параллельную работу, когда обмотки (ВН) и обмотки (НН) двух трансформаторов имеют электрическую связь через включенные ремонтные перемычки или секционные выключатели [1].

В целях правильного распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям параллельная работа двухобмоточных трансформаторов рекомендуется в следующих случаях [2]:

— равенства номинальных первичных и вторичных напряжений (допускается разность коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5\%$);

— тождественности групп соединения обмоток;

— равенства напряжений КЗ (допускается отклонение не более чем на $\pm 10\%$ от средней величины).

При несоблюдении первых двух условий в обмотках трансформаторов возникают неравные токи, которые в отдельных случаях, особенно при несовпадении групп соединения обмоток, могут превысить значения токов КЗ. Несоблюдение третьего условия приводит к тому, что общая нагрузка распределяется между трансформаторами непропорционально их номинальным мощностям. Рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов не превышало 3:1.

Включение на параллельную работу трансформаторов, имеющих разные параметры, требует проведения предварительных оценок целесообразности и возможности такой работы.

Параллельная работа трансформаторов с разными коэффициентами трансформации влечет к перегрузке одного из трансформаторов. Экспериментально это было показано в [3]. Для исследования были взяты два трансформатора мощностью 4 кВА и 2,5 кВА напряжением 380/220 кВ и схемой соединения обмоток Y/Y с коэффициентами трансформации 1,674 и 1,910, соответственно. Показано, что увеличение нагрузки влечет за собой снижение потребляемого тока обмотками трансформатора с большим коэффициентом трансформации. При определенном соотношении параметров параллельно работающих

двухобмоточном и трехобмоточном трансформаторов с разными коэффициентами трансформации, может возникнуть емкостный эффект. Это, в свою очередь, приведет к тому, что трехобмоточный трансформатор будет потреблять активную мощность своей вторичной обмоткой и через первичную обмотку передавать эту мощность в первичную обмотку двухобмоточного трансформатора [4].

В случае включения на параллельную работу трансформаторов, которые имеют разные схемы соединения обмоток на стороне низшего напряжения, в цепи возникает значительная разностная ЭДС, соизмеримая по значению с фазным напряжением обмоток [5]. В результате действия этой ЭДС образуется уравнивающий ток, сила которого в несколько раз превышает номинальный.

При параллельной работе трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания и отличающимися номинальными мощностями существует риск перегрузки одного из трансформаторов или неэффективного перераспределения нагрузки между ними [6]. Авторами [6] в качестве примера были выбраны 4 трансформатора марки ТМГ, с напряжениями короткого замыкания U_k равными 4,5; 5,5; 5,5; 6 %; исходными данными являлась общая нагрузка группы трансформаторов и их паспортные данные. Приведены таблицы с допустимым сочетанием выбранных трансформаторов для каждого конкретного случая.

Существует необходимость перевода питания потребителей от одного питающего центра на смежный, без предварительного кратковременного отключения одной из ЛЭП 6-10 кВ. Проблема заключается в том, что до создания кольцевого режима, в большинстве случаев нет возможности обеспечить временную электрическую связь между обмотками НН для предварительного включения трансформаторов на параллельную работу, в виду конструктивных особенностей подстанций и значительного расстояния между ними.

Предварительное включение трансформаторов подстанций на параллельную работу путем включения шунтирующих связей необходимо для обеспечения перетоков мощностей, а также уравнивающих токов между трансформаторами через ремонтную перемычку или секционный выключатель [1, 7].

Исходя из указаний, существующих нормативно технических документов и инструкций, в электрически не связанных распределительных электрических сетях перед включением «в кольцо» ЛЭП или участков сетей должна создаваться временная электрическая связь между центрами питания путем включения секционного выключателя, ЛЭП, непосредственно соединяющей шины двух центров питания. Как показывает многолетняя практика данное требование влечет за собой необходимость выполнения предварительных расчетов перераспределения нагрузки по

кольцу электрической связи между центрами питания, а обеспечение перевода электрического питания потребителей методом вхождения в кольцо между удаленными подстанциями необходимо в 50 % случаев.

В работе исследован метод предварительного получения данных о возможности создания кольцевого режима в электрически не связанных распределительных сетях для обеспечения перевода питания потребителей от одного питающего центра на другой без предварительного отключения. В рассмотренном случае переток мощности между трансформаторами и уравнивающие токи будут протекать через ЛЭП 6-10 кВ, включенных в кольцевой режим.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как и для разомкнутых сетей, электрические расчеты замкнутых сетей выполняются для наиболее характерных нормальных установившихся режимов наибольших и наименьших нагрузок. Однако, в отличие от разомкнутых, при анализе замкнутых сетей дополнительно требуется проведение расчетов послеаварийных режимов при отключении отдельных участков сети. Это связано с тем, что отключение участка замкнутой сети может вызвать существенное изменение режима напряжений и потоков мощности, которые могут оказаться недопустимыми.

Также данный режим опасен тем, что при возникшем перетоке мощности, наличии уравнивающих токов из-за разности напряжений между трансформаторами Т-1 и Т-2, возможен недопустимый перегруз одного из трансформаторов на питающем центре, с последующим его повреждением [1, 2, 7].

Создание кольцевых режимов (включение «в кольцо») ЛЭП 6 или 10 кВ питающихся от разных питающих центров допускается только на время, необходимое для перевода нагрузки потребителей или выполнения неотложных ремонтных работ.

Суть предлагаемого метода заключается в следующем:

- произвести анализ пропускной способности кольцующихся ЛЭП, а также определить токоограничивающие элементы в линии;
- установить одинаковые уровни напряжений между питающими центрами подстанций ПС на обмотках НН;
- произвести предварительный расчет уравнивающих токов трансформаторов Т-1 и Т-2;
- произвести предварительный расчет перераспределения мощности между трансформаторами Т-1 и Т-2;
- произвести анализ уставок максимальной токовой защиты (МТЗ) на присоединениях ПС, с учетом максимально возможного перетока нагрузки;

▪ произвести анализ полученных величин уравнильных токов и перетоков мощности.

Если по результатам полученных расчетов создание временной электрической связи невозможно, операции по переводу нагрузки с одной линии электропередачи на другую, должны осуществляться с кратковременным (на время производства переключений в электроустановках) отключением нагрузки (потребителей).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Порядок действий для включения на параллельную работу трансформаторов (автотрансформаторов) следующий:

1. Автоматику РПН трансформаторов (автотрансформаторов) с автоматического режима регулирования напряжения (АРН) переводим на дистанционное управление (ДУ);

2. Устанавливаем с помощью устройства регулирования под нагрузкой напряжения трансформатора (РПН) одинаковые значения уровней напряжения, по сторонам низшего напряжения (НН) трансформаторов (автотрансформаторов) для максимально возможного снижения величины уравнильных токов.

Произведем расчет электрических режимов для включения на параллельную работу трансформаторов (автотрансформаторов).

В качестве примера рассмотрим параллельное включение трехфазных трансформаторов по схеме, приведенной на рис.1.

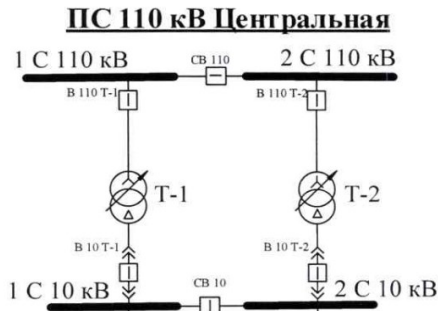


Рис. 1. Представлена однолинейная схема включения на параллельную работу трансформаторов T-1 и T2 на ПС 110 кВ Центральная путем включения секционного выключателя СВ 110 и секционного выключателя СВ 10.

Fig. 1. A single-line diagram is presented for connecting transformers T-1 and T2 for parallel operation at the 110 kV Tsentralnaya substation by connecting the sectional switch PS 110 and the sectional switch PS 10.

Нагрузка между трансформаторами, работающими параллельно, распределяется пропорционально их мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания согласно выражению (1) [8]:

$$\frac{S_{1нагр}}{S_{2нагр}} = \left(\frac{S_{1ном}}{S_{2ном}} \right) \left(\frac{U_{k2}}{U_{k1}} \right),$$

где $S_{1ном}$, $S_{2ном}$ — номинальные мощности трансформаторов (МВА); U_{k1} , U_{k2} — напряжения

короткого замыкания трансформаторов, включаемых на параллельную работу (%).

Некоторое перераспределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами с различными напряжениями короткого замыкания возможно осуществить изменением их коэффициентов трансформации путем переключения ответвлений первичных обмоток. Переключение ответвлений необходимо выполнять так, чтобы у недогруженных трансформаторов вторичное напряжение при холостом ходе было выше, чем у трансформаторов, работающих с перегрузкой.

Рассмотрим два варианта распределения мощности между трансформаторами T-1 и T-2 включенных на параллельную работу.

Вариант № 1

На параллельную работу включены два трансформатора одинаковой мощности $S_{1ном} = S_{2ном} = 40$ МВА, с одинаковыми напряжениями короткого замыкания $U_{k1} = U_{k2} = 6,5\%$. Суммарная нагрузка объекта S равна 16 МВА. Рассмотрим, как распределяется нагрузка между трансформаторами. Считаем, что активное сопротивление электрической связи по стороне НН между трансформаторами равно 0.

Рассчитаем эквивалентное напряжение короткого замыкания U'_k по следующей формуле [8, 9]:

$$U'_k = \frac{S}{\frac{S_{1ном}}{U_{k1}} + \frac{S_{2ном}}{U_{k2}}} = 1,3\%. \quad (1)$$

Определяем распределение нагрузки между трансформаторами T-1 и T-2 по следующим формулам [8, 9]:

$$S' = \frac{S_{1ном}}{U_{k1}} U'_k = 8000 \text{ кВА}; \quad (2)$$

$$S'' = \frac{S_{2ном}}{U_{k2}} U'_k = 8000 \text{ кВА}, \quad (3)$$

Где S' и S'' - фактические нагрузки на трансформаторах в установившемся режиме.

По результатам расчетов определяем, что фактические нагрузки трансформаторов будут распределены равномерно.

Вариант № 2

На параллельную работу включены два трансформатора одинаковой мощности $S_1 = S_2 = 40$ МВА, но с разными напряжениями короткого замыкания $U_{k1} = 6,5\%$, $U_{k2} = 8,5\%$. Суммарная нагрузка энергообъекта S равна 16 МВА. Рассмотрим, как распределяется нагрузка между трансформаторами. Считаем, что активное сопротивление электрической связи по стороне НН между трансформаторами равно 0.

Рассчитаем эквивалентное напряжение короткого замыкания по формуле (1):

$$U'_k = 1,47\%.$$

Определяем распределение нагрузки между трансформаторами Т-1 и Т-2 по формулам (2) и (3):

$$S' = 9046 \text{ кВА};$$

$$S'' = 6954 \text{ кВА}.$$

По результатам расчетов определяем, что фактические нагрузки трансформаторов не будут распределены равномерно, по причине разных значений U_{k1} и U_{k2} .

Из полученных расчетных данных можно произвести не только анализ перераспределения нагрузки между двумя трансформаторами, но и получить расчетную величину перетока (А) нагрузки по организованной временной связи через секционный выключатель (СВ) или временную шунтирующую связь (ремонтную перемычку).

Расчет электрических режимов для кратковременного создания кольцевого режима работы в электрических сетях 6/10 кВ.

Произведем расчет кратковременного кольцевого режима работы Л-13 и Л-30 (рис. 2) от

смежных питающих центров ПС 110 кВ Набережная и ПС 110 кВ Восточная, при переводе нагрузки Л-30 ПС 110 кВ Восточная на Л-13 ПС 110 кВ Набережная, без отключения потребителей.

Примечание: данная схема не предполагает предварительного создания временной шунтирующей электрической связи по стороне НН между трансформаторами при организации кольцевого режима ввиду значительного расстояния между объектами.

Исходные данные ПС 110 кВ Восточная:

- номинальная мощность трансформатора Т-2 $S_{2ном} = 25 \text{ МВА}$;
- фактическая нагрузка Т-2 $S_{2факт} = 1,3 \text{ МВА}$;
- номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора Т-2 $U_{ВН2} = 115 \text{ кВ}$;
- номинальное напряжение обмотки НН трансформатора Т-2 $U_{НН2} = 11 \text{ кВ}$;
- напряжение короткого замыкания обмоток ВН-НН трансформатора Т-2 $U_{к2} = 17,7\%$;

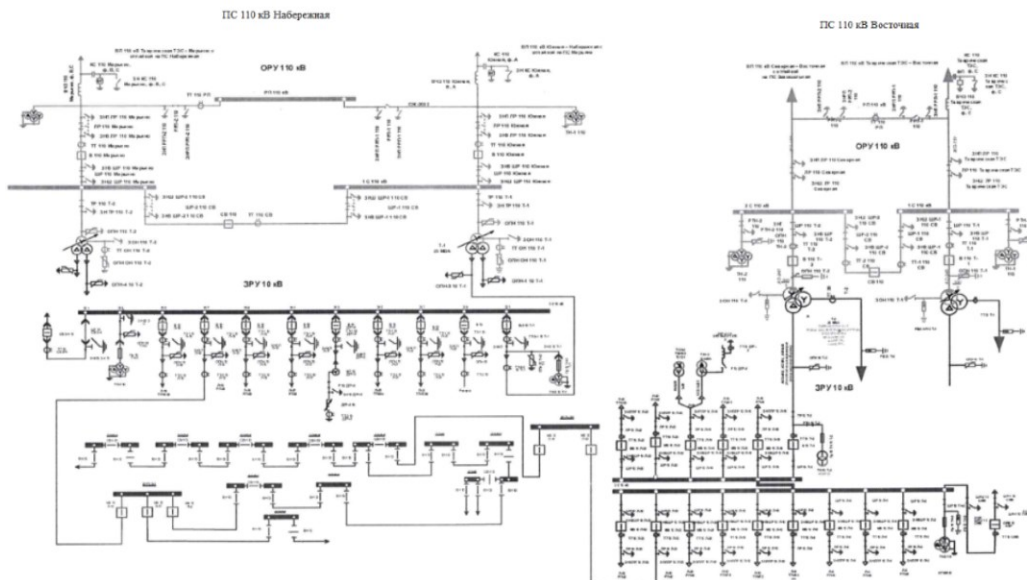


Рис. 2. Однолинейная схема распределительной сети 10 кВ ПС 110 кВ Набережная и ПС 110 кВ Восточная с кольцующимися ЛЭП 10 кВ Л-13 и Л-30.

Fig. 2. Single-line diagram of the 10 kV distribution network of the 110 kV Naberezhnaya substation and the 110 kV Vostochnaya substation with ringing 10 kV power lines L-13 and L-30.

- фактическое напряжение обмотки НН трансформатора Т-2 $U_{ф2} = 10,6 \text{ кВ}$;
- соединение групп обмоток трансформатора – УН/УН/Д-0-11;
- возможность дистанционно управлять РПН – Да;
- количество ступеней РПН – 6;
- фактическая нагрузка на Л-30 ПС 110 кВ Восточная – 65 А в сети 10 кВ;
- нормальный разрыв: ВН 10 ТП-574 в ст.ТП-739; ВН 10 ТП-320 в ст.ТП-65.
- уставка МТЗ Л-30 – 600А;
- Л-30 ТТ 10 400/5
- транзит осуществляется через РП-20,
- токоограничивающим элементом на Л-13 является головной участок воздушной линии,

выполненный проводом марки АС 50 (ВЛ) (ДТН 210 А).

Исходные данные ПС 110 кВ Набережная:

- номинальная мощность трансформатора Т-1 $S_{1ном} = 25 \text{ МВА}$;
- фактическая нагрузка Т-1 $S_{1факт} = 3,5 \text{ МВА}$;
- номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора Т-1 $U_{ВН1} = 115 \text{ кВ}$;
- номинальное напряжение обмотки НН трансформатора Т-1 $U_{НН1} = 11 \text{ кВ}$;
- напряжение короткого замыкания обмоток ВН-НН трансформатора Т-1 $U_{к1} = 17,7\%$;
- фактическое напряжение обмотки НН трансформатора Т-1 $U_{ф1} = 10,7 \text{ кВ}$;
- соединение групп обмоток трансформатора – УН/УН/Д-0-11;
- возможность дистанционно управлять РПН

– Да;

- количество ступеней РПН – 6;
- фактическая нагрузка на Л-13 ПС 110 кВ Набережная – 78 А в сети 10 кВ;
- нормальный разрыв ТП-65 СВН 10;
- уставка МТЗ Л-13 – 400 А;
- Л-13 ТТ 10 300/5;
- транзит осуществляется через РП- 20;
- токоограничивающим элементом на Л-13 является кабельная линия КЛ 10 Л-13 (ДДТН 247 А).

1. Осуществляем перевод автоматики РПН трансформатора Т-2 ПС 110 кВ Восточная, РПН Т-1 ПС 110 кВ Набережная с автоматического на дистанционное управление.

2. Устанавливаем с помощью РПН Т-1 ПС 110 кВ Набережная (РПН Т-2 ПС 110 кВ Восточная) максимально близкие по уровню значения напряжения на стороне НН трансформаторов Т-1 ПС 110 кВ Набережная и Т-2 ПС 110 кВ Восточная (рис 3).

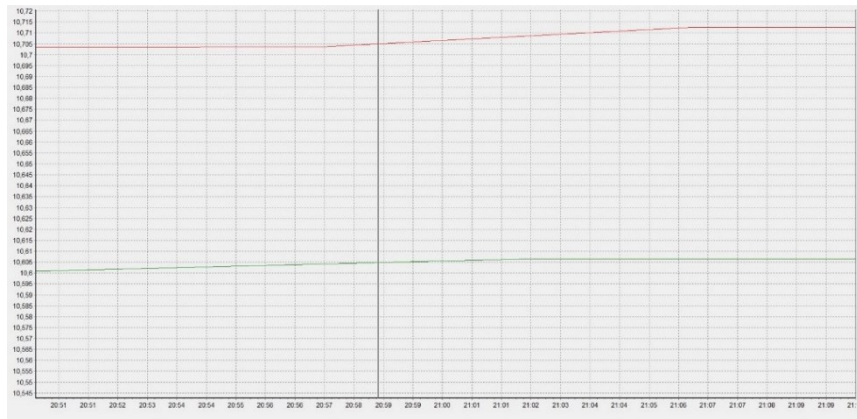


Рис. 3. График установившихся уровней напряжений после регулировки, на ТН 10 кВ ПС 110 кВ Восточная (зеленый цвет) и ТН 10 кВ ПС 110 кВ Набережная (красный цвет).

Fig. 3. Graph of steady-state voltage levels after adjustment, on a 10 kV transformer transformer at the 110 kV Vostochnaya substation (green) and a 10 kV transformer at the 110 kV Naberezhnaya substation (red).

3. Выполняем расчет распределения мощности между трансформаторами Т-1 и Т-2 включенных на параллельную работу для оценки перетока мощности и загрузки трансформаторов Т-1 и Т-2:

4. Рассчитаем эквивалентное напряжение короткого замыкания по формуле (1):

$$U'_k = 1,7\%.$$

Определяем распределение нагрузки между трансформаторами Т-1 и Т-2 по формулам (2) и (3):

$$S' = 2400 \text{ кВА};$$

$$S'' = 2400 \text{ кВА}.$$

Нагрузка между трансформаторами Т-1 и Т-2 распределяется равномерно, без учета уравнительных токов. Это связано с тем что у трансформатора Т-2 и Т-1 идентичные значения U_k .

5. Выполняем предварительный расчет уравнительных токов:

Выполним расчет сопротивления обмоток трансформатора на ПС 110 кВ Восточная и ПС 110 кВ Набережная по следующим формулам [10]:

$$Z_{k1} = \frac{U_{k1} U_{\phi 1}^2}{100 S_{1ном}} = 0,79 \text{ Ом};$$

$$Z_{k2} = \frac{U_{k2} U_{\phi 2}^2}{100 S_{2ном}} = 0,81 \text{ Ом}.$$

Определим разности вторичных напряжений на стороне НН между трансформаторами Т-1 и Т-2 по следующей формуле:

$$\Delta U = U_{\phi 1} - U_{\phi 2} = 0,1 \text{ В}.$$

Рассчитаем значения уравнительного тока между трансформаторами Т-1 и Т-2 по следующей формуле [11]:

$$I_y = \frac{\Delta U}{Z_{k1} + Z_{k2}} = 62,5 \text{ А}.$$

6. Определяем действующее значение тока по щитовым приборам на Л-3 ПС 110 кВ Набережная и Л-30 ПС 110 кВ Восточная до создания кольцевой схемы.

Л – 13 ПС 110 кВ Набережная = 78 А;

Л – 30 ПС 110 кВ Восточная = 65 А.

7. Производим анализ существующих нагрузок ЛЭП ПС 110 кВ Набережная и ПС 110 кВ Восточная. Суммарная нагрузка обеих кольцующихся ЛЭП, а также возможный переток, полученный расчетным путем, не должны превышать длительно допустимую токовую нагрузку (ДДТН) токоограничивающих элементов и уставку максимальной токовой защиты (МТЗ) устройств релейной защиты отдельно на каждом из присоединений, так как в случае, если при создании кольцевого режима отключится один из выключателей присоединения, оставшийся в работе выключатель будет отключен действием МТЗ, вследствие превышения уставочного значения.

По результатам анализа:

Л-13 + Л-30 + $I_y = 205,5 \text{ А} < I_{уст} \text{ МТЗ}.$

Полученное значение меньше значений длительно допустимых токовых нагрузок ДДТН для

линий Л-15 и Л-30.

Таким образом, исходя из полученных данных, кольцевой режим для рассмотренных ЛЭП 10 кВ, с

принятыми параметрами электрической сети осуществлять допускается (Рис. 4, 5).

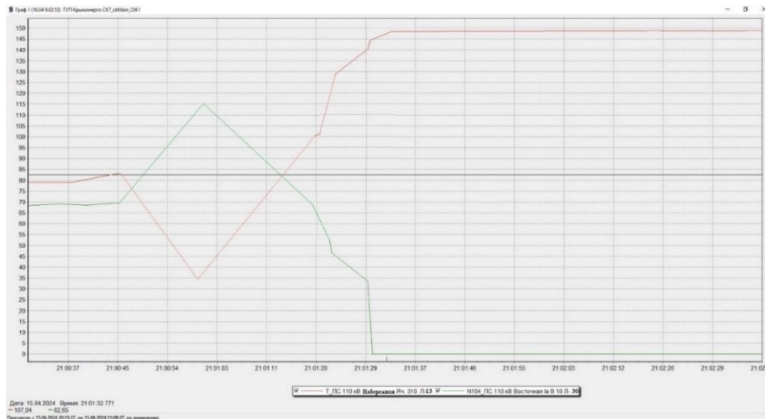


Рис. 4. График перевода нагрузок Л-30 на Л-13 до создания кольцевого режима, в процессе создания и после размыкания транзита ПС 110 кВ Восточная Л-30 (зеленый цвет) и ПС 110 кВ Набережная Л-13 (красный цвет).

Fig. 4. Schedule for the transfer of loads L-30 to L-13 before the creation of a ring mode, during the creation process and after opening the transit of the 110 kV Vostochnaya L-30 substation (green) and the 110 kV Naberezhnaya substation L-13 (red).

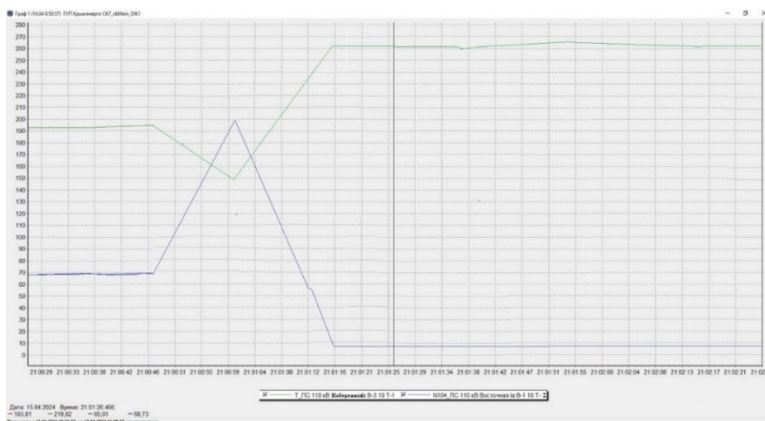


Рис. 5. График загрузки трансформаторов Т-2 ПС 110 кВ Восточная и Т-1 ПС 110 кВ Набережная до создания кольцевого режима, в процессе создания и после размыкания транзита ПС 110 кВ Восточная Т-2 (фиолетовый цвет) и ПС 110 кВ Набережная Т-1 (светло-зеленый цвет).

Fig. 5. Loading schedule of transformers T-2 110 kV Vostochnaya substation and T-1 110 kV Naberezhnaya substation before the creation of a ring mode, during the creation process and after disconnecting the transit 110 kV Vostochnaya substation T-2 (purple) and 110 kV Naberezhnaya substation T-1 (light green color).

ВЫВОДЫ

В работе осуществлена попытка решения проблемы создания кольцевого режима работы трансформаторов, не имеющих электрической связи на стороне низшего напряжения, с целью перевода питания потребителей от одного питающего центра на другой без их предварительного отключения. Данную связь предложено обеспечить посредством ЛЭП.

Реализация предложенного метода рассмотрена на примере двух подстанций классом напряжения 110/10 кВ. Показана возможность осуществления предварительного анализа электрических режимов для включения двух силовых трансформаторов (автотрансформаторов) на параллельную работу, а

также для создания кольцевых режимов в электрических сетях 6-10 кВ.

По результатам анализа были определены величина перетоков мощности и вероятные загрузки трансформаторов. Данный алгоритм расчетов позволит заблаговременно предотвратить недопустимые перегрузы трансформаторов и линий электропередачи, по которым будет осуществляется перевод нагрузки, исключая аварийные режимы работы оборудования, тем самым повышая надежность при выполнении подобных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила переключений в электроустановках. Утверждены приказом Минэнерго России от 13 сентября 2018 года № 757. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201811230023>
2. СО 34.35.502-2005. Инструкция для оперативного персонала по обслуживанию устройств релейной защиты и электроавтоматики энергетических систем. Методические указания. Утверждены РАО «ЕЭС России» 01.10.2005.
3. Ромодин А.В., Кузнецов М.И. Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации // Электротехника. – 2016. – № 11. – С. 16-21.
4. Ромодин А.В., Кузнецов М.И. Параллельная работа трехобмоточного и двухобмоточного трансформаторов с разными коэффициентами трансформации // Электротехника. – 2017. – № 11. – С. 14-18.
5. Рак А.Н., Корощенко А.В. Особенности режима параллельной работы трансформаторов при различных схемах соединения // Взрывозащищенное электрооборудование. – 2016. – № 1. – С. 46-50.
6. Плотников И.И. Подбор силовых трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания для параллельной работы // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2022. – № 4. – С. 97-104.
7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утверждены приказом Минэнерго России от 04 октября 2022 года № 1070. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212060056>.
8. Токарев, Б.Ф. Электрические машины / Б.Ф. Токарев. - М.: Энергоатомиздат, 1989 – 672 с.
9. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Энергоатомиздат, 1986 – 360 с.
10. Герман Л.А., Серебряков А.С., Лоскутов А.Б., Осокин В.Л., Субханвердиев К.С. Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети с двухсторонним питанием // Электричество. – 2019. – №5. – С. 19–23.
11. Федорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В. Разработка автоматического устройства ускоренной синхронизации генераторов // Интеллектуальная Электротехника. – 2022. – № 3. – С. 32-48.

REFERENCES

1. Rules of switching in electrical installations. Approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia dated September 13, 2018 No. 757. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201811230023>
2. FROM 34.35.502-2005. Instructions for operational personnel on maintenance of relay protection devices and electrical automation of energy systems. Methodological guidelines. Approved by RAO UES of Russia on 01.10.2005.
3. Romodin A.V., Kuznetsov M.I. Investigation of parallel operation of three-phase transformers with different transformation coefficients // Electrical engineering. - 2016. – No. 11. – pp. 16-21.
4. Romodin A.V., Kuznetsov M.I. Parallel operation of three-winding and two-winding transformers with different transformation coefficients // Electrical engineering. – 2017. No. 11. pp. 14-18.
5. Rak A.N., Koroshchenko A.V. Features of the parallel operation of transformers with different connection schemes // Explosion-proof electrical equipment. 2016. No. 1. pp. 46-50.
6. Plotnikov I.I. Selection of power transformers with different short-circuit voltages for parallel operation // Bulletin of the AGTU. Series: Marine engineering and Technology. – 2022. – No. 4. – pp. 97-104.
7. Rules of technical operation of electric power plants and networks of the Russian Federation. Approved by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated October 04, 2022 No. 1070. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212060056>
8. Tokarev, B.F. Electric machines / B.F. Tokarev. Moscow: Energoatomizdat, 1989 - 672 p.
9. Kopylov, I.P. Electric machines / I.P. Kopylov. Moscow: Energoatomizdat, 1986 - 360 p.
10. German L.A., Serebryakov A.S., Loskutov A.B., Osokin V.L., Subkhanverdiev K.S. Calculation of short-circuit currents in a traction network with two-way power supply // Electricity. – 2019. – No. 5. – pp. 19-23.
11. Fedorova V.A., Kirichenko V.F., Glazyrin G.V. Development automatic device for accelerated synchronization of generators // Intelligent Electrical Engineering. - 2022. – No. 3. – pp. 32-48.

METHOD OF PRELIMINARY CALCULATIONS FOR CREATION OF TEMPORARY RING
MODES IN ELECTRICAL NETWORKS 6-10 kV

Arifov¹A.M., Bekirov²E. A.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Physics and Technology Institute.
295007, Republic of Crimea, Simferopol, p. Vernadsky, 4.
¹arifov.alim@inbox.ru, ²bekirov.e.a@cfuv.ru.

Abstract: The work explores a preliminary calculation method to determine the possibility of switching on transformers for parallel operation and creating temporary ring modes in electrical networks of 6 - 10 kV, in order to ensure the transfer of electrical power to consumers without interruptions in power supply.

Subject: of research: ring mode of operation of power transmission lines (PTLs) in electrically unconnected distribution networks of 6-10 kV.

Materials and methods: the work first proposed a method for creating ring modes of power lines in 6-10 kV electrical networks receiving electrical power from different power centers, between which there is no possibility of creating a temporary electrical connection, by turning on a sectional switch or a separate shunt connection (repair jumper) , for subsequent creation of a ring mode.

Results: using the method of preliminary calculations, results were obtained that allow a preliminary assessment of the possibility of creating a ring mode of 6-10 kV power lines between electrically unconnected power centers (CPs).

Conclusions: the method proposed in the work for preliminary calculations of steady-state modes makes it possible to assess the possibility of creating a short-term ring mode in electrically unconnected 6-10 kV distribution networks.

Key words: ring mode; parallel operation of transformers; reliability; power flow

УДК 628.19

ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМАЯ ТОЛЩИНА СЛОЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОДОПРОВОДОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРЕКРАЩЕНИЯ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Продоус¹ О.А., Якубчик² П.П., Шлычков³ Д.И.

¹ Независимый эксперт по водоснабжению и канализации,

190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 37/1, лит. А, пом. 1-Н, pro@enco.su

² ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС),

190031, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 9, p.jakub@mail.ru

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26, ShlyichkovDI@mgsu.ru

Аннотация. В статье рассмотрен расчет значений предельно-допустимой с гидравлической точки зрения толщины слоя внутренних отложений в металлических трубах инженерных систем, оказывающий влияние на величину значений характеристик их гидравлического потенциала и на величину фактического энергопотребления насосных агрегатов, транспортирующих воду или тепло потребителям. Приведены графики зависимостей, демонстрирующие значительное расхождение величины гидравлического уклона и энергопотребления насосов в новом и изношенном металлических трубопроводах систем водоснабжения и теплоснабжения.

Предмет исследования: определение количественного критерия для оценки предельного состояния металлических трубопроводов инженерных сетей (водоснабжения и теплоснабжения). Таким критерием выступает предельно-допустимая толщина слоя внутренних отложений на стенках металлических трубопроводов, при превышении которой их дальнейшая эксплуатация становится нецелесообразной.

Материалы и методы: В основу методики положены аналитические зависимости для гидравлического расчета трубопроводов, основанные на формулах профессора Ф.А. Шевелева, уточненных авторами с учетом уменьшения живого сечения трубы из-за отложений. Метод включает расчет фактического внутреннего диаметра, скорости потока, гидравлического уклона и энергопотребления насосных агрегатов в зависимости от толщины слоя отложений (δ).

Результаты: На конкретном примере показано, что при толщине отложений стальной трубе гидравлический уклон увеличивается, а энергопотребление насосов повышается по сравнению с новым трубопроводом. Расчетным путем показана предельно-допустимая толщина слоя отложений, после которой эксплуатация становится неэффективной.

Выводы: На основании результатов сделан вывод о необходимости обязательного контроля толщины внутренних отложений для обоснования вывода сетей из эксплуатации. Авторы рекомендуют разработать шкалу предельно-допустимых толщин для всего сортамента труб и внести соответствующие требования в актуализированные версии сводов правил по наружным сетям.

Ключевые слова: водопровод из металлических труб, внутренние отложения, толщина слоя, гидравлический расчет, сравнение результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность рассмотренной в данной статье методики расчета предельно-допустимых значений толщины слоя внутренних отложений на стенках металлических водопроводов инфраструктуры вытекает из выступления Президента РФ В.В. Путина на Совещании с членами Правительства РФ 10 марта 2021 года (Москва, Кремль, 18.30), на котором В.В. Путин призвал уделять проблеме изношенности коммунальных сетей больше внимания, потому что от этого страдают люди. По словам Президента: «..... не будут лишними методические рекомендации», – о которых пойдет речь в данной статье.

Исследованиями гидравлических характеристик металлических водопроводных труб без внутренних покрытий из стали и серого чугуна в середине 50-х годов 20-го века занимался известный ученый в области гидравлики трубопроводов – профессор Ф.А. Шевелев, которым были составлены специальные справочные пособия (более 10-ти изданий), используемые

специалистами проектных организаций для проведения гидравлического расчета водопроводных труб из разных видов материалов. Авторами данной статьи был предложен новый подход к гидравлическому расчету металлических водопроводов с отложениями на внутренних стенках труб за счет уточнения расчетной зависимости профессора Ф.А. Шевелева с учетом изменяющейся во времени толщины слоя отложений на внутренней поверхности труб [1, 2, 3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Толщина слоя внутренних отложений δ на стенках металлических труб из стали влияет на значение фактического внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$, как показано на рис. 1.

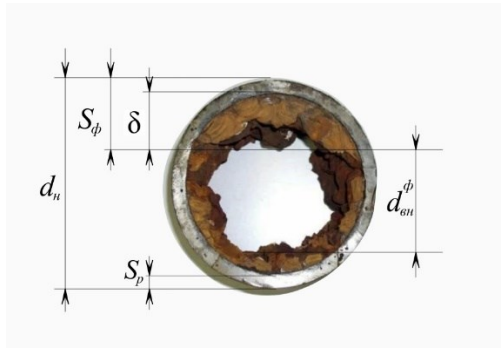


Рис. 1 Внутренние отложения в стальных трубах
Fig. 1 Internal deposits in steel pipes

где:

S_p – толщина стенки трубы по ГОСТ, м;

S_ϕ – фактическая толщина стенки трубы со слоем отложений, м;

δ – фактическая толщина слоя внутренних отложений, м;

d_n – наружный диаметр трубы по ГОСТ, м.

$$d_p = d_n - 2S_p, \text{ м} \quad (1)$$

$$d_{\text{вн}}^\phi = (d_n - 2S_p) - 2\delta_\phi, \text{ м} \quad (2)$$

В работах [1, 2, 5] доказано, что толщина слоя внутренних отложений δ_ϕ на стенках стальных и чугунных труб систем водоснабжения и напорной канализации изменяет значения характеристик гидравлического потенциала труб: $d_{\text{вн}}^\phi$, V_ϕ , i_ϕ и, как следствие, увеличивает энергопотребление насосных агрегатов, транспортирующих питьевую воду или сточную жидкость.

В сетях теплоснабжения также широко используются стальные трубы, подверженные образованию внутренних отложений в процессе их эксплуатации. Проблема образования слоя отложений в металлических сетях теплоснабжения усугубляется тем, что в них, в отличие от сетей водоснабжения с «холодной» водой (~ 10-20° С), транспортируется теплоноситель – горячая вода, имеющая среднюю температуру значительно большую, чем в сетях водоснабжения (~ 60° С).

Процесс образования слоя внутренних отложений в металлических сетях теплоснабжения до настоящего времени окончательно не учтен. Требуется проведение специальных комплексных НИР с участием заинтересованных государственных структур.

Из указанных работ следует, что чем больше значение толщины слоя внутренних отложений δ_ϕ , тем больше изменяются значения: $d_{\text{вн}}^\phi$, V_ϕ и i_ϕ . Изменение значения этих характеристик влияет также на величину фактического энергопотребления насосных агрегатов $N_{\text{дв}}^\phi$, определяемую по формуле, в которую входят эти характеристики. Формула имеет вид [5]:

$$N_{\text{дв}}^\phi = 10^6 \cdot i_\phi (d_{\text{вн}}^\phi)^2 \cdot V_\phi \cdot \frac{0,00808}{\eta}, \text{ кВт/ч}, \quad (3)$$

где:

i_ϕ – фактический гидравлический уклон, определяемый по уточненной авторами формуле Ф.А. Шевелева, имеющей вид [2]:

$$i_\phi = 0,00107 \frac{V_\phi^2}{[(d_n - 2S_p) - 2\delta]^{1,3}} \quad (4)$$

V_ϕ – фактическая скорость движения жидкости

$$V_\phi = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_{\text{вн}}^\phi)^2}, \text{ м/с}; \quad (5)$$

q – заданный расход, л/с (м³/с);

η – КПД насосного агрегата. Для расчетов обычно принимают $\eta=0,7$.

Для подтверждения этого, рассмотрим конкретный пример.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

По водопроводу из стальных электросварных труб диаметром $d_n=0,325$ м ($S_p=7,0$ мм (0,007 м)) перекачивается расход $q=134$ л/с (0,134 м³/с). Толщина слоя внутренних отложений $\delta_\phi=25$ мм (0,025 м). Определить и сравнить значения характеристик гидравлического потенциала новых и изношенных труб с толщиной слоя отложений $\delta_\phi=25$ мм.

Построить графики зависимостей: $i_\phi = f(\delta_\phi)$ и $N_{\text{дв}}^\phi = f(\delta_\phi)$.

Рассчитать для условий задачи значение предельно-допустимой с гидравлической точки зрения толщины слоя внутренних отложений для прекращения дальнейшей эксплуатации изношенного стального водопровода.

Решение

1. Определяют значение фактического внутреннего диаметра изношенных труб $d_{\text{вн}}^\phi$ по формуле (2):

$$d_{\text{вн}}^\phi = (d_n - 2S_p) - 2\delta_\phi, \text{ м}$$

$$d_{\text{вн}}^\phi = (0,325 - 2 \cdot 0,007) - 2 \cdot 0,025 = 0,311 - 0,05 = 0,261 \text{ м.}$$

2. Определяют по формуле (5) фактическую скорость в трубах со слоем отложений $\delta_\phi=25$ мм

$$V_\phi = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_{\text{вн}}^\phi)^2} = \frac{4 \cdot 0,134}{3,14 \cdot 0,261^2} = \frac{0,536}{0,2139} = 2,51, \text{ м/с.}$$

3. Рассчитывают по формуле (4) значение фактического гидравлического уклона i_ϕ в изношенном водопроводе:

$$i_\phi = 0,00107 \frac{2,51^2}{0,261^{1,3}} = \frac{0,00674}{0,1744} = 0,03865 \text{ мм/м}$$

4. По формуле (3) вычисляют значение фактического энергопотребления насоса, установленного на трубопроводе с заданной толщиной слоя внутренних отложений $\delta_\phi=25$ мм:

$$N_{дв}^{\Phi} = 10^6 \cdot 0,03865 \cdot 0,261^2 \cdot 2,51 \cdot \frac{0,00808}{0,7} = 76,26 \text{ кВт/ч.}$$

Для анализа значений характеристик новых и изношенных стальных труб, согласно условиям задачи, в таблицу 1 сведены характеристики сравниваемых труб.

Таблица 1. Показатели характеристик новых и изношенных стальных труб.
Table 1. Performance indicators of new and worn-out steel pipes.

Расход, $q, \text{ м}^3/\text{с}$	Новые стальные электросварные трубы				Изношенные стальные трубы				
	$d_{вн}^p, \text{ м}$	$V_p, \text{ м/с}$	$i_p, \text{ мм/м}$	$N_{дв}^p, \text{ кВт/ч}$	$\delta, \text{ мм}$	$d_{вн}^{\Phi}, \text{ м}$	$V_{\Phi}, \text{ м/с}$	$i_{\Phi}, \text{ мм/м}$	$N_{дв}^{\Phi}, \text{ кВт/ч}$
0,134	0,311	1,76	0,01513	29,72	25	0,261	2,51	0,03865	76,26
Процент расхождения значений, %									
	-----	-----	-----	-----	-----	16,1	29,9	60,9	61,0

Анализ значений характеристик, приведенных в табл. 1 показывает следующее:

- фактический внутренний диаметр труб $d_{вн}^{\Phi}$ с толщиной слоя отложений $\delta_{\Phi} = 25 \text{ мм}$ меньше расчетного $d_{вн}^p$ в 1,19 раза:
 $d_{вн}^{\Phi} = 0,261 < d_{вн}^p = 0,311 \text{ м}$, в 1,19 раза;
- фактический гидравлический уклон труб с отложениями i_{Φ} больше значения i_p для новых труб:
 $i_{\Phi} = 0,03865 > i_p \text{ мм/м} = 0,01513 \text{ мм/м}$, в 2,6 раза;
- фактическое энергопотребление насосного агрегата $N_{дв}^{\Phi}$ больше значения $N_{дв}^p$ для новых труб:

$N_{дв}^{\Phi} = 76,27 \text{ кВт/ч} > N_{дв}^p = 29,72 \text{ кВт/ч}$, в 2,57 раза.

Это также подтверждает вывод о том, что необходимо при гидравлическом расчете металлических труб с внутренними отложениями всегда учитывать фактическую толщину слоя отложений δ_{Φ} , входящую в расчетные формулы для определения значений фактических характеристик гидравлического потенциала труб с внутренними отложениями.

Подтвердим сказанное графиками зависимостей $i_{\Phi} = f(\delta_{\Phi})$ и $N_{дв}^{\Phi} = f(\delta_{\Phi})$ (рис. 2 и 3), построенными по данным табл. 2 для разной толщины слоя отложений δ_{Φ} .

Таблица 2. Расчетные характеристики труб
Table 2. Design characteristics of pipes

Заданный расход $q, \text{ м}^3/\text{с}$	Толщина слоя отложений, $\delta_{\Phi}, \text{ мм}$	Характеристики гидравлического потенциала труб			
		$d_{вн}^{\Phi}, \text{ м}$	$V_{\Phi}, \text{ м/с}$	$i_{\Phi}, \text{ мм/м}$	$N_{дв}^{\Phi}, \text{ кВт/ч}$
0,134	0	0,311	1,76	0,01513	29,72
	5	0,301	1,88	0,01801	35,40
	10	0,291	2,02	0,02175	42,93
	15	0,281	2,16	0,02599	51,15
	20	0,271	2,32	0,03144	61,82
	25	0,261	2,51	0,03865	76,27

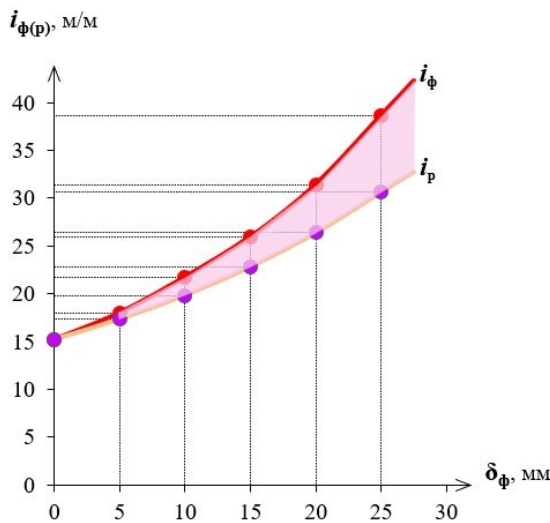


Рис. 2. График зависимости $i_{\Phi} = f(\delta_{\Phi})$
Fig. 2. Dependency graph $i_{ac} = f(\delta_{ac})$

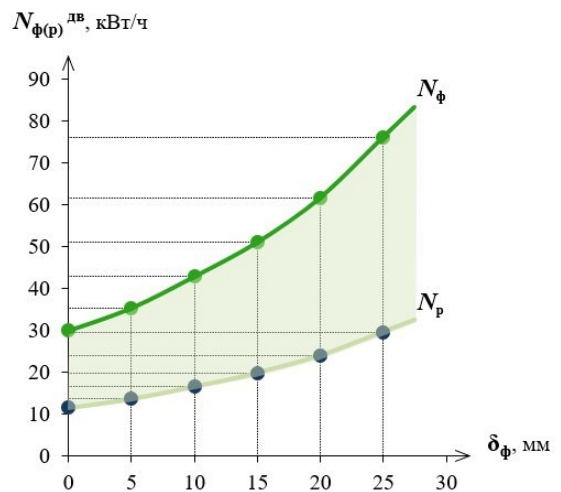


Рис. 3. График зависимости $N_{дв}^{\Phi} = f(\delta_{\Phi})$
Fig. 3. Dependency graph $N_{en}^{ac} = f(\delta_{ac})$

Поясним далее физический смысл понятия предельно-допустимое значение конкретной характеристики труб, например, толщина слоя внутренних отложений δ_ϕ .

Под предельно-допустимым значением этой характеристики следует понимать такое размерное значение толщины слоя δ_ϕ , превышение которого приводит к изменению значений фактических характеристик гидравлического потенциала труб: $d_{вн}^\phi$, V_ϕ и i_ϕ [6]. Поэтому следует подобрать с помощью расчетных зависимостей (1–5) такое значение δ_ϕ , при котором значения $d_{вн}^\phi$, V_ϕ и i_ϕ резко не увеличивают значения характеристик i_ϕ и $N_{дв}^\phi$ (рис. 2, 3).

Методика расчета (см. рис. 1, 2, 3) базируется на использовании общепринятого в отрасли – экспертного мнения специалистов, эксплуатирующих напорные трубопроводы систем водоснабжения, напорной канализации и теплоснабжения из стальных труб. Принято считать, что при образовании слоя внутренних отложений δ_ϕ , фактический внутренний диаметр изношенных труб $d_{вн}^\phi$ не может уменьшиться за счет наличия этого слоя на величину, превышающую 5 % от значения их расчетного внутреннего диаметра по ГОСТ [7]:

$$d_{вн}^\phi \leq 0,95d_{вн}^p, \text{ м.} \quad (6)$$

Для условий задачи:

$$d_{вн}^\phi = 0,95 \cdot 0,316 = 0,295 \text{ м}$$

$d_{вн}^\phi = 0,295 \text{ м} < d_{вн}^p = 0,311 \text{ м}$ на 5,0 % или в 1,05 раза.

Тогда, предельно-допустимое значение толщины слоя внутренних отложений $\delta_{доп}^{пред}$ для приведенного примера будет вычисляться, как разница между значениями расчетного $d_{вн}^p$ и фактического $d_{вн}^\phi$ внутреннего диаметра труб по формуле:

$$\delta_{доп}^{пред} = d_{вн}^p - d_{вн}^\phi, \text{ м} \quad (7)$$

$$\delta_{доп}^{пред} = 0,311 \text{ м} - 0,295 \text{ м} = 0,016 \text{ м} = 16,0 \text{ мм.}$$

Что также означает следующее: эффективность эксплуатации металлических инженерных сетей с внутренними отложениями на стенках труб должна оцениваться каким-то гидравлическим критерием, по которому будет производиться количественная (экспертная) оценка эффективности эксплуатации металлических водопроводных сетей и сетей теплоснабжения на основании разработанной авторами специальной методики оценки продолжительности периода остаточной эксплуатации напорных металлических водопроводных и канализационных сетей с внутренними отложениями, опубликованной в работе [6, 7, 8].

Разработанная методика предусматривает проводить такую оценку по величине гидравлического (безразмерного) коэффициента эффективности эксплуатации труб с отложениями, определяемого по следующей формуле [7]:

$$K_{эф} = \frac{N_{дв}^p}{N_{дв}^\phi} = \frac{(d_{вн}^p)^2 \cdot V_p \cdot i_p}{(d_{вн}^\phi)^2 \cdot V_\phi \cdot i_\phi} \quad (8)$$

где:

$N_{дв}^p$ – расчетное энергопотребление насосного агрегата, кВт/ч, (формула (2));

$N_{дв}^\phi$ – фактическое энергопотребление насосного агрегата, кВт/ч, (формула (2));

$d_{вн}^p$, V_p , i_p – характеристики гидравлического потенциала новых стальных или чугунных труб из серого чугуна. Определяются по формулам (1), (5) и (4).

$d_{вн}^\phi$, V_ϕ , i_ϕ – тоже для изношенных труб с толщиной слоя δ_ϕ . Определяются также по формулам (1), (5), (4), с учетом δ_ϕ .

С учетом экспертного мнения специалистов, эксплуатирующих металлические инженерные сети с внутренними отложениями, авторами разработана специальная таблица для количественной оценки эффективности эксплуатации металлических сетей по значению коэффициента $K_{эф}$.

Таблица имеет вид:

Таблица 3. Таблица значений $K_{эф}$
Table 3. Table of K_{ef} values

Период продолжительности остаточной эксплуатации трубопроводов, $T_{ост.}$, лет	Значение величины $K_{эф}$		
	$0,9 \leq K_{эф}^{доп} \leq 1$	$0,80 \leq K_{эф} \leq 0,90$	$K_{эф} \leq 0,80$

ВЫВОДЫ

На основании вышеизложенного можно сделать следующие **выводы**.

Требуется:

- Разработать шкалу предельно-допустимой толщины слоя внутренних отложений $\delta_{\text{доп}}^{\text{пр}}$ для труб из стали и серого чугуна для всего сортамента по ГОСТ.
- Рекомендовать и внести в п. 11, 45 СП 31.13330-2021 требование обязательного контроля значения фактической толщины слоя отложений $\delta_{\text{ф}}$ для обоснования прекращения дальнейшей эксплуатации сетей по фактическому значению коэффициента эффективности их работы при $K_{\text{эф}}^{\text{ф}} < K_{\text{эф}}^{\text{доп}}$.
- В приведенном примере допустимое значение $K_{\text{эф}}^{\text{доп}} = 0,53 < K_{\text{эф}} = 0,8$ (экспертное, рекомендованное значение). Поэтому трубопровод с толщиной слоя отложений $\delta_{\text{ф}}=25$ мм **не может продолжать дальнейшую эксплуатацию**, так как $\delta_{\text{ф}}=25$ мм $>$ $\delta_{\text{доп}}^{\text{пред}}=16$ мм. Его необходимо выводить из эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие. // М.: ООО «Издательский Дом «Бастет». 2020. – 428 с.
2. Продоус О.А., Шпилов А.А., Якубчик П.П. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями. Справочное пособие I-е издание 2021. // Издательство ООО «Перо», Санкт-Петербург – Москва. 2021. – 238 с. ил.
3. Продоус О.А., Якубчик П.П., Смолин Е.С. Сравнительный анализ зарубежной и отечественной расчетных зависимостей для гидравлического расчета металлических водопроводных труб с внутренними отложениями. // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника». 2023. N 1. – С. 56-60. // DOI:10/35776/VST/2023.01.08
4. Продоус О.А., Якубчик П.П. Новый подход к гидравлическому расчету металлических трубопроводов водоснабжения с отложениями на внутренних стенках. // Журнал «Инженерные системы АВОК Северо-Запад». № 1. 2022. – С. 28-30.
5. Продоус О.А., Якубчик П.П., Шлычков Д.И. Зависимость энергопотребления насосных агрегатов напорных коллекторов водоотведения от толщины слоя осадка на внутренней поверхности труб. // Журнал «Сантехника, отопление, кондиционирование». № 05 (245)/2022. – С. 28-30.
6. Продоус О.А., Шлычков Д.И., Якубчик П.П., Пархоменко С.В. Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации. // Научно-технический журнал по строительству и архитектуре «Вестник МГСУ», Том 17, выпуск 6/2022. – С. 738-746. // DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746
7. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Гидравлический расчет сетей водоотведения с внутренними отложениями. Монография. // Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Москва. 2022. – 120 с. ил.
8. Абрамов Н.Н. Расчет водопроводных сетей. // М.: «Стройиздат», 1976. 304с.
9. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. // М.: Наука. 1978. – 400 с.
10. Койда Н.У. и др. Вариационные методы гидравлического расчета трубопроводов. // Минск. Высшая школа. 1968. – 36 с.
11. Гальперин Расчет кольцевой водопроводной сети с учетом действительных условий. // Водоснабжение и санитарная техника. 1992. № 5. – С. 26-27.
12. Григоровский Е.П., Койда Н.У. Автоматизация расчета многоконтурных сетевых систем. // Киев. Высшая школа. 1977. – 192 с.
13. Джонс Дж. Методы проектирования. // М.: Мир. 1986. – 326 с.
14. Дмитриев А.В., Кетаев А.Б. Городские инженерные сети. // М.: Стройиздат. 1988. – 175 с.
15. Зайцев И.Д., Вайнер В.С. К вопросу оптимизации трубопроводных сетей на стадии проектирования. // Экономика и математические методы. 1979. Т. 15. – С. 171-176.
16. Ильин Ю.А. Вопросы надежности магистральных трубопроводов. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1976. № 1. – С. 122-124.
17. Калицун В.И., Ласков Ю.М. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 2000. – 417 с.
18. Кикачейшвили Г.Е. Расчет оптимальных параметров систем подачи и распределения воды. // Тбилиси: Сабчота Сакартвело. 1980. – 199 с. ил.
19. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей / Москва : Наука, 1985. – 278 с.
20. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение. // М.: Стройиздат. 1995. – 688 с.
21. Оводов В.С. Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение. М.: Колос. 1984. – 480 с.
22. Абрамов Н.Н. и др. Расчет водопроводных сетей. // М.: Стройиздат. 1983. – 278 с.
23. СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». Госстрой СССР. М.: Стройиздат. 1985. – 136 с.
24. Мошнин Л.Ф. Современные методы расчета систем подачи и распределения воды. // Водоснабжение и санитарная техника. 1984. № 10. – С. 7-10.
25. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. Новосибирск: Наука. 1983. – 167 с.

26. Теплов А.В. Расчет железнодорожной водопроводной сети. М.: Трансжелезнодороиздат. 1946. – 127 с.

27. Хасилев В.Я. Элементы теории гидравлических цепей. // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт. 1964. № 1. – С. 69-88.

28. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра. 1975. – 296 с.

29. Чупин В.Р., Мелехов Е.С., Чупин Р.В. Моделирование и оптимизация трубопроводных систем коммунального хозяйства. // Вестник Ир ГТУ. 2008. – С. 15-24

30. Kloss H., Roman M. Ogolne problemy niezawodnosci systemow wodociagowych. // Gaz Woda i Technika Sanitarna, 2008. № 9. – p. 34-51.

REFERENCES

1. Shevelev F.A., Shevelev A.F. Tables for hydraulic calculation of water pipes. Reference manual. / Moscow: Bastet Publishing House, LLC. 2020. – 428 p.

2. Prodous O.A., Shipilov A.A., Yakubchik P.P. Tables for the hydraulic calculation of water pipes made of steel and cast iron with internal deposits. Reference manual, 1-th edition, 2021. // Publishing house LLC "Pero", St. Petersburg – Moscow. 2021. – 238 p. ill.

3. Prodous O.A. Yakubchik P.P. Smolin E.S. Comparative analysis of foreign and domestic calculation dependencies for hydraulic calculation of metal water pipes with internal deposits. // The magazine "Water supply and sanitary equipment". 2023. N 1. – pp. 56-60. // DOI:10/35776/VST/2023.01.08

4. Prodous O.A., Yakubchik P.P. A new approach to the hydraulic calculation of metal water supply pipelines with deposits on the inner walls. // AVOK North-West Engineering Systems Journal, No. 1. 2022, pp. 28-30.

5. Prodous O.A. Yakubchik P.P. Shlychkov D.I. Dependence of energy consumption of pumping units of pressure collectors of drainage on the thickness of the sediment layer on the inner surface of pipes. // The magazine "Plumbing, heating, air conditioning". No. 05 (245)/2022. – pp. 28-30.

6. Prodous O.A., Shlychkov D.I., Yakubchik P.P., Parkhomenko S.V. Influence of the thickness of the layer of internal sediments in pipelines of water supply and sanitation systems on the duration of their residual operation. // Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture "Bulletin of MGSU", Volume 17, issue 6/2022. – pp. 738-746. // DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746

7. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Hydraulic calculation of drainage networks with internal deposits. The monograph. // Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU). Moscow. 2022. 120 p. ill.

8. Abramov N.N. Calculation of water supply networks. / Moscow: Stroyizdat, 1976. 304s.

9. Buslenko N.P. Modeling of complex systems. // M.: Science. 1978. – 400 p.

10. Koida N.U. et al. Variational methods of hydraulic calculation of pipelines. // Minsk. Higher school. 1968. – 36 p.

11. Galperin Calculation of the ring water supply network, taking into account the actual conditions. // Water supply and sanitary equipment. 1992. No. 5. pp. 26-27.

12. Grigorovskiy E.P., Koida N.U. Automation of calculation of multi-circuit network systems. // Kiev. Higher school. 1977. 192 p.

13. Jones J. Design methods. // M.: Mir. 1986. – 326 p.

14. Dmitriev A.V., Ketaev A.B. Urban engineering networks. // M.: Stroyizdat. 1988. 175 p.

15. Zaitsev I.D., Vayner V.S. On the issue of optimization of pipeline networks at the design stage. // Economics and mathematical methods. 1979. Vol. 15. pp. 171-176.

16. Ilyin Yu.A. Issues of reliability of main pipelines. // News of the USSR Academy of Sciences. Power engineering and transport. 1976. No. 1. pp. 122-124.

17. Kalitsun V.I., Laskov Yu.M. Hydraulics, water supply and sewerage: textbook for universities. Moscow: Stroyizdat. 2000. – 417 p.

18. Kikachishvili G.E. Calculation of optimal parameters of water supply and distribution systems. // Tbilisi: Sabchota Sakartvelo. 1980. - 199 p. ill.

19. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. Theory of hydraulic circuits / Moscow : Nauka, 1985. – 278 p.

20. Nikoladze G.I., Somov M.A. Water supply. // M.: Stroyizdat. 1995. – 688 p.

21. Ovodov V.S. Agricultural water supply and irrigation. Moscow: Kolos. 1984. – 480 p.

22. Abramov N.N. et al. Calculation of water supply networks. // M.: Stroyizdat. 1983. – 278 p.

23. SNiP 2.04.02-84 "Water supply. Outdoor networks and facilities". Gosstroy of the USSR. Moscow: Stroyizdat. 1985. – 136 p.

24. Moshnin L.F. Modern methods of calculating water supply and distribution systems. // Water supply and sanitary equipment. 1984. No. 10. pp. 7-10.

25. Sumarokov S.V. Mathematical modeling of water supply systems. Novosibirsk: Nauka Publ. 1983. – 167 p.

26. Teplov A.V. Calculation of the railway water supply network. Moscow: Transzheleznodorizdat. 1946. 127 p.

27. Khasilev V.Ya. Elements of the theory of hydraulic circuits. // Izvestiya AN SSSR, Energetika i transport. 1964. № 1. – pp. 69-88.

28. Charny I.A. Unsteady movement of real liquid in pipes. Moscow: Nedra. 1975. 296 p.

29. Chupin V.R., Melekhov E.S., Chupin R.V. Modeling and optimization of pipeline systems of public utilities. // Bulletin of Ir GTU. 2008. – pp. 15-24

30. Kloss H., Roman M. Ogolne problemy niezawodnosci systemow wodociagowych. // Gaz Woda i Technika Sanitarna, 2008. № 9. – P. 34-51.

THE MAXIMUM ALLOWABLE THICKNESS OF THE SEDIMENT LAYER ON THE WALLS OF METAL WATER PIPES OF INFRASTRUCTURE ENGINEERING NETWORKS TO STOP THEIR FURTHER OPERATION

Prodous¹ O.A., Yakubchik² P.P., Shlychkov³ D.I.

¹ Independent Expert on Water Supply and Sewerage, 37/1 Moskovsky Ave., lit., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation. Ah, room 1-N, pro@enco.su

² St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I (PGUPS), 9 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, p.jakub@mail.ru

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, ShlychkovDI@mgsu.ru

Abstract. A specific example shows the calculation of the maximum allowable thickness of the layer of internal sediments in metal pipes of engineering systems from a hydraulic point of view, which affects the values of the characteristics of their hydraulic potential and the actual energy consumption of pumping units transporting water or heat to consumers. Graphs of dependencies are presented, demonstrating a significant discrepancy between the magnitude of the hydraulic slope and the energy consumption of pumps in new and worn-out metal pipelines of water supply and heat supply systems.

The subject of the study is the definition of a quantitative criterion for assessing the limiting condition of metal pipelines of engineering networks (water supply and heat supply). Such a criterion is the maximum allowable thickness of the layer of internal deposits on the walls of metal pipelines, if exceeded, their further operation becomes impractical.

Materials and methods: The methodology is based on analytical dependencies for the hydraulic calculation of pipelines based on the formulas of Professor F.A. Shevelev, clarified by the authors taking into account the reduction in the live section of the pipe due to deposits. The method includes the calculation of the actual internal diameter, flow velocity, hydraulic slope and energy consumption of pumping units depending on the thickness of the sediment layer (δ).

Results: A concrete example shows that with the thickness of deposits in a steel pipe, the hydraulic slope increases, and the energy consumption of pumps increases compared to a new pipeline. The maximum allowable thickness of the sediment layer is calculated, after which operation becomes ineffective.

Conclusions: Based on the results, it is concluded that it is necessary to monitor the thickness of internal deposits to justify the decommissioning of networks. The authors recommend developing a scale of maximum allowable thicknesses for the entire range of pipes and making appropriate requirements in updated versions of codes of rules for outdoor networks.

Key words: plumbing from metal pipes, internal deposits, layer thickness, hydraulic calculation, comparison of results.

УДК 621.182

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ

Дихтярь Т.В.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295943, г. Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: ta_titova@mail.ru

Аннотация. Существующие методы деаэрации воды подразделяют на физические и химические. Сущность физических методов деаэрации заключается в следующем: вода, содержащая удаляемый газ, приводится в соприкосновение с воздухом, если парциальное давление этого газа в воздухе близко к нулю; создаются условия, при которых растворимость газа в воде становится ничтожно малой. С помощью первого приема аэрации воды, обычно удаляют свободную углекислоту и сероводород, поскольку парциальное давление этих газов в атмосферном воздухе близко к нулю. Ко второму приему прибегают при извлечении кислорода из воды. В этом случае ввиду значительного парциального давления кислорода в атмосферном воздухе аэрацией воды кислород удалить нельзя, поэтому воду доводят до кипения, тогда растворимость всех газов в ней падает до нуля. Для этого применяют либо нагревание воды, либо понижение давления до величины, при которой вода кипит без дополнительного подогрева в вакуумных деаэраторах. В вакуумном деаэраторе большая часть газов выделяется из воды в виде пузырьков, которые выходят на поверхность воды. Целью настоящей работы является определение расхода выпара, который образуется в результате термической обработки воды в вакуумном деаэраторе. Процесс деаэрации по своей физической сущности не зависит от величины абсолютного давления. Нулевая растворимость газов может быть достигнута при любой температуре кипения, а значит и при температуре кипения ниже 100°C, так что деаэрацию воды можно осуществить при давлении ниже атмосферного. Определен расход выпара в результате обработки воды в вакуумном деаэраторе.

Предмет исследования: процессы массообмена в тепловых потоках.

Материалы и методы: математические методы физического и численного моделирования.

Результаты: в результате исследований получены зависимости, позволяющие установить связь расхода выпара и деаэрированной воды.

Выводы: уточнено соотношение для определения расхода выпара в процессе деаэрации.

Ключевые слова: термическая деаэрация, концентрация газа, коэффициент растворимости газа, энтальпия, выпар, вакуум.

ВВЕДЕНИЕ

Термическая деаэрация воды основана на использовании закона растворимости газа в жидкости - закона Генри. Согласно этому закону, концентрация газа, растворенного в жидкости, зависит от концентрации того же газа в газовой или парогазовой смеси над жидкостью. Концентрация газа в жидкости прямо пропорциональна концентрации газа в газовой или парогазовой смеси[1].

Концентрация газа C_G прямо пропорциональна его парциальному давлению p_G . Парциальное давление отдельного газа это то давление, которое он имел бы, если бы один занимал весь объем смеси газов. Общее давление газовой или парогазовой смеси равно сумме парциальных давлений газов и паров, составляющих смесь (закон Дальтона) [1]:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n. \quad (1)$$

Так как C_G прямо пропорциональна p_G , то зависимость C от C_G можно представить как зависимость C от p_G и выразить закон Генри применительно к воде так: растворимость газа в

воде прямо пропорциональна его парциальному давлению над водой, мг/кг[1]:

$$C = \psi p_G, \quad (2)$$

где ψ - коэффициент растворимости газа в воде, мг/кг·бар; p_G - парциальное давление газа над водой, бар.

Коэффициент ψ показывает, сколько миллиграмм газа растворяется в 1 кг воды при парциальном давлении газа в парогазовой смеси над водой, равном 1 бар[1].

Коэффициент растворимости газа ψ зависит от температуры. С повышением температуры ψ уменьшается, стало быть растворимость газа с повышением температуры также уменьшается[2].

Вычисляемое по формуле (2) содержание растворенного газа в воде отвечает состоянию полного насыщения воды газом[1].

На зависимости растворимости газа в воде от температуры и давления основана работа термического деаэратора. Для удаления из воды газов необходимо создать в деаэраторе температуру и давление, при которых растворимость газов станет равной нулю.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Для удаления из воды газов необходимо создать в деаэраторе температуру и давление, при которых растворимость газов станет равной нулю[1].

Рассмотрим, как эти условия достигаются. Кипение жидкости происходит при такой температуре, при которой давление паров жидкости по величине равно полному давлению в пространстве над жидкостью. Следовательно, при кипении воды давление водяных паров равно полному давлению над кипящей водой, и тогда парциальные давления газов в парогазовой смеси над кипящей водой практически близки к нулю. Стало быть, согласно закону Генри, растворимость газов в кипящей воде равна нулю.

Будем нагревать воду, находящуюся в сосуде под давлением атмосферного воздуха. При нагревании вода испаряется. С повышением температуры увеличивается испарение воды. При этом повышается парциальное давление водяных паров в воздухе над поверхностью воды. Поскольку общее давление над водой неизменно, то, согласно закону Дальтона, парциальное давление воздуха понижается, соответственно понижается и парциальное давление кислорода в воздухе. Доведем нагрев воды до температуры кипения. Как известно, при атмосферном давлении вода кипит при температуре 100°C. Парциальное давление $p_{\text{к}}$ кислорода над кипящей водой равно нулю. Следовательно, по закону Генри растворимость кислорода в воде при атмосферном давлении и температуре 100°C (состояние кипения) также равна нулю[3].

Если давление над водой выше атмосферного, то соответственно выше температура кипения. Поэтому для достижения нулевой растворимости газов при давлении выше атмосферного требуется более высокий нагрев воды[4].

Итак, нулевая растворимость газов в воде при любом давлении достигается при кипении воды. Практически в термических деаэраторах воду удаётся нагреть до температуры немного ниже температуры кипения. Для достижения наибольшей глубины деаэрации добиваются, чтобы разность между температурой кипения и конечной температурой воды в деаэраторе была минимальной - 0,1 - 0,2°C. Эту разность температур называют недогревом воды[4].

Если давление над водой меньше атмосферного, то вода кипит при температуре ниже 100°C. Чем меньше давление, тем ниже температура кипения[1].

Процесс деаэрации по своей физической сущности не зависит от величины абсолютного давления. Нулевая растворимость газов может быть достигнута при любой температуре кипения, а значит и при температуре кипения ниже 100°C, так что деаэрацию воды можно осуществить при давлении ниже атмосферного. Термические деаэраторы, работающие под давлением ниже

атмосферного, называют вакуумными деаэраторами[1].

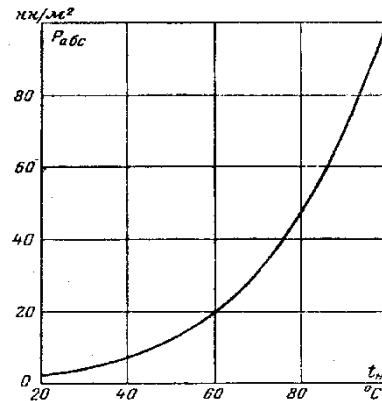


Рис. 1. Зависимость между температурой кипения воды и абсолютным давлением

Fig. 1. The relationship between the boiling point of water and absolute pressure

Рассмотрим, как изменяется содержание растворенного кислорода в воде при нагревании, если давление над водой ниже атмосферного. С повышением температуры парциальное давление водяных паров растет, а парциальное давление воздуха и содержание в нем кислорода падает, общее же давление сохраняется неизменным[1].

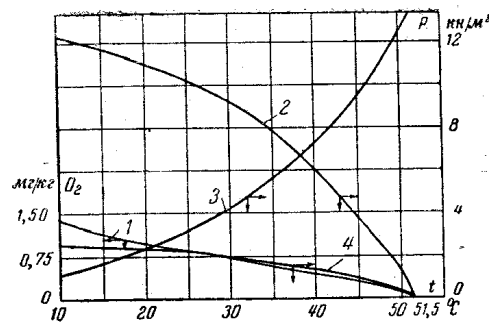


Рис. 2. Зависимость содержания растворенного кислорода, насыщающего воду, и парциальных давлений воздуха, кислорода и водяного пара над водой от температуры при полном давлении паровоздушной смеси над водой 100 мм.рт.ст., относительная влажность воздуха 100 %:

1 – содержание кислорода, растворенного в воде; 2 – парциальное давление воздуха; 3 – парциальное давление водяного пара; 4 – парциальное давление кислорода, содержащегося в воздухе

Fig. 2. The dependence of the content of dissolved oxygen saturating water and the partial pressures of air, oxygen and water vapor above water on the temperature at full pressure of the vapor-air mixture above water of 100 mmHg, relative humidity of 100 %:

1 - the oxygen content dissolved in water; 2 - the partial pressure of air; 3 - the partial pressure of water vapor; 4 - the partial pressure of oxygen contained in the air.

При температуре 51,5°C (температура кипения воды при давлении 100 мм.рт.ст.) парциальное давление водяных паров становится равным

полному давлению, а давление воздуха и содержащегося в нем кислорода падает до нуля. Соответственно падает содержание растворенного кислорода в воде[1].

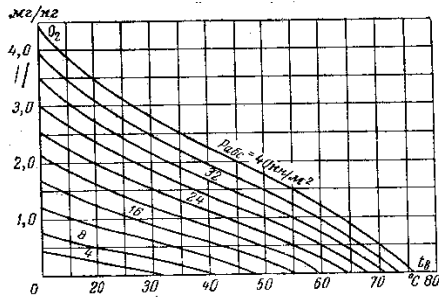


Рис. 3. Зависимость содержания растворенного кислорода, насыщающего воду от температуры и давления

(относительная влажность воздуха 100 %)

Fig. 2. Dependence of the content of dissolved oxygen saturating water on temperature and pressure (relative humidity 100%)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс деаэрации воды по мере движения ее через деаэратор постепенно замедляется вследствие понижения движущей силы процесса, поэтому удаление остаточного кислорода в значительной мере зависит от времени пребывания воды в деаэраторе. С увеличением продолжительности процесса увеличивается глубина деаэрации. Увеличение времени пребывания воды в деаэраторе достигается устройством ступеней - каскадов в виде полок или тарелок[5].

Греющий пар не должен содержать газов, особенно кислорода. Газы, содержащиеся в паре, ухудшают работу деаэратора и замедляют передачу тепла от пара к воде.

Расчет деаэратора с нагревом воды в нем производят на основе уравнений теплопередачи. Тепловой баланс деаэрационной установки составляется для определения полного расхода пара, подводимого к деаэратору.

В общем виде уравнение теплового баланса деаэратора записывается как равенство потоков теплоты введенных в деаэратор и вышедших из него, кДж/с[6]

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (3)$$

где Q_1 - количество теплоты, подведенное в аппарат с обрабатываемой водой; Q_2 - количество теплоты, подведенное в аппарат с греющим паром; Q_3 - количество теплоты, отводимое из деаэратора с деаэрированной водой; Q_4 - количество теплоты, отводимое с выпаром; Q_5 - потери теплоты в окружающую среду.

$$Q_1 = G_B h_B, \quad (4)$$

где G_B - расход воды, поступающей на обработку, т.е. производительность деаэратора, кг/с; h_B - энтальпия воды, поступающей на обработку, кДж/кг.

$$Q_2 = G_{II} h_{II}, \quad (5)$$

где G_{II} - расход греющего пара, кг/с; h_{II} - энтальпия греющего пара, кДж/кг.

$$Q_3 = G_{Д.В} h_{Д.В}, \quad (6)$$

где $G_{Д.В}$ - расход деаэрированной воды, кг/с; $h_{Д.В}$ - энтальпия деаэрированной воды, кДж/кг.

$$Q_4 = G_{ВЫП} h_{ВЫП}, \quad (7)$$

где $G_{ВЫП}$ - расход выпара, кг/с; $h_{ВЫП}$ - энтальпия выпара, кДж/кг.

$$Q_5 = \alpha F (t_{из} - t_{в.о.з.}), \quad (8)$$

где α - коэффициент теплоотдачи от изоляции деаэратора к окружающему воздуху, Вт/(м²·К); F - площадь поверхности аппарата, м²[7]; $t_{из}$ - температура на поверхности изоляции (согласно требованиям техники безопасности не должна превышать 45°C); $t_{в.о.з.}$ - температура окружающего воздуха, (принимается равной температуре, установленной санитарными нормами для переходного периода года 22°C).

Для гидродинамического расчета вакуумных деаэраторов получена формула[2]

$$G_{II}^{2/3} = AS^3 \sqrt{\frac{\rho''}{G_B}}, \quad (9)$$

где A - коэффициент, имеющий в диапазоне вакуум 500-700 мм рт. ст.; S - сечение для прохода пара, м²; ρ'' - плотность пара, кг/м³.

Сечение для прохода пара определяется по формуле[2]

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2), \quad (10)$$

где D - внутренний диаметр колонки деаэратора, м; d - диаметр круглой тарелки деаэратора, м.

После преобразований окончательно получим

$$G_{II} = \sqrt{A^3 \left(\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \right)^3 \frac{\rho''}{G_B}}. \quad (11)$$

Из формулы (9) выведем единицы измерения для коэффициента A .

$$\left(\frac{m}{ч}\right)^{2/3} = A \cdot m^2 \left(\frac{кг \cdot ч}{м^3 \cdot м}\right)^{1/3};$$

$$\frac{m^2}{ч^2} = A^3 \cdot \frac{м^6 \cdot м \cdot ч}{м^3 \cdot м \cdot 1000};$$

$$\frac{m^2}{ч^2} = A^3 \cdot \frac{м^3 \cdot ч}{1000},$$

отсюда

$$A = \frac{10 \cdot \sqrt[3]{m^2}}{м \cdot ч}.$$

Таким образом, получим формулу для определения расхода выпара

$$G_{ВЫП} = \frac{G_B(h_B - h_{Д.В}) + \sqrt{A^3 \left(\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\right)^3 \frac{\rho''}{G_B}(h_{П} - h_{Д.В}) + \alpha F(t_{из} - t_{гоз})}}{h_{ВЫП} - h_{Д.В}}. \quad (14)$$

Нагрев воды по ступеням сильно меняется в зависимости от выпара. При малом выпаре нагрев воды на верхних ступенях незначителен. Вода нагревается в основном на нижних ступенях. С ростом выпара нагрев воды перемещается от нижних ступеней к верхним, и тогда на верхних ступенях вода нагревается больше. Это объясняется тем, что с увеличением выпара растут количество пара и температурный напор на верхних ступенях, одновременно растет коэффициент теплоотдачи от пара к воде. Выпар влияет на недогрев воды[8].

Таким образом, выпар - избыток пара, подаваемого в колонку - является средством изменения температурного режима деаэрационной колонки, благодаря чему изменение расхода выпара служит способом регулирования работы деаэрационной колонки[2].

Вода, поступающая в деаэратор, подогревается до температуры выше 50°C. Для вскипания воды с такой температурой необходим сравнительно неглубокий вакуум. Подогрев воды можно осуществлять путем нагрева в поверхностном газоводяном подогревателе, что позволит отказаться от охладителя выпара[9].

Если использовать теплоту конденсации (выпара), то возможно подогреть воду после химводоочистки для возврата в деаэратор, что позволит использовать с максимальной отдачей потенциал энергоносителей, снижая затраты на их использование.

Существенное значение имеет величина нагрева воды в колонке, определяющая совместно с величиной выпара расход пара на деаэратор. Чем больше пара подается в колонку, тем интенсивнее идет дробление воды потоком пара и,

Переведем т/ч в кг/с:

$$A = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{кг^{2/3}}{м \cdot с}$$

Из материального баланса выразим связь расхода выпара и деаэрированной воды[6]

$$G_B + G_{П} = G_{ВЫП} + G_{Д.В}, \quad (12)$$

отсюда

$$G_{Д.В} = G_B + G_{П} - G_{ВЫП}. \quad (13)$$

следовательно, быстрее протекает процесс деаэрации.

Количество тепла, передаваемое от пара к воде определяется из уравнения теплового баланса[10]

$$Q = G_{ВЫП}(h'_{ВЫП} - h''_{ВЫП})\eta_{ном} = G_B c_B (t''_B - t'_B), \quad (15)$$

где $G_{ВЫП}$ - расход выпара, кг/с; $h'_{ВЫП}$ - энтальпия пара на входе в аппарат, ккал/кг; $h''_{ВЫП}$ - энтальпия пара на выходе из аппарата, ккал/кг; $\eta_{ном} \approx 0,97 - 0,995$ - коэффициент тепловых потерь, учитывающий потерю тепла на внешнее охлаждение; G_B - расход воды, кг/с; c_B - теплоемкость воды, ккал/(кг·°C); t''_B - температура воды на выходе из аппарата, °C; t'_B - температура воды на входе в аппарат, °C.

Таким образом, из формулы (15) можно определить температуру, до которой нужно подогреть воду, чтобы вернуть ее на деаэрацию, °C[10]

$$t''_B = \frac{G_{ВЫП}(h'_{ВЫП} - h''_{ВЫП})\eta_{ном}}{G_B c_B} + t'_B. \quad (16)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Проведем эксергетический анализ для обоснования выбора принятой схемы.

Большинство процессов, протекающих в химико-технологических системах, в той или иной степени связано с теплообменом рабочих веществ и теплообменом с окружающей средой. При этом эксергия одного рабочего тела повышается за счет уменьшения эксергии другого. Часть эксергии безвозвратно теряется. Потери эксергии при теплообмене обусловлены несколькими причинами[11].

Наиболее значительны потери эксергии, связанные с передачей тепла при конечной разности температур теплоносителей, часть потерь вызвана продольной теплопроводностью (в теплообменниках тепло передается не только в направлении, перпендикулярном поверхности теплообмена, но и вдоль этой поверхности), гидравлическим сопротивлением аппарата, теплообменом с окружающей средой. Для определения эффективности работы теплообменных аппаратов необходимо оценить эти потери[12].

В процессе теплообмена никакой полезной работы не совершается и, следовательно, изменение эксергии теплового потока равно потерям, обусловленным необратимостью процесса из-за конечной разности температур теплоносителей. Таким образом, эксергетические потери от конечной разности температур при теплообмене для данного теплового потока пропорциональны средней разности эксергетических температур теплоносителей[11]:

$$\Delta E = E_r - E_x = Q\bar{\tau}_r - Q\bar{\tau}_x = Q\bar{\tau}_{cp}, \quad (17)$$

где E_r, E_x - эксергии горячего и холодного теплоносителей; $\bar{\tau}_r, \bar{\tau}_x$ - средние эксергетические температуры горячего и холодного теплоносителей; Q - тепловой поток между теплоносителями; $\bar{\tau}_{cp}$ - средняя разность эксергетических температур теплоносителей.

$$\bar{\tau}_r = 1 - T_o / \bar{T}_r, \bar{\tau}_x = 1 - T_o / \bar{T}_x, \quad (18)$$

где \bar{T}_r, \bar{T}_x - средние температуры горячего и холодного теплоносителей; T_o - температура окружающей среды.

Для адиабатного теплоизолированного теплообменника справедливо уравнение теплового баланса

$$G_1 c_1 \Delta T_1 = G_2 c_2 \Delta T_2, \quad (19)$$

где $G_1 c_1$ и $G_2 c_2$ - тепловые эквиваленты теплоносителей; $\Delta T_1, \Delta T_2$ - средние разности температур теплоносителей в процессе.

Эксергетический КПД теплообменника[10]

$$\eta_e = \frac{G_x c_x \Delta T_x}{G_r c_r \Delta T_r}, \quad (20)$$

где G_x, G_r - расходы холодного и греющего теплоносителя, кг/с; c_x, c_r - средние теплоемкости холодного и греющего теплоносителя, Дж/(кг·К); $\Delta T_x, \Delta T_r$ - средние разности температур теплоносителей в процессе, К.

Средняя разность температур определяется по формулам[11]:

$$\Delta T_x = \left(1 - \frac{\tau_o}{\tau_x} \right), \quad (21)$$

$$\Delta T_r = \left(1 - \frac{\tau_o}{\tau_r} \right), \quad (22)$$

где T_o - температура окружающей среды ($T_o = \text{const}$), К; T_x, T_r - средние температуры холодного и горячего теплоносителей, К.

Таким образом, получим

$$\eta_e = \frac{G_x c_x T_r (\tau_x - \tau_o)}{G_r c_r T_x (\tau_r - \tau_o)}. \quad (23)$$

Эксергетический КПД теплообмена при отсутствии потерь эксергии, обусловленных гидравлическим сопротивлением аппарата, определяется отношением средних эксергетических температур теплоносителей. Учитывая пропорциональную зависимость между этими параметрами, можно выбрать температурный режим процесса в зависимости от допустимых эксергетических потерь.

ВЫВОДЫ

Наряду с увеличением выпара растет количество пара и температурный напор на верхних ступенях, одновременно растет коэффициент теплоотдачи от пара к воде, при этом выпар влияет на недогрев воды, а изменение расхода выпара служит способом регулирования работы деаэрационной колонки. Выявлено, что эксергетический КПД теплообмена при отсутствии потерь эксергии, обусловленных гидравлическим сопротивлением аппарата, определяется отношением средних эксергетических температур теплоносителей, что позволило, учитывая пропорциональную зависимость между этими параметрами, осуществить выбор температурного режима процесса в зависимости от допустимых эксергетических потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагинский Л.Н., Евилевич М.А., Бегачев В.И. и др. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод. Л.: Химия. 1982. 48 с.
2. Труб И.А., Литвин О.П. Вакуумные деаэраторы. М.: Энергия. 1967. 100с.
3. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Д.: Энергия. 1971. 185 с.
4. Гиммельберг А.С., Григорьев Г.В., Михайлов В.Г., Егоров П.В., Шилова Н.Е. Новые термические деаэраторы для ТЭС и котельных // Сборник докладов научно-практического семинара «Ресурс и надежность тепломеханического оборудования энергетических и промышленных предприятий». 2006. № 2. С.85-89.
5. Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. М.: Стройиздат. 1975. 176 с.
6. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой. 2003. 884 с.
7. Дихтярь Т.В. Определение состава газа от различных промышленных и бытовых объектов // Строительство и техногенная безопасность. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. Симферополь: 2017. № 7(59). С. 89-93.
8. Кирш А.К., Лагун В.П., Симою Л.Л., Нахман О.В. и др. Деаэрация в конденсаторах паровых турбин // "Теплоэнергетика". 1977 № 10. С. 12-15.
9. Галустов В. С. Термическая деаэрация воды // Энергия и менеджмент. 2004. № 1. С. 17-19.
10. Берман С.С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок. М.: Машгиз. 1959. 423 с.
11. Клыков М.В. Методические указания к лабораторной работе "Эксергетический анализ процесса теплообмена в теплообменнике типа "труба в трубе"" по дисциплине «Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии». Салават: УГНТУ. 2006. 14 с.
12. Георгиевский Н.В. Котлы для сжигания сероводорода: особенности конструирования и критерии выбора // Индустрия. 2011. № 2. С. 84-89.

REFERENCES

1. Braginsky L.N., Evilevich M.A., Begachev V.I. and others. Modeling of aeration facilities for wastewater treatment. L.: Chemistry. 1982. 48 p.
2. Trub I.A., Litvin O.P. Vacuum deaerators. Moscow: Energiya. 1967. 100p.
3. Oliker I.I., Permyakov V.A. Thermal deaeration of water at thermal power plants. D.: Energiya. 1971. 185 p.
4. Himmelberg A.S., Grigoriev G.V., Mikhailov V.G., Egorov P.V., Shilova N.E. New thermal deaerators for thermal power plants and boiler houses // Collection of reports of the scientific and practical

seminar "Resource and reliability of thermal mechanical equipment of energy and industrial enterprises". 2006. No. 2. pp.85-89.

5. Zolotova E.F., Ass G.Yu. Purification of water from iron, manganese, fluorine and hydrogen sulfide. Moscow: Stroyizdat. 1975. 176 p.

6. Timonin A.S. Engineering and Environmental handbook. Vol. 2. Kaluga: N. Bochkareva Publishing House. 2003. 884 p.

7. Dikhtyar T.V. Determination of gas composition from various industrial and domestic facilities // Construction and technogenic safety. Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture. Simferopol: 2017. No. 7(59). pp. 89-93.

8. Kirsh A.K., Lagun V.P., Simoy L.L., Nachman O.V. et al. Deaeration in steam turbine condensers // "Teploenergetika". 1977 No. 10. pp. 12-15.

9. Galustov V. S. Thermal deaeration of water // Energy and Management. 2004. No. 1. pp. 17-19.

10. Berman S.S. Heat exchangers and condensing devices of turbine installations. Moscow: Mashgiz. 1959. 423 p.

11. Klykov M.V. Methodological guidelines for the laboratory work "Exergetic analysis of the heat exchange process in a pipe-in-pipe heat exchanger" in the discipline "Theoretical foundations of energy and resource conservation in chemical technology". Salavat: UGNTU. 2006. 14 p.

12. Georgievsky N.V. Boilers for burning hydrogen sulfide: design features and selection criteria // Industry. 2011. № 2. pp. 84-89.

INVESTIGATION OF THERMAL DEAERATION PROCESSES WHEN WATER TEMPERATURE CHANGES

Dikhtyar T.V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute "Academy of Construction and Architecture",
295943, Simferopol, Kievskaya str., 181, e-mail: ta_titova@mail.ru

Abstract. The existing methods of water deaeration are divided into physical and chemical. The essence of physical deaeration methods is as follows: water containing the gas to be removed is brought into contact with air if the partial pressure of this gas in the air is close to zero; conditions are created under which the solubility of the gas in water becomes negligible. With the first method of water aeration, free carbon dioxide and hydrogen sulfide are usually removed, since the partial pressure of these gases in the atmospheric air is close to zero. The second method is used when extracting oxygen from water. In this case, due to the significant partial pressure of oxygen in the atmospheric air, oxygen cannot be removed by aeration of water, so the water is brought to a boil, then the solubility of all gases in it drops to zero. To do this, either heating the water or lowering the pressure to a value at which the water boils without additional heating in vacuum deaerators is used. In a vacuum deaerator, most of the gases are released from the water in the form of bubbles that reach the surface of the water. The purpose of this work is to determine the evaporation rate, which is formed as a result of heat treatment of water in a vacuum deaerator. The deaeration process is physically independent of the absolute pressure. Zero solubility of gases can be achieved at any boiling point, and therefore at a boiling point below 100 ° C, so that water deaeration can be carried out at a pressure below atmospheric pressure. The evaporation rate as a result of water treatment in a vacuum deaerator has been determined.

Subject: mass transfer processes in heat flows.

Materials and methods: mathematical methods of physical and numerical modeling.

Results: as a result of the research, dependences were obtained that make it possible to establish a relationship between the consumption of steam and deaerated water.

Conclusions: the ratio for determining the evaporation rate during the deaeration process has been clarified.

Key words: thermal deaeration, gas concentration, gas solubility coefficient, enthalpy, evaporation, vacuum.

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ВОЗДУХА

Зайцев¹ О.Н., Ангелюк² И.П., Петренко² Д.М.¹ ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет им. И.И. Ишутина,
305040, Россия, ул. 50 лет Октября, 94, Курск,² ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.
E-mail: ¹ zon071941@mail.ru, ² iliya.angeluck@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены существующие схемы рекуперации воздуха, аэродинамические и термодинамические процессы, протекающие при смешении воздушных потоков в рекуператорах различных типов, дан критический анализ конструктивных особенностей рекуператоров различного типа, а также возможности совершенствования и развития в данной сфере.

Предмет исследования: аэродинамические и термодинамические процессы, протекающие в рекуператорах воздуха.

Материалы и методы: изучение существующих схем рекуперации воздуха на основе научных статей, публикаций, патентов, научной литературы, а также нормативного законодательства в данной сфере.

Результаты: получены результаты по схемам рекуперации воздуха, техническим характеристикам, технологическим и конструктивным особенностям, эффективности теплообмена, а также КПД рекуператоров различного типа.

Выводы: проведен критический анализ существующих систем рекуперации воздуха в системах отопления и вентиляции зданий и сооружений, уровень эффективности данных систем, а также возможности совершенствования и развития рекуператоров воздуха наиболее перспективных типов.

Ключевые слова: рекуперация воздуха, аэро-, термо-, термодинамические процессы, совершенствование.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с общемировым ростом цен на энергоресурсы происходящим в последние годы задача сбережения тепловой энергии в системах вентиляции и отопления становится все более и более актуальна. Одним из наиболее эффективных методов экономии тепловой энергии являются рекуперация воздуха. Снижение эксплуатационных расходов в системах вентиляции и отопления существенно увеличивает популярность устройств.

В независимости от конструктивных особенностей, рекуператоры по своей сути являются теплообменниками. Это могут быть один или два теплообменника, в первом случае теплообмен происходит через стенки по средству обмена теплом приточных и вытяжных потоков воздуха, во втором случае происходит передача тепла некоему промежуточному теплоносителю в системе вытяжной вентиляции с последующей отдачей тепла в приточной вентиляционной системе.

В холодное время года главной задачей рекуператоров воздуха является нагрев приточного воздуха посредством вытяжного. Системы вентиляции, оборудованные рекуператорами воздуха, являются более экономичными и создают больше возможности для энергосбережения.

На сегодняшний день, несмотря на долгое изучение данной тематики, до сих пор существует ряд особенностей, не получивших должного освящения в специализированной литературе.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время можно отдельно выделить пять типов теплообменников рекуператоров: камерного типа, роторного типа, пластинчатого типа, тепловые трубки, а также модели с промежуточным теплоносителем [1]:

- камерные рекуператоры характеризуются наличием специальной камеры (внутреннего объема), при этом в роле теплообменника выступают стенки камеры;

- роторные рекуператоры характеризуются наличием специального вращающегося колеса (ротора), ось вращения которого совпадает с осью движения воздуха, а в роле теплообменника в данном случае выступают пластины ротора;

- пластинчатые рекуператоры характеризуются статичными пластинчатыми теплообменниками, по каналом которого движутся потоки вытяжного и приточного воздуха;

- рекуператоры воздуха на основе тепловых трубок характеризуются наличием специальных герметичных трубок, по которым циркулирует легкокипящее вещество, которое отдает и забирает тепло по мере циркуляции и смены агрегатного состояния;

- рекуператоры воздуха с промежуточным теплоносителем характеризуются наличием двух отдельных теплообменников, устанавливаемых в системах вытяжной и приточной вентиляции, соединенных между собой трубопроводами с теплоносителем.

Большинство рекуператоров работают как противоточные теплообменники. Принципиальная схема рекуператора с промежуточным теплоносителем представлена на рисунке 1.

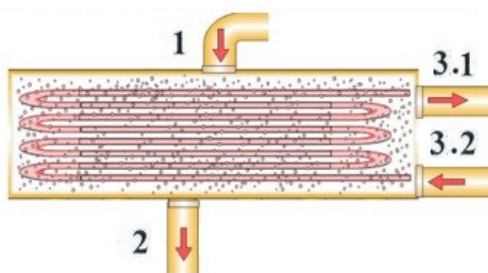


Рис. 1. Принципиальная схема рекуператора с промежуточным теплоносителем.

Fig. 1. Schematic diagram of the recuperator with intermediate coolant.

На рисунке: 1 – подача воздуха из системы приточной вентиляции с уличной температурой; 2 – подача воздуха после прохождения рекуператора с повышенной температурой; 3.1 и 3.2 подача и обратка теплоносителя на теплообменник в рекуператоре от системы вытяжной вентиляции.

Теплоноситель в данной системе может перемещаться на значительные расстояния, а значит и вентиляционные установки могут находиться на существенном расстоянии друг от друга. Как пример можно обозначить, что одна система будет находиться в подвале здания, а другая на кровле.

Отрицательной стороной данной системы является необходимость установки насоса для прокачки теплоносителя, значительное увеличение протяженности трубопроводов, что в свою очередь непосредственно влияет на удорожание системы в целом так и на повышение теплопотерь.

По типам направления движения потоков воздуха рекуператоры можно разделить на три основных типа:

- 1) рекуператоры с поперечным потоком, воздушные потоки вытяжной и приточной вентиляции циркулируют под перпендикулярным углом один к одному так чтобы они пересекались;
- 2) рекуператоры с параллельным потоком, при котором воздушные потоки вытяжной и приточной вентиляции циркулируют симметрично один к одному;
- 3) рекуператоры с вращающимся потоком, воздушные потоки вытяжной и приточной вентиляции находятся во вращение посредством ротора, обладающего значительной тепловой инерцией, приводящегося в действие посредством двигателя.

Нужно учитывать, что установка воздушных рекуператоров возможно только в системах с принудительной вентиляции. В системах с естественной вентиляцией или же гибридной системой установка рекуператоров воздуха невозможна.

Одним из наиболее распространенных типов рекуператоров воздуха, расположенных внутри помещения, являются пластинчатые рекуператоры. Их применяют в зданиях оснащенных системой механической вентиляции и они позволяют рекуперировать часть энергии вытяжного воздуха.

Данное устройство состоит из теплообменника, который осуществляет тепловой контакт удаляемого и приточного воздуха, фильтров для очистки воздуха, вентиляторов для механического побуждения воздушных потоков.

На практике они поставляются с завода в виде коробок с заглушками которые непосредственно и монтируются в систему вентиляции.

Максимальная же эффективность в таких системах достигается по средствам увеличения площади контакта воздушных потоков вытяжной и приточной вентиляции.

Принципиальная схема работы пластинчатого рекуператора воздуха представлена на рисунке 2.

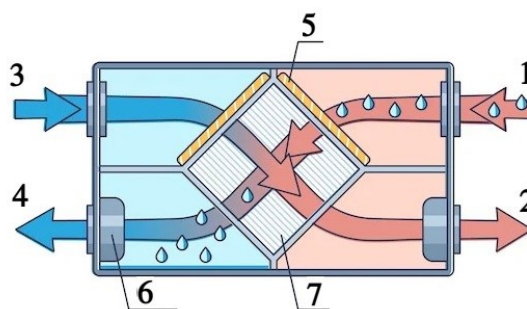


Рис. 2. Принципиальная схема пластинчатого рекуператора воздуха.

Fig. 2. Schematic diagram of a plate air recuperator.

На рисунке 2: 1 – подача воздуха из системы вытяжной вентиляции, комнатной температуры; 2 – подача воздуха в систему вентиляции после прохождения рекуператора с повышенной температурой; 3 – подача воздуха из системы приточной вентиляции с уличной температурой; 4 – подача воздуха в систему вытяжной вентиляции, с последующим удалением на улицу; 5 – фильтр для очистки и улучшения характеристик воздуха; 6 – вентилятор для механического побуждения воздушных потоков; 7 – теплообменник пластинчатого рекуператора воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность рекуператора является важнейшей его характеристикой. КПД определяет, насколько рекуператору удалось нагреть приточный воздух относительно идеального варианта. В данном случае под идеальным вариантом подразумевается нагревание приточного воздуха до температуры вытяжного воздуха, в реальности такой вариант невозможен.

Работа рекуператора характеризуется его эффективностью, которая, определяется как тепло, обмениваемое по отношению к максимуму, который мог бы быть обменен.

Коэффициент полезного действия рекуператора будет определяться по формуле, представленной ниже (формула 1):

$$\varepsilon = \frac{T_{п}-T_{н}}{T_{в}-T_{н}} \quad (1)$$

В формуле 1: $T_{п}$ - температура воздуха после прохождения рекуператора, °С; $T_{н}$ - температура воздуха в приточной системе вентиляции (наружная температура), °С; $T_{в}$ - температура воздуха в системе вытяжной вентиляции (до прохождения рекуператора), °С.

Главной идеей формулы 1 по определению коэффициента полезного действия воздушного рекуператора является контроль изменения явного тепла в воздушных потоках до и после рекуператора.

Формула 1 проста и удобна и широко применяется на практике, однако для более точного расчета необходимо применять формулу 2, которая в свою очередь учитывает изменение относительной влажности в воздушных потоках:

$$\varepsilon = \frac{I_{п}-I_{н}}{I_{в}-I_{н}} \quad (2)$$

В формуле 2: $I_{п}$ - энтальпия воздуха после прохождения рекуператора, кДж/кг; $I_{н}$ - энтальпия воздуха в приточной системе вентиляции (энтальпия наружного воздуха), кДж/кг; $I_{в}$ - энтальпия воздуха в системе вытяжной вентиляции (до прохождения рекуператора), кДж/кг.

Главной идеей формулы 2 по определению коэффициента полезного действия воздушного рекуператора является контроль изменения энтальпии в воздушных потоках до и после рекуператора. Данная формула позволяет получить более точные и корректные данные.

В связи с изменением наружной температуры как на протяжении дня, так и на протяжении сезона, может быть крайне полезно определить среднюю сезонную эффективность работы рекуператора.

Формула 3 позволяет определить сезонную эффективность работы воздушного рекуператора, в ней учитывается изменения наружной температуры на протяжении различного времени:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^H \varepsilon_i h_i}{H} \quad (3)$$

В формуле 3: h_i – количество часов, в течении которых эффективность рекуператора равна ε_i , час; H – является суммарным (общим) числом часов за исследуемый период (например период отопления).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Определим эффективность рекуператора воздуха в системе вентиляции исходя из следующих показателей, характерных для периода отопления в Крыму:

Исходные данные: $T_{п}$ - температура воздуха после прохождения рекуператора, (+ 12 °С); $T_{н}$ - температура воздуха в приточной системе вентиляции (наружная температура), (- 1 °С); $T_{в}$ - температура воздуха в системе вытяжной вентиляции (до прохождения рекуператора), (+ 21 °С).

$$\varepsilon = \frac{12 + 1}{21 + 1} * 100\% = 59 \%$$

Исходя из типовых исходных данных, можно сделать вывод, о том, что КПД рекуператора воздуха будет 59%.

Ниже представлен рисунок 3, по которому можно ориентировочно определить температуру воздуха после прохождения пластинчатого рекуператора в зависимости от температуры наружного воздуха.

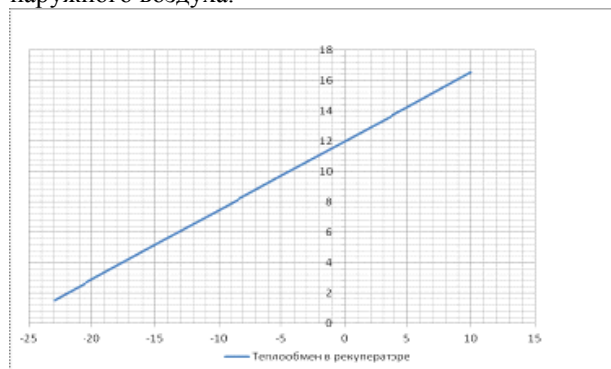


Рис. 3. График зависимости температуры воздуха после прохождения пластинчатого рекуператора от температуры наружного воздуха.

Fig. 3. Graph of the dependence of the air temperature after passing through the plate recuperator on the outside air temperature.

Исходя из графика можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры наружного воздуха, интенсивность процесса передачи тепла уменьшается, в связи с уменьшением разницы температур между воздухом приточной и вытяжной системы вентиляции.

В связи со значительными сезонными перепадами наружной температуры проведем расчеты для разных коэффициентов полезного действия рекуператора воздуха на протяжении сезона, и оформим полученные данные в рисунок 4.

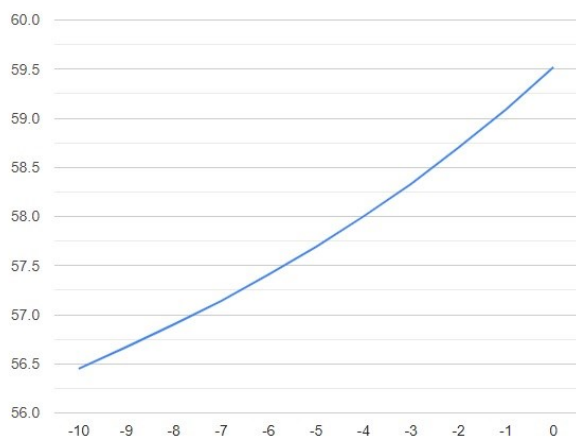


Рис. 4. График зависимости эффективности рекуператора воздуха от наружной температуры

Fig. 4. Graph of the dependence of the efficiency of the air recuperator on the outside temperature.

Как можно видеть из графика 4 эффективность пластинчатого рекуператора воздуха возрастает по мере увеличения температуры наружного воздуха. В целом системы вентиляции с рекуператорами воздуха, с учетом энергии необходимой на работу калорифера, достигают максимальной эффективности при значительных разницах наружной и внутренних температур.

Применение рекуператоров позволяет существенно повысить энергосбережение и тем самым снизить эксплуатационные затраты на функционирование системы вентиляции и кондиционирования воздуха.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного критического анализа систем рекуперации воздуха можно сделать вывод о эффективности их применения в вентиляции, за счет уменьшения необходимых затрат энергии на нагрев приточного воздуха за счет тепла удаляемого воздуха.

2. Проведен анализ конструктивных особенностей воздушных рекуператоров различных типов, определены их особенности, а также определены вентиляционные системы, подходящие для их применения.

3. Проведен анализ формул, применяемых для определения коэффициента полезного действия рекуператоров в зависимости от температур воздуха, энтальпии воздуха, а также сезонной неравномерности температуры наружного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ястребов А.В. Зекин В.Н. Статья «Рекуперация воздуха: виды, принципы работы, функции» Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ» №4 (49) Т.1 Апрель 2022 г.
2. А.С. Ильин Повышение энергетической эффективности систем вентиляции и

кондиционирования объектов ЖКХ» «Сибирский Федеральный Университет», Красноярск, 2017 год.

3. Ю.Д. Сибикин. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха 2015 год.

4. Zaycev O.N. Angeluck I.P., Toporen S.S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698 – 055033.

5. G.B. Gharehpetian. S. Mohammad Mousavi Agah. 2017. Distributed generation systems.

6. Yusuf BaşoğulOnur. Vahip GülerAli Keçebaş. Binary geothermal power plant. Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants, 2021

7. Egorov S. A., Zaycev O. N., Angeluck I.P., Sivachenko Yu. A. Thermodynamic characteristics of the flue gas heat recuperator of a combined autonomous heat generating unit // AIP Conference Proceedings 2434. – 2022. – 020023 <https://doi.org/10.1063/5.0091673>.

8. Н.И.Ватин, М.В. Смотракова, Технико-экономическое обоснование применения систем вентиляции с роторной рекуперацией тепла. Санкт-Петербург 2003 год.

9. И.Ю. Игнаткина. Система рекуперации теплоты с адаптивной рециркуляцией вытяжного воздуха. Вестник ВНИИМЖ №1(33)-2019

10. Вдовичев А.А. Численное исследование теплопереноса и аэродинамики в перекрестно-точном рекуператоре открытого типа // Вестник Евразийской науки. 2022. №2. Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_49089452_31549355.pdf f (дата обращения: 30.08.2022).

REFERENCES

1. Yastrebov A.V. Zekin V.N. Article “Air recovery: types, principles of operation, functions” International scientific journal “BULLETIN OF SCIENCE” No. 4 (49) Vol. 1 April 2022

2. A.S. Ilyin Increasing the energy efficiency of ventilation and air conditioning systems for housing and communal services” “Siberian Federal University”, Krasnoyarsk, 2017.

3. Yu.D. Sibikin. Heating, ventilation and air conditioning 2015.

4. Zaycev O.N. Angeluck I.P., Toporen S.S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698 – 055033.

5. G.B. Gharehpetian. S. Mohammad Mousavi Agah. 2017. Distributed generation systems.

6. Yusuf BaşoğulOnur. Vahip GülerAli Keçebaş. Binary geothermal power plant. Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants, 2021

7. Egorov S. A., Zaycev O. N., Angeluck I.P., Sivachenko Yu. A. Thermodynamic characteristics of the flue gas heat recuperator of a combined autonomous heat generating unit // AIP Conference Proceedings

2434. – 2022. – 020023
<https://doi.org/10.1063/5.0091673>.

8. N.I.Vatin, M.V. Smotrakova, Feasibility study of the use of ventilation systems with rotary heat recovery. St. Petersburg 2003.

9. I.Yu. Ignatkina. Heat recovery system with adaptive exhaust air recirculation. VNIIMZH Bulletin No. 1(33)-2019

10. Vdovichev A.A. Chislennoe issledovanie teploperenosa i aerodinamiki v perekrestno-tochnom rekuperatore otkry'togo tipa [CFD study of heat transfer and aerodynamics in a cross-precision open-type heat exchanger] // Bulletin of Eurasian Science. 2022. №2. Access: elibrary.ru/download/elibrary_49089452_31549355.pdf

CRITICAL ANALYSIS OF EXISTING AIR RECOVERY SYSTEMS

Zaitsev¹ O.N., Angeluck² I.P., Petrenko² D.M.

¹SouthWest State University, 50 Let Oktyabrya Street, 94, Kursk, 305040

²V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea 295050
E-mail: ¹zon071941@mail.ru, ²iliya.angeluck@yandex.ru

Abstract. The article examines existing air recovery schemes, aerodynamic and thermodynamic processes that occur when air flows are mixed in recuperators of various types, provides a critical analysis of the design features of recuperators of various types, as well as opportunities for improvement and development in this area.

Subject: aerodynamic and thermodynamic processes occurring in air recuperators.

Materials and methods: study of existing air recovery schemes based on scientific articles, publications, patents, scientific literature, as well as regulatory legislation in this area.

Results: results were obtained on air recovery schemes, technical characteristics, technological and design features, heat exchange efficiency, as well as the efficiency of various types of recuperators.

Conclusions: a critical analysis of existing air recovery systems in heating and ventilation systems of buildings and structures was carried out, the level of efficiency of these systems, as well as the possibility of improving and developing air recuperators of the most promising types.

Key words: air recovery, aero-, thermo-, thermodynamic processes, improvement.

УДК 697.1

РАСЧЕТ НАПОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ ПОДБОРА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА

Царёва О.С., Андреев А.И.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29
E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

Аннотация. При проектировании систем отопления в частных домах подбор оборудования играет ключевую роль. Использование программного обеспечения увеличивает скорость, повышает эффективность проектирования и экономит средства потребителей.

Предмет исследования. Подбор насосного оборудования с помощью ПО Valtec.PRГ для системы теплого пола в частном одноэтажном доме.

Материалы и методы. При расчете используются унифицированные ограждающие конструкции и наиболее популярное интерьерное решение – окна «в пол» в жилых помещениях. Для расчета был выбран проект одноэтажного частного жилого дома в городе Санкт-Петербург с размерами в осях 13,2мх13,2м. При расчете рассмотрено 3 участка системы напольного отопления. Чтобы определить потери напора на самом нагруженном контуре, необходимо просуммировать потери на участках 1 – 2 – 3, при этом за участок 2 необходимо взять контур с наибольшими потерями напора. Самым нагруженным контуром в данной системе является контур №6 в помещении «Холл». При выборе циркуляционного насоса для системы напольного отопления определяли и две гидравлические характеристики: суммарный расход на всех участках сети и потери напора на самом нагруженном контуре напольного отопления.

Результаты: Проведен расчет системы напольного отопления и подобран циркуляционный насос для частного одноэтажного дома в г. Санкт-Петербург согласно полученным значениям суммарного расхода на всех участках сети и потери напора на самом нагруженном контуре напольного отопления системы.

Выводы. Правильный подбор насоса обеспечивает равномерный тепловой поток и бесперебойную работу системы.

Ключевые слова: водяной теплый пол, индивидуальное жилищное строительство, гидравлический расчет, циркуляционный насос, потери напора, расход.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация в строительстве в наше время достигается за счет применения технологий информационного моделирования. Внедрение программного обеспечения (ПО) в проектирование инженерных систем играет ключевую роль в современной инженерной практике. Это позволяет увеличить эффективность проектирования, сократить время на разработку проектов, повысить точность расчетов и улучшить качество конечного продукта.

Одним из основных направлений внедрения ПО в проектирование инженерных систем является использование специализированных программ для расчета теплотехнических характеристик зданий, гидравлических расчетов систем водоснабжения и отопления, электрических сетей и т.д.

Данные технологии применяются не только при проектировании многоэтажных жилых и промышленных зданий, но и в случае индивидуального жилищного строительства (ИЖС).

Рынок ИЖС в России демонстрирует стремительный рост. В 2021-2022 годах более половины нового жилья в стране было построено в рамках ИЖС. Согласно последним исследованиям, две трети из 61,8 миллионов семей предпочитают проживать в частных домах, что составляет более 40 миллионов частных домовостроений. Эта статистика указывает на значительный потенциал рынка ИЖС

в России и высокий спрос на качественные инженерные проекты с подбором доступного оборудования. [1]

В данной работе было выбрано ПО Valtec.PRГ, поскольку данная программа имеет удобный интерфейс, соответствует требованиям государственных норм и находится в бесплатном доступе [2,3].

Российская компания Valtec производит и поставляет высококачественную и надежную продукцию для сантехники и отопления, включая краны, вентили, трубы, фитинги, насосы и другие комплектующие.

Применение типовых проектов стало менее популярно, и проектировщики сталкиваются с уникальными решениями для каждого объекта. Компанией Valtec разработаны ПО для оптимизации проведения ручных трудоемких расчетов инженерных систем [4].

Целью данной работы является подбор циркуляционного насоса с помощью ПО Valtec.PRГ для системы теплого пола в частном одноэтажном доме.

При расчете используются унифицированные ограждающие конструкции и наиболее популярное интерьерное решение – окна «в пол» в жилых помещениях. Помимо вышеуказанных исходных данных актуальность работы подтверждается доступностью выбранного ПО.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В работе [5] проведено исследование по оптимизации утепления наружных стен на примере частных жилых домов Московского региона. Получена формула оптимальной толщины утепления.

В статье [6] рассматриваются критерии оценки теплоэнергоэффективности частного жилого дома с применением современных средств инструментального контроля. Авторами выявлены основные характеристики зданий, влияющие на теплотехнические качества ограждающих конструкций. В заключении работы приведены выводы по теплотехническому исследованию объекта.

В работе [7] выполнен экономический анализ систем водяного и электрического теплых полов методом совокупных затрат на примере помещений площадью 5, 10 и 20 м² в г. Москва. Сделан вывод о том, что срок окупаемости напольной системы отопления зависит от площади помещения, а также, что для малых площадей целесообразнее применять электрический теплый пол.

В статье [8] рассматривается выбор оптимального теплого пола для жилых помещений, учитывая различные аспекты, такие как тип пола, его мощность, и совместимость с напольными покрытиями.

В работе [9] рассматривается вопрос выбора между двумя типами отопления: электричество и вода с точки зрения экономической целесообразности. Водяной теплый пол, как правило, требует больших первоначальных затрат на установку, но может быть более экономичным в эксплуатации за счет низкой температуры теплоносителя. Электрический теплый пол, в свою очередь, может быть дешевле в установке, но его эксплуатация может обходиться дороже, особенно в больших помещениях.

В статье [10] рассмотрено влияние изменений параметров микроклимата на самочувствие человека, а также на строительные конструкции зданий, проанализированы микроклиматические параметры и факторы, влияющие на внутреннюю среду, приведены нормативные показатели и санитарные нормы. Выявлены условия, негативно и позитивно воздействующие на организм человека, а также продемонстрировано влияние параметров микроклимата на элементы строительных конструкций и здания в целом. На основе проведенного анализа продемонстрирована необходимость поддержания микроклимата жилых и общественных помещений в пределах нормы.

В статье [11] представлено фундаментальное теоретическое исследование, проведенное для понимания влияния автоматизации системы напольного отопления в помещении на теплопередачу в зависимости от условий окружающей среды. Рассматриваемый физический процесс математически описан с учетом турбулентной естественной конвекции и поверхностного теплового излучения внутри заполненного воздухом помещения с панорамным окном.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для расчета был выбран проект одноэтажного частного жилого дома в городе Санкт-Петербург с размерами в осях 13,2мх13,2м. В части объемно-планировочных решений приняты следующие помещения: 2 спальни, кухня-гостиная, кабинет, 2 санузла и котельная. Была запроектирована система водяного теплого пола во всех помещениях здания (Рис. 1):



Рис. 1. План напольного отопления
Fig. 1. Floor heating plan

Для разводки контуров системы теплого пола используются металлопластиковые трубы диаметром 16x2,0 мм, для магистралей от циркуляционного насоса до коллектора теплого пола – трубы диаметром 26x3,0 мм.

Для того, чтобы подобрать циркуляционный насос для системы напольного отопления, необходимо определить две гидравлические характеристики: Q – суммарный расход на всех участках сети и H – потери напора на самом нагруженном контуре напольного отопления.

Перед тем, как приступить к расчетам, необходимо разбить систему на несколько расчетных участков, чтобы потом занести все необходимые данные в программу Valtec.

Расчетные участки системы напольного отопления:

1. Участок от циркуляционного насоса до коллектора напольного отопления.
2. Один контур напольного отопления.
3. Участок от коллектора напольного отопления до циркуляционного насоса.

Чтобы определить потери напора на самом нагруженном контуре, необходимо просуммировать потери на участках 1 – 2 – 3, при этом за участок 2 необходимо взять контур с наибольшими потерями напора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Определение гидравлических характеристик:
В разделе гидравлика выбираем подраздел «Гидравлика», через кнопку «Добавить» создаем участки расчетной системы (Рис. 2):

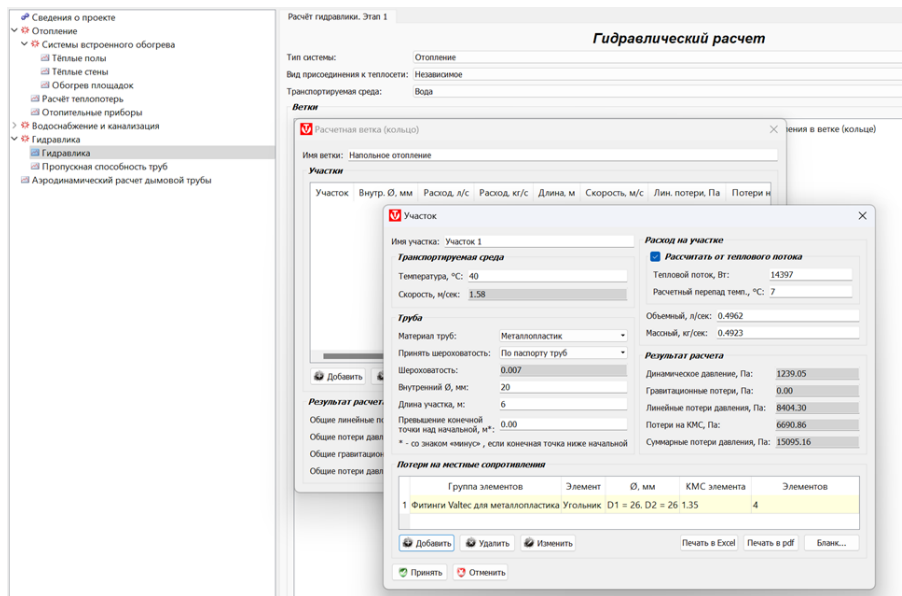


Рис. 2. Создание расчетных участков в разделе “Гидравлика”
Fig. 2. Creation of rated sections in the "Hydraulics" section

Участок 1 и Участок 3 – это подающая и обратная магистрали от насоса, на данных участках будет наибольший расход жидкости, он составляет 0,50 л/с (Рис. 3):

Участок	Внутр. Ø, мм	Расход, л/с	Расход, кг/с	Длина, м	Скорость, м/с	Лин. потери, Па	Потери на КМС, Па	Гравитационные потери, Па
1 Участок 1	20	0.50	0.49	6.00	1.58	8404.30	6690.86	0.00
2 Участок 3	20	0.50	0.49	6.00	1.58	8575.57	6690.86	0.00

Рис. 3. Расчетные характеристики участков 1 и 3
Fig. 3. Calculated characteristics of sections 1 and 3

Суммарные потери давления составили 30361 Па (Рис. 4):

Гидравлический расчет

Тип системы: Отопление
 Вид присоединения к теплотрассе: Независимое
 Транспортируемая среда: Вода

Ветки

Ветка	Количество участков, шт	Общие потери давления в ветке (кольце)
1 Напольное отопление (магистраль)	2	30361.60

Рис. 4. Общие потери давления в магистралях
 Fig. 4. Total pressure losses in pipelines

Участок 2 – это наиболее нагруженный контур напольного отопления.

Данные для расчета Участка 2 возьмем из расчета водяных теплых полов из раздела «Тёплые полы» в ПО Valtec (Рис. 5):

Расчёт водяных тёплых полов

Помещения

№	Наименование помещения	Площадь ОЗ, м2	Шаг ОЗ, см	Площадь КЗ, м2	Шаг КЗ, см	Тепловой поток в помещении, Вт
1	1. Мастер-спальня	17.850	15.000	0.000	0.000	1424.430
2	10. Гардероб	5.590	15.000	0.000	0.000	534.572
3	2. Кухня-гостиная	58.280	15.000	0.000	0.000	4650.744
4	3. Кабинет	13.200	15.000	0.000	0.000	1053.360
5	4. Котельная	13.200	15.000	0.000	0.000	1262.316
6	5. Прихожая	13.080	15.000	0.000	0.000	1250.840
7	6. Холл	10.680	15.000	0.000	0.000	1021.328
8	7. Спальня	17.850	15.000	0.000	0.000	1424.430
9	8. Ванная	4.760	10.000	0.000	0.000	250.662
10	9. С/У	10.000	10.000	0.000	0.000	526.600

Рис. 5. Расчет водяных теплых полов
 Fig. 5. Calculation of water underfloor heating

Гидравлический расчет

Тип теплоносителя: Вода
 Помещение: 6. Холл
 Расчётный перепад температур: 7.00
 Общая длина (нетто) труб ТП, м: 71.20

Петли

Помещение	№ петли	Длина нетто, м	Нагрузка, Вт	Расход, кг/с	Скорость, м/с	Кол. соед., шт	ΔР, Па	№ колл.
1 6. Холл	16	72.800	1114.441	0.038	0.339	0	14711.242	1

Рис. 6. Данные самого нагруженного контура теплого пола
 Fig. 6. Data of the most loaded underfloor heating circuit.

Самым нагруженным контуром в данной системе является контур №6 в помещении «Холл» (Рис. 6).

Потери давления на данном участке составляют 14711 Па.

Суммарные потери напора на самой нагруженной ветке:

$$H = 30361 + 14711 = 45072 \text{ Па} \text{ или } 4,59 \text{ м вод. ст.}$$

Максимальный расход (Рис. 7):

$$Q = 0,49 \text{ л/с}$$

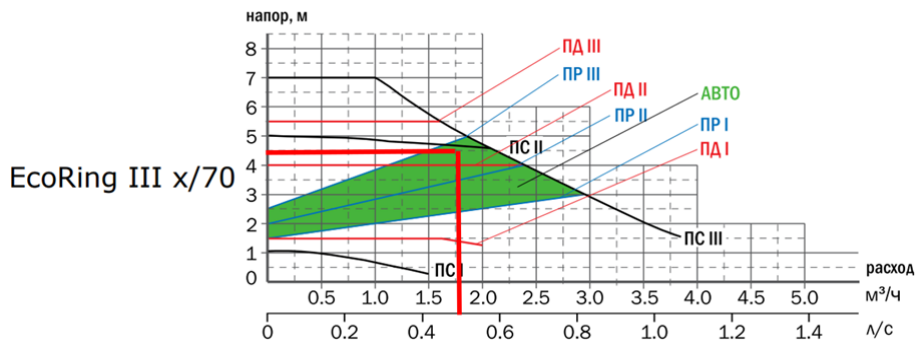


Рис. 7. График работы циркуляционного насоса
 Fig. 7. Operating schedule of the circulation pump

У каждого циркуляционного насоса в паспортных данных есть напорная характеристика ($Q-H$).

Чтобы определить рабочую точку насоса, необходимо соединить две точки $Q-H$ на графике, в данном случае насос будет работать в автоматическом режиме (режим работы с пропорциональным изменением давления в зависимости от расхода).

Согласно п. 7.4.1. паспорта насоса Zota EcoRing III [12]:

7.4.1. В отличие от режимов пропорционального регулирования, выбор линии пропорционального регулирования осуществляется насосом автоматически на основе анализа работы системы на протяжении одной недели. Если насос подобран правильно, и требуемый расход контура, в котором установлен насос, находится в зоне автоматического выбора кривой регулирования, то насос самостоятельно выберет наиболее оптимальную кривую пропорционального регулирования для данных условий эксплуатации.

ВЫВОДЫ

В результате работы для частного одноэтажного дома в г. Санкт-Петербург был подобран циркуляционный насос Zota EcoRing III согласно рассчитанным параметрам системы. Правильный подбор насоса обеспечивает равномерный тепловой поток и бесперебойную работу системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг М. Свой дом в эпоху перемен: есть ли будущее за ИЖС. Режим доступа: <https://realty.rbc.ru/news/6524ff3a9a7947b2b43d4ca6> (дата обращения: 11.03.2024).
2. Гатин А.Д. Использование программы «Valtec» при теплотехнических и гидравлических расчетах // Избранные доклады 64-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. 2018. С. 769-773.
3. Нелюбов А.А., Портнов В.В., Применение программ Valtec для проектирования и расчетов теплотехнических систем // Физикотехнические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения. Труды 23-й научно-технической конференции. Воронеж, 2021. 2021. С. 64-68.
4. VALTEC.PRГ.3.1.3. Программа для теплотехнических и гидравлических расчетов. Режим доступа: <https://valtec.ru/document/calculate/#VALTEC.PR> (дата обращения: 11.03.2024).
5. Окунев А.Ю., Оптимизация утепления наружных стен на примере частных жилых домов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1. С. 126-139.
6. Логинова Е.В., Евдокименко М.О., Оценка теплоэнергоэффективности ограждающих конструкций частного жилого дома // Вестник

Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2017. № 20. С. 26-31.

7. Базунов Е.П., Кравчук В.Ю., Экономическое сравнение электрических и водяных теплых полов // Строительство: наука и образование. 2021. № 11 (1). С. 15-23.

8. Королева А.Н., Выбор оптимального теплого пола для жилых помещений // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : мат. I Национальной науч.-практ. конф. с Междунар. участием. Саратов, 2019. С. 48–51.

9. Кантаков Р.Г., Экономическое сравнение водяного и электрического панельного отопления для жилого помещения // Дни студенческой науки: сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов Института инженерно-экологического строительства и механизации НИУ МГСУ. М., 2019. С. 354–358.

10. Умеренкова Э.В., Умеренков Е.В., Насонова А.А., Голобоков А.С. Влияние системы «теплый пол» на параметры микроклимата помещения // Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения : сб. науч. статей Международной научно-практ. конф. Курск, 2019. С. 180–182.

11. Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A., Chen Yu-Bin, Chang Jui-Yung. Automation of the heated floor system in a room under the influence of ambient conditions // Applied Thermal Engineering. 2021, vol. 196, pp. 117298 DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117298

12. Паспорт насоса Zota EcoRing III. Режим доступа:

https://zota.ru/static/uploaded/documentation/entries/files/Nasos_ZOTA_EcoRING_11-10-2024.pdf (дата обращения 05.08.2025)

REFERENCES

1. Gol'dberg M. Your home in an era of change: is there a future for individual housing construction. <https://realty.rbc.ru/news/6524ff3a9a7947b2b43d4ca6> (date of access: 11.03.2024). (In Russian).
2. Gatin A.D. Using the Valtec program in heat engineering and hydraulic calculations. *Izbrannye doklady 64-j universitetskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i molodyh uchenyh.* 2018. pp. 769-773. (In Russian).
3. Neljubov A.A., Portnov V.V., Using Valtec programs for designing and calculating heat engineering system. *Fizikotekhnicheskie problemy jenergetiki, jekologii i jenergoresursosberezhenija.* Trudy 23-j nauchno-tehnicheskoy konferencii. Voronezh, 2021. pp. 64-68. (In Russian).
4. VALTEC.PRГ.3.1.3. Program for heat engineering and hydraulic calculations. Access mode: <https://valtec.ru/document/calculate/#VALTEC.PR> (date of access: 11.03.2024). (In Russian).
5. Okunev A.Ju., Optimization of external wall insulation using private residential buildings as an example. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo*

arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2019. No. 1, pp. 126-139. (In Russian).

6. Loginova E.V., Evdokimenko M.O., Assessment of thermal and energy efficiency of enclosing structures of a private residential building. Vestnik Hakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova. 2017. No. 20, pp. 26-31. (In Russian).

7. Bazunov E.P., Kravchuk V.Ju., Economic comparison of electric and water-heated floors. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2021. No 11 (1), pp. 15-23. (In Russian).

8. Koroleva A.N., Selection of the optimal underfloor heating for residential premises. Innovations in nature management and environmental protection: proc. I National scientific-practical. conf. with International. participation. Saratov, 2019. pp. 48–51. (In Russian).

9. Kantakov R.G., Economic comparison of water and electric panel heating for residential premises. Days of student science: collection of reports of scientific-technical. conf. based on the results of research work of

students of the Institute of Environmental Engineering and Mechanization of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering. Moscow, 2019. pp. 354–358. (In Russian).

10. Umerenkova Je.V., Umerenkov E.V., Nasonova A.A., Golobokov A.S. The influence of the "warm floor" system on the parameters of the indoor microclimate. Modern problems in construction: setting tasks and solutions: collection of scientific articles from the International Scientific and Practical Conf. Kursk, 2019. pp. 180–182. (In Russian).

11. Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A., Chen Yu-Bin, Chang Jui-Yung. Automation of the heated floor system in a room under the influence of ambient conditions. Applied Thermal Engineering. 2021, vol. 196, pp. 117298 DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117298

12. Passport of the Zota EcoRing III pump. https://zota.ru/static/uploaded/documentation/entries/files/Nasos_ZOTA_EcoRING_11-10-2024.pdf (date of access: 05.08.2025). (In Russian).

CALCULATION OF UNDERFLOOR HEATING FOR SELECTING A CIRCULATION PUMP

Tsareva O.S., Andreev A.I.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Rusinternal territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Politekhnikeskaya st., 29, litera B, tsareva_os@spbstu.ru

Abstract: When designing heating systems in private homes, the selection of equipment plays a key role. The use of software increases the speed, improves the efficiency of design and saves consumers' money.

The subject of the study. Selection of pumping equipment using Valtec.PRG software for a heated floor system in a private one-story house.

Materials and methods. The calculation uses standardized enclosing structures and the most popular interior solution - floor-to-ceiling windows in residential premises. For the calculation, a project of a one-story private residential building in St. Petersburg with dimensions in axes of 13.2 m x 13.2 m was selected. In the calculation, 3 sections of the underfloor heating system were considered. To determine the pressure loss on the most loaded circuit, it is necessary to sum up the losses in sections 1 - 2 - 3, while section 2 should be taken as the circuit with the greatest pressure loss. The most loaded circuit in this system is circuit No. 6 in the "Hall" room. When selecting a circulation pump for an underfloor heating system, two hydraulic characteristics were determined: the total flow rate in all network sections and pressure losses in the most loaded underfloor heating circuit.

Results. The underfloor heating system was calculated and a circulation pump was selected for a private one-story house in St. Petersburg according to the obtained values of the total flow rate in all network sections and pressure losses in the most loaded underfloor heating circuit of the system.

Conclusions. Correct selection of the pump ensures uniform heat flow and uninterrupted operation of the system.

Keywords: water underfloor heating, individual housing construction, hydraulic calculation, circulation pump, pressure losses, flow rate

УДК 624.042.8; 624.074.438

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БУНКЕРОВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Чемодуров В. Т., Литвинова Э. В.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»
295493, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181
Chens_mu1@mail.ru, EllaLit@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен расчет бункера сыпучих материалов при динамических нагрузках. Этот расчет является опорным для оценки прочности конструкции в условиях возможного землетрясения. Показано, что в условиях землетрясений такие конструкции не выдерживают нагрузки, возникающие в процессе колебаний. Применение математических методов дает возможность подобрать как толщину обечайки бункера, так и параметры ребер подкрепления, которые, в совокупности, дают значительный экономический эффект, заключающийся в том, что конструкция выдержит любые колебания, свойственные заданной бальности движения грунта. В настоящее время все большее применение находят методы математического моделирования для выбора таких значений параметров устройств, которые в состоянии обеспечить прочность, устойчивость и долговечность конструкции для самых неблагоприятных условий ее эксплуатации. Необходимо отметить, что расчеты на прочность цилиндрических бункеров сыпучих материалов от воздействия возможных землетрясений (что характерно для Крыма) не проводились. В статье предложен алгоритм расчета на прочность цилиндрического бункера с учетом действия сейсмической нагрузки. Рассматриваются сдвиговые деформации и колебания конструкции для возможных землетрясений вплоть до 9 баллов.

Предмет исследования. Изучение напряженно-деформируемого состояния оболочки бункера при нестационарном динамическом воздействии.

Материалы и методы. Разработка моделей колебательного процесса цилиндрических тонкостенных объектов и их исследование в плане обеспечения прочности и устойчивости. Моделирование колебательных процессов опирается на известные методы, принятые на практике.

Результаты. В результате анализа различных математических моделей колебания баков с сыпучим материалом мы получили перемещения точек системы. Имея эти данные легко определяются внутренние усилия в цилиндрической обечайке при динамических нагрузках.

Выводы. При анализе реакции конструкций, заполненных сыпучим материалом, следует кроме расчета по формам их изгиба как балки с бесконечным числом степеней свободы также учитывать и расчет их местной деформации стенок, влияющей на образование присоединенных масс вмещающей в них жидкости.

Ключевые слова: динамическая прочность цилиндрических бункеров, сейсмические нагрузки, формы колебаний, цилиндрическая обечайка бункера, материальный стержень с бесконечным числом степеней свободы.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей при проектировании сооружения, конструкции или механизма является выбор его параметров и характеристик, которые должны обеспечить наилучшие показатели его качества (надежность, долговечность, минимальные затраты как на создание, так и в процессе эксплуатации). Сочетание требований по качеству сооружения, его эксплуатационных показателей и, в тоже время, неизбежных ограничений на ресурсы приводит к решению многочисленных вариантов проектируемой конструкции. В настоящее время неизменным инструментом в процессе проектирования сооружений и механизмов выступают методы системного анализа, которые позволяют, в зависимости от потребностей, применять те или иные методы оптимизации для получения «идеального» облика создаваемой конструкции [1].

Как правило в условиях ограниченных ресурсов целевой функцией в процессе исследования выступает масса конструкции, которая практически напрямую влечет за собой стоимость объекта. Добиться минимизации массы конструкции

позволяет строгий инженерный подход к выбору варьируемых (как правило конструктивных) параметров.

Важным при разработке математической модели функционирования любого объекта является выбор функциональных ограничений, как правило, прочностных. При этом прочностные характеристики и их ограничивающие функции впервые будут связаны с возможными сейсмическими нагрузками. Стойкость цилиндрических бункеров к сейсмическим воздействиям в руководящих документах по проектированию таких сооружений отсутствует.

При разработке бункеров для хранения сыпучих веществ и материалов методы оптимизации их параметров не используются [2]. Расчеты проводятся согласно расписанным инструкциям только на статическую нагрузку, в которой фиксируются возможные ее значения. В настоящее время все большее применение находят методы математического моделирования для выбора таких значений параметров устройств, которые в состоянии обеспечить прочность, устойчивость и долговечность конструкции для самых неблагоприятных условий ее эксплуатации.

Необходимо отметить, что расчеты на прочность цилиндрических бункеров сыпучих материалов от воздействия возможных землетрясений (что характерно для Крыма) не проводились.

В статье предложен алгоритм расчета на прочность цилиндрического бункера с учетом действия сейсмической нагрузки. Рассматриваются сдвиговые деформации и колебания заполненной конструкции при возможных землетрясениях вплоть до 9 баллов.

Цель исследования – разработка математического аппарата для выбора оптимальных параметров конструкции бункера сыпучих материалов, отвечающего требованиям прочности и устойчивости при наличии динамических нагрузок. При этом анализу подлежит только цилиндрическая обечайка бункера.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В [2] при проектировании строительной части силосов для расчета прочности и жесткости конструкции, а также для определения необходимости расчета стен на выносливость и многократное повторение нагрузок, на температурные воздействия, для учета абразивности и агрессивности сыпучего материала следует указывать:

а) удельный вес (плотность), угол внутреннего трения и коэффициент трения сыпучего материала о материал стены; вместимость силосов;

б) характеристику режима эксплуатации силосов (число, частоту и продолжительность циклов загрузки и разгрузки);

в) температуру сыпучего материала во время его загрузки и выгрузки из силоса, а также коэффициент теплопроводности и теплоемкость;

г) модуль сжатия и коэффициент Пуассона сыпучего материала;

д) степень абразивности и агрессивности сыпучего материала.

Свод правил [3] устанавливает правила проектирования и распространяется на стальные вертикальные цилиндрические силосы для хранения сыпучих продуктов объемом до 30000 м³ с плоским днищем на фундаменте и до 2000 м³ с плоским и коническим днищем на опорной конструкции, не устанавливает требований к проектированию стальных вертикальных цилиндрических силосов для районов с повышенной сейсмической активностью.

В [4] проведен анализ известных теоретических и экспериментальных исследований задачи устойчивости тонколистовых оболочек цилиндрических бункер. Рассмотрены вопросы: устойчивости стенки спирально-навивного зернобункера и цилиндрического зернобункера с гладкой стенкой, сжатой силами трения зерна и нагрузкой от крыши; устойчивости стенки цилиндрической оболочки емкостей для жидких и сыпучих материалов при создании в них предварительного напряжения.

В [5] отражены основные понятия процесса функционирования емкостей стационарного типа. Рассматриваемым вопросам посвящены работы таких специалистов, как Богомяких В.А., Боуманс Г., Буренин П.Д., Варламов А.В., Горюшинский В.С., Гячев Л.В., Дженике Э.В., Зенков Р.Л., Рогинский Г.А., Степанов А.Л., Третьяков Г.М. и др.

Для различных конструктивных элементов и моделей методы могут быть различными. Правильный выбор модели и метода оптимизации являются залогом эффективности получения оптимального решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из всего многообразия принятых в теории колебаний математических моделей для изучения динамики сдвиговых процессов выберем классический способ, основанный на колебании стержня с распределенной по его массе. Сопrotивляемость сдвиговым деформациям определяется прочностными характеристиками материала и моментом инерции сечения бункера (то есть его формы в плане).

Из всего многообразия возможных динамических нагрузок, действующих на строительные конструкции, в данной статье основной упор сделан на нагрузки, которые могут возникнуть в результате сдвиговых деформаций поверхности земли в процессе землетрясения.

Любое сооружение нужно рассматривать как связанный с грунтом физический объект, который во время землетрясения находится в неинерциальной системе координат под воздействием всей совокупности внешних и внутренних сил и сил инерции, появляющихся в этой системе. Реакция сооружения на воздействия определяется реальными геофизическими условиями и свойствами конкретного объекта. Они и определяют фактическую сейсмостойкость сооружения [7-8].

Наиболее важным при динамических расчетах в условиях сейсмике является определение возмущающей нагрузки. В настоящее время широкое распространение получили нагрузки в виде импульсов, которыми аппроксимируют записи реальных колебаний грунта [9]. Примем в качестве внешнего воздействия на исследуемый объект импульс Берлаге, который описывается уравнением

$$J = Ft = A_b t e^{-ct} \sin(2\pi\omega t). \quad (1)$$

Здесь: A_b , c и ω – коэффициенты, определяемые характером и интенсивностью землетрясения. Исходя из принятого импульса внешнего воздействия, определим поперечную силу, приложенную к изучаемому объекту

$$F = A_b e^{-ct} \sin(2\pi\omega t) = m_s \frac{d^2 y_0}{dt^2} = Q. \quad (2)$$

Здесь m_s – суммарная масса бака с сыпучим наполнителем, y_0 –перемещение грунта вместе с объектом.

Коэффициент A_b зависит от ряда переменных факторов. Его можно подобрать, руководствуясь выражением (1), интегрируя горизонтальные перемещения основания рассматриваемой конструкции

$$\frac{d^2 y_0}{dt^2} = \frac{A_b}{m_s} e^{-ct} \text{Sin}(2\pi\omega t). \quad (3)$$

При решении уравнения (3) необходимо руководствоваться данными таблицы 1.

Таблица 1. Максимумы колебаний поверхности земли, соответствующие интенсивности землетрясений
Table 1. Ground surface vibration maxima corresponding to earthquake intensity

Интенсивность в баллах	Ускорение грунта (м/с ²)	Скорость колебаний грунта (м/с)	Смещение маятника сейсмографа (мм)
6	0,3 – 0,6	0,03 – 0,06	1,5 – 3,0
7	0,6 – 1,2	0,06 – 0,12	3,0 – 6,0
8	1,2 – 2,4	0,12 – 0,24	6,0 – 12,0
9	2,4 – 4,8	0,24 – 0,48	12,0 – 24,0

Считаем, что вместе с грунтом происходит движение основания конструкции. При этом (за счет инерционных сил) возникают колебания объекта исследования. При определении колебательного движения конструкции по ее высоте целесообразно принять ее модель в виде стержня с распределенной массой. Такая система имеет бесконечное число степеней свободы.

Рассмотрим модель потери устойчивости оболочки цилиндрического резервуара в упругой области его деформаций [10-11].

Из практики известно, что наиболее точное решения задачи о колебании упругих систем можно получить, если рассматривать сооружение с непрерывно распределенными по длине конструкции массами. Бункера сыпучих грузов неплохо вписываются в данную категорию сооружений, которые не имеют по своей длине точечных нагрузок. В этом случае бункер (в виде цилиндрического бака) рассматривается как система, нагруженная бесконечно малыми массами, равномерно распределенными по высоте резервуара. В соответствие с этим примем конструкцию цилиндрического бункера в виде материального стержня с бесконечным числом степеней свободы. Действительно, такая схема наиболее удачно имитирует бак с полностью нагруженным объемом сыпучим наполнителем. Его сопротивляемость на изгиб определяется моментом инерции поперечного сечения. Естественно, чем больше радиус обечайки бункера, тем меньше оказываются напряжения в его оболочке.

Известно, что, упругое тело с распределенными массами по его длине имеет неограниченное число степеней свободы, то есть неограниченное число перемещений точек конструкции. Следовательно, колебание конструкции такого тела представляет собой сумму неограниченного числа простых гармонических колебаний (главных колебаний). При этом, каждое главное колебание характеризуется своей формой, периодом колебаний и наличием узлов, то есть таких точек, которые остаются неподвижными в процессе колебаний.

Форма колебания с наименьшим числом узлов соответствует колебанию первого тона и имеет наименьшую частоту. Последующие формы колебаний тела с распределенной массой характерны тем, что увеличивается частота их колебаний, а влияние на общие перемещения точек тела резко снижается. Поэтому часто при практических расчетах ограничиваются тремя формами главных колебаний.

Форму главного колебания представляют в виде функции координат точек тела. Эту функцию представляют таким образом, чтобы перемещение какой-либо точки равнялось единице. Эту точку называют точкой приведения. Ее перемещение принимают в качестве обобщенной координаты. С этой точкой связывают приведенные массы, жесткости и силы.

Общий порядок динамического расчета тел, моделируемых в виде балок [6, 13].

1. Устанавливается степень точности принятия решения для заданной конструкции.

2. Выбирается вид перемещения точек балки: поперечные, продольные или крутильные. На практике эти колебания рассматриваются раздельно.

3. Определяются функции форм колебаний f_n и соответствующих им частот и периодов λ_n, τ_n . Необходимо удостовериться в отсутствие резонанса.

4. Вычисляются вынужденные колебания при каждой форме f_n .

5. Находят максимальные значения суммарных вынужденных колебаний.

Пусть f_n известны. Одну из точек на балке принимают за точку приведения. Перемещение этой точки равно единице и является обобщенной координатой. Для нее находят приведенные параметры: массы, жесткости и приведенной силы:

$$m_{np} = \int_0^l m_0 f_n^2 dx,$$

$$C_{\text{прн}} = EJ \int_0^l (f_n'')^2 dx,$$

$$\Phi_{\text{прн}} = F \int_0^l f_n dx.$$

Частота колебаний и период каждой формы колебаний определяются по формулам:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{C_{\text{пр}}}{m_{\text{пр}}}}, \quad \tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}}}.$$

Для точного решения задачи о колебаниях упругих систем необходимо рассматривать сооружение с непрерывно распределенными по длине сооружения массами [6, 12].

Представим цилиндрический бак с сыпучим наполнителем в виде стержня с равномерно распределенной массой по его длине и жестким креплением на одном конце (рисунок 1).

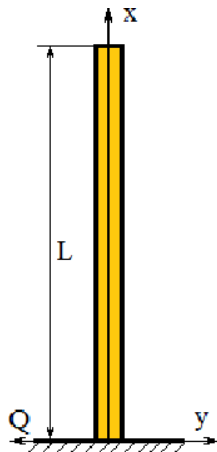


Рис. 1. Схема модели цилиндрической обечайки бункера с распределенной по ее высоте массой

Fig. 1. Diagram of the model of the cylindrical shell of the bunker with the mass distributed over its height

Дифференциальное уравнение равновесия стержня постоянного сечения имеет вид

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x). \quad (4)$$

Здесь: E – модуль упругости материала цилиндрического бака; J – его момент инерции. Ось x является вертикальной осью цилиндрического бака; ось y – поперечная ось; $F(x)$ – интенсивность внешней нагрузки по длине бака. Рассматривается нагрузка, меняющаяся во времени. В этом случае учтем силу инерции $m_0 \ddot{y}$ (m_0 – погонная масса). Тогда уравнение (4) примет вид

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x) - m_0 \ddot{y}.$$

При свободных колебаниях бака $F(x) = 0$, тогда

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) дополним граничными условиями конкретной конструктивной схемы:

$$\left. \begin{aligned} \text{При } x = 0: \quad & y = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0; \\ \text{при } x = l: \quad & \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Начальные условия обычно принимаются нулевыми. Уравнение (5) решается методом разделения переменных. Представим

$$y(x, t) = q(t) \cdot f(x). \quad (7)$$

Подстановка (7) в (5) дает следующий результат

$$\frac{EJ}{m_0} \frac{f^{IV}}{f} = -\frac{\ddot{q}}{q} = \lambda^2 \quad (8)$$

Левая часть равенства (8) зависит только от координаты x , правая – от времени. λ^2 – постоянная величина. Уравнение (8) запишем в виде двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{q} + \lambda^2 q &= 0, \\ \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} - \frac{\lambda^2 m_0}{EJ} f &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Первое уравнение (9) – уравнение свободных колебаний системы с одной степенью свободы, определяющее простые гармонические колебания с частотой λ . Второе уравнение (9) определяет форму свободных колебаний f , соответствующую частоте λ .

Обозначим множитель

$$\frac{\lambda^2 m_0}{EJ} = \beta^4,$$

тогда будем иметь

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} - \beta^4 f = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид

$$f(x) = C_1 \cdot \sin(\beta x) + C_2 \cdot \cos(\beta x) + C_3 \cdot \text{sh}(\beta x) + C_4 \cdot \text{ch}(\beta x). \quad (11)$$

Так как упругие тела с распределенной массой имеют неограниченное число степеней свободы, то есть неограниченное число возможных перемещений точек системы, то в этом случае колебательное движение упругого тела представляет собой неограниченную сумму простых гармонических (главных) колебаний

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} (q_n \cdot f_n).$$

Каждое главное колебание характеризуется своей формой и периодом колебаний. Как показывает практика, с ростом числа n влияние главных колебаний на общее состояние упругой

системы резко уменьшается. Иногда даже ограничиваются одной первой формой колебания.

Запишем уравнение (11) для n -ой формы

$$f_n(x) = \sin(\beta_n x) + C_2 \cos(\beta_n x) + C_3 \operatorname{sh}(\beta_n x) + C_4 \operatorname{ch}(\beta_n x).$$

Для определения постоянных коэффициентов используем граничные условия (6). Получим следующую зависимость:

$$f_n(x) = \left. \begin{aligned} & \frac{(\operatorname{sh}(\beta_n l) + \sin(\beta_n l))(\operatorname{ch}(\beta_n x) - \cos(\beta_n x))}{\operatorname{ch}(\beta_n x) + \cos(\beta_n x)} - \\ & - \frac{(\operatorname{ch}(\beta_n l) + \cos(\beta_n l))(\operatorname{sh}(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))}{\operatorname{ch}(\beta_n x) + \cos(\beta_n x)}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Выберем точку приведения на свободном конце стержня. В этой точке $f_n(x) = 1$. Для этого разделим уравнение (12) на $f_n(\beta_n l)$. Получим:

$$f_n(x) = \left. \begin{aligned} & \frac{(\operatorname{sh}(\beta_n l) + \sin(\beta_n l))(\operatorname{ch}(\beta_n x) - \cos(\beta_n x))}{2(\operatorname{ch}(\beta_n l) \cdot \sin(\beta_n l) - \operatorname{sh}(\beta_n l) \cdot \cos(\beta_n l))} - \\ & - \frac{(\operatorname{ch}(\beta_n l) + \cos(\beta_n l))(\operatorname{sh}(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))}{2(\operatorname{ch}(\beta_n l) \cdot \sin(\beta_n l) - \operatorname{sh}(\beta_n l) \cdot \cos(\beta_n l))}. \end{aligned} \right\}$$

Уравнение частоты рассматриваемой схемы имеет вид

$$\operatorname{ch}(\beta_n l) \cdot \cos(\beta_n l) = -1.$$

Корни этого уравнения (для первых трех форм колебаний):

$$\beta_1 l = a_1 = 1,88; \beta_2 l = a_2 = 4,69; \beta_3 l = a_3 = 7,85.$$

Теперь легко получить основные параметры колебаний: частоты собственных колебаний, приведенные массы, жесткости и внешнее воздействие. В дальнейшем ограничимся первыми тремя формами колебаний системы.

Теперь общее решение колебания упругой системы с распределенной массой можно записать в виде

$$y = \sum_{n=1}^3 y_n(x, t) = \sum_{n=1}^3 q_n(t) f_n(x).$$

Перемещения $q_n(t)$ находятся из решения уравнения

$$m_{\text{пр}} \cdot \ddot{q}_n + C_{\text{пр}n} \cdot q_n = \Phi_{\text{пр}n}.$$

Рассмотрим бункер, имеющий высоту $H = 10$ м, диаметр $D = 5$ м, площадь основания $A = 19,6$ м², внутренний объем $W = 196$ м³. Осевой момент инерции бункера зависит от толщины его стенки (δ) и определяется по формуле:

$$J = 0,05D^4 \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right), \quad \text{где } d = D - 2,0 * \delta.$$

Определимся с массовыми характеристиками бункера. Удельная плотность корпуса бункера $\rho_k = 7870$ кг/м³, плотность насыпного материала $\rho_n = 700$ кг/м³. В этом случае погонная масса внутреннего наполнителя бункера $m_{\text{но}} = \rho_n * A =$

колебаний. При этом первый коэффициент приведем к единице

13720 кг/м. Погонная масса обечайки бункера будет существенно зависеть от ее толщины. Площадь поперечного сечения кольца

$$A_k = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \approx \pi D \delta.$$

Поэтому $m_{k0} = \rho_k A_k \approx \rho_k \pi D \delta$ кг/м. Суммарная погонная масса системы $m_{s0} = m_{k0} + m_{\text{но}}$.

Для первых трех форм колебаний:

$$\Phi_{\text{пр}1} = 0,412Fl; \Phi_{\text{пр}2} = 0,173Fl; \Phi_{\text{пр}3} = 0,142Fl.$$

Рассмотрим задачу анализа прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки. При изгибе цилиндрической оболочки в ней возникают:

– радиальные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{M}{\pi r^2 \delta_0}. \quad (13)$$

– кольцевые напряжения

$$\sigma_2 = \frac{g \rho l r}{\delta_0}.$$

Доминирующими являются радиальные напряжения.

При динамическом расчете определяется максимальное поперечное перемещение выбранной модели бака с материалом u_{max} и рассчитывается изгибающий момент

$$M = \frac{3EJ u_{\text{max}}}{l^2}. \quad (14)$$

После подстановки выражения (14) в (13) получим условие прочности цилиндрической обечайки

$$\sigma_1 = \frac{3EJy_{max}}{\pi l^2 r^2 \delta_0} \leq [\sigma].$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Результат расчета реакции цилиндрического бака с сыпучим наполнителем, с равномерно распределенными по длине сооружения массами, на сейсмическое воздействие показан на рисунке 2. На данном рисунке представлена тенденция изгиба оболочки цилиндрического бака при его колебании

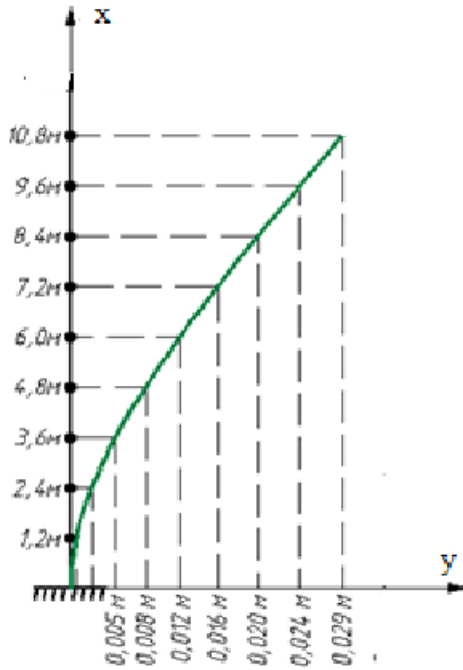


Рис. 2. Реакция цилиндрического бака с сыпучим наполнителем на сейсмическое воздействие
Fig. 2. Reaction of cylindrical tank with loose filler to seismic impact

На рисунке 3 графически показано изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины. Как видно, что внешнее воздействие движения земной поверхности приводят к внутренним усилиям, которые не превышают критические значения для стальных оболочек, у которых допускаемые напряжения равны $[\sigma] = 160$ (МПа).

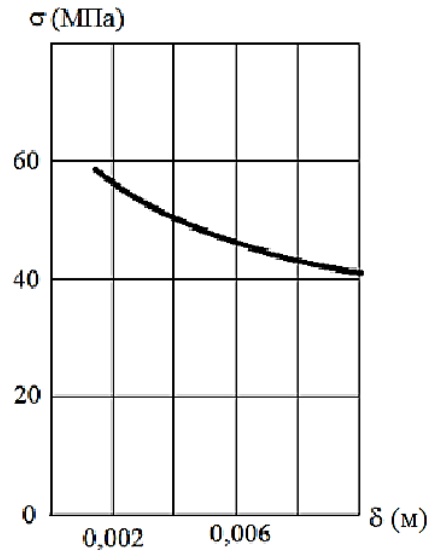


Рис. 3. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (6 баллов)
Fig. 3. Variation of internal stress in the shell depending on its thickness (6 points)

Таблица 2. Параметры прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки 6 баллов при $A_b = 88500$ Н, $\ddot{y} = 0,45$ м/с².

Table 2. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 6 points at $A_b = 88500$ Н, $\ddot{y} = 0,45$ м/с².

δ (м)	J (м ⁴)	ms_0 (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,001	0,05	13800	29	183	513	0,00431	66,0
0,002	0,10	14000	41	259	726	0,00365	55,8
0,003	0,15	14100	51	317	889	0,00335	51,2
0,004	0,20	14200	58	366	1030	0,00317	48,5
0,005	0,25	14300	66	409	1150	0,00304	46,4
0,006	0,30	14500	72	448	1260	0,00294	44,8
0,007	0,35	14600	77	483	1350	0,00284	43,3
0,008	0,40	14700	83	517	1450	0,00276	42,1
0,009	0,45	14800	88	548	1540	0,00269	41,0
0,010	0,50	15000	92	578	1620	0,00262	39,9

Таблица 3. Параметры прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки 7 баллов при $A_b = 177000$ Н, $\ddot{y} = 0,9$ м/с².

Table 3. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 7 points at $A_b = 177000$ Н, $\ddot{y} = 0,9$ м/с².

δ (м)	J (м ⁴)	ms_0 (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,001	0,05	13800	29	183	513	0,00863	132,0
0,002	0,10	14000	41	259	726	0,00729	112,0
0,003	0,15	14100	51	317	889	0,00670	102,0
0,004	0,20	14200	58	366	1030	0,00634	97,0
0,005	0,25	14300	66	409	1150	0,00609	92,7
0,006	0,30	14500	72	448	1260	0,00587	89,5
0,007	0,35	14600	77	483	1350	0,00569	86,6
0,008	0,40	14700	83	517	1450	0,00553	84,1
0,009	0,45	14800	88	548	1540	0,00538	81,9
0,010	0,50	15000	92	578	1620	0,00525	79,8

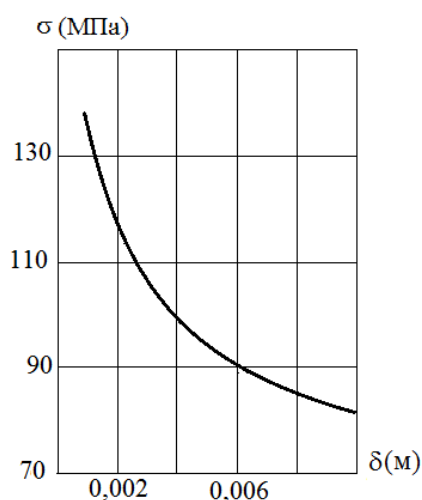


Рис. 4. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (7 баллов)

Fig. 4. Change of internal stress in the shell depending on its thickness (7 points)

Как видно, для перечисленных толщин обечайки бака напряжения в ней не превосходят допустимые значения.

Таблица 4. Параметры прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки 8 баллов при $A_b = 354000$ Н, $\ddot{y} = 1,8$ м/с².

Table 4. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 7 points at $A_b = 354000$ Н, $\ddot{y} = 1,8$ м/с².

δ (м)	J (м ⁴)	ms_0 (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,005	0,25	14300	66	409	1150	0,0122	186
0,006	0,30	14500	72	448	1260	0,0117	179
0,007	0,35	14600	77	483	1350	0,0114	174
0,008	0,40	14700	83	517	1450	0,0110	169
0,009	0,45	14800	88	548	1540	0,0108	164
0,010	0,50	15000	92	578	1620	0,0105	160
0,011	0,55	15100	98	608	1700	0,0102	157
0,012	0,60	15200	101	631	1770	0,0099	152
0,013	0,65	15300	104	652	1830	0,0096	147
0,014	0,70	15400	108	676	1900	0,0094	144
0,015	0,75	15600	112	696	1950	0,0092	140

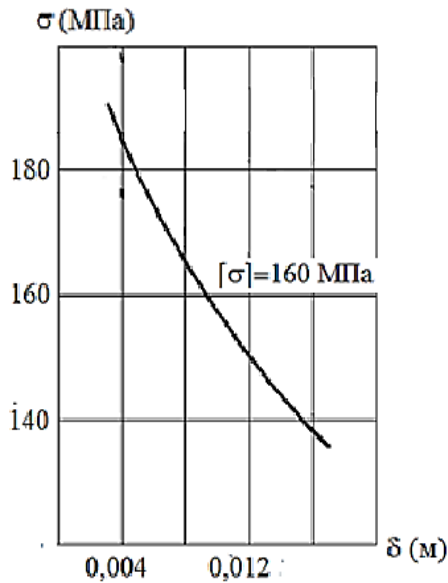


Рис. 5. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (8 баллов)
Fig. 5. Change of internal stress in the shell depending on its thickness (8 points)

Анализ прочности оболочки при восьмибалльном землетрясении показывает, что в ее конструкции напряжения превышают допустимые значения. Это говорит о том, что в данных условиях силосы для хранения сыпучих материалов (обычно изготавливаемых толщиной в 4 мм) однозначно

будут разрушены. Как видно из таблицы 4 и рисунка 5, минимальная безопасная толщина оболочки должна составлять не менее 10 мм.

Рассматриваем ситуацию, когда землетрясение достигает значения в 9 баллов (это практически экстремальный вариант). Все результаты представлены в таблице 5 и на рисунке 12.

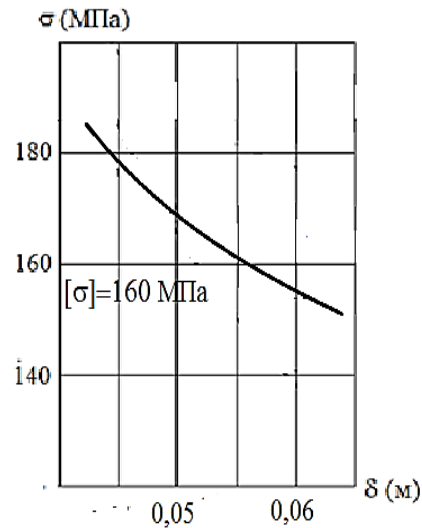


Рис. 6. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (9 баллов)
Fig. 6. Change of internal stress in the shell depending on its thickness (9 points)

Таблица 5. Параметры прочности цилиндрической оболочки под действием сейсмической нагрузки 8 баллов при $A_b = 700000 \text{ Н}$, $\ddot{y} = 3,6 \text{ м/с}^2$.

Table 5. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 7 points at $A_b = 700000 \text{ Н}$, $\ddot{y} = 3,6 \text{ м/с}^2$.

δ (м)	J (м ⁴)	m_{s0} (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,045	2,19	19300	168	1050	2940	0,0119	177
0,046	2,24	19400	169	1060	2960	0,0118	176
0,047	2,28	19500	171	1060	2980	0,0117	174
0,048	2,33	19600	172	1070	3000	0,0116	173
0,049	2,38	19800	173	1080	3020	0,0115	171
0,050	2,42	19900	174	1080	3040	0,0114	169
0,055	2,66	20500	180	1120	3140	0,0110	162
0,056	2,71	20600	181	1130	3160	0,0109	161
0,057	2,75	20800	182	1130	3170	0,0108	159
0,058	2,80	20900	183	1140	3190	0,0107	158
0,059	2,85	21000	184	1140	3210	0,0106	157
0,060	2,89	21100	185	1150	3220	0,0102	155
0,005	0,25	14300	66	411	1150	0,0242	370

Таблица 6. Сравнение прогибов в зависимости от бальности землетрясения (толщина оболочки 0,005 м)
Table 6. Comparison of deflections depending on earthquake score (shell thickness 0.005 m)

Бальности	\ddot{y} (м/с ²)	$x = 2$ (м)	$x = 4$	$x = 6$	$x = 8$	$x = 10$
6	0,45	0,0004	0,0010	0,0014	0,0018	0,0031
7	0,90	0,0009	0,0020	0,0028	0,0036	0,0061
8	1,80	0,0018	0,0038	0,0054	0,0070	0,0119
9	3,60	0,0036	0,0077	0,0109	0,0145	0,0242

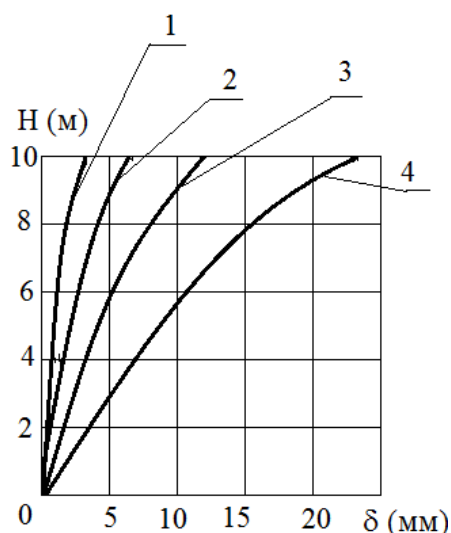


Рис. 7. Сравнение прогибов в зависимости от бальности землетрясения (толщина оболочки 0,005 м):

кривая 1 соответствует 6 баллам, 2 – 7 баллам, 3 – 8 баллам, 4 – 9 баллам

Fig. 7. Comparison of deflections depending on earthquake score (shell thickness 0.005 m): curve 1 corresponds to 6 points, 2 - 7 points, 3 - 8 points, 4 - 9 points

Необходимо отметить, что в условиях сильных землетрясений (8 и 9 баллов) в оболочках бункера возникают усилия значительно превышающие допустимые. Этот факт однозначно указывает на то, что конструкция бункера будет разрушена. В настоящее время оболочки бункеров выполнены толщиной всего 4 мм. Таким образом, анализ прочности конструкции на нагрузки, возникающие при землетрясениях, имеют актуальное значение. Укрепить прочность оболочек бункеров можно самым простым способом – увеличить толщину оболочки. Однако такой способ ведет к росту расхода материала, а, следовательно, и стоимости конструкции. Другой способ укрепления конструкции связан с укреплением оболочки с помощью продольных стрингеров, которые возьмут на себя часть продольной нагрузки. В этом случае, несмотря на дополнительный расход материала, необходимо разумно сочетать и рост толщины оболочки и параметров используемых стрингеров, то есть необходимо переходить к постановке и решению оптимизационных задач.

В результате анализа различных математических моделей колебания баков с сыпучим материалом мы получили перемещения точек системы. Имея эти данные легко определяются внутренние усилия в цилиндрической обечайке при динамических нагрузках.

ВЫВОДЫ

Безопасность и долговечность эксплуатации строительных объектов стационарного типа напрямую зависит от их надежности в любых

экстремальных условиях эксплуатации. В этой связи еще на этапе проектирования конструкции необходимо тщательным образом проанализировать сценарии возникновения опасных для данной системы ситуаций.

В сейсмически опасных районах просто необходимо использовать данные по динамическим нагрузкам, исходя из возможно опасных их воздействий.

При анализе реакции конструкций, заполненных сыпучим материалом, следует кроме расчета по формам их изгиба как балки с бесконечным числом степеней свободы также учитывать и расчет их местной деформации стенок, влияющей на образование присоединенных масс вмещаемой в них жидкости.

При проектировании любой системы основной целью является получения такого облика ее конструкции (оптимального), который позволяет получить заданные прочностные характеристики при минимальных затратах необходимого материала. В этом случае целесообразно рассмотреть различные варианты комбинаций конструктивных элементов, составляющих данный объект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чемодуров, В.Т. Моделирование систем: монография / В. Т. Чемодуров, Э. В. Литвинова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – 236 с.
2. Пособие по проектированию предприятий, зданий и сооружений по хранению и переработке зерна (к СНиП 2.10.05-85 «Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна») / ЦНИИ промзернопроект. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 144 с.
3. СП 359.1325800.2017 Силосы стальные вертикальные цилиндрические для хранения сыпучих продуктов. Правила проектирования. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
4. Чапаев Т.М., Балкизов А.Б., Сасиков А.С., Шогенова Ж.Х., Кушаева Е.А. Анализ известных теоретических и экспериментальных исследований устойчивости стенки цилиндрического зернобункера // ИВД. 2018. № 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izvestnyh-teoreticheskikh-i-eksperimentalnyh-issledovaniy-ustoychivosti-stenki-tsilindricheskogo-zernohranilischa>.
5. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах / И.В. Горюшинский, И.И. Кононов, В.В. Денисов, Е.В. Горюшинская, Н.В. Петрушкин. Под общей редакцией И.В. Горюшинского: Учебное пособие. – Самара: СамГАПС, 2003. – 232 с.
6. Безухов, Н.И. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для строительных специальностей вузов / Н.И. Безухов, О.В. Лужин, Н.В. Колкунов. 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1987. – 264 с.: ил.

7. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением №1). – Москва: Стандартинформ, 2018. – 114 с.

8. Немчинов, Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений / Ю.И. Немчинов. – Киев: НИИСК Минрегионстроя Украины, 2008. – 480 с.: ил.

9. Назаров Ю.П., Позняк Е.В., Симбиркин В.Н., Курнавин В.В. Расчет конструкций линейно-спектральным методом при дифференцированном сейсмическом движении грунта, заданном акселерограммами. Вестник НИЦ «Строительство». 2021; 28(1):92-101. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-92-101](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-92-101).

10. Перцев, А.К. Динамика оболочек и пластин (Нестационарные задачи) / А.К. Перцев, Э.Г. Платонов. – Л.: Судостроение, 1987. – 316 с.

11. Погорелов, В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций / В. И. Погорелов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2007. – 528 с.

12. Назаров, Ю. П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия / Ю. П. Назаров. – М.: Наука, 2010. – 468 с.

13. Шакирзянов, Р.А. Динамика и устойчивость сооружений: Учебное пособие. – 2-е перераб. изд. / Р.А. Шакирзянов, Ф.Р. Шакирзянов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. – 120 с.

REFERENCES

1. CHemodurov V. T. System modeling: Monograph / V. T. CHemodurov, E. V. Litvinova. – Simferopol': IT «ARIAL», 2016. – 236 p.

2. Manual for the design of enterprises, buildings and structures for the storage and processing of grain (to SNiP 2.10.05-85 «Enterprises, buildings and structures for the storage and processing of grain») / Central Research Institute of Industrial Grain Project. – M.: CИTP Gosstroy USSR, 1989. – 144 p.

3. SP 359.1325800.2017 Steel vertical cylindrical silos for bulk product storage. Design rules. – Moscow: Standartinform, 2018. – 20 p.

4. Chapaev T.M., Balkizov A.B., Sasikov A.S., Shogenova Zh.Kh., Kushaeva E.A. Analysis of well-

known theoretical and experimental studies of cylindrical grain hopper wall stability // IVD. 2018. № 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izvestnyh-teoreticheskikh-i-eksperimentalnyh-issledovaniy-ustoychivosti-stenki-tsilindricheskogo-zernohranilisha>.

5. Containers for bulk cargo in transport and cargo systems / I.V. Goryushinsky, I.I. Kononov, V.V. Denisov, E.V. Goryushinskaya, N.V. Petrushkin. Edited by I.V. Goryushinsky: Textbook. – Samara: SamGAPS, 2003. – 232 p.

6. Bezukhov, N.I. Stability and dynamics of structures in examples and tasks: Textbook for construction specialties of universities/N.I. Bezukhov, O.V. Luzhin, N.V. Kolkunov // 3rd ed., Revised. – M.: Higher. shk., 1987. – 264 p.: Ill.

7. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Actualized edition SNiP II-7-81* (with a change №1). – Moscow: Standartinform, 2018. – 114 p.

8. Nemchinov, Yu.I. Seismic resistance of buildings and structures/Yu.I. Nemchinov. - Kyiv: NIISK of the Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2008. - 480 p.: Ill.

9. Nazarov Y., Poznyak E., Simbirkin V., Kurnavin V. Structural analysis by response spectrum method for differential seismic ground motion given by accelerograms. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021; 28(1):92-101. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-92-101](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-92-101).

10. Pertsev, A.K. Dynamics of shells and plates (Non-stationary tasks) / A.K. Pertsev, E.G. Platonov – L.: Shipbuilding, 1987. – 316 p.

11. Pogorelov, V.I. Construction mechanics of thin-walled structures/V.I. Pogorelov – St. Petersburg: BHV – Petersburg, 2007. – 528 p.

12. Nazarov, Y. P. The analytical foundations of calculating structures on seismic influences / YU. P. Nazarov. – M.: Nauka, 2010. – 468 p.

13. Shakirzyanov, R.A. Dynamics and stability of structures: Textbook. – 2nd revision. ed. /R.A. Shakirzyanov, F.R. Shakirzyanov. – Kazan: Publishing House Kazansk. state. architecture-construction. University, 2015. – 120 p.

DYNAMIC STRENGTH STUDY OF CYLINDRICAL BULK SILOS UNDER SEISMIC LOAD CONDITIONS

¹Chemodurov V. T., ²Litvinova E. V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute « Academy of Construction and Architecture»
Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation
E-mail: ¹Chens_mu1@mail.ru, ²EllaLit@mail.ru

Abstract. The article calculation of bulk material hopper at dynamic loads is considered. This calculation is a reference for assessing the strength of the structure under possible earthquake conditions. It is shown that in earthquake conditions such structures do not withstand loads arising during vibrations. The use of mathematical methods makes it possible to select both the thickness of the hopper shell and the parameters of the reinforcement ribs, which, together, give a significant economic effect, which means that the structure will withstand any fluctuations inherent in a given point of ground movement. Mathematical modeling methods are now increasingly being used to select device parameter values that are able to provide strength, stability and durability to the structure for the most adverse operating conditions. It should be noted that calculations for the strength of cylindrical bunkers of bulk materials from the impact of possible earthquakes (which is typical for the Crimea) were not carried out. The article proposes an algorithm for calculating the strength of a cylindrical bunker taking into account the effect of seismic load. Shear deformations and structure vibrations for possible earthquakes up to 9 points are considered.

Research subject. Study of the stress-strain state of the hopper shell under unsteady dynamic impact.

Materials and methods. Development of models of oscillation process of cylindrical thin-walled objects and their study in terms of ensuring strength and stability. Simulation of oscillatory processes relies on well-known methods adopted in practice.

Results. As a result of the analysis of various mathematical models of vibrations of tanks with bulk material, we obtained movements of system points. Having these data, the internal forces in the cylindrical shell under dynamic loads are easily determined.

Conclusions. When analyzing the reaction of structures filled with loose material, in addition to calculating their bending as beams with an infinite number of degrees of freedom, one should also take into account the calculation of their local deformation of the walls, which affects the formation of the attached masses of the liquid contained in them.

Key words: dynamic strength of cylindrical hoppers, seismic loads, vibration forms, cylindrical shell of the hopper, material rod with an infinite number of degrees of freedom.

Раздел 4. Экологическая безопасность

УДК 532. 631.371:628.179.2:628.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ В АППАРАТАХ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЛОКАЛЬНОГО ВОДООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)

Мовчан¹ С.И., Николенко² И.В.

¹ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»
272312 Запорожская область, г. Мелитополь, проспект Б. Хмельницкого, 18
²ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт биохимических технологий, экологии и фармации,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181.
e-mail: ¹msi.movchan@gmail.com, ²nikoshi@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования напорных аппаратов обработки сточных вод локального водоочистного оборудования систем оборотного водоснабжения, рассматривающая связь элементарной циркуляции с компонентами вихря, основой которой является теорема Стокса, что позволяет установить взаимосвязь водных потоков восходящими и нисходящими потоками, ограниченного в напорных аппаратах электрофлотации и электрокоагуляции. Рассмотрено процесс циркуляция скорости жидкости по замкнутому контуру равна напряжению вихря, пронизывающего его, для трёх случаев, которое наглядно иллюстрируется, как сумма напряжений вихревых шнуров равная сумме их циркуляции. В этом случае можно рассматривать все процессы, происходящие внутри каждого аппарата, используемого в процессах водообработки.

Предмет исследования: локальное водоочистное оборудование в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий.

Материалы и методы: для оценки работоспособности существующих и вновь разрабатываемых систем обработки сточных вод применялись количественные и качественные показатели их обработки, что позволило выбрать оптимальное решение в работе систем оборотного водоснабжения.

Результаты: моделирование систем подачи сточных вод восходящими и нисходящими потоками, в напорных системах, позволяет снизить гидравлическую нагрузку, уменьшить сопротивление и обеспечить моделирование гидравлических явлений под преобладающим действием сил тяжести водного потока.

Выводы: с учётом действия сил, на каждую частицу, согласно закону Стокса, установлена взаимосвязь между гидромеханическими параметрами частиц примесей водных растворов (эффективного диаметра, электрокинетического дзета-потенциала, электрофоретической скорости, количества частиц). Согласно теории электрофореза и седиментации, разработанной Смолуховским и Гюккелем, теоремы Стокса, рассмотрены все процессы, происходящие внутри каждого аппарата локального водоочистного оборудования, для циркуляции скорости совершается вокруг вихревого шнура непосредственно по поверхности вихревой трубки.

Ключевые слова: аппараты, локальное оборудование, электрофлотация, электрокоагуляция, элементарная циркуляция, компоновка вихря, скорость жидкости,

Работа выполнена в рамках Государственного заказа на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-03-2025-418 от 17.01.2025 г. «Инновационные технологии использования воды и водных ресурсов в системах оборотного водоснабжения» (FRRS 2023-0039)»

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании гидравлических явлений важное значение имеет одинаковое происхождение природы физической сущности, происходящих процессов. Исходя из условий режимов движения очевидно, что в гидродинамически подобных потоках имеет место подобие движения жидкости восходящими и/или нисходящими потоками при ламинарном движении [3].

Моделирование гидродинамических процессов в водохозяйственном секторе России играет ключевую роль в реализации стратегических задач развития страны. Это направление является важной частью федеральной целевой программы "Развитие

водохозяйственного комплекса Российской Федерации" [1, 2].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из ключевых аспектов устойчивого и эффективного развития водохозяйственного комплекса является интеграция водных ресурсов в производственные процессы предприятий различных отраслей экономики. В рамках данного подхода особое внимание уделяется разработке и внедрению инновационных технологий водоочистки, что способствует повышению экологической безопасности и экономической эффективности водопользования. [4].

Рассматривая вопросы моделирования, в напорных системах в аппаратах обработки сточных

вод, необходимо учитывать, что сумма напряжений вихревых шнуров, образующихся во внутреннем объёме локального водоочистного оборудования, непосредственно рвана сумме их циркуляции во внутреннем объёме, что является определяющим факторов в работе водоочистного оборудования. В частности, рассмотрены дифференциальные движения идеальной жидкости, в основе которых используются уравнения покоя, введя в эти уравнения силу инерции, отнесённые к единице массы движущейся жидкости [5]. При моделировании гидравлических явлений также представлены условия неустановившегося движения жидкости в напорных системах, когда движение происходит в напорной системе, когда имеет место несколько секций (уравнительных систем). Следует иметь ввиду, что отдельные секции характеризуются различными формами проведения технологических процессов, значительными гидравлическими сопротивлениями и свойствами водного потока, определяющими технологическими процессами [6]. Немаловажным условием работы водоочистного оборудования является создание условий для ламинарного режима движения реальных жидкостей.

Ламинарное течение характеризуется упорядоченным движением параллельных слоев жидкости без поперечного перемешивания. Такое, ламинарное течение жидкостей, наиболее полно проявляется восходящими и нисходящими потоками т.е. сточных вод, в аппаратах локального водоочистного оборудования [11]. В отличие от турбулентного режима, оно обеспечивает предсказуемую траекторию частиц, что теоретически идеально для гравитационной

сепарации в отстойниках, флотаторах и осадительных центрифугах [12]. Однако практическая реализация стабильного ламинарного потока в промышленных масштабах сталкивается с фундаментальными противоречиями:

– гидродинамический парадокс: уменьшение габаритов сооружений и аппаратов для снижения капитальных затрат провоцирует увеличение числа Рейнольдса (Re), непосредственно нарушающую сплошность потока [13; 14];

– технологические условия, повышающие требования к производительности водоочистного оборудования, позволяющих увеличивать скорость потока, приближая Re к критическому значению ~ 2000 , для круглых сечений водоочистного оборудования [15];

– геометрическая несовместимость: компактные конструкции усиливают влияние входных эффектов, углов поворота и шероховатости и т.п., непосредственно влияющих на увеличение гидравлических сопротивлений [16].

ОБСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для математического описания работы локального водоочистного оборудования важным фактором являются вопросы движения водных потоков восходящими и нисходящими потоками.

Условия проведения моделирования и модели фильтрации, в зависимости различных условий формирования электрического поля представлены на рис. 1.

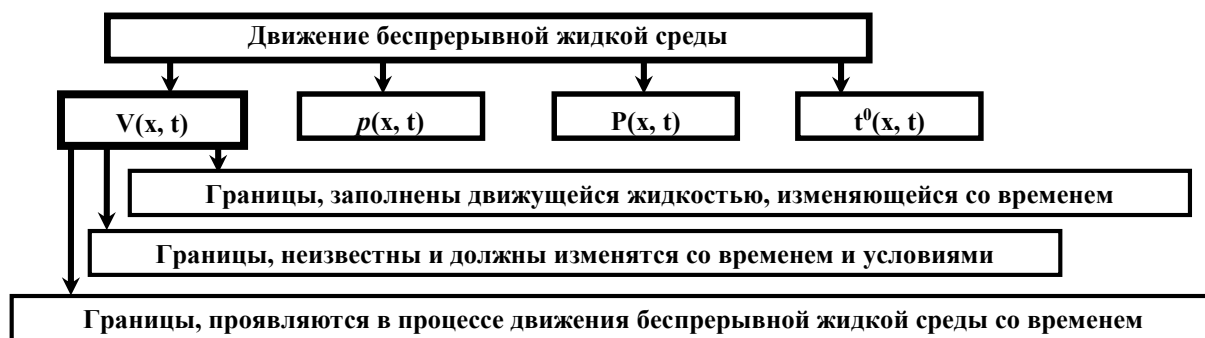


Рис. 2. Блок-схема условий движения сплошной жидкостной среды
Fig. 2. Block diagram of the conditions of motion of a continuous liquid medium

Всякое движение жидкости характеризуется скоростями отдельных частиц, и при решении задач общая картина движения заменяется кинематической схемой, т. е. движение каждой точки в свою очередь характеризуется отдельным вектором скорости, глубиной погружения и давлением. Скорость (u), глубина погружения (h) и давление (P) называются компонентами движения. Компоненты движения могут изменяться в зависимости от координат и времени, т. е. в общем случае можно написать:

$$\blacksquare u = \varphi_1(x, y, z, t);$$

$$\blacksquare h = \varphi_2(x, y, z, t);$$

$$\blacksquare P = \varphi_3(x, y, z, t).$$

Если компоненты зависят только от координат, а не от времени, то такое движение называется установившимся. Установившимся движением жидкости называется такое движение, при котором скорость течения и гидродинамическое давление в любой точке движущейся жидкости не изменяются течением времени. Примерами установившегося движения могут служить истечение жидкости из крана бака, когда горизонт жидкости в баке будет оставаться постоянным, а также движение воды в

канале при постоянном горизонте воды. В общем, примером может служить течение при постоянном напоре [5, стр. 86-89, 68].

Установившееся движение в общем, виде можно записать:

- $u = \varphi_1(x, y, z)$;
- $h = \varphi_2(x, y, z)$;
- $P = \varphi_3(x, y, z)$.

Поэтому разработка математических моделей для систем сложного движения водных потоков восходящих и нисходящих является актуальной задачей в работе напорных систем обработки сточных вод.

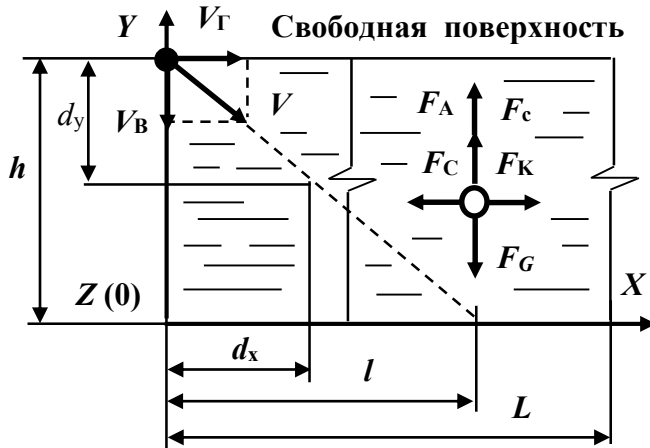


Рис. 3. Диаграмма сил, действующих на свободно осаждаемую частицу и движущуюся в жидкой среде [7]:

Fig. 3. Diagram of forces acting on a freely settling particle and moving in a liquid medium

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

И ИХ АНАЛИЗ

1. Силы, действующие на движущуюся частицу

Для получения полной картины действия сил, действующих на свободную поверхность, вертикальной и горизонтальной плоскостях в движущейся жидкости, представлено на рис. 3, рассмотренную при теоретическом обосновании очистки сточных вод [7].

F_A - СИЛА ВЫТАЛКИВАНИЯ ИЛИ СИЛА АРХИМЕДА;

F_c - СИЛА СОПРОТИВЛЕНИЯ, КОТОРАЯ УРАВНОВЕШИВАЕТ СИЛУ ТЯЖЕСТИ F_G , ОПРЕДЕЛЯЕМУЮ ВЕСОМ G ;

F_G - СИЛА ТЯЖЕСТИ, ГДЕ G ВЕС;

F_K - СИЛА КУЛОНА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ЗАРЯЖЕННУЮ ЧАСТИЦУ;

F_C - СИЛА СТОКСА (ВЯЗКОСТИ).

Согласно теории электрофореза и седиментации, разработанной Смолуховским и Гюккелем, в которой движение частицы в электрическом поле рассматривается как результат действия на ее поверхностный заряд силы Кулона со стороны электрического поля и силы вязкости в

горизонтальной плоскости. А в вертикальной плоскости: силе тяжести, силе вязкости и силе Архимеда. Такое расположение сил и их действие, по соответствующим направлениям, стало основой проведенных исследований, учитывающих сумму сил в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\begin{cases} \vec{F}_K + \vec{F}_c = 0 \\ \vec{F}_m + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- с учетом вышеозначенных сил, действующих в различных плоскостях, имеем:

$$\begin{cases} F_K = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r \cdot \xi \cdot E = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot V_G = F_c & (2.1) \\ \vec{F} = m \cdot \vec{g} = \rho \cdot V \cdot \vec{g} = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{8} \cdot \vec{g} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho \cdot \vec{g} & (2.2) \\ \vec{F}_A = -m_l \cdot \vec{g} = -\rho_l \cdot V \cdot \vec{g} = -\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho_l \cdot \vec{g} & (2.3) \\ \vec{F}_c = -6 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta \cdot \vec{V}_B & (2.4) \end{cases}$$

2. Гидромеханические параметры сферических частиц примесей водных растворов

Исследования движения частиц примесей водных растворов восходящими и нисходящими (рис. 3), согласно закону Стокса, согласно формуле

(3) для сферических частиц потоками позволили установить гидромеханические параметры частиц примесей водных растворов (эффективного диаметра, электрокинетического дзета-потенциала, электрофоретической скорости, количества частиц):

$$n \cdot \frac{\partial C_2}{\partial t} = C_D \cdot \frac{\partial C_1}{\partial x^3} + C_v \cdot \frac{\partial C_2}{\partial x^2} + C_\xi \cdot \frac{\partial C_3}{\partial x^3} + C_n \cdot \frac{\partial C_4}{\partial x^4} - v \frac{\partial C_5}{\partial x}, \quad (3)$$

где C_D, C_V, C_ξ, C_n – концентрация гидромеханических параметров определяемых частиц примесей водных растворов соответственно D, V, ξ и n .

Данное уравнение (3) рассматривает начальные условия с учётом предельных условий, которые были рассмотрены ранее

Учитывая вышеприведенные условия, а также то, что между основными гидромеханическими параметрами частиц примесей (D, V, ξ и n) водных растворов имеет место не только функциональная, но и математическая зависимость:

$V_B = \frac{D^2 \cdot g \cdot (\rho - \rho_1)}{18 \cdot \eta},$	$V_\Gamma = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot \xi}{\eta},$	$\xi = \frac{3}{2} \cdot \frac{\vec{V}_\Gamma \cdot \eta}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E},$	$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot V_B}{g \cdot (\rho - \rho_1)}},$	(4)
--	--	--	---	-----

возникающих из условий движения частиц в вертикальной и горизонтальной плоскостях и сил, действующих в данных условиях (соответственно теории электрофореза Смолуховского и Гюккеля).

Тогда, для общей массы и массы дисперсной фазы водного раствора, получим уравнение, учитывающее взаимосвязь процессов, в системах обратного водоснабжения:

$$(G_{CB} \cdot x_{CB}) \cdot m_j^i = (G_{CB}^{Oч} \cdot x_{CB}^{Oч} + G_{CB}^{Onm} \cdot x_{CB}^{Onm} + G_{CB}^{Onm} \cdot x_{P.B.}) \cdot m_j^i, \quad (5)$$

где m_j^i – коэффициент, учитывающий количественный показатель загрязнений в соответствующей системе.

Учитывая нестационарность течения водного потока, действие внешних массовых сил и отказавшись от упрощений и предположений, запишем теорию импульсов для соответствующих направлений в декартовой системе координат. Получим следующие уравнения:

Применим теорию импульсов исследования водного потока в трехмерной системе координат.

$$\begin{aligned} & \rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial \Theta} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + \omega \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \cdot \left[2 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \right] \right\} + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + X \end{aligned} \quad (6)$$

где X – массовая сила, действующая в направлении оси X , Н/м³.

циркуляции восходящими и нисходящими потоками в аппаратах напорной электрофлотации-электрокоагуляции, на бесконечно малом контуре, в плоскости со сторонами dx и dy площадь обозначим dW_z (рис. 4).

Аналогичные уравнения можно записать для других направлений Y и Z [6, стр. 41].

Пусть циркуляция скорости жидкости по часовой стрелке будет положительной, а против часовой стрелки

3. Связь элементарной циркуляции с компонентами вихря. Теорема Стокса

Установим связь элементарной циркуляции с компонентами вихря, в основе которой лежит использование теоремы Стокса. Рассмотрим схему

Полный дифференциал скорости жидкости для данного случая согласно формулы (7) будет:

$$d\Gamma_z = x_x \cdot dx + \left(u_y + \frac{du_y}{dx} \cdot dx \right) \cdot dy - \left(u_x + \frac{du_x}{dy} \cdot dy \right) dx - u_x \cdot dy = \left(\frac{du_y}{dx} - \frac{du_x}{dy} \right) \cdot dx \cdot dy = 0 \quad (7)$$

С учётом равенства (3) получим следующее соотношение:

$$d\Gamma_z = \left(\frac{du_y}{dx} - \frac{du_x}{dy} \right) \cdot dx \cdot dy = 2 \cdot \omega_s \cdot dy \cdot dx \quad (8)$$

или

$$d\Gamma_z = 2 \cdot \omega_z \cdot dW_z \quad (9)$$

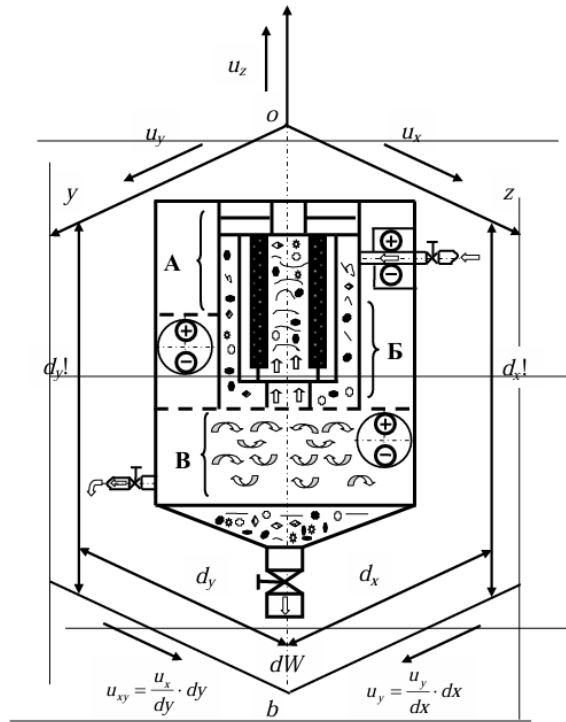


Рис. 4. Схема циркуляции восходящими и нисходящими потоками в аппаратах напорной электрофлотации-электрокоагуляции

Fig. 4. Scheme of circulation with ascending and descending flows in pressure electroflotation-electrocoagulation devices

Аналогично получим связь элементарных циркуляций на остальные две оси:

$$\left\{ \begin{array}{l} d\Gamma_z = 2 \cdot \omega_z \cdot dW_z, \\ d\Gamma_y = 2 \cdot \omega_y \cdot dW_y, \\ d\Gamma_x = 2 \cdot \omega_x \cdot dW_x. \end{array} \right. \quad (10)$$

Выражение проекции циркуляции для контура конечных размеров можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_x = 2 \cdot \int_W \omega_x \cdot dW_x, \\ \Gamma_y = 2 \cdot \int_W \omega_y \cdot dW_y, \\ \Gamma_z = 2 \cdot \int_W \omega_z \cdot dW_z. \end{array} \right. \quad (11)$$

Следовательно, можно записать:

$$\Gamma = 2 \cdot \int_W \omega_z \cdot dW_n. \quad (12)$$

Сопоставим равенства (7) и (12), получим:

$$\Gamma = I. \quad (13)$$

Следовательно, циркуляция скорости жидкости по замкнутому контуру равна напряжению вихря, пронизывающего его.

Это положение называется теоремой Стокса. Теорема Стокса справедлива для трёх случаев [7]:

1. Циркуляция скорости происходит вокруг одиночного вихря, что доказано выводом формулы (12).

2. Циркуляция скорости совершается вокруг вихревого шнура непосредственно по поверхности вихревой трубки.

Для доказательства этого разделим площадь, охваченную контуром, на бесконечное большое число элементарных прямоугольников (рис. 4), из которых каждый пронизывается вихревой линией, а

вся совокупность этих линий образует вихревой шнур.

Циркуляция скорости каждого прямоугольника по периметру равна, согласно равенству (13) напряжению вихря. Следовательно, сумма циркуляции скорости жидкости по всем элементарным контурам прямоугольников, образующие своей совокупностью сечение вихревой трубки, равна сумме вихрей линий, образующих шнур.

3. Циркуляция скорости охватывает контур, пронизанный в разных местах отдельными вихревыми шнурами.

Это легко доказать, если принять, что сумма напряжений вихревых шнуров:

$$I = I_1 + I_2, \quad (14)$$

равно сумме их циркуляции:

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 = \Gamma, \quad (15)$$

где I - Γ напряжений вихревых шнуров, зависящая суммарной их циркуляции.

Таким образом, сумма напряжений вихревых шнуров, образующихся во внутреннем объёме локального водоочистного оборудования, непосредственно равна сумме их циркуляции во внутреннем объёме, что является определяющим факторов в работе водоочистного оборудования.

ВЫВОДЫ:

1. Рациональное и эффективное использование воды и водных ресурсов в системах оборотного водоснабжения является одним из стимулов развития региональной экономики, предприятий использующих воду и водные ресурсы в системах повторного и многократного использования воды и водных ресурсов.

2. Установленная математическая зависимость позволяет определить отдельные параметры частиц водных растворов вертикальных аппаратов при электрохимической коагуляции-флотации, в основе которых используются восходящие и нисходящие водные потоки.

3. Согласно теоремы Стокса, установлена взаимосвязь элементарной циркуляции водных потоков восходящих и нисходящих компонентами вихревых потоков, позволяющих интенсифицировать процессы обработки сточных вод.

4. Теоретически проверено и практически подтверждено, что моделирование во внутренних объёмах аппаратов обработки сточных вод локального водоочистного оборудования, является подтверждением выбора ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих эффективную обработку сточных вод промышленных предприятий.

5. Сумма напряжений вихревых шнуров (потоков), образующихся во внутреннем объёме локального водоочистного оборудования, непосредственно равна сумме их циркуляции во

внутреннем объёме, что является определяющим факторов в работе водоочистного оборудования.

6. Рассмотрены физико-математические основы доминирования вязких сил, их количественная оценка проявляется вследствие нарушения ламинарности, что позволяет оптимизировать очистные сооружений и аппараты локального водоочистного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 19.04.2012 N 350 (ред. от 31.05.2017) "О федеральной целевой программе "Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах".

Электронный ресурс: режим доступа: <http://government.ru/docs/37156/> (дата обращения 10.06.2024 г.)

2. 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 10.06.2024 г.)

3. Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. – М.: ООО «Типография Левко», Институт устойчивого развития/Центр экологической политики России, 2009. – 88 с.

4. Яковлев С.В., Губин И.Г., Павлинов И.И., Родин В.Н. Комплексное использование водных ресурсов. – М.: Высшая школа, 2005. – 234с.

5. Дидур В.А., Грачёва Л.И., Радул Н.Н., Орел А.Н. Гидроаэромеханика и её использование в энергетике АПК. Учебное пособие для сельскохозяйственных вузов / В.А. Дидур, Л.И. Грачёва, Н.Н. Радул, А.Н. Орел. – М.: МГАУ, 2008. – 395 с.

6. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И. Лева. Изд-во «Энергия», Ленин-оде-од-ние, 1967. – 235 с.

7. Куликов Н.И. Теоретические основы очистки воды: учебное пособие / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышев. – Донецк: изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2009. 298 с.

8. Артамонов В.В. Процеси і апарати технології водоочистки: Навч. посібник / В.В. Артамонов, Т.В. Вижевська. – Рівне: РДГУ, 1999. – 127 с.

9. Бунина Л.Н., Николенко И.В., Мовчан С.И. Усовершенствовании и исследование конструкции аппарата очистки сточных вод при осветлении / Л.Н. Бунина, И.В. Николенко, С.И. Мовчан // Строительство и техногенная безопасность. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – 2023. - №28(80). - С. 53-60.

<https://stroyjournal-asa.ru/index.php/asa/issue/download/79/74>

10. Николенко И.В., Мовчан С.И. Интенсификация ресурсосберегающих технологий использования воды при обработке сточных вод

промышленных предприятий // Водоснабжение и санитарная техника, 2024. №8. С. 30-42. DOI: 10.35776/VSI.2024.08.

11. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник для вузов / Д. В. Штеренлихт. - 5-е изд., стереотип. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 656 с.

12. Кульков, А. А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: учебник для вузов / А.А. Кульков, В.А. Сарданашвили. Москва: Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2016. - 555 с.

13. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов: в 2 ч. / Ю.И. Дытнерский. - 3-е изд., стереотип. Москва: Химия, 2002. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. 400 с.

14. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам химической технологии: учебное пособие для вузов / В.Л. Пибалк, В.М. Виноградов, В.М. Ульянов [и др.]; под ред. В.Л. Пибалка. Москва: Химия, 2001. 576 с.

15. Кулов, Н.Н. Математическое моделирование в химической технологии и биотехнологии / Н.Н. Кулов, Р.Ф. Апостолов, А.А. Аратюнов // Теоретические основы химической технологии. 2014. -Т. 48, № 3. - С. 243-248.

16. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2012. - 466 с.

REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Russian Federation of 19.04.2012 N 350 (as amended on 31.05.2017) "On the federal target program "Development of the water management complex of the Russian Federation in 2012-2020".

2. Water strategy of the Russian Federation for the period up to 2020. Order of the Government of the Russian Federation of August 27, 2009 N 1235-р.

3. Danilov-Danilyan V.I. Water resources of the world and prospects of the water management complex of Russia. - М.: ООО "Типография Levko", Institute of Sustainable Development/Center for Environmental Policy of Russia, 2009. - 88 p.

4. Yakovlev S.V., Gubin I.G., Pavlinov I.I., Rodin V.N. Integrated use of water resources. - М.: Higher School, 2005. - 234p.

5. Dydur V.A., Gracheva L.I., Radul N.N., Orel A.N. Hydro-aeromechanics and its use in the energy sector of the agricultural sector. Textbook for agricultural universities / V.A. Dydur, L.I. Gracheva, N.N. Radul, A.N. Eagle. - М.: Moscow State University, 2008. - 395 p.

6. Levi I.I. Modeling of hydraulic phenomena / I.I. Lev. Publishing house "Energy", Lenin-oe od-nie, 1967. - 235 p.

7. Kulikov N.I. Theoretical foundations of water purification: a tutorial / N.I. Kulikov, A.Ya. Naimanov, N.P. Omelchenko, V.N. Chernyshev. - Donetsk: Knowledge Publishing House (Donetsk branch), 2009. 298 p.

8. Artamonov V.V. Processes and devices of water treatment technology: Textbook / V.V. Artamonov, T.V. Vyzhevskaya. - Rivne: RDTU, 1999. - 127 p.

9. Bunina L.N., Nikolenko I.V., Movchan S.I. Improvement and study of the design of wastewater treatment apparatus for clarification / L.N. Bunina, I.V. Nikolenko, S.I. Movchan // 2170. K2. Construction and industrial safety. Scientific and technical journal on construction and architecture. - 2023. - № 28(80). - P. 53-60.

<https://stroyjournal-asa.ru/index.php/asa/issue/download/79/74>

10. Nikolenko I.V., Movchan S.I. Intensification of resource-saving technologies for water use in wastewater treatment of industrial enterprises // Water supply and sanitation, 2024. 8. С. 30-42. DOI: 10.35776/VSI.2024.08.

10. Nikolenko I.V., Movchan S.I. Intensification of resource-saving technologies for water use in industrial wastewater treatment // Water supply and sanitary engineering, 2024. No. 8. Pp. 30-42. DOI: 10.35776/VSI.2024.08.

11. Shterenlicht, D.V. Hydraulics: a textbook for universities / D. V. Shterenlicht. - 5th ed., stereotype. - St. Petersburg: Lan, 2022. - 656 p.

12. Kulkov, A. A. Processes and apparatuses for oil and gas refining and petrochemistry: a textbook for universities / A.A. Kulkov, V.A. Sardanashvili. Moscow: Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkina, 2016. - 555 p.

13. Dytnerky, Yu.I. Processes and apparatuses of chemical engineering: a textbook for universities: in 2 parts / Yu.I. Dytnerky. - 3rd ed., stereotype. Moscow: Chemistry, 2002. Part 1. Theoretical foundations of chemical engineering processes. Hydromechanical and thermal processes and apparatuses. 400 p.

14. Calculations and problems for processes and apparatuses of chemical engineering: a textbook for universities / V.L. Pebalk, V.M. Moscow: Chemistry, 2001. 576 p.

15. Kulov, N.N. Mathematical modeling in chemical engineering and biotechnology / N.N. Kulov, R.F. Apostolov, A.A. Aratyunov // Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2014. - Vol. 48, No. 3. - P. 243-248.

16. Idelchik, I.E. Handbook of Hydraulic Resistances / I.E. Idelchik; edited by M.O. Shteinberg. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: Mashinostroenie, 2012. - 466 p.

MODELING IN WASTEWATER TREATMENT APPARATUS LOCAL WATER TREATMENT
EQUIPMENT RECYCLING WATER SUPPLY SYSTEMS (for discussion)

¹Movchan S.I., ²Nikolenko I.V.

¹ Melitopol State University
Address: Zaporozhye region, Melitopol, B. Khmelnitsky Ave., 18
²V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy
295493, Republic of Crimea, Simferopol, Kyiv Street, 181.
e-mail: ¹msi.movchan@gmail.com, ²nikoshi@mail.ru

Abstract. The article considers the issues of modeling pressure devices for wastewater treatment of local water treatment equipment of circulating water supply systems, considering the relationship of elementary circulation with the components of the vortex, the basis of which is the Stokes theorem, which allows us to establish the relationship of water flows with ascending and descending flows, limited in pressure devices of electroflotation and electrocoagulation. The process of circulation of the liquid velocity along a closed circuit is considered equal to the voltage of the vortex penetrating it, for three cases, which is clearly illustrated as the sum of the voltages of the vortex cords equal to the sum of their circulation. In this case, it is possible to consider all the processes occurring inside each device used in water treatment processes.

Subject of the study: local water treatment equipment in industrial water supply systems.

Materials and methods: To assess the performance of existing and newly developed wastewater treatment systems, quantitative and qualitative indicators of their treatment were used, which made it possible to select the optimal solution for the operation of water recycling systems.

Results: modeling of wastewater supply systems with ascending and descending flows, in pressure systems, allows to reduce the hydraulic load, reduce resistance and ensure modeling of hydraulic phenomena under the prevailing action of gravity of the water flow.

Conclusions: Taking into account the action of forces on each particle, according to Stokes' law, a relationship was established between the hydromechanical parameters of impurity particles of aqueous solutions (effective diameter, electrokinetic zeta potential, electrophoretic velocity, number of particles). According to the theory of electrophoresis and sedimentation developed by Smoluchowski and Gückel, Stokes' theorem, all processes occurring inside each device of local water purification equipment are considered, for the circulation of velocity is performed around the vortex cord directly on the surface of the vortex tube.

Key words: devices, local equipment, electroflotation, electrocoagulation, elementary circulation, vortex arrangement, liquid velocity

The work was carried out within the framework of the State order for the provision of public services (performance of works) No. 075-03-2025-418 dated 17.01.2025 "Innovative technologies for the use of water and water resources in water recycling systems" (FRRS 2023-0039)"

СПИСОК АВТОРОВ

Аблаев А.Р.	обучающийся, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Ангелюк И.П.	к.т.н., Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
Андреев А.И.	обучающийся, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург
Арифов А.М.	обучающийся, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
Бекиров Э.А.	д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Богущий Ю.Г.	старший преподаватель, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
Горохов Т.И.	аспирант, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов
Дихтярь Т.В.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Зайцев О.Н.	д.т.н., профессор, Юго-Западный государственный университет им. И.И. Ишутина, г. Курск
Калафатов Д.А.	к.т.н., Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь.
Литвинова Э. В.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Меннанов Э.М.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Мовчан С.И.	к.т.н., доцент, Мелитопольский государственный университет имени А.С. Макаренко, г. Мелитополь
Николенко И.В.	д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь.
Петренко Д.М.	обучающийся, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Продоус О.А.	д.т.н., профессор, независимый эксперт по водоснабжению и канализации, г. Москва
Родин С.В.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь.
Сидорова В.В.	кандидат архитектуры, доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Царёва О.С.	к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург
Чемодуров В.Т.	д.т.н., профессор Академии строительства и архитектуры, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Шлычков Д.И.	к.т.н., доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва
Якубчик П.П.	к.т.н., Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 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 – работодателем 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 сканированным 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.

Язык статьи: русский, английский.

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 **четырех 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.