



Основан в 2016 году

Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 5, № 3, 2021

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода

Иван Иванович

кандидат технических наук,
доцент

зам. главного редактора:

Гончаренко

Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Платонов

Александр Сергеевич

кандидат физико-математических
наук, доцент

Редакционный совет:

Лешенюк Николай Степанович, доктор физико-математических наук, профессор – председатель; Богданова Валентина Владимировна, доктор химических наук, профессор – зам. председателя; Акулов Артем Юрьевич, кандидат технических наук (Россия); Альгин Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор; Байков Валентин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Бирюк Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Волянин Ежи, доктор технических наук, профессор (Польша); Иваницкий Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент; Иванов Юрий Сергеевич, кандидат технических наук; Ильющонок Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Каван Степан, доктор технических наук (Чехия); Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, доцент (Россия); Камлюк Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Карпиленья Николай Васильевич, доктор военных наук, профессор; Ковтун Вадим Анатольевич, доктор технических наук, профессор; Кремень Маркс Аронович, доктор психологических наук, профессор; Кудряшов Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент; Кузьмицкий Валерий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент; Лебедева Наталья Шамильевна, доктор химических наук, доцент (Россия); Лебедин Александр Владимирович, доктор военных наук, профессор; Пастухов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Поздеев Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Украина); Порхачев Михаил Юрьевич, кандидат педагогических наук, доцент (Россия); Соколов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор (Россия); Тихонов Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Фурманов Игорь Александрович, доктор психологических наук, профессор; Чень Цзяньго, доктор технических наук, профессор (Китай); Шарипханов Сырым Дюсенгазиевич, доктор технических наук (Казахстан).

Учредитель – Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Решением коллегии Высшей аттестационной комиссии № 18/8 от 9 декабря 2016 г.
журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1835 от 19 сентября 2016 г.

Журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по психологическим, техническим (по научным направлениям – безопасность в чрезвычайных ситуациях; пожарная и промышленная безопасность; гражданская оборона) и военным (по научному направлению – гражданская оборона) наукам.

Ответственность за подбор и точность приведенных данных, а также за использование сведений, не подлежащих открытой публикации, несут авторы опубликованных материалов.

Статьи, поступающие для публикации в журнале, рецензируются.

Полная или частичная перепечатка, размножение, воспроизведение или иное использование опубликованных материалов допускаются с обязательной ссылкой на журнал «Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси».

Адрес редакции: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск

Контактные телефоны: (017) 340-53-93 (главный редактор)

(017) 341-32-99

Сайт Университета гражданской защиты: www.ucsp.by

Email редакции: vestnik@ucsp.by

ISSN 2519-237X (print)

ISSN 2708-017X (online)

© Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Пожарная и промышленная безопасность (технические науки)

Левчук О.В. Международный опыт реагирования на инциденты при строительстве и эксплуатации атомных электростанций. 269

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесюк Н.М., Писченков И.А. Оценка огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями 278

Полева И.И., Жамойдик С.М., Нехань Д.С. Модельные огневые испытания железобетонных центрифугированных колонн с конструктивной огнезащитой. 289

Дмитриченко А.С., Здитовецкая С.В., Мамедова С.И. Исследование влияния материала оконного профиля на однослойную стеклянную панель в условиях стандартного огневого воздействия 300

Бирюк В.А., Давыдик М.А., Кравчук А.П. Повышение термомеханических свойств листовых стекол с целью создания пожаростойких светопрозрачных ограждающих конструкций высотных зданий 311

Безопасность в чрезвычайных ситуациях (технические науки)

Жукалов В.И., Гольдаде В.А., Зотов С.В. Сорбция и удерживающая способность модифицированных волокнисто-пористых материалов по отношению к нефти и нефтепродуктам. 321

Ковтун В.А., Пасовец В.Н., Танырверди А.М., Антоненко М.А. Предупреждение чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением инженерных конструкций . . 335

Кобяк В.В., Миканович Д.С., Журов М.М. Определение вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях. 343

Разное (обзоры)

Дмитракович Н.М., Жук Д.В. Аналитический обзор моделей тепломассопереноса в защитной одежде. 352

Смиловенко О.О., Богданова В.В., Малашенко С.М., Полуян А.И., Миргуламы Ф.О. Применение метода многокритериального синтеза в решении задач по обеспечению пожарной безопасности 366

Правила предоставления статей 380

CONTENTS

Fire and industrial safety (technical sciences)

Levchuk O.V. International experience in incident response during the construction and operation of nuclear power plants 269

Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Evaluation of fire resistance of steel building structures taking into account the influence of heat exchange with adjacent structures 278

Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S. Reinforced concrete centrifuged columns with structural fire protection model fire tests 289

Dmitrichenko A.S., Zditovetskaya S.V., Mamedova S.I. Study of the influence of the window profile material on a single-layer glass panel under standard fire exposure 300

Biryuk V.A., Davydik M.A., Kravchuk A.P. Increasing the thermomechanical properties of sheet glasses for the purpose of creation of fire-resistant light-transparent enclosures of high buildings 311

Safety in emergencies (technical sciences)

Zhukalov V.I., Goldade V.A., Zotov S.V. Sorption and retention capacity of modified fibrous-porous materials in relation to oil and petroleum products 321

Kovtun V.A., Pasovets V.N., Tanirverdi A.M., Antonenko M.M. Prevention of emergencies caused by destruction of engineering structures 335

Kobyak V.V., Mikanovich D.S., Zhurov M.M. Determination of emergencies probability at hydraulic structures 343

Miscellaneous (reviews)

Dmitrakovich N.M., Zhuk D.V. Analytical review of heat and mass transfer models in protective clothing 352

Smilovenko O.O., Bogdanova V.V., Malashenko S.M., Poluyan A.I., Mirgulyamly F.O. Application of the method of multi-criterial synthesis in solving problems to ensure fire safety 366

Rules of submitting articles for publication 380

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.269>

УДК 614.8:621.039

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ РЕАГИРОВАНИЯ НА ИНЦИДЕНТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Левчук О.В.

Цель. Исследование особенностей строительства, ввода в эксплуатацию и эксплуатации атомных электростанций.

Методы. Общенаучные методы исследования индукции, дедукции, анализа и синтеза.

Результаты. Проанализированы аварии, инциденты и общественно-политическая обстановка, возникшие при строительстве, вводе в эксплуатацию и эксплуатации атомных электростанций ближнего и дальнего зарубежья, а также Республики Беларусь. Предложены основные принципы дальнейшего развития атомной отрасли в республике, учитывающие Концепцию национальной безопасности Республики Беларусь.

Область применения исследований. Представленные результаты исследования могут быть использованы при совершенствовании отдельных положений Концепции национальной безопасности Республики Беларусь, касающихся развития ядерной энергетики страны.

Ключевые слова: АЭС, авария, инцидент, общественно-политическая обстановка, строительство, эксплуатация.

(Поступила в редакцию 21 июля 2021 г.)

Введение

В настоящее время в мире эксплуатируется 439 атомных реакторов, ведется сооружение еще 68 (в том числе 16 – в Европе, 22 – в Китае, 5 – в США). Несмотря на развернувшуюся в последние годы кампанию в Европе по отказу от атомной энергетики, ни одна из развитых стран полностью не прекратила ее использование, что объясняется относительной дешевизной выработки электроэнергии и высокой производительностью атомных установок.

Тем не менее любая АЭС является потенциально опасным объектом, при сооружении и эксплуатации станций большинство стран сталкиваются с техническими и политическими проблемами. Наибольшую опасность представляет возникновение запроектной аварии с выбросом радиоактивных веществ, что формирует серьезные угрозы для общества и государства. Кроме того, различные инциденты и аварийные ситуации вызывают весьма острую реакцию общественности, особенно с учетом масштабности возможных последствий (за 70 лет эксплуатации атомных электростанций в мире произошло три крупные аварии). Вследствие этого вопросы безопасности атомной электростанции подняты на уровень государственной политики, а актуальные вопросы использования ядерной энергетики нашли свое отражение в Концепции национальной безопасности Республики Беларусь.

Основная часть

Несмотря на то что эксплуатирующие атомные электростанции государства уделяют большое внимание их безопасности, практически все они сталкиваются с инцидентами, которые возникают на этапе строительства АЭС и в ходе их эксплуатации. *Россия*, как родоначальник атомной энергетики в мире, при строительстве АЭС неоднократно сталкивалась с серьезными проблемами. В частности, в конце 1980-х гг. началось сооружение Татарской атомной электростанции в Камских Полянах. Ее возведение продолжалось 10 лет, но в 1990-м г. обнаружилось, что на месте будущей АЭС проходит тектонический разлом, и строительство было остановлено. Дополнительными поводами к «заморозке» стала сложная общественно-политическая обстановка в стране в тот период, а также катастрофа на Чернобыльской АЭС. В 2005 г. в Госсовете Татарстана обсуждался вопрос о возобновлении

строительства Татарской АЭС. Но на тот момент в республике выработка электроэнергии и ее потребление были равны, поэтому решение не было принято¹.

Сооружение первой очереди второй Ленинградской АЭС (ЛАЭС-2) с двумя энергоблоками ВВЭР-1200 недалеко от действующей ЛАЭС-1 началось в 2007 г. Пуск первого энергоблока ЛАЭС-2 должен был состояться в 2013 г., но оказалось, что построить новую атомную станцию за 6 лет невозможно. Атомщики пообещали, что АЭС введут в строй в 2017 г., но при строительстве случилось несколько происшествий, которые повлияли на сроки ввода в эксплуатацию.

В декабре 2010 г. из-за многочисленных нарушений требований пожарной безопасности и санитарно-эпидемиологического законодательства строительство было приостановлено по постановлению прокуратуры. 17 июля 2011 г. произошло обрушение 1,2 тыс. тонн арматуры, которая должна была стать каркасом защитной оболочки одного из ключевых элементов системы безопасности нового энергоблока. Скрыть происшествие оказалось невозможно. 4 июля 2015 г. строители АЭС не смогли установить в реактор блок защитных труб. По информации СМИ, 70-тонную конструкцию уронили с 20-метровой высоты в бассейн для выдержки отработавшего ядерного топлива. Были повреждены бассейн и важный компонент самого реактора. Произошедший инцидент пытались скрыть.

В дальнейшем застройщика атомной станции – строительный холдинг «Титан-2» обвинили в нарушении правил строительства. По этому поводу 3 марта 2016 г. в Санкт-Петербурге состоялась пресс-конференция на тему «Ленинградская АЭС-2: нарушения технологии и фальсификации при строительстве». Согласно представленным на конференции документам в ходе строительства ЛАЭС-2 допускались нарушения при проведении сварочных работ, термообработки, технологии бетонирования, а также фальсификации при обучении специалистов².

Несмотря на неудачи, «Росатом» не намерен рассматривать саму возможность остановки проекта. Однако, по мнению экспертов, опасность аварии вполне реальна. Вместе с тем на пресс-конференции в Санкт-Петербурге экологи выступили против выдачи лицензии на эксплуатацию новой АЭС.

По соображениям безопасности в 2012 г. отказались от достройки почти готового энергоблока № 5 на Курской АЭС.

В 2013 г. в России в Калининградской области прекращено строительство Балтийской АЭС, которую строили по тому же проекту, что и Ленинградскую АЭС-2³.

В ночь с 10 на 11 ноября 2016 г. произошла авария на Нововоронежской АЭС. Шестой энергоблок не смог проработать на проектной мощности даже несколько недель после ввода в эксплуатацию. Местные жители сообщили СМИ о мощном взрыве на атомной электростанции. При этом государственные СМИ России ограничились скупой информацией об инциденте. В частности, агентство «РИА Новости» сообщило, что «6-й энергоблок Нововоронежской АЭС был отключен от сети из-за отказа электрогенератора». Отключению энергоблока № 6 предшествовал взрыв, который разрушил турбинный цех, где сгорел генератор и взорвался трансформатор. В то же время руководство Нововоронежской АЭС информацию о взрыве отрицало, заявив, что похожий на него громкий звук вызван срабатыванием системы защиты. Следует отметить, что 2-я очередь Нововоронежской атомной электростанции была построена по новому проекту и является первым объектом с применением новых

¹ Без АЭС Татарстан погрузится во тьму? [Электронный ресурс] / Т. Янькова // Вечерняя Казань. – Режим доступа: <http://www.evening-kazan.ru/articles/bez-aes-tatarstan-pogruzitsya-vo-tmu.html>. – Дата доступа: 12.06.2021.

² Обвинения в нарушениях при строительстве ЛАЭС-2: суд без «ответчиков» [Электронный ресурс] // Новости России СНГ и мира. – ИА REGNUM. – Режим доступа: <http://regnum.ru/news/society/2091735.html>. – Дата доступа: 09.06.2021.

³ Строительство второй Ленинградской АЭС отстает на 4 года [Электронный ресурс] / А. Ожаровский // Bellona.ru: Публикации. – Режим доступа: <https://bellona.ru/2015/10/15/laes-2-ovos/> – Дата доступа: 10.06.2021.

реакторов ВВЭР-1200. После инцидентов на Нововоронежской АЭС правительство Вьетнама приняло решение отказаться от строительства в своей стране аналогичной АЭС по российскому проекту⁴.

Среди стран Европы атомная энергетика наиболее широко развита во Франции, где в настоящее время в составе 19 АЭС эксплуатируется 58 реакторов. Несмотря на накопленный богатый опыт, страна периодически сталкивается с проблемами при их сооружении. Так, на строящемся третьем энергоблоке АЭС «Фламанвиль» было обнаружено повышенное содержание углерода в стали крышки и днища корпуса реактора ЕРК. По мнению специалистов, это может привести к уменьшению прочности металла ниже установленной нормы, что создает риски для безопасной работы реактора. В Великобритании аналогичные проблемы выявлены в корпусе реактора строящейся АЭС «Хинкли Пойнт С». В обоих случаях строительство атомных электростанций ведет французская энергетическая компания ЕБЕ, а корпуса реакторов изготовлены во Франции.

Выявленные проблемы привели к увеличению сроков строительства, поскольку требуется установить, будут ли элементы корпусов соответствовать нормам. Если исследование покажет несоответствие, то придется изготавливать новые корпуса. Ранее начало эксплуатации первого блока станции планировалось на 2023 г., но этот срок будет отложен.

О проблемах французского проекта ЕРК свидетельствует и тот факт, что до сих пор не построен ни один такой энергоблок – ни на «Фламанвиле-3», ни на АЭС «Олкилуото-3» в Финляндии, ни на АЭС «Тайшань» в Китае. Сроки их сооружения неоднократно откладывались, а стоимость строительства существенно возросла. В связи с этим специалисты высказывают мнение о необходимости расширения сотрудничества с «Росатомом», несмотря на то что, по заявлениям разработчиков, реактор ЕРК, в сравнении с реакторами предыдущих поколений, имеет меньшую вероятность аварии, более высокие рентабельность, мощность и экономичность⁵.

В Финляндии работают две АЭС, каждая из которых имеет по два реактора. Их суммарная мощность составляет 2,7 ГВт. Кроме того, в стране действует один исследовательский реактор. Ведется строительство пятого промышленного реактора и разрабатываются планы строительства шестого. В октябре 2011 г. в Финляндии было объявлено о строительстве новой атомной электростанции на мысе Ханхикиви⁶. Однако из-за несостоятельности экономического решения проект покинул основной инвестор строительства – немецкий концерн E.ON. О готовности достроить «Ханхикиви» заявил «Росатом», но в ходе сооружения данного объекта российская компания столкнулась с активными протестами местного населения, которое различными способами стремилось помешать возведению станции⁷.

В Бельгии в 2016 г. на АЭС «Тианж-2» в результате эрозии обнаружена потеря прочности железобетонной оболочки реактора. В августе 2016 г. второй энергоблок АЭС «Тианж-2» был временно остановлен. На бельгийской АЭС «Дуль», после того как эксперты обнаружили в нижней части третьего энергоблока корпуса реактора порядка 8 тыс. трещин в два сантиметра каждая, было принято решение о его остановке.

Реакторы обеих АЭС были временно выведены из эксплуатации по требованию Федерального агентства Бельгии по ядерной безопасности. Бельгийские эксперты заверяют, что

⁴ В России произошла авария на Нововоронежской АЭС [Электронный ресурс] // BY24.ORG. – Режим доступа: https://by24.org/2016/11/17/accident_at_nuclear_plant_in_voronezh/new_voronezh_nuclear_plant/. – Дата доступа: 10.06.2021.

⁵ Проблемы при строительстве британской АЭС [Электронный ресурс] // Все о релейной защите RZA.ORG.UA. – Режим доступа: <http://rza.org.ua/news/read/Problemy-pri-stroitelstve-britanskoj-AES.html> – Дата доступа: 10.06.2021.

⁶ АЭС Ханхикиви // Seogan: Атомные станции – надзор и безопасность. – Режим доступа: <https://www.seogan.ru/aes-xanxikivi.html>. – Дата доступа: 11.06.2021.

⁷ Репортаж: Финны не рады приходу Росатома [Электронный ресурс] / А. Ожаровский // Bellona.ru: Публикации. – Режим доступа: <https://bellona.ru/2015/10/15/laes-2-ovos/>. – Дата доступа: 10.06.2021.

угрозы для населения и окружающей среды нет. Однако, по мнению немецких региональных министров, повторный ввод в эксплуатацию реакторов на АЭС «Дуль» и «Тианж», расположенных в 60 и 120 км от границы с Германией, чреват серьезным инцидентом, который может иметь значительные негативные последствия для 17-миллионного населения соседнего немецкого региона. Тревогу усиливает тот факт, что жителям ближайших к АЭС населенных пунктов в Бельгии начали бесплатно раздавать таблетки с йодом. Министры окружающей среды и экономики земли Северный Рейн-Вестфалия выступили против перезапуска остановленных ядерных реакторов в Бельгии и направили письмо федеральному министру Германии по окружающей среде с просьбой предпринять меры для недопущения перезапуска бельгийских реакторов.

Только в 2011 г. на АЭС в Бельгии произошло 14 инцидентов, 11 из которых квалифицированы как происшествия первого уровня (инциденты без последствий), еще два – второго уровня (происшествия со значительным нарушением правил безопасности). Правительство Бельгии подтвердило, что все АЭС на территории страны будут поэтапно закрыты к 2025 г.⁸

КНР планирует в ближайшие 10 лет вложить почти 570 млрд долларов в строительство 60 атомных энергоблоков в дополнение к уже существующим 30. При этом китайские ученые в вопросах проектирования и строительства АЭС рассчитывают обходиться в будущем только своими силами без участия иностранцев. Но уже на начальном этапе в КНР начали сталкиваться с проблемами при сооружении атомных электростанций. Одна из них – выбор подходящих площадок для строительства. Оказалось, что по сейсмическому фактору, наличию больших объемов воды и еще целому ряду условий в Китае не так много мест, где можно возводить энергоблоки.

Помимо проблем безопасности при возведении АЭС, Китаю придется заниматься вопросами утилизации большого количества радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. Пока нет ответа на вопрос, каким образом будет решаться эта проблема, и КНР старается не привлекать к ней внимания международной общественности. Специалисты отмечают, что в Китае пока не отработаны технологии замкнутого ядерного цикла и в обозримой перспективе это сделано не будет.⁹

Япония до катастрофы 2011 г. на АЭС «Фукусима-1» располагала 54 действующими атомными реакторами. В декабре 2013 г. официально принято решение о закрытии всех шести блоков «Фукусима-1». Позднее все реакторы японских АЭС были постепенно заглушены. Правительство приложило много сил для возобновления их работы. Предполагается, что АЭС смогут перезапустить, после того как будет подтверждено их соответствие новым, более строгим стандартам безопасности. Однако подготовка к пуску энергоблоков сталкивается с серьезным противодействием со стороны оппозиционных сил и сопровождается судебными разбирательствами. В результате 32 из 48 реакторов в итоге планируется списать по различным основаниям (несоответствие новым стандартам безопасности, сейсмическая активность и др.). Весной 2015 г. операторы приняли решение вывести из эксплуатации 5 наиболее старых атомных реакторов. Хотя 42 японских ядерных силовые установки считаются действующими, в 2016 г. работали только 4 из них, а остальные были остановлены. Два энергоблока находятся в стадии строительства, но их возведение заморожено. Вместе с тем в 2017 г. Япония рассчитывала запустить 10 ранее остановленных реакторов.

⁸ Десятки тысяч немцев, голландцев и бельгийцев вместе протестуют против двух АЭС [Электронный ресурс] / К. Польская // Новости и аналитика о Германии, России, Европе, мире. DW. – Режим доступа: <https://www.dw.com/ru/десятки-тысяч-немцев-голландцев-и-бельгийцев-вместе-протестуют-против-двух-аэс/a-39407935>. – Дата доступа: 10.06.2021.

⁹ Ядерная экспансия Китая, планы и проблемы [Электронный ресурс] // Народный Корреспондент. – Режим доступа: <http://nk.org.ua/geopolitika/yadernaya-ekspansiya-kitaya-planu-i-problemyi-77825>. – Дата доступа: 09.06.2021.

Ввиду потенциальной опасности атомных электростанций процесс их строительства нередко носит политизированный характер. В частности, с принятием решения о возведении Белорусской АЭС Литва активно противодействует процессу его завершения. Главной претензией является несогласие с размещением АЭС в непосредственной близости от белорусско-литовской границы, что в случае аварии создает угрозу радиоактивного заражения. Вместе с тем эксперты полагают, что подобная позиция литовской стороны является политически мотивированной, о чем свидетельствует отсутствие активных сторонников Литвы в данном споре в других странах.

Кроме того, на уровне решения технических вопросов при строительстве АЭС белорусская сторона осуществляет активное взаимодействие с литовским институтом энергетики в рамках программы Еврокомиссии «Инструмент ядерной безопасности». Объем ее финансирования составляет 3,5 млн евро. Белорусскими специалистами отмечается конструктивное сотрудничество с литовскими коллегами. Более того, литовские атомщики испытывают давление со стороны членов правительства и политиков своей страны, которые требуют прекратить сотрудничество с Республикой Беларусь. Так, в сентябре 2018 г. МИД Литвы потребовал от Литовского института энергетики пересмотреть свою позицию по Белорусской АЭС, несмотря на то что литовским внешнеполитическим ведомством ранее было согласовано участие ученых данного института в консультациях Беларуси по строительству АЭС в Островце¹⁰. При этом какие-либо замечания, указывающие на наличие технических проблем в обеспечении безопасности Белорусской атомной станции у литовских специалистов, представителей МАГАТЭ и различных международных миссий, не возникали.

Вместе с тем инциденты, происходящие на Игналинской АЭС в Литве, могут представлять реальную опасность. Так, 16 августа 2017 г. в зале бассейнов выдержки топлива в процессе загрузки контейнера отработанным топливом часть топливной кассеты высвободилась из захвата загрузочной машины и осталась на кольцевом чехле контейнера¹¹. В случае разрушения кассеты такое происшествие можно было бы квалифицировать как инцидент с ядерными материалами.

Возникшая напряженность с Литвой не является уникальной ситуацией. Подобная проблема существовала в отношениях между Австрией и Словакией из-за строительства нового энергоблока. Давление на Словакию со стороны Австрии оказалось достаточно эффективным. В 2002 г. стремившаяся в ЕС страна, поддавшись на требования Австрии, взяла обязательство остановить реакторы АЭС «Ясловске Богунице». К 2008 г. это было сделано, однако в январе 2009 г. из-за проблем с поставками энергоносителей словацкие власти снова запустили реакторы. Австрийцам это не понравилось, но вторично на их давление словаки не поддались.

До конца 1970-х гг. Австрия, как и все развитые страны, активно занималась атомными исследованиями. Недалеко от Вены была возведена АЭС «Цвентендорф», но в эксплуатацию ее так и не ввели. В 1978 г. экологические активисты добились проведения в стране общенационального референдума по вопросу будущего станции. С минимальным перевесом победили противники АЭС, и с тех пор полностью построенная атомная электростанция стоит законсервированной.

¹⁰ МИД Литвы потребовал от Литовского института энергетики пересмотреть свою позицию по БелАЭС [Электронный ресурс] // Ежедневник ej.by: Новости Беларуси – свежие и главные новости дня и недели... – Режим доступа: <https://ej.by/news/world/2017/09/24/mid-litvy-potreboval-ot-litovskogo-institut-a-energetiki-peresmotret.html>. – Дата доступа: 11.06.2021.

¹¹ Игналинская АЭС сообщила VATESI об инциденте с топливной кассетой [Электронный ресурс] // Научный портал «Атомная энергия 2.0». – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/news/2017/08/16/78541>. – Дата доступа: 11.06.2021.

«Экологический экстремизм» Австрии усилился после аварии на Чернобыльской АЭС. Постепенно страна взяла курс на борьбу против атомных станций во всей Европе. Соответствующее положение присутствует в программах всех ведущих партий, что создает проблемы многим странам, а некоторые станции с подачи Австрии и вовсе были закрыты.

Особый интерес у Австрии возник к атомным станциям соседних с ней стран. Еще в 1990-е гг. австрийцы проявляли обеспокоенность в отношении АЭС «Кршко» в Словении. Ее работа действительно вызывала нарекания, и в 2008 г. из-за неполадок ее пришлось временно остановить. Тем не менее, несмотря на достаточно жесткие требования Вены рассмотреть вопрос о ее закрытии, Словенская АЭС была вновь запущена и продолжает работать.

В 1998 г. Австрия пообещала заблокировать переговоры о вступлении Чехии в Евросоюз, если чешская АЭС «Темелин» не будет закрыта. Чехи отказались, сославшись на то, что право выбора источников энергии – внутреннее дело каждой страны. Австрийские активисты блокировали пограничные переходы с Чехией, а Партия свободы пыталась организовать античешский референдум. Однако на сторону Чехии встал Евросоюз, и АЭС продолжает функционировать.

Министр окружающей среды Австрии Николаус Берлакович после аварии на АЭС «Фукусима-1» внес на рассмотрение коллег по ЕС предложение о проведении срочных проверок на европейских атомных станциях для выяснения их надежности в случае землетрясений. Он также предложил странам Евросоюза задуматься об отказе от атомной энергетики. Во многом по требованию Австрии Болгария закрыла АЭС «Козлодуй», а Литва – Игналинскую АЭС.

Вместе с тем «антиатомная» деятельность Австрии носит политизированный характер. Об этом, в частности, свидетельствует гораздо более мягкая риторика Вены в отношении АЭС «Пакт» в Венгрии и абсолютно спокойное отношение к многочисленным АЭС в Германии. Подобный подход, по мнению экспертов, объясняется тем, что Венгрия, наряду с Германией и Швейцарией, является для Австрии более значимым партнером в отличие от остальных стран-соседей¹².

Для более глубокого понимания особенностей, с которыми приходится сталкиваться Беларуси при строительстве собственной АЭС, полезен опыт работы генерального подрядчика. В частности, надзорным органам Республики Беларусь, осуществляющим контроль за сооружением атомной электростанции, целесообразно учитывать опыт российского генерального подрядчика при возведении Тяньваньской АЭС в Китае (далее – ТАЭС), поскольку строительство Белорусской АЭС по аналогичному проекту ведет тот же коллектив АО «Атомстройэкспорт».

Необходимо учитывать, что в ходе сооружения ТАЭС неоднократно возникал ряд спорных ситуаций из-за многочисленных рекламаций, предъявляемых китайской стороной. Например, после завершения гидравлических испытаний на первом и втором этапах ревизии оборудования были обнаружены проблемы, решение которых заняло более 17 месяцев, что отложило изначально заявленные сроки ввода в эксплуатацию первого энергоблока. Несоблюдение графика строительно-монтажных работ при сооружении первой очереди ТАЭС связано с большим количеством изменений проектных решений (всего в проект внесено более 31 тыс. изменений и выдано более 31,5 тыс. разъяснений по нему).

В частности, на этапе ввода в эксплуатацию первого энергоблока ТАЭС были выявлены следующие нарушения:

- деформация элементов опорно-подвесной системы;
- дефекты теплообменных трубок парогенераторов;
- индикации на сварных швах дыхательного трубопровода;
- проблемы с установкой и извлечением шахты в корпусе реактора;

¹² Австрия объявляет войну АЭС [Электронный ресурс] / В. Трухачев // Сетевое издание «Правда.Ру». – Режим доступа: <https://www.pravda.ru/world/1070030-oesterreich/> – Дата доступа: 14.06.2021.

вмятина на главном разъеме реактора;
некачественное сварное соединение главного циркуляционного трубопровода;
коррозионное повреждение оборудования систем морской воды;
несоответствие трубопроводной арматуры установленным требованиям.

Богатый опыт КНР в области атомной энергетики, а также наличие высококвалифицированных специалистов во всех сферах, связанных со строительством АЭС, позволяли компетентно и своевременно выявлять некачественно выполненные работы, ошибки в расчетах и несовершенство конструкций. Надзорными органами КНР не принимались возражения по возникающим проблемным вопросам. В спорных случаях проводились дополнительные исследования для приведения выполненных работ в соответствие с китайскими нормами. В итоге устранение несоответствий потребовало от подрядчика привлечения значительных людских, материальных и финансовых ресурсов.

В то же время Минэнерго и МЧС не располагают детальной информацией о проблемах других стран, связанных с сооружением и эксплуатацией атомных электростанций. Кроме того, в сфере атомной энергетики имеются также иные факторы, которые усложняют разрешение спорных вопросов, в том числе отсутствие собственных высококвалифицированных специалистов в области проектирования, строительства и эксплуатации объектов ядерной энергетики, недостаточный опыт в сфере надзора за обеспечением их безопасности.

Заключение

Таким образом, несмотря на накопленный богатый опыт строительства АЭС, при их сооружении подавляющее большинство стран постоянно сталкиваются с рядом проблем, решение которых требует принципиально новых подходов, а иногда и дополнительных научных исследований. Как следствие, в большинстве случаев подрядчикам не удается уложиться в заявленные сроки строительства.

Проблемы, возникающие в ходе строительства Белорусской АЭС, включая разногласия заказчика и подрядчика, а также претензии стран-соседей, являются типичными для практики строительства подобных объектов. В результате необходим постоянный анализ и учет зарубежного опыта при строительстве и эксплуатации собственной АЭС. В дальнейшем при развитии атомной отрасли целесообразно руководствоваться следующими основными принципами:

осуществлять деятельность в области атомной энергетики исходя исключительно из интересов Республики Беларусь;

создать собственную систему подготовки кадров, позволяющую обеспечить полный жизненный цикл АЭС от строительства до вывода из эксплуатации без помощи иностранных специалистов;

в рамках выработанной информационной политики в данной сфере осуществлять информирование населения об эксплуатации Белорусской АЭС, включая разъяснение происходящих инцидентов.

Выстраивание безопасности ядерных установок должно отталкиваться от Концепции национальной безопасности Республики Беларусь, поскольку функционирование АЭС подразумевает не только соблюдение технологических регламентов. Особое внимание при этом следует уделить информационному противодействию, а именно – попыткам давления на Республику Беларусь, связанным с вопросами атомной энергетики. Таким образом, изложенные в статье выводы могут быть использованы при совершенствовании отдельных положений Концепции национальной безопасности.

**Международный опыт реагирования на инциденты при строительстве
и эксплуатации атомных электростанций**

**International experience in incident response during the construction
and operation of nuclear power plants**

Левчук Олег Васильевич

Государственный секретариат
Совета Безопасности Республики Беларусь,
координационно-инспекторское управление,
главный советник

Адрес: ул. Карла Маркса, 38,
220016, г. Минск, Беларусь

Oleg V. Levchuk

State Secretariat of the Security Council
of Belarus, Coordinating and Inspection
Department, Chief Adviser

Address: Karla Marksa str., 38,
220016, Minsk, Belarus

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.269>

**INTERNATIONAL EXPERIENCE IN INCIDENT RESPONSE DURING THE
CONSTRUCTION AND OPERATION OF NUCLEAR POWER PLANTS**

Levchuk O.V.

Purpose. Investigation of the features of the construction, commissioning and operation of nuclear power plants.

Methods. General scientific methods of research of induction, deduction, analysis and synthesis.

Findings. Accidents, incidents and the socio-political situation that arose during the construction, commissioning and operation of nuclear power plants in the near and far abroad, as well as in the Republic of Belarus, are analyzed. The basic principles of further development of the nuclear industry in the republic, taking into account the Concept of National Security of the Republic of Belarus, are proposed.

Application field of research. The presented research results can be used to improve certain provisions of the National Security Concept of the Republic of Belarus concerning the development of the country's nuclear energy.

Keywords: APS, accident, incident, socio-political situation, construction, operation.

(The date of submitting: July 21, 2021)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.278>

УДК 614.841.332:624.94.014.2

ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ПРИМЫКАЮЩИМИ СМЕЖНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесиук Н.М., Писченков И.А.

Цель. На основе экспериментальных исследований и теоретических данных определить теплофизические характеристики вспучивающегося огнезащитного состава и оценить прогрев стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой наружной поверхности с учетом примыкания бетонного покрытия, оценить влияние теплообмена с бетонным покрытием на оптимальную толщину слоя вспучивающегося огнезащитного состава для обеспечения требуемого предела огнестойкости.

Методы. Моделирование в системе конечно-элементного анализа.

Результаты. На основе серии экспериментальных и теоретических исследований в системе конечно-элементного анализа ANSYS решена теплотехническая задача огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой наружной поверхности на основе вспучивающегося состава с учетом примыкания бетонного покрытия. Экспериментальные исследования использованы для оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации. Полученные теплофизические характеристики позволили оценить прогрев стальных конструкций с огнезащитой с учетом теплообмена с бетонным покрытием. В зависимости от требуемого предела огнестойкости и вида рассматриваемых конструкций (перекрытия) и расчетной ситуации при учете теплообмена с бетонным покрытием оптимальная толщина огнезащитного покрытия, обеспечивающая требуемый предел огнестойкости, снижается в 1,2...4,4 раза.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы для решения задач огнестойкости стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой наружной поверхности с учетом теплообмена со смежными строительными конструкциями и элементами при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Ключевые слова: огнестойкость, вспучивающаяся огнезащита, эффективные теплофизические характеристики, обратная задача теплопроводности, стандартный температурный режим, стальные конструкции, метод конечных элементов.

(Поступила в редакцию 13 июля 2021 г.)

Введение

Одним из нормируемых для строительных конструкций показателей является предел огнестойкости. Основные задачи огнестойкости – обеспечение эвакуации и спасение людей, обеспечение для прибывших подразделений безопасных условий для ликвидации пожара¹. Огнестойкость стальных конструкций, в том числе с огнезащитой, во многом определяется закономерностью прогрева сечения в ходе пожара. В процессе прогрева строительных конструкций может произойти их разрушение, а вследствие чего – гибель людей, а также причинен значительный материальный ущерб. Поэтому обеспечение требуемой огнестойкости указанных конструкций является важной и актуальной задачей.

¹ Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ: принят 02.07.2013: вступ. в силу 01.08.2010 / постановление Совета Министров Респ. Беларусь. – Минск: Госстандарт, 2015. – 25 с.

Огнестойкость – способность конструктивной системы, ее части или отдельной конструкции выполнять требуемые функции (несущую и (или) ограждающую) в течение установленной продолжительности регламентируемого пожара при заданном уровне нагрузки². Наступление предельного состояния R стальных конструкций происходит при потере прочности или устойчивости конструкции, что соответствует достижению температуры прогрева стального сечения конструкции критического значения [1]. Для каждого значения критической температуры стали соответствует свое значение коэффициента снижения расчетного предела текучести.

Основная часть

Классически расчетная оценка огнестойкости стальных конструкций осуществляется с использованием табличных данных и упрощенных методов расчета, основанных на расчете теплоемкости системы без учета теплопотерь в смежные конструкции [2; 3]. При этом в ряде нормативных документов допускается использовать более подробные, так называемые общие методы теплотехнического расчета³. Математический аппарат общего метода расчета достаточно сложен и требует решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов, которое может быть выполнено с помощью программных комплексов, например ANSYS.

Упрощенные методы и табличные данные в настоящее время широко используются при расчете огнестойкости стальных конструкций, которые могут быть подвержены при пожаре обогреву со всех сторон и для которых нет необходимости получать распределение температур в пределах стального сечения⁴. Для указанных конструкций эти методы дают достаточно хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований их прогрева. В иных случаях требуется использование общего метода расчета.

Оценка прогрева незащищенного стального сечения при пожаре, как правило, не вызывает сложностей, но при этом и не имеет особого смысла, т.к. предел огнестойкости незащищенной конструкции редко когда превышает предел огнестойкости R15. Во всех остальных случаях, где требуется большая огнестойкость, необходимо использовать огнезащиту стальных конструкций. Эффективность огнезащитных средств оценивается экспериментальными либо экспериментально-расчетными методами. Расчетная оценка прогрева стальных сечений в экспериментально-расчетных методах осуществляется на основании теплофизических характеристик огнезащиты, полученных путем решения обратной задачи теплопроводности в диапазоне расчетных температур при рассматриваемом температурном воздействии.

Теплофизические характеристики огнезащиты в дальнейшем используются для определения прогрева стального сечения.

Оценка огнестойкости стальных конструкций предусматривает анализ результатов серии их модельных огневых испытаний с различной толщиной огнезащиты и приведенной толщиной металла⁵. Результаты испытаний посредством решения уравнения регрессии позволяют определить константы, используемые в дальнейшем для расчета времени прогрева

² Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019; введ. 08.09.2020. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

³ Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250); введ. 10.12.2009. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 77 с.

⁴ Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненными из плит КНАУФ-Файерборд ТУ 5742-006-01250242-2009 по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей ТУ 1121-012-04001508-2011: утв. зам. нач. ФГБУ ВНИИПО МЧС России 19.03.2012. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2012. – 40 с.

⁵ Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied passive protection products to steel members: BS EN 13381-4:2013. – Ent. 31.05.2013. – London: BSI, 2013. – 88 p.

аналогичных конструкций до критической температуры в зависимости от приведенной толщины металла и толщины огнезащиты.

В строительстве также применяются стальные конструкции с примыкающими смежными железобетонными покрытиями (рис. 1).

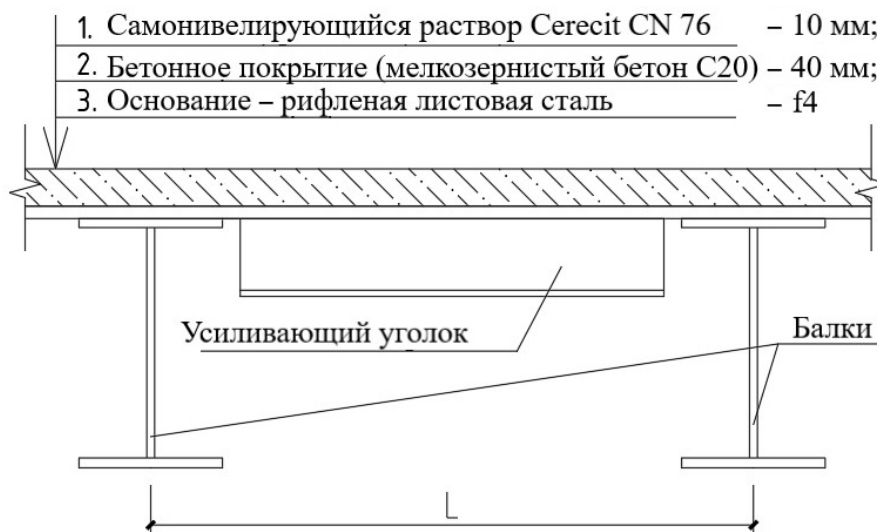


Рисунок 1. – Детали конструкции с примыканием бетонного покрытия

Конструкция составного железобетонного перекрытия состоит из стальных стержневых элементов (балок, уголков), листовой стали и бетонного покрытия. Однако, как указано выше, теплообмен с примыкающим бетонным покрытием при оценке прогрева стального сечения не учитывается.

Примыкание смежных элементов, как правило, снижает температуру стального сечения конструкций за счет теплообмена через поверхности контакта. В результате учета теплообмена со смежными элементами значительно изменяется оптимальная толщина огнезащитного покрытия для обеспечения требуемого предела огнестойкости.

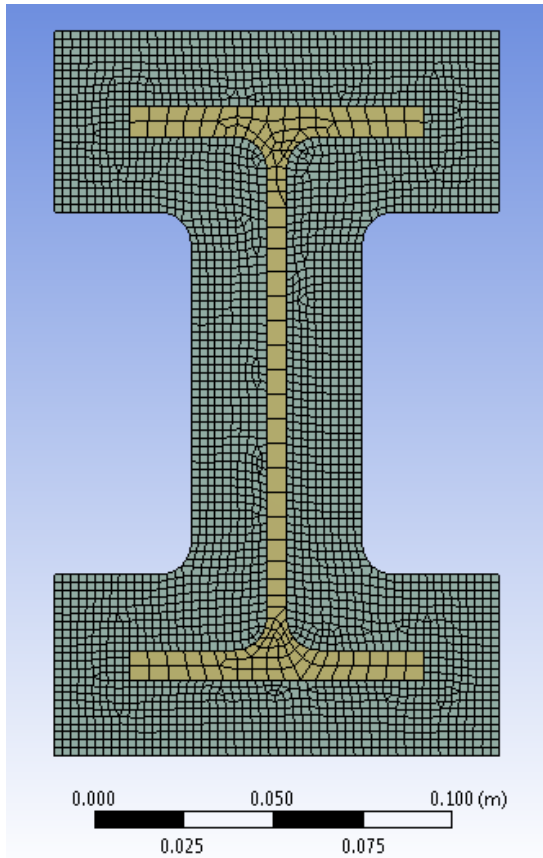
В частности, задача огнезащиты составного перекрытия, состоящего из стального листа, усиленного стальными уголками, и бетонного покрытия поверх него, в упрощенной постановке может быть решена только со значительным запасом как огнезащиты, так и толщины бетонного покрытия. Суммарный эффект огнезащиты для обеспечения предельного состояния EI по огнестойкости, равно как и снижение температуры стального сечения за счет теплопотерь в бетон могут быть определены исключительно общими методами расчета.

Для доказательства наличия снижения температуры стального сечения за счет теплообмена со смежным бетонным покрытием для указанного составного перекрытия были решены следующие задачи:

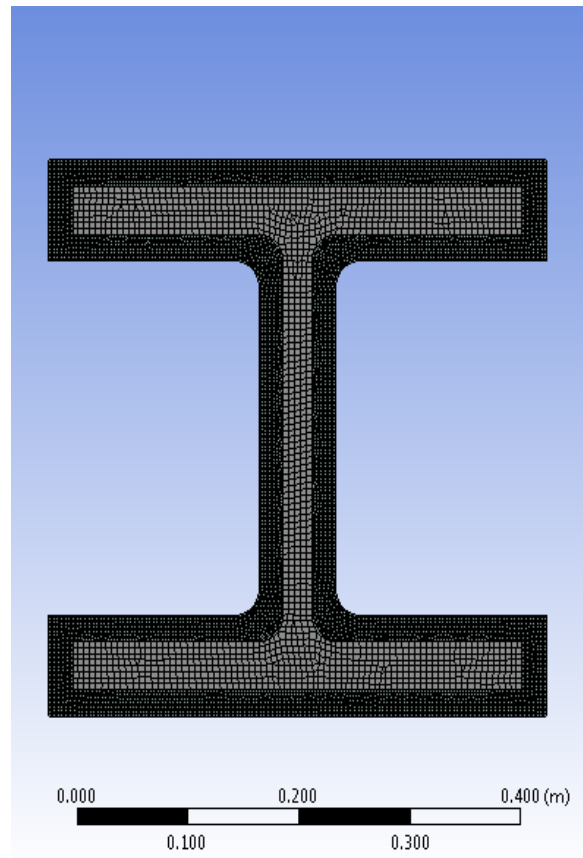
1. Разработаны модели стальных огнезащищенных конструкций в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS, идентичные испытанным. Примеры разработанных моделей приведены на рисунке 2.

Определены эффективные теплофизические характеристики вспучивающейся огнезащиты путем решения обратной задачи теплопроводности для серии экспериментальных исследований с использованием общих методов расчета в конечно-элементной модели. Серия экспериментальных исследований состояла из набора стальных колонн и балок двутаврового сечения с различной приведенной толщиной металла от 3,4 до 17,0 мм.

2. Разработаны модели 4 видов составного перекрытия, пример одной из моделей представлен на рисунке 3. Решена прочностная задача с определением критической температуры стального сечения.



Расчетная модель конструкции с приведенной толщиной металла 3,4 м и толщиной вспучивающегося огнезащитного покрытия 1,052 мм



Расчетная модель конструкции с приведенной толщиной металла 17 м и толщиной вспучивающегося огнезащитного покрытия 1,081 мм

Рисунок 2. – Модели стальных стержневых огнезащищенных конструкций со вспучивающимся покрытием

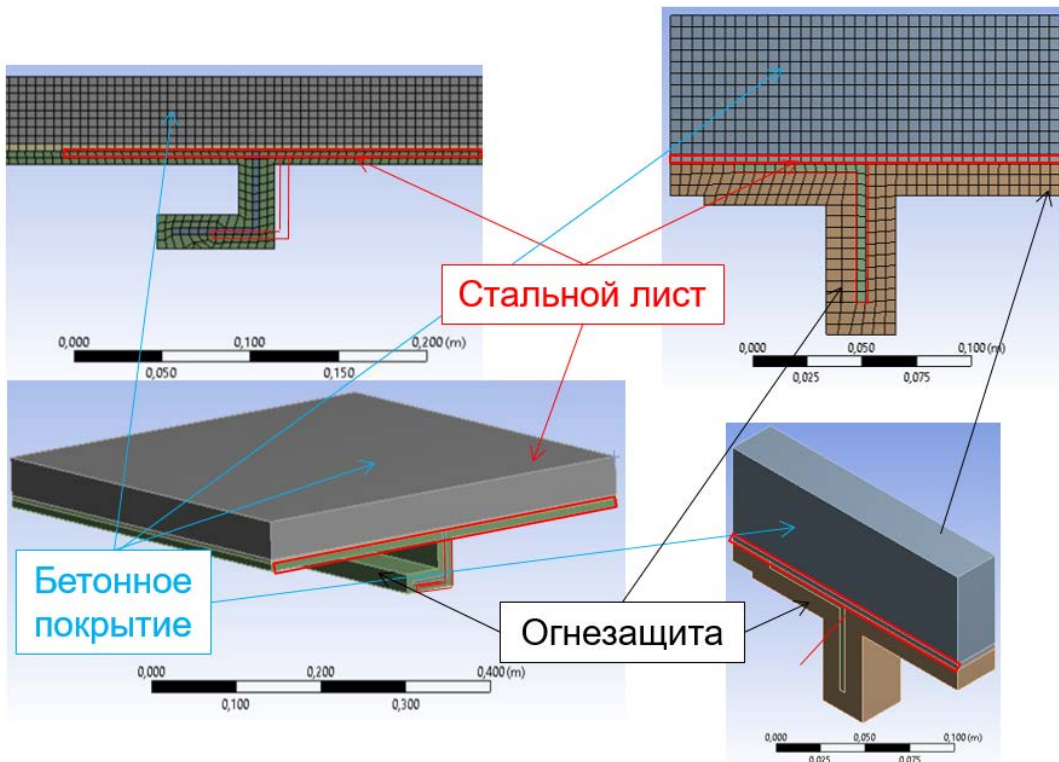


Рисунок 3. – Модель составного перекрытия

3. Для 4 видов составного перекрытия, включающих стальные сечения с различной приведенной толщиной металла и критической температурой, решены 4 вида задач прогрева при стандартном температурном воздействии длительностью 30, 45 и 60 мин с различными граничными условиями (соответствующими в разной степени как упрощенной, так и общей расчетной модели):

3.1) без учета теплоотдачи в бетон (теплота от пожара аккумулируется исключительно стальным сечением – соответствует формулировке упрощенных методов расчета);

3.2) с косвенным учетом теплоотдачи в бетон (при этом поверхность контакта стального сечения с бетоном охлаждается как необогреваемая поверхность);

3.3) с учетом теплоотдачи в бетон (теплота от пожара аккумулируется как стальным, так и бетонным сечением, без учета теплопотерь с необогреваемой поверхности);

3.4) с учетом теплоотдачи в бетон (теплота от пожара аккумулируется как стальным, так и бетонным сечением, а также учитываются теплопотери с необогреваемой поверхности – соответствует формулировке общих методов расчета).

Для каждого вида задач прогрева решена оптимизационная задача и определена минимально допустимая толщина вспучивающегося огнезащитного покрытия исходя из данных экспериментальных исследований и максимального приближения температуры сечения к критической.

На основании результатов проведения серии экспериментальных исследований прогрева стальных огнезащищенных конструкций были проанализированы зависимости температуры стального сечения испытанных образцов от времени огневого воздействия.

Следует отметить, что кривые прогрева исследуемых конструкций при проведении огневых испытаний можно условно разделить на два участка. Точка перегиба соответствует процессу активного вспучивания огнезащитного покрытия в температурных диапазонах от 200 до 250 °С с последующим замедлением прогрева. Замедление прогрева обусловливается несколькими факторами: поглощением теплоты огнезащитным покрытием в результате его термического разложения и уменьшением теплопроводности покрытия за счет увеличения его пористости и образования пенококса [4].

В дальнейшем данные результаты прогрева стальных огнезащищенных конструкций были использованы при определении теплофизических характеристик огнезащитного состава.

Определение эффективных теплофизических характеристик огнезащитного состава проводили с использованием системы конечно-элементного анализа ANSYS, включало:

– разработку расчетных конечно-элементных моделей конструкций с огнезащитой наружной поверхности с формулировкой начальных и граничных условий;

– оценку эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием метода последовательных итераций.

Расчетная модель принята составной из двух частей, первая часть – двутавровое сечение, вторая часть – огнезащитный состав. В ходе моделирования фрагмент разбивался на конечные элементы призматической формы с максимальным размером грани для металла 5 мм, для огнезащитного покрытия – 2 мм.

Во время огневого воздействия толщина огнезащиты изменяется практически на всей продолжительности пожара. Ввиду сложности процесса моделирования изменения толщины огнезащитного состава для упрощения модели изменением геометрических размеров вспученного состава пренебрегали, при этом толщину огнезащиты в расчетной модели задавали постоянной (во вспученном состоянии) с коэффициентом вспучивания, равным 20. Таким образом, процесс вспучивания учитывался косвенным образом за счет изменения эффективных теплофизических характеристик огнезащиты. Эффективная теплопроводность вспучивающегося огнезащитного покрытия определялась исходя из следующих расчетных упрощений:

- изменением температуры по высоте экспериментальной конструкции пренебрегали, поэтому расчетные модели приняты двумерными;
- теплофизические характеристики стали принимали согласно ТКП EN 1993-1-2-2009⁶;
- значение удельной теплоемкости вспучивающегося огнезащитного состава принято постоянным и равным 5000 Дж/(кг×К);
- значение плотности вспучивающегося огнезащитного состава принято постоянным (100 кг/м³);
- при определении теплового потока, поглощенного поверхностью конструкции, учитывался теневой эффект. Теневой эффект учтен посредством снижения теплового потока за счет поправочного коэффициента. Поправочный коэффициент для учета влияния теневого эффекта определен согласно положениям ТКП EN 1993-1-2-2009⁷.

Для определения эффективных теплофизических характеристик вспучивающегося огнезащитного состава для разработанных расчетных конечно-элементных моделей стальных конструкций с огнезащитой определены:

- 1) начальные условия: температура в расчетном сечении одинакова и равна температуре окружающей среды;
- 2) граничные условия (для теплообмена между газовой средой пожара и наружной поверхностью конструкций граничные условия приняты 3-го рода, для теплообмена между огнезащитным составом и стальной конструкцией – 4-го рода):
 - температура греющей среды принята равной изменению среднеобъемной температуры газовой среды в печи при проведении огневых испытаний;
 - коэффициент теплоотдачи конвекцией от нагревающей среды к поверхности конструкции с равен⁸ 25 Вт/(м²×К);
 - степень черноты поверхности материалов принята равной 0,8 для огнезащитного состава⁹, 0,7 для стали¹⁰ и 1,0 для пламени¹¹ (греющей среды);
 - для контура примыкания огнезащитного состава к стальному сечению принят идеальный тепловой контакт (равенство плотности теплового потока для двух тел);

Поправочный коэффициент для учета влияния теневого эффекта определялся согласно 4.2.5.1(2) ТКП EN 1993-1-2-2009¹².

На этапе оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава для конструкций путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации были приняты следующие расчетные предпосылки:

- 1) плотность стали ρ_a принята независимой от ее температуры и равна 7850 кг/м³;
- 2) значения теплофизических характеристик стали приняты согласно Еврокоду¹³.

Процесс параметрической оптимизации для эффективного коэффициента теплопроводности заключается в проведении итерационного расчета с последовательным уточнением зависимости коэффициента теплопроводности материала огнезащиты от температуры до момента удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных данных прогрева стального сечения. Расхождение экспериментальных и расчетных значений температуры стального сечения, защищенного огнезащитным покрытием, составляет: толщиной

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 3.

⁸ См. сноску 2.

⁹ См. сноску 2.

¹⁰ См. сноску 2.

¹¹ См. сноску 3.

¹² См. сноску 3.

¹³ См. сноску 3.

0,358–0,447 мм от 5 до 90 °С; толщиной 1,052–1,581 мм от 5 до 40 °С (расчетные значения температур в диапазоне от 350 до 800 °С находятся выше, чем экспериментальные, что идет в запас огнестойкости). Это свидетельствует о возможности использования разработанных расчетных моделей для прогнозирования прогрева стальных конструкций вспучивающимся огнезащитным составом.

Принято, что при моделировании прогрева стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой наружной поверхности с учетом примыкания смежных элементов наступление предела огнестойкости стальной конструкции происходит при прогреве расчетного сечения конструкции до критической температуры.

При разработке моделей для каждой из них установлены:

1) начальные условия: температура в расчетном сечении одинакова и равна температуре окружающей среды;

2) граничные условия (для теплообмена между газовой средой пожара и поверхностью конструкции, подвергнутой огневому воздействию, граничные условия приняты 3-го рода; для теплообмена между материалами, примыкающими друг к другу, – 4-го рода; для учета охлаждения моделируемой конструкции перекрытия с его необогреваемой поверхности в окружающую среду – 3-го рода с коэффициентом теплообмена 9 Вт/м^2)¹⁴:

– температура греющей среды принята равной изменению стандартного температурного режима¹⁵;

– коэффициент теплоотдачи конвекцией от нагревающей среды к поверхности конструкции равен¹⁶ $25 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$;

– степень черноты поверхности материалов принята равной 0,8 для огнезащитного состава¹⁷, 0,7 для стали¹⁸, 0,7 для бетона¹⁹ и 1,0 для пламени²⁰ (греющей среды);

– для контура примыкания огнезащитного состава к стальному сечению принят идеальный тепловой контакт (равенство плотности теплового потока для двух тел);

– потерями тепла по торцам конструкции (по длине) пренебрегали (тепловой поток принят равным нулю), в запас безопасности.

Результаты моделирования прогрева стальных конструкций со вспучивающимся огнезащитным покрытием с учетом теплопередачи примыкающему смежному бетонному покрытию в зависимости от расчетной ситуации приведены в таблице 1.

Заключение

В соответствии с результатами моделирования прогрева стальных конструкций, представленными в таблице 1, следует отметить, что при определении огнестойкости с учетом теплопередачи смежным примыкающим конструкциям оптимальная толщина огнезащитного вспучивающегося покрытия для обеспечения требуемого предела огнестойкости значительно меньше (в 1,2 раза при температурном воздействии в течение 30 мин, 1,7–3,1 при температурном воздействии в течение 45 мин и 2,3–4,4 при температурном воздействии в течение 60 мин в зависимости от вида рассматриваемой конструкции и расчетной ситуации).

¹⁴ См. сноску 2.

¹⁵ Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.10.1998. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 16 с.

¹⁶ См. сноску 2.

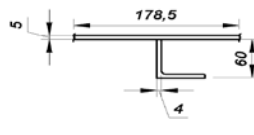
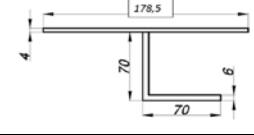
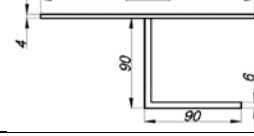
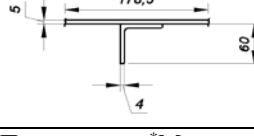
¹⁷ См. сноску 3.

¹⁸ См. сноску 3.

¹⁹ Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2 (02250); введ. 10.12.2009. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 86 с.

²⁰ См. сноску 2.

Таблица 1. – Результаты моделирования 4 видов составного перекрытия при температурном воздействии

Вид перекрытия	Критическая температура, °С	Время температурного воздействия, мин	Расчетная ситуация 3.1	Расчетная ситуация 3.2	Расчетная ситуация 3.3	Расчетная ситуация 3.4
			толщина огнезащиты, мм / температура, °С			
	708	30	0,358 / 617	0,358 / 534	0,358 / 410	0,358 / 408
		45	0,600 / 704	0,358 / 692	0,358 / 540	0,358 / 534
		60	1,300 / 689	0,800 / 668	0,358 / 671	0,358 / 659
	690	30	0,358 / 619	0,358 / 548	0,358 / 434	0,358 / 433
		45	0,700 / 689	0,400 / 681	0,358 / 578	0,358 / 573
		60	1,350 / 684	0,800 / 687	0,450 / 670	0,420 / 667
	654	30	0,358 / 581	0,358 / 563	0,358 / 464	0,358 / 463
		45	0,009 / 651	0,550 / 645	0,358 / 607	0,358 / 603
		60	1,400 / 684	1,100 / 654	0,600 / 652	0,600 / 644
	540	30	0,450 / 517	0,358 / 457	0,358 / 342	0,358 / 329
		45	1,100 / 538	0,550 / 528	0,358 / 463	0,358 / 414
		60	1,586 / 567*	1,100 / 515	0,400 / 516	0,358 / 527

Примечание. *Максимальная толщина не позволяет обеспечить требуемую расчетную температуру сечения.

Результаты моделирования свидетельствуют, что учет теплообмена стального сечения с бетонным покрытием позволяет существенно снизить расчетную температуру стального сечения и уменьшить оптимальную толщину огнезащиты. Причем с увеличением времени температурного воздействия увеличивается интенсивность теплопередачи в бетонное покрытие. Вследствие этого разница оптимального слоя огнезащитного покрытия, необходимого для обеспечения требуемого предела огнестойкости, при моделировании прогрева с учетом теплопередачи смежному бетонному покрытию возрастает по отношению к оптимальной толщине огнезащитного покрытия при моделировании прогрева без учета теплопередачи смежному бетонному покрытию. Оптимальная толщина огнезащитного покрытия, обеспечивающая требуемый предел огнестойкости, снижается в 1,2...4,4 раза в зависимости от требуемого предела огнестойкости и вида рассматриваемых конструкций (перекрытия) и расчетной ситуации. Таким образом, использование расчетных моделей в системе конечно-элементного анализа ANSYS позволяет учесть суммарный огнезащитный эффект и найти оптимальную толщину огнезащитного покрытия, существенно меньшую по сравнению с консервативными методами расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пехотиков, А.В. Огнестойкости изгибаемых стальных конструкций: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / А.В. Пехотиков. – М., 2008. – 198 с.
2. Жамойдик, С.М. Огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / С.М. Жамойдик. – Минск, 2017. – 129 с.
3. Ботян, С.С. Оценка нагрева стальных несущих элементов здания с учетом примыкающих конструкций / С.С. Ботян [и др.] // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов VII Международной заочной научно-практической конференции, Минск, 23 декабря 2020 г. / Университет гражданской защиты МЧС Беларуси. – Минск, 2021. – С. 15.
4. Гравит, М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий / М.В. Гравит // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 5. – С. 33–37.

Оценка огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями
Evaluation of fire resistance of steel building structures taking into account the influence of heat exchange with adjacent structures

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: aseckis@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8593-4413

Sergey S. Botyan

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: aseckis@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8593-4413

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: vadkud@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4889-1060

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Department of Scientific and Innovation Activity,
Head of the Department

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: vadkud@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4889-1060

Олесиук Николай Михайлович

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», сектор международного сотрудничества, начальник сектора

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: nikolai-96@tut.by
ORCID: 0000-0001-5925-1371

Nikolai M. Olesiyuk

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
International Cooperation Sector, Head of Sector

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: nikolai-96@tut.by
ORCID: 0000-0001-5925-1371

Писченков Иван Александрович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации
чрезвычайных ситуаций, курсант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: ipischenkov@mail.ru

Ivan A. Pischenkov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Prevention and Elimination of Emergency
Situations Faculty, cadet

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: ipischenkov@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.278>

EVALUATION OF FIRE RESISTANCE OF STEEL BUILDING STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF HEAT EXCHANGE WITH ADJACENT STRUCTURES

Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A.

Purpose. On the basis of experimental studies and theoretical data, to determine the thermophysical characteristics of an intumescent fire retardant and evaluate the heating of steel structures with intumescent fire protection of the outer surface, taking into account the adjoining of a concrete coating, as well evaluate the effect of heat transfer with a concrete coating on the optimal layer thickness of an intumescent fire retardant to ensure the required fire resistance limit.

Methods. Modeling in the system of finite element analysis.

Findings. On the basis of a series of experimental and theoretical studies in the ANSYS finite element analysis system, the thermotechnical problem of fire resistance of steel structures with fire protection of the outer surface based on an intumescent composition was solved, taking into account the abutment of a concrete coating. Experimental studies are used to assess the effective values of the thermophysical characteristics of an intumescent composition by solving the inverse problem of thermal conductivity for a computational finite element model using parametric optimization methods. The obtained thermophysical characteristics made it possible to evaluate the heating of steel structures with fire protection, taking into account heat transfer with a concrete coating. Depending on the required fire resistance level and the type of the considered structures (floor slab) and the design situation, taking into account heat exchange with the concrete coating, the optimal thickness of the fire retardant coating that provides the required fire resistance level is reduced by 1.2 ... 4.4 times.

Application field of research. The results can be used to solve the fire resistance problems of steel structures with partial and full fire protection of the outer surface during the design and construction of buildings and structures.

Keywords: fire resistance, intumescent fire protection, effective thermophysical characteristics, inverse problem of thermal conductivity, standard temperature conditions, steel structures, finite element method.

(The date of submitting: July 13, 2021)

1. Pekhotikov A.V. *Ognestoykosti izgibaemykh stal'nykh konstruksiy* [Fire resistance of bent steel structures]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2008. 198 p. (rus)
2. Zhamoidik, S.M. *Ognestoykost' stal'nykh kolonn s konstruktivnoy ognezashchitoy* [Fire resistance of steel columns with constructive fire protection]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Minsk, 2017. 129 p. (rus)
3. Batyan S.S., Kudryashov V.A., Zhamoidik S.M., Kreer L.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Otsenka nagreva stal'nykh nesushchikh elementov zdaniya s uchetom primykayushchikh konstruksiy [Assessment of heating of steel bearing elements of a building taking into account adjoining structures] *Proc. VII Intern. corresp. scientific-practical conf. «Problemy obespecheniya bezopasnosti lyudey pri pozhare i vzryve»*, Minsk, December 23, 2020. University of Civil Protection of the MES of the Republic of Belarus. Minsk: UCP, 2021. P. 15. (rus)
4. Gravit M.V. Otsenka porovogo prostranstva penokoksa ognezashchitnykh vspuchivayushchikhsya pokrytiy [Evaluation of the pore space of the foam coke flame retardant intumescent coatings] *Fire and Explosion Safety*, 2013. No 5. Pp. 33–37. (rus)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.289>

УДК 614.841.332:624.94.014.2

МОДЕЛЬНЫЕ ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ КОЛОНН С КОНСТРУКТИВНОЙ ОГНЕЗАЩИТОЙ

Полева И.И., Жамойдик С.М., Нехань Д.С.

Цель. Разработать методику и провести модельные огневые испытания центрифугированных железобетонных колонн без огнезащиты и с конструктивной огнезащитой в виде огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard толщиной от 12,5 до 40 мм, а также получить распределение температур на обогреваемой и необогреваемой поверхностях колонн, на арматуре и на необогреваемой поверхности конструктивной огнезащиты.

Методы. Проведение огневых испытаний. Измерение температур с помощью термоэлектрических преобразователей.

Результаты. Разработана методика и проведены модельные огневые испытания центрифугированных железобетонных колонн без огнезащиты и с конструктивной огнезащитой в виде огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard толщиной от 12,5 до 40 мм. Экспериментально доказано, что огнестойкие гипсовые плиты Knauf Fireboard являются эффективным способом обеспечения огнезащиты стержневых железобетонных конструкций, позволяющие повышать их огнестойкость до максимально нормируемых значений в Республике Беларусь – R180.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы для оценки огнестойкости железобетонных колонн, защищенных конструктивной огнезащитой на основе огнестойких гипсовых плит, при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Ключевые слова: огнестойкость, центрифугированные железобетонные колонны, конструктивная огнезащита, стандартный температурный режим, огневые испытания.

(Поступила в редакцию 29 июля 2021 г.)

Введение

Железобетон – комплексный строительный материал, представляющий собой рационально объединенные и совместно работающие бетон и стальные стержни. Благодаря своим качествам он массово применяется в строительстве, постепенно вытесняя другие строительные материалы.

Применение новых и эффективных конструкций – одна из констант социально-экономического развития любого государства. Постоянное стремление повысить технико-экономические показатели строительных конструкций натолкнуло ученых и инженеров на поиск оптимальных решений по сокращению исходных материалов при изготовлении железобетонных конструкций с обеспечением эксплуатационных требований. Снижение массы конструкций, являющейся основным недостатком железобетона, осуществляется путем использования прогрессивных технологий изготовления, применения тонкостенных конструкций, эффективных форм и сечений. Так в строительство приходит центрифугированный бетон [1; 2]. Опыт применения центрифугированных железобетонных элементов показал высокую эффективность, технологические и эксплуатационные преимущества. Именно поэтому на территории Республики Беларусь возведено более 500 различных объектов с применением центрифугированных железобетонных колонн, стоек и ригелей кольцевого и прямоугольного полого сечения. Указанные конструкции также широко использовались при строительстве объектов энергетики и в других регионах СССР [3].

Согласно ТР 2009/013/ВУ¹ здания и сооружения должны быть запроектированы таким образом и построены из таких строительных материалов и конструкций, чтобы в течение

¹ Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность. 4-е изд.: ТР 2009/013/ВУ. – Введ. 31.12.09. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2015. – 28 с.

расчетного периода обеспечивалось соблюдение существенных требований, к которым относятся требования пожарной безопасности. Одним из обязательных для соблюдения требований пожарной безопасности является обеспечение конструкциями зданий выполнения своих функций при пожаре. Это требование достигается путем нормирования классов пожарной опасности и огнестойкости конструкций.

Поскольку железобетонные конструкции выполнены полностью из негорючих материалов, они относятся к классу пожарной опасности $K0^2$ и, следовательно, могут быть использованы в зданиях всех степеней огнестойкости³ при соответствующей огнестойкости.

Под огнестойкостью принято понимать способность конструктивной системы, ее части или отдельной конструкции выполнять требуемые функции в течение установленной продолжительности регламентируемого пожара при заданном сочетании нагрузок⁴. Железобетонные конструкции, в зависимости от их огнестойкости, могут быть как не имеющие предела огнестойкости, так и обладать пределом огнестойкости REI240 [4].

Фактические пределы огнестойкости железобетонных конструкций могут быть определены экспериментальным или расчетным методами.

Экспериментальная оценка огнестойкости заключается в воздействии на конструкцию регламентированного температурного режима при заданных силовых нагрузках до момента наступления одного или нескольких предельных для данной конструкции состояний. В результате проведения таких испытаний решаются две основные задачи: определение огнестойкости конструкции (практическая) и выявление механизма ее разрушения и иных параметров, определяющих ее поведение (научная).

При всем разнообразии испытанных железобетонных конструкций в СССР и странах постсоветского пространства, в отечественных публикациях не упоминаются огневые испытания центрифугированных железобетонных конструкций, в том числе полых железобетонных колонн.

Результаты огневых испытаний, проведенных в Австрии [5], показали, что центрифугированные железобетонные колонны размером поперечного сечения более 40 см, толщиной стенки около 1/3 диаметра соответствуют пределу огнестойкости R180. Это свидетельствует об отсутствии ограничений в применении таких изделий в строительстве в ряде стран. Следует отметить, что данные, представленные в работе [5], – результат испытаний центрифугированных железобетонных колонн с толщиной защитного слоя бетона 35 мм и степенью армирования от 9 до 20 %. Это не позволяет в полной мере относить указанные конструкции к тонкостенным. Колонны со степенью армирования ниже 9 %, выпускаемые в Micheldorf (Австрия), соответствуют пределу огнестойкости не более R90 при том же защитном слое, из чего следует ограничение области применения в зданиях и сооружениях не выше II степени огнестойкости⁵.

В 2020 г. были проведены натурные огневые испытания двух центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения под нагрузкой в Республике Беларусь. Подробное описание методики и результатов огневых испытаний представлено в работах [6; 7]. Испытания колонн проводили в составе фрагмента здания, выполненного по каркасной конструктивной схеме. Разрушение колонн произошло в средней трети их высоты. Этому предшествовало образование магистральных спиралевидных трещин, направленных под углом

² Конструкции строительные. Методы определения пожарной опасности: СТБ 1961-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: Госстандарт, 2009. – 20 с.

³ Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020: введ. 04.04.21 (взамен СН 2.02.01-2019, с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 70 с.

⁴ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 01.01.10 (с отменой ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250)). – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

⁵ См. сноску 2.

75–80 ° к плоскости земли [6]. Фактический предел огнестойкости испытанных колонн с учетом стандартного ряда составил R60, что существенно ограничивает область применения рассматриваемых конструкций в зданиях.

Одним из способов увеличения предела огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн является снижение нагрева сечения конструкции за счет использования огнезащиты. Так, конструктивная огнезащита позволяет повышать предел огнестойкости стальных конструкций до 240 мин [4], что является наиболее надежным способом защиты конструкций от огня.

Таким образом, одной из ключевых характеристик, определяющих область применения железобетонных конструкций в строительстве, является огнестойкость. Для широкого и обоснованного применения ЦБ в строительстве требуется провести модельные огневые испытания центрифугированных железобетонных колонн без огнезащиты и с конструктивной огнезащитой в виде огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard толщиной от 12,5 до 40 мм, а также получить распределение температур на обогреваемой и необогреваемой поверхностях колонн, на арматуре и на необогреваемой поверхности конструктивной огнезащиты.

Основная часть

Стандарты по определению огнезащитной эффективности для стержневых железобетонных конструкций в Республике Беларусь отсутствуют, поэтому авторами статьи была разработана собственная методика исследования нагрева центрифугированных железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой и без нее. Методика основана на методе определения огнезащитной эффективности средства по металлу⁶. Методика испытаний предусматривала нагрев образцов в условиях стандартного температурного режима. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для оценки теплофизических характеристик огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard и времени действия огнезащиты.

Испытанию подвергали четыре образца без статической нагрузки. В качестве образцов для испытаний использовали полые центрифугированные железобетонные колонны, наружным диаметром 560 мм, с толщиной стенки 55 мм, армированных пространственным каркасом, состоящим из 7 равномерно распределенных по окружности стержней класса S500 диаметром 12 мм и приваренной к ним поперечной спиральной арматуры из проволоки В-1 диаметром 4 мм. Толщина защитного слоя бетона во всех случаях составила 20 мм. Длина образцов составляла (1500±10) мм. Для воссоздания реальных условий эксплуатации в зданиях для образования замкнутой воздушной полости в верхней и нижней частях образцов предусматривалась бетонная шпонка высотой 200±10 мм.

Образец № 1 испытывали без огнезащиты, образцы № 2–4 были с конструктивной огнезащитой толщиной 12,5 мм; 20 мм и 40 мм соответственно из огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard. Общий вид образцов перед испытаниями представлен на рисунке 1.

Конструктивные решения огнезащиты железобетонных стержневых конструкций представляли собой каркасно-обшивные облицовки на каркасе из стальных оцинкованных профилей (с толщиной металла 0,6 мм) и плит Knauf Fireboard. Каркас включал КНАУФ-профили потолочные ПП 60/27/06 и направляющие ПН 28/27/06, соединенные между собой самонарезающими винтами с шагом не более 500 мм. К железобетонной конструкции стальной каркас крепили через КНАУФ-подвесы прямые (длиной 120 мм) с шагом не более 1000 мм с помощью металлических анкерных изделий.

⁶ Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 01.01.11. – Минск: Госстандарт, 2010. – 25 с.



а – образец без конструктивной огнезащиты



б – образец с конструктивной огнезащитой толщиной 20 мм

Рисунок 1. – Образцы перед испытаниями

Крепление однослойной обшивки. Крепление однослойных обшивок из плит Knauf Fireboard к каркасу осуществляли самонарезающими винтами длиной 25 мм (для плит толщиной 12,5 мм) либо длиной 35 мм (для плит толщиной 20 мм) с шагом не более 150 мм. Винты находились на расстоянии не менее 15 мм от края торцевой кромки плиты и не менее 10 мм от края продольной кромки. Смещение винтов по вертикали на двух смежных плитах составляло не менее 10 мм. Стыковка плит как по горизонтали, так и по вертикали осуществлялась только на профилях каркаса. Стыки плит Knauf Fireboard, образованные прямыми продольными и обрезанными торцевыми кромками, а также места установки винтов были зашпатлеваны гипсовой негорючей шпатлевкой с применением армирующей ленты.

Крепление двухслойной обшивки. Крепление 1-го слоя. Крепление плит Knauf Fireboard к каркасу осуществлялось самонарезающими винтами длиной 35 мм. При двухслойной обшивке при креплении плит первого слоя шаг винтов составлял не более 500 мм. После крепления первого слоя обшивки все стыки и места установки винтов зашпаклевывались негорючей смесью. *Крепление 2-го слоя.* Плиты второго слоя крепятся к каркасу через плиты первого слоя самонарезающими винтами длиной 55 мм с шагом не более 150 мм. Стыковка плит как по горизонтали, так и по вертикали осуществлялась только на профилях каркаса. Стыки плит Knauf Fireboard, образованные прямыми продольными и обрезанными торцевыми кромками, а также места установки винтов были зашпатлеваны гипсовой негорючей шпатлевкой с применением армирующей ленты.

Схема устройства конструктивной огнезащиты центрифугированных железобетонных колонн с однослойной обшивкой представлена на рисунке 2.

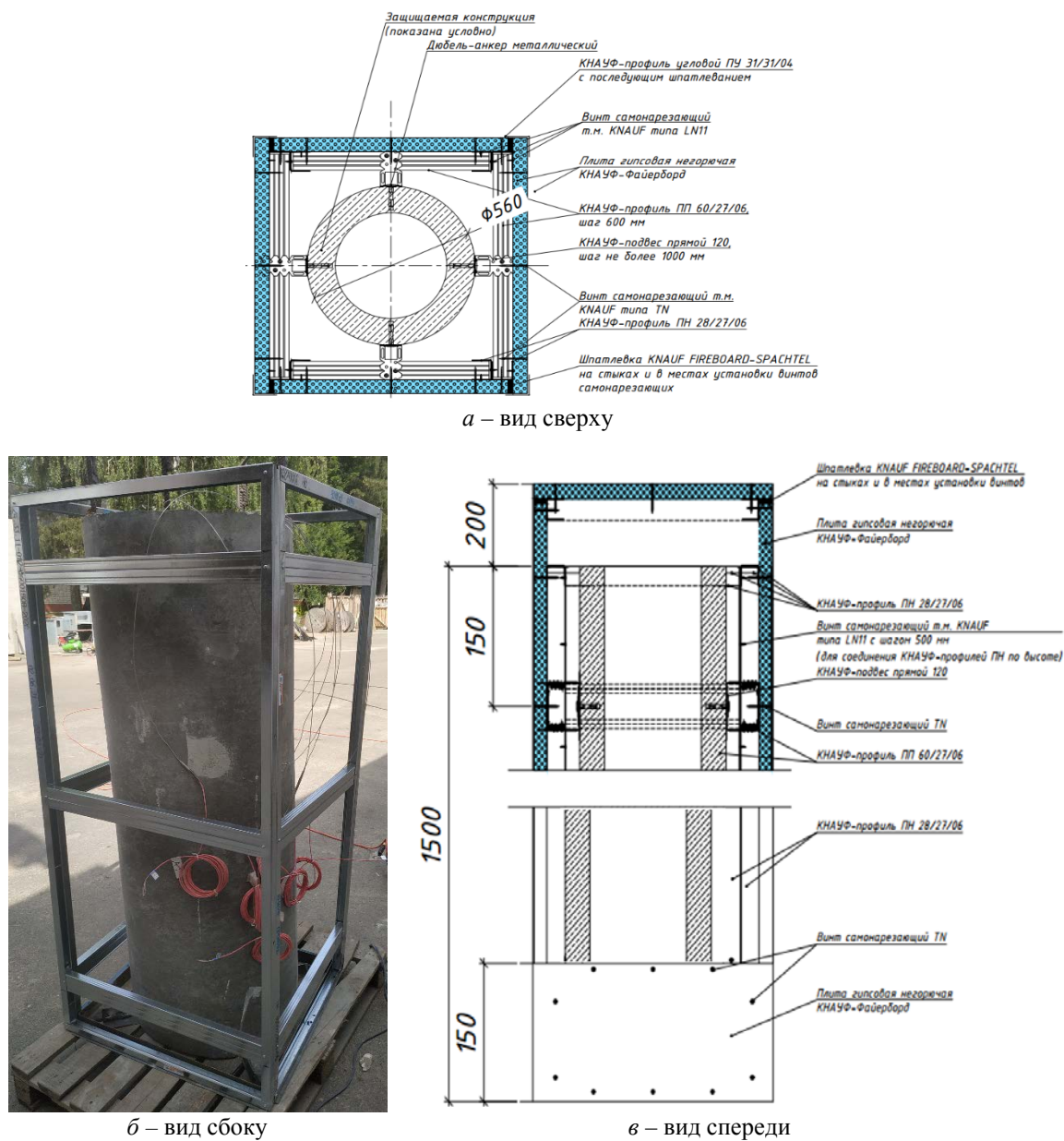


Рисунок 2. – Схема устройства конструктивной огнезащиты центрифугированных железобетонных колонн

Для определения температуры бетона и арматуры центрифугированных железобетонных колонн, в том числе защищенных огнестойкими гипсовыми плитами Knauf Fireboard, на внешней и внутренней поверхности испытуемых образцов, а также на арматуре устанавливали горячие спаи термоэлектрических преобразователей (далее – ТП). Для образцов, защищенных конструктивной огнезащитой, дополнительно устанавливали ТП на обратной от огневого воздействия стороне огнезащиты. Установку горячих спаев ТП осуществляли на высоте 1000 ± 100 мм от нижнего среза образца таким образом, чтобы ТП находились в одной плоскости с ТП, регистрировавшими показания температуры газовой среды. ТП на образцах устанавливали в пропилах с фиксацией клеевым раствором (рис. 3а), а на обратной от огневого воздействия стороне конструктивной огнезащиты – дополнительно с фиксацией металлическими пластинами с помощью шурупов (рис. 3б).



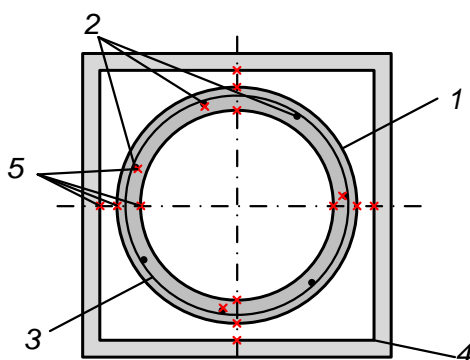
а – внутренняя поверхность колонны



б – внутренняя поверхность огнезащиты

Рисунок 3. – Фиксация ТП на образцах

Схема расстановки ТП на колонне и огнезащите представлена на рисунке 4.



1 – колонна; 2 – продольная арматура колонны; 3 – поперечное армирование колонны;
4 – конструктивная огнезащита; 5 – горячий спай термопары

Рисунок 4. – Схема расстановки ТП в сечении испытываемого защищенного образца и конструктивной огнезащиты

Началу испытаний соответствовал момент включения форсунок (горелок) печи. Продолжительность испытаний образцов № 1–4 составила 101, 131, 182 и 185 мин соответственно.

В процессе испытаний регистрировали следующие параметры:

- изменение температуры газовой среды в печи;
- изменение температуры бетона на внешней и внутренней поверхности, а также на арматуре;
- изменение температуры на обратной от огневого воздействия стороне огнезащиты;
- внешние признаки (трещинообразование, отслоение, хрупкое взрывообразное разрушение и т.д.).

Внешний вид конструкций после проведения испытаний представлен на рисунке 5.

В результате огневых испытаний получены следующие данные:

– **образец № 1:** на 90-й минуте огневых испытаний температура, зарегистрированная ТП, установленными на арматуре, составила $(514...616) \pm 4$ °С (среднее значение 564 ± 4 °С), установленными на обогреваемой поверхности бетона, – $(826...947) \pm 6$ °С (среднее значение 899 ± 6 °С), установленными на необогреваемой поверхности бетона, – $(479...493) \pm 3$ °С (среднее значение 484 ± 3 °С);



а – образец без огнезащиты



б – образец с конструктивной огнезащитой 12,5 мм

Рисунок 5. – Состояние конструкций после огневых испытаний

– **образец № 2:** на 120-й минуте огневых испытаний температура, зарегистрированная ТП, установленными на арматуре, составила $(332...351) \pm 2$ °С (среднее значение 341 ± 2 °С), установленными на обогреваемой поверхности бетона, – $(498...518) \pm 4$ °С (среднее значение 512 ± 4 °С), установленными на необогреваемой поверхности бетона, – $(297...329) \pm 2$ °С

(среднее значение 318 ± 2 °С), установленными на необогреваемой поверхности конструктивной огнезащиты, – $(637...641) \pm 4$ °С (среднее значение 638 ± 4 °С);



6 – образец с конструктивной огнезащитой 20 мм



2 – образец с конструктивной огнезащитой 40 мм

Рисунок 5. – Состояние конструкций после огневых испытаний

– **образец № 3:** на 180-й минуте огневых испытаний температура, зарегистрированная ТП, установленными на арматуре, составила $(434...456) \pm 3$ °С (среднее значение 445 ± 3 °С), установленными на обогреваемой поверхности бетона, – $(569...632) \pm 4$ °С (среднее значение 592 ± 4 °С), установленными на необогреваемой поверхности бетона, – $(402...411) \pm 2$ °С (среднее значение 407 ± 3 °С), установленными на необогреваемой поверхности конструктивной огнезащиты, – $(647...685) \pm 5$ °С (среднее значение 670 ± 5 °С);

– **образец № 4:** на 180-й минуте огневых испытаний температура, зарегистрированная ТП, установленными на арматуре, составила $(167...198) \pm 2$ °С (среднее значение 187 ± 2 °С), установленными на обогреваемой поверхности бетона, – $(257...314) \pm 2$ °С (среднее значение 284 ± 2 °С), установленными на необогреваемой поверхности бетона, – $(172...193) \pm 2$ °С (среднее значение 181 ± 2 °С), установленными на необогреваемой поверхности конструктивной огнезащиты, – $(394...501) \pm 3$ °С (среднее значение 437 ± 3 °С).

Заключение

1. Разработана методика исследования нагрева стержневых железобетонных конструкций, защищенных конструктивной огнезащитой из огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard, позволившая получить распределение температур и их развитие во времени, что в дальнейшем позволяет оценить огнестойкость центрифугированных железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой.

2. На основании разработанной методики проведены модельные огневые испытания железобетонных центрифугированных колонн с конструктивной огнезащитой в виде огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard толщиной от 12,5 до 40 мм и без нее. В результате испытаний установлено, что огнестойкие гипсовые плиты Knauf Fireboard являются эффективным способом обеспечения огнезащиты железобетонных конструкций, позволяют значительно снизить температуру бетона и арматуры в защищаемых конструкциях. Конструктивная огнезащита в виде огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard позволяет обеспечивать пределы огнестойкости железобетонных стержневых конструкций до максимально нормируемых пределов огнестойкости в Республике Беларусь R180.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пастушков, В.Г. Опыт применения центрифугированных линейных элементов с поперечными сечениями различного профиля при строительстве многоэтажных зданий / В.Г. Пастушков, Г.П. Пастушков // Архитектура и строительные науки. – 2014. – № 1, 2 (18, 19). – С. 36–38.
2. Чернильник, А.А. Некоторые аспекты повышения эффективности производства центрифугированных железобетонных изделий [Электронный ресурс] / А.А. Чернильник, А.В. Яновская, Н.А. Доценко // Молодой исследователь Дона. – 2019. – № 6 (21). – С. 97–99. – Режим доступа: https://mid-journal.ru/upload/iblock/cec/21_CHernilnik_97_99.pdf. – Дата доступа: 28.07.2021.
3. Казачек, В.Г. Шагая в ногу со временем (к 80-летию Тимофея Максимовича Пецольда) / В.Г. Казачек [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 16. – С. 111–113.
4. Князева, Ю.Д. Повышение огнестойкости конструкций из газобетона / Ю.Д. Князева, В.В. Кротова, М.В. Гравит // Alfabuild. – 2018. – № 4 (6). – С. 49–64.
5. Barnas, A. Entwicklung hochbewehrter Schleuderbetonstützen – Brandverhalten und Bemessungssoftware / A. Barnas, G. Rinnohofer // Zement+Beton. – 2004. – S. 16–21.
6. Полевода, И.И. Результаты натуральных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 142–159. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
7. Нехань, Д.С. Исследования температуры газовой среды при проведении натуральных огневых испытаний строительных конструкций / Д.С. Нехань [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 130–141. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.

**Модельные огневые испытания железобетонных центрифугированных колонн
с конструктивной огнезащитой**

Reinforced concrete centrifuged columns with structural fire protection model fire tests

Полевода Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»,
начальник университета

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: ip@ucp.by
ORCID: 0000-0003-2469-3553

Ivan I. Palevoda

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Head of University

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: ip@ucp.by
ORCID: 0000-0003-2469-3553

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Нехань Денис Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

Denis S. Nekhan'

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Lecturer

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.289>

REINFORCED CONCRETE CENTRIFUGED COLUMNS WITH STRUCTURAL FIRE PROTECTION MODEL FIRE TESTS

Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S.

Purpose. To develop a methodology and conduct model fire tests of reinforced concrete columns with and without Knauf Fireboard gypsum boards structural fire protection 12.5 to 40 mm thick, to obtain a temperature distribution on the heated and unheated surfaces of the fire protection and columns, as well as on the reinforcement.

Methods. Fire testing. Thermoelectric converters temperature measurement.

Findings. A method has been developed and model fire tests of centrifuged reinforced concrete columns with and without Knauf Fireboard gypsum boards structural fire protection 12.5 to 40 mm thick have been carried out. It has been experimentally proved that Knauf Fireboard fire-resistant gypsum boards are an effective way to ensure fire protection of reinforced concrete columns, allowing to increase their fire resistance up to the standardized maximum value in the Republic of Belarus, R180.

Application field of research. The obtained results can be used in buildings and structures design process as fire resistance assessment of reinforced concrete columns protected by structural fire protection based on fire-resistant gypsum boards.

Keywords: fire resistance, centrifuged reinforced concrete columns, structural fire protection, standard temperature regime, fire tests.

(The date of submitting: July 29, 2021)

REFERENCES

1. Pastushkov V.G., Pastushkov G.P. Opyt primeneniya tsentrifugirovannykh lineynykh elementov s poperechnymi secheniyami razlichnogo profilya pri stroitel'stve mnogoetazhnykh zdaniy [Experience of using centrifuged linear elements with cross sections of various profiles in the construction of multi-storey buildings]. *Arkhitektura i stroitel'nye nauki*, 2014. No. 1, 2 (18, 19). Pp. 36–38. (rus)
2. Chernilnik A.A., Yanovskaya A.V., Dotsenko N.A. Nekotorye aspekty povysheniya effektivnosti proizvodstva tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh izdeliy [Some aspects of increasing the efficiency of production of centrifuged concrete products]. *Molodoj issledovatel' Dona*, 2019. No. 6 (21). Pp. 97–99, available at: https://mid-journal.ru/upload/iblock/cec/21_CHernilnik_97_99.pdf (accessed: July 28, 2021). (rus)
3. Kazachek V.G., Lazovskiy D.N., Rak N.A., Tur V.V. Shagaya v nogu so vremenem [Keeping up with the times]. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, 2014. No. 16. Pp. 111–113. (rus). URI: <https://rep.bntu.by/handle/data/34142>.
4. Knyazeva Yu.D., Krotova V.V., Gravit M.V. Povysenie ognestoykosti konstruktsiy iz gazobetona [Increase of fire resistance of aerated concrete structures]. *Alfabuild*, 2018. No. 4 (6). Pp. 49–64. (rus)
5. Barnas A., Rinnhofer G. Entwicklung hochbewehrter Schleuderbetonstützen – Brandverhalten und Bemessungssoftware [Development of highly reinforced spun concrete columns – fire behavior and design software]. *Zement+Beton*, 2004. Pp. 16–21. (deu)
6. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn kol'tsevogo secheniya [Results of full-scale fire test of spun reinforced concrete columns of annular section]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4. No. 2. Pp. 142–159. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
7. Nekhan' D.S., Kurachenko I.Yu., Olesiyuk N.M., Kreer L.A. Issledovaniya temperatury gazovoy sredy pri provedenii naturnykh ognevykh ispytaniy stroitel'nykh konstruktsiy [Temperature studies of the gaseous medium during full-scale fire tests of building constructions]. *Journal of Civil Protection*. 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 130–141. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.300>

УДК 614.841.332

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ОКОННОГО ПРОФИЛЯ НА ОДНОСЛОЙНУЮ СТЕКЛЯННУЮ ПАНЕЛЬ В УСЛОВИЯХ СТАНДАРТНОГО ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Дмитриченко А.С., Здитовецкая С.В., Мамедова С.И.

Цель. Разработать методику расчета огнестойкости однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в раму, в условиях стандартного огневого воздействия при различных пожарных нагрузках с учетом конструктивных особенностей рамы и теплофизических свойств воздуха, дымовых газов и рамы.

Методы. Расчеты распределения температуры и напряжений ограниченной стеклянной панели выполняются численно с использованием программного пакета FlexPDE.

Результаты. Рассчитано распределение температуры и напряжений в однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в оконный профиль, с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при пожаре. Исследовано влияние материала оконного профиля на разрушение однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в раму, в условиях стандартного огневого воздействия при различных пожарных нагрузках.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании зданий и сооружений с целью обеспечения безопасной эксплуатации и эвакуации в случае пожара.

Ключевые слова: светопрозрачная конструкция, коэффициент теплоотдачи, термическое напряжение, тепловое воздействие, огнестойкость.

(Поступила в редакцию 30 июня 2021 г.)

Введение

Разрушение ограждающих светопрозрачных конструкций (СПК) оказывает существенное влияние на динамику развития пожара. При разрушении СПК и вскрытии проемов происходит резкий приток воздуха в зону горения, что способствует резкому нарастанию опасных факторов пожара. До настоящего времени теоретические исследования воздействия пожара на СПК в основном касались разрушения одиночного стекла, поэтому актуальной задачей является оценка влияния конструктивных особенностей оконного профиля (материал, из которого он изготовлен, его ширина и толщина) на огнестойкость СПК, моделирование и расчет полей температуры и напряжений в условиях огневого воздействия.

Основная часть

Рассмотрим стеклянную панель высотой h_z , шириной $2h_x$ и толщиной $2h_y$, заключенную в раму высотой L_z , шириной $2L_x$ и толщиной $2L_y$, кромка рамы, в которую заключена панель, имеет размер $L_s/2$. Начало координат разместим в центре нижней поверхности рамы и направим ось z перпендикулярно нижней поверхности рамы, ось x параллельно нижней поверхности рамы, ось y направлена перпендикулярно поверхности стеклянной панели (рис. 1).

Разделим объем, занимаемый рамой с заключенной в ней стеклянной панелью, на пять слоев. Первый слой отсекается плоскостью $z = L_s/2$, второй слой – плоскостью $z = L_s$, третий слой – плоскостью $z = L_z - L_s$, четвертый и пятый слой – плоскостью $z = L_z - L_s/2$, нижняя поверхность рамы имеет координату $z = 0$, верхняя поверхность рамы имеет координату $z = L_z$.

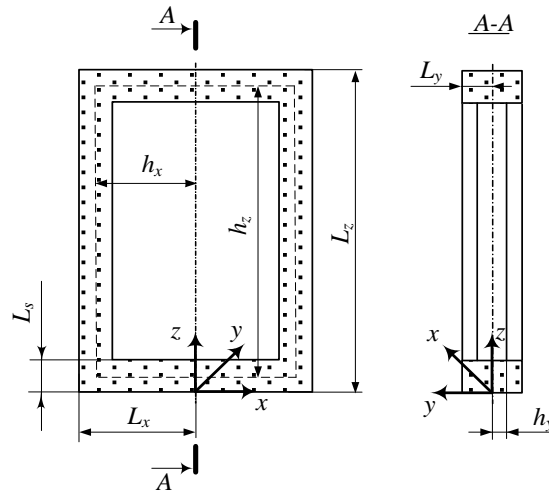


Рисунок 1. – Стеклопанель, заключенная в раму

Температурное поле в стеклянной панели будет описываться трехмерным дифференциальным уравнением теплопроводности [1];

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda(T)\left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2}\right) + I(x, z, t)\frac{e^{-y/\gamma}}{\gamma} f(x, z) \quad \text{при } -h_x < x < h_x, \quad -h_y < y < h_y, \quad L_s/2 < z < h_z; \quad (1)$$

$$f(x, z) = [\eta(x - L_s + L_x) - \eta(x - L_x + L_s)][\eta(z - L_s) - \eta(z - L_z + L_s)], \quad (2)$$

где $\rho(T)$ – плотность стекла, кг/м³; $c(T)$ – теплоемкость стекла, Дж/(кг · К); $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности стекла, Вт/(м · К); $T(x, y, z, t)$ – температура, К; x, y, z – пространственные координаты, м; t – время, с; $I(x, z, t)$ – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины, Вт/м²; γ – длина затухания (величина, обратная коэффициенту поглощения), м; $\eta(x), \eta(z)$ – единичные функции Хевисайда. $f(x, z)$ – двумерная единичная функция, значение которой равно нулю на плоскости XZ, затененной рамой, и единице во всех других точках плоскости XZ.

Начальное условие имеет вид:

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad \text{при } t = 0, \quad (3)$$

где T_i – начальная температура пластины, К.

Граничные условия имеют вид:

$$-\lambda \frac{\partial T(x, -h_y, z, t)}{\partial y} = \left[h_1 (T(x, -h_y, z, t) - T_{c1}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T^4(x, -h_y, z, t) - T_{c1}^4(t)) \right] f(x, z) \quad \text{при } y = h_y, \quad L_s - L_x < x < L_x - L_s, \quad L_s < z < L_z - L_s; \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, h_y, z, t)}{\partial y} = \left[h_2 (T(x, h_y, z, t) - T_{c2}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T^4(x, h_y, z, t) - T_{c2}^4(t)) \right] f(x, z) \quad \text{при } y = -h_y, \quad L_s - L_x < x < L_x - L_s, \quad L_s < z < L_z - L_s, \quad (5)$$

где $h_1(T), h_2(T)$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями стеклянной панели, Вт/(м² · К); $T_{c1}(t), T_{c2}(t)$ – температура окружающей среды с двух сторон стеклянной панели, К; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы среда – светопрозрачная конструкция; σ – постоянная Стефана – Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴)).

Приведенная степень черноты системы среда – светопрозрачная конструкция:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_{\text{сп}} + 1/\varepsilon_{\text{с}} - 1}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{сп}}$ – степень черноты среды; $\varepsilon_{\text{с}}$ – степень черноты поверхности стекла.

Температурное поле в раме будет описываться трехмерным дифференциальным уравнением теплопроводности [2]:

$$\rho_1(T_1)c_1(T_1)\frac{\partial T_1(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda_1(T_1)\left(\frac{\partial^2 T_1(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, z, t)}{\partial z^2}\right),$$

при $-L_x < x < L_x, -L_y < y < L_y, 0 < z < L_z,$ (7)

где $\rho_1(T_1)$ – плотность материала рамы, кг/м³; $c_1(T_1)$ – теплоемкость материала рамы, Дж/(кг · К); $\lambda_1(T_1)$ – коэффициент теплопроводности материала рамы, Вт/(м · К); $T_1(x, y, z, t)$ – температура рамы, К.

Начальное условие имеет вид:

$$T_1(x, y, z, 0) = T_i \quad \text{при } t = 0, \quad (8)$$

где T_i – начальная температура рамы, К.

Граничные условия имеют вид:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(x, -L_y, z, t)}{\partial y} = \left[h_{11} (T(x, -L_y, z, t) - T_{c1}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}1} \sigma (T_1^4(x, -L_y, z, t) - T_{c1}^4(t)) \right] + I(x, z, t)$$

при $y = -L_y, -L_x < x < L_x, 0 < z < L_z;$ (9)

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(x, L_y, z, t)}{\partial y} = \left[h_{21} (T(x, L_y, z, t) - T_{c2}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}1} \sigma (T_1^4(x, L_y, z, t) - T_{c2}^4(t)) \right] + I(x, z, t)$$

при $y = L_y, -L_x < x < L_x, 0 < z < L_z;$ (10)

где $h_{11}(T_1), h_{21}(T_1)$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями рамы, Вт/(м² · К); $\varepsilon_{\text{пр}1}$ – приведенная степень черноты системы среда – рама; $I(x, z, t)$ – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность рамы, Вт/м².

Приведенная степень черноты системы среда – рама:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_{\text{сп}} + 1/\varepsilon_{\text{п}} - 1}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\text{сп}}$ – степень черноты среды; $\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты поверхности рамы.

На торцевых поверхностях рамы примем температуру равной начальной. Будем считать, что тепловые потоки и температуры на стыках поверхностей стеклянной панели и рамы равны друг другу.

Коэффициент конвективного теплообмена от среды, нагреваемой пожаром, $h_2(T(x, -h_y, z, t), T_{c2}(t))$, меняется с изменением температуры дымовых газов и температуры обогреваемой поверхности пластины, коэффициент конвективного теплообмена от необогреваемой поверхности пластины и окружающим воздухом $h_1(T(x, h_y, z, t), T_{c1}(t))$ меняется с ростом температуры необогреваемой поверхности. Нестационарность процессов теплообмена при развитии пожара значительно затрудняет расчеты, критериальные уравнения для коэффициентов теплообмена при нестационарном процессе в большинстве случаев отсутствуют. Однако при определенных условиях конвективного теплообмена пограничный слой

быстро реагирует на внешние возмущения и успевает перестроиться при изменении температуры среды, воздействующей на поверхность и на изменение температуры самой поверхности. В этом случае в каждый момент времени существуют как бы мгновенные стационарные условия и для определения интенсивности процесса может быть использован квазистационарный подход [3].

Средний коэффициент теплоотдачи для вертикальной поверхности высотой H с учетом ламинарного и турбулентного режимов в широком диапазоне изменения параметров $Pr = 0,022-7640$, $Ra_H = 10^{-4} - 10^{15}$ можно определить по формулам (12)–(16) [4]:

$$h_1 = \frac{Nu_{cp,b} \lambda_b}{H}, \quad h_2 = \frac{Nu_{cp,r} \lambda_r}{H}, \quad (12)$$

где Nu – критерий Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); H – высота стеклянной панели, м. Индексы: b – воздух; r – дымовые газы.

Критерий Нуссельта рассчитывается по формуле:

$$Nu_{cp,b}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra_{H,b}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_b}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}, \quad Nu_{cp,r}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra_{H,r}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_r}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}, \quad (13)$$

где Ra – критерий Рэлея.

Критерий Рэлея рассчитывается по формуле:

$$Ra_{H,b} = Gr_{H,b} Pr_b, \quad Ra_{H,r} = Gr_{H,r} Pr_r, \quad (14)$$

где Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа.

При этом критерий Грасгофа вычисляется по формулам:

$$Gr_{H,b} = \frac{g \beta_t (T_\infty - T_n) H^3}{\nu_b^2}, \quad Gr_{H,r} = \frac{g \beta_t (T_\infty - T_n) H^3}{\nu_r^2}, \quad (15)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с²; $\beta_t = 1/T$ – термический коэффициент объемного расширения, К⁻¹; T_∞ – температура окружающей среды, К; T_n – температура поверхности панели, К; H – высота стеклянной панели, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Критерий Прандтля для воздуха находится из следующего соотношения:

$$Pr_b = \frac{\nu_b}{a_b}, \quad Pr_r = \frac{\nu_r}{a_r}, \quad (16)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Теплофизические и динамические параметры берутся при температуре

$$T_{cp} = (T_\infty + T_n)/2. \quad (17)$$

Свойства воздуха и дымовых газов при разных температурах, приведенные в таблицах [5], аппроксимированы полиномами второй степени и имеют следующий вид:

$$\lambda_b(T) = 0,02428 + 8,120878 \cdot 10^{-5} \cdot T - 2,971432 \cdot 10^{-8} \cdot T^2, \quad (18)$$

$$\nu_b(T) = 1,319498 \cdot 10^{-5} + 9,118545 \cdot 10^{-8} \cdot T + 8,279991 \cdot 10^{-11} \cdot T^2, \quad (19)$$

$$Pr_b(T) = 0,707193 - 2,040537 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3,26627 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \quad (20)$$

$$\lambda_r(T) = 0,022854 + 8,499151 \cdot 10^{-5} \cdot T + 9,64936 \cdot 10^{-10} \cdot T^2, \quad (21)$$

$$\nu_r(T) = 1,10659 \cdot 10^{-5} + 9,905 \cdot 10^{-8} \cdot T + 6,376374 \cdot 10^{-11} \cdot T^2, \quad (22)$$

$$Pr_r(T) = 0,71022 - 1,88012 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,594406 \cdot 10^{-8} \cdot T^2. \quad (23)$$

Теплофизические характеристики образцов оконного стекла исследовались в интервале температур 25–500 °С на приборе LFA 457 MicroFlash фирмы NETZSCH [6] методом лазерной вспышки [7]. Зависимость коэффициента теплопроводности, теплоемкости и коэффициента температуропроводности оконного стекла от температуры может быть аппроксимирована полиномами второй степени:

$$\lambda = 0,718899 + 1,541745 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,39502 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \quad (24)$$

$$c = 676,580017 + 2,699688 \cdot T - 2,790412 \cdot 10^{-3} \cdot T^2, \quad (25)$$

$$a = 4,378452 \cdot 10^{-7} - 4,179546 \cdot 10^{-10} \cdot T + 5,629294 \cdot 10^{-13} \cdot T^2. \quad (26)$$

Теплофизические свойства для материалов, из которых изготавливается оконный профиль, приведены в таблице 1 [8, с. 224, 304, 318].

Таблица 1. – Теплофизические свойства материалов для изготовления оконного профиля

Материал	Плотность ρ_1 , кг/м ³	Теплоемкость c_1 , Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности λ_1 , Вт/(м·К)
ПВХ	1400	1200	0,19
Алюминий	2600	920	160
Стеклопластик	1800	1400	0,75
Дерево	500	2700	0,15

Для оконных стекол в диапазоне температур 0–300 °С коэффициент линейного теплового расширения равен $\beta = (9,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ [9]. Оценки предела прочности оконного стекла на растяжение σ_b получены в ряде экспериментальных работ по разрушению стекла [10]. В таблице 2 приводятся механические свойства стекла и рассчитанные значения критической температуры $T_k = \sigma_b / (\beta E)$.

Таблица 2. – Механические свойства стекла

Коэффициент линейного теплового расширения $\beta \cdot 10^6$, К ⁻¹	Предел прочности стекла на растяжение $\sigma_b \cdot 10^{-7}$, Па	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-10}$, Па	Критическая температура T_k , К
9,5	4,7	7,0	70
9,2	2,0–5,0	7,2	30–75
8,5	5,5–13,8	7,24	90–224
9,0	3,5–7,0	7	55–110

Среднеобъемную температуру помещения при пожаре $T_{c2}(t)$ зададим с помощью стандартной кривой пожара

$$T_{п}(t) = 345 \cdot \lg(kt + 1) + T_0, \quad k = 0,133 \text{ с}^{-1}, \quad (27)$$

где $T_{п}(t)$ – температура пожара, К; T_0 – начальная температура пожара, К; t – время пожара, с.

Для расчета распределения температуры в стеклянной панели, заключенной в раму с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара методом конечных элементов в среде пакета FlexPDE [11] был разработан программный код решения краевой задачи (1)–(26) методом конечных элементов.

С помощью разработанного программного кода были рассчитаны профили температуры в стеклянной оконной панели и оконном профиле, зависимости от времени изменения температуры на обогреваемой и необогреваемой поверхностях панели.

На рисунке 2 приведено распределение температуры по толщине алюминиевого и деревянного профилей и стеклянной панели, заключенной в них. Из приведенных зависимостей видно, что стеклянная панель прогревается сильнее под более теплопроводным алюминиевым профилем. Интенсивность падающего излучения $I = 10 \text{ кВт/м}^2$, длина поглощения $\gamma = 2 \text{ мм}$. Для проведения расчетов примем следующие численные значения: $L_y = 30 \text{ мм}$, $L_y = 10 \text{ мм}$, $h_y = 2,5 \text{ мм}$, $h_x = 0,5 \text{ м}$, $h_z = 1,2 \text{ м}$ в момент времени $t = 200 \text{ с}$.

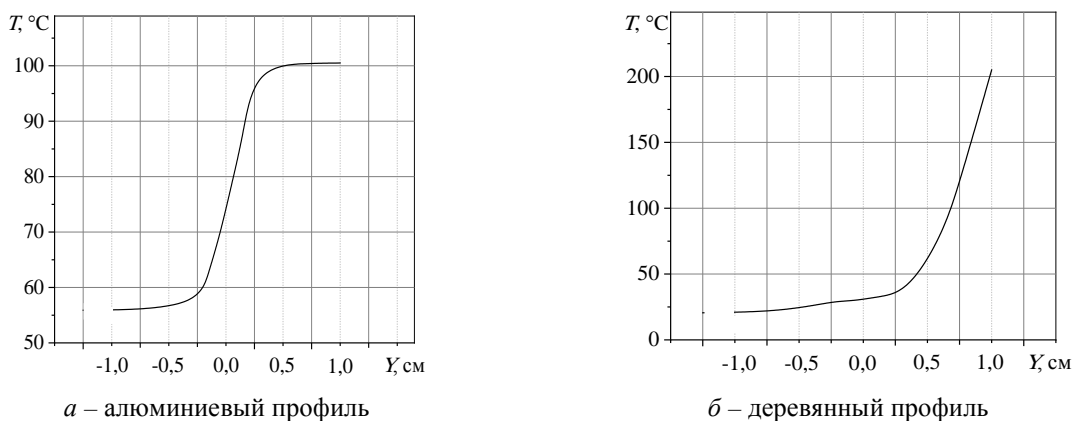


Рисунок 2. – Распределение температуры по толщине оконного профиля

На рисунке 3 показаны зависимости разности температур центральной части стеклянной панели $T(z)$ и ее края от высоты стеклянной панели, при разной толщине профиля в момент времени $t = 200 \text{ с}$. Как видно из приведенных зависимостей, перегрев центральной части панели относительно ее края тем больше, чем шире и толще профиль. Разность температур центральной части стеклянной панели и ее края больше для панели, заключенной в деревянную раму. Интенсивность падающего излучения $I = 10 \text{ кВт/м}^2$, длина поглощения $\gamma = 2 \text{ мм}$. Для проведения расчетов примем следующие численные значения: $h_y = 2,5 \text{ мм}$, $h_z = 1,2 \text{ м}$ в момент времени $t = 200 \text{ с}$.

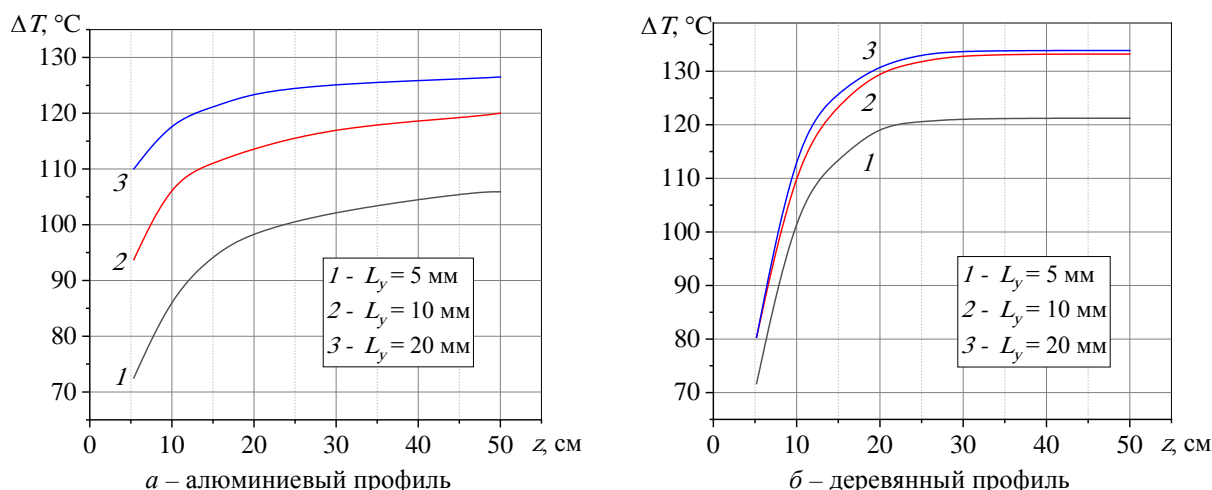


Рисунок 3. – Зависимость разности температур центральной части стеклянной панели и ее края от высоты стеклянной панели

В работе [12] предложен метод расчета огнестойкости стеклянной панели по критерию достижения критических напряжений. Показано, что температура стекла при воздействии на него тепловой нагрузки в центральной части панели повышается быстрее, чем в части, закрытой рамой. Следовательно, центральная часть стеклянной панели расширяется

быстрее, чем края, и там возникают растягивающие напряжения. Проведенные эксперименты [12; 13] показывают, что первоначальное разрушение стеклянной панели при пожаре происходит на ее краях. Стекло разрушается в момент времени τ_b , когда разность температур центральной части панели и ее края достигает критического значения T_k , приводящего к возникновению напряжений, превосходящих предел прочности стекла при растяжении:

$$\Delta T(-L_s, \tau_b) = \frac{\sigma_b}{E\beta} = T_k, \quad (28)$$

где T_k – критическая температура перегрева центральной части панели относительно ее края, приводящая к возникновению критических напряжений σ_b , вызывающих разрушение стекла.

Принимая во внимание механические свойства стекла (табл. 2), получим, что при коэффициенте линейного теплового расширения стекла $\beta = (9 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, модуле упругости $E = 72 \text{ ГПа}$, пределе прочности оконного стекла на растяжение $20 \text{ МПа} < \sigma_b < 138 \text{ МПа}$ критическая температура перегрева центральной части панели относительно ее края лежит в диапазоне $30 \text{ К} < T_k < 224 \text{ К}$.

Зависимость предела огнестойкости τ_b по критерию достижения критических напряжений в панели, приводящих к ее разрушению от критической температуры T_k при разной интенсивности радиационного теплового потока I , поступающего на поверхность панели для алюминиевого, пластикового и деревянного оконного профиля одинакового размера, показана на рисунке 4. Для проведения расчетов примем численные значения, приведенные к рисунку 2. Длина поглощения $l = 2 \text{ мм}$.

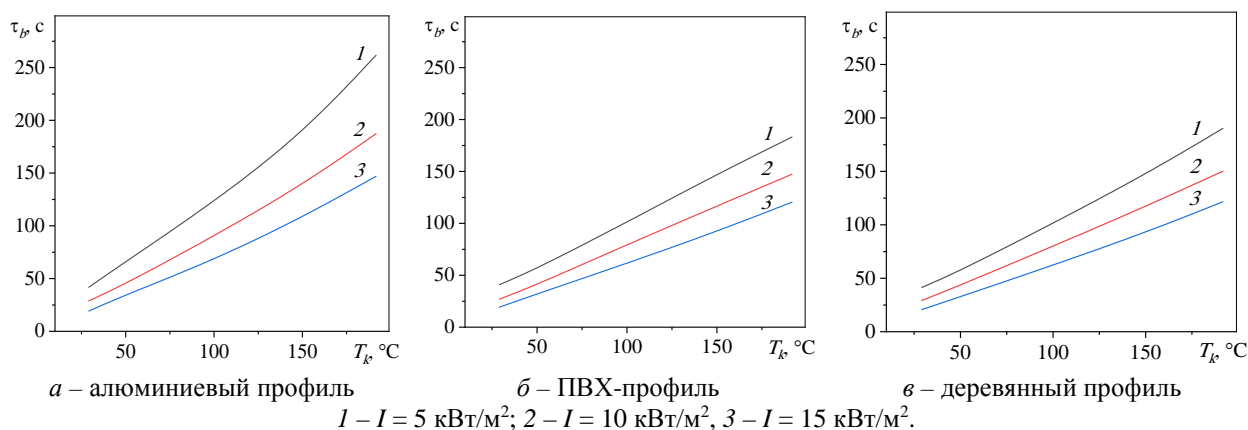


Рисунок 4. – Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклянной панели от критической температуры

Как видно из приведенных зависимостей, время разрушения панели увеличивается с увеличением критической температуры (критических напряжений) и тем меньше, чем больше интенсивность радиационного теплового потока.

Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклянной панели от критической температуры для разных материалов оконного профиля (алюминий, ПВХ, дерево) показана на рисунке 5. Для проведения расчетов примем численные значения, приведенные к рисунку 2. Длина поглощения $l = 2 \text{ мм}$, интенсивность падающего излучения $I = 10 \text{ кВт/м}^2$.

Из приведенных зависимостей видно, что время разрушения панели увеличивается с увеличением критической температуры (критических напряжений) и тем меньше, чем больше интенсивность радиационного теплового потока. Время разрушения оконной панели, заключенной в раму из алюминия, превышает время разрушения панели, заключенной в раму из ПВХ или дерева. Этот факт объясняется тем, что алюминий имеет теплопроводность, значительно превышающую теплопроводность пластика и дерева. Поэтому стекло

под алюминиевым профилем прогревается больше, чем под ПВХ или деревом, следовательно, необходимо больше времени, чтобы разность температур края стекла и его центра достигли критических значений. Пределы огнестойкости панелей из ПВХ и дерева одинаковой толщины и ширины незначительно отличаются друг от друга, т.к. их теплофизические свойства близки.

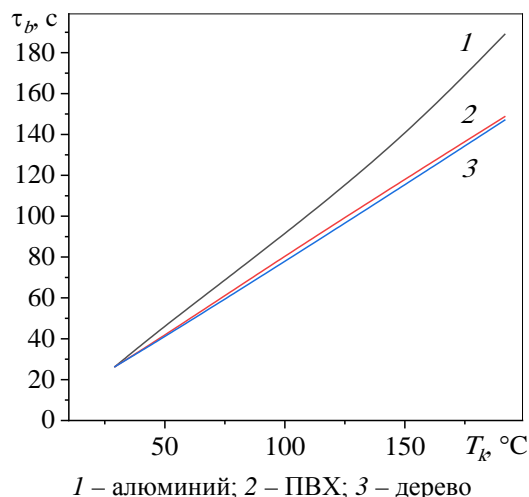


Рисунок 5. – Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклянной панели от критической температуры для разных материалов оконного профиля

Заключение

На основе разработанного программного кода с использованием пакета FlexPDE рассчитаны профили температуры однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в оконный профиль с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при пожаре. Учет конструктивных характеристик оконного профиля (его размеры и материал) влияет на распределение температуры в стеклянной панели в области ее затенения оконным профилем. Прогрев затененной зоны тем меньше, чем больше ширина и толщина оконного профиля и более теплопроводен материал, из которого оконный профиль изготовлен.

Рассчитана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в панели, приводящих к ее разрушению, от критической температуры при разной интенсивности радиационного теплового потока, поступающего на поверхность панели для алюминиевого, пластикового и деревянного оконного профиля. Показано, что время разрушения панели увеличивается с увеличением критической температуры (критических напряжений) и тем меньше, чем больше интенсивность радиационного теплового потока. Время разрушения оконной панели, заключенной в раму из алюминия, превышает время разрушения панели, заключенной в раму из ПВХ или дерева. Это обусловлено более высокой теплопроводностью алюминия, превышающей теплопроводность пластика и дерева. Для панелей из ПВХ и дерева одинаковой толщины и ширины пределы огнестойкости незначительно отличаются друг от друга, т.к. теплофизические свойства этих материалов близки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pagni, P.J. Thermal Glass Breakage / P.J. Pagni // Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium. – Gaithersburg, USA. – 2002. – P. 3–22.
2. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
3. Прохач, Э.И. Об использовании квазистационарного подхода в расчетах конвективного теплообмена / Э.И. Прохач // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 5. – С. 857–860.

4. Гусев, С.Е. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / С.Е. Гусев, Г.Г. Шкловер. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 166 с.
5. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
6. Приборы термического анализа группы NETZSCH [Электронный ресурс] // Products & Solutions – NETZSCH Analyzing & Testing. – Режим доступа: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermal-diffusivity-conductivity/>. – Дата доступа: 20.01.2021.
7. Parker, W.J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity / W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler // Journal of Applied Physics. – 1961. – Vol. 32, No. 9. – P. 1675–1684.
8. Чиркин, В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. – М.: Машгиз, 1962. – 247 с.
9. Bansal, N.P. Handbook of Glass Properties / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – New York: Academic Press Inc., 1986. – 680 p.
10. Fletcher, D.Q. Mechanics of Materials / D.Q. Fletcher. – New York: Holt. Reinhart and Winston, 1985. – 474 p.
11. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pdesolutions.com>. – Дата доступа: 15.01.2021.
12. Pagni, P.J. Glass Breaking in Fires / P.J. Pagni, A.A. Joshi // Proceedings of the Third International Symposium «Fire Safety Science». – Berkeley, USA. – 1991. – P. 791–802. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-791.
13. McLellan, G.W. Glass Engineering Handbook / G.W. McLellan, E.B. Shand. – New York: McGrawHill Book Co., 1984. – 481 p.

Исследование влияния материала оконного профиля на однослойную стеклянную панель в условиях стандартного огневого воздействия

Study of the influence of the window profile material on a single-layer glass panel under standard fire exposure

Дмитриченко Александр Степанович

кандидат технических наук, доцент

Белорусский государственный технологический университет, кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники, заведующий кафедрой

Адрес: ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Беларусь

e-mail: das2312@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8818-5243

Aleksandr S. Dmitrichenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Belarusian State Technological University,
Chair of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Head of the Chair

Address: Sverdlova str., 13a,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: das2312@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8818-5243

Здитовецкая Светлана Валентиновна

кандидат технических наук

Белорусский государственный технологический университет, кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники, доцент

Адрес: ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Беларусь

e-mail: teka_11@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4978-6521

Svetlana V. Zditovetskaya

PhD in Technical Sciences

Belarusian State Technological University,
Chair of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Associate Professor

Address: Sverdlova str., 13a,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: teka_11@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4978-6521

Мамедова Севиндж Иззат

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, адъюнкт

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: mamedova_si@mail.ru

Sevindzh I. Mamedova

The State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, adjunct

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: mamedova_si@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.300>

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE WINDOW PROFILE MATERIAL ON A SINGLE-LAYER GLASS PANEL UNDER STANDARD FIRE EXPOSURE

Dmitrichenko A.S., Zditovetskaya S.V., Mamedova S.I.

Purpose. To develop a method for calculating the fire resistance of a single-layer flat glass panel enclosed in a frame under the conditions of standard impact during various fire loads, taking into account the design features of the frame and the thermophysical properties of air, fume gases and the frame.

Methods. Calculations of the temperature and stress distribution of a bounded glass panel are performed numerically using the FlexPDE software package.

Findings. The distribution of temperature and stresses in a single-layer flat glass panel enclosed in a window profile is calculated, taking into account the temperature dependence of the thermophysical characteristics of glass, air and flue gases, the design features of the translucent structure and the nonlinear nature of the change in the ambient temperature during a fire. The effect of the material of the window profile on the destruction of a single-layer flat glass panel enclosed in a frame under conditions of standard fire exposure under various fire loads has been investigated.

Application field of research. The results of the study can be used in the design of buildings and structures to ensure safe operation and evacuation in the event of a fire.

Keywords: translucent structure, heat transfer coefficient, thermal tension, thermal impact, fire resistance.

(The date of submitting: June 30, 2021)

REFERENCES

1. Pagni P.J. Thermal Glass Breakage. *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*, 2002. Pp. 3–25. URL: https://iafss.org/publications/fss/7/3/view/fss_7-3.pdf.
2. Karslou G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Nauka, 1964. 488 p. (rus)
3. Prokhach E.I. Ob ispol'zovanii kvazistatsionarnogo podkhoda v raschetakh konvektivnogo teplo-obmena [On the use of the quasi-stationary approach in the calculations of convective heat transfer]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1976. Vol. 31, No. 5. Pp. 857–860. (rus)
4. Gusev S.E. Shklover G.G. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen pri vneshnem obtekanii tel* [Free-convective heat transfer in the external flow of bodies]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 166 p. (rus)
5. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1972. 720 p. (rus)
6. *Pribory termicheskogo analiza gruppy NETZSCH* [Devices of the thermal analysis of NETZSCH group]. Available at: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermal-diffusivity-conductivity/> (accessed January 20, 2021). (rus)
7. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. *Journal of Appl. Physics*, 1961. Vol. 32. No. 9. Pp. 1675–1684.
8. Chirkin V.S. *Teploprovodnost' promyshlennykh materialov* [Thermal conductivity of industrial materials]. Moscow: Mashgiz, 1962. 247 p. (rus)
9. Bansal N.P., Doremus R.H. *Handbook of Glass Properties*. New York: Academic Press Inc., 1986. 680 p.
10. Fletcher D.Q. *Mechanics of Materials*. New York: Holt. Reinhart and Winston, 1985. 474 p.
11. *FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations*, available at <http://www.pdesolutions.com> (accessed: January 15, 2021).
12. Pagni P.J., Joshi A.A., Glass Breaking in Fires. *Proceedings of the Third International Symposium «Fire Safety Sciences»*, Berkeley, USA, 1991. Pp. 791–802. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-791.
13. McLellan G.W., Shand E.B. *Glass Engineering Handbook* / New York: McGrawHill Book Co., 1984. 481 p.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.311>

УДК 614.841.332:[693.98:691.615.1]

ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ СТЕКОЛ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ПОЖАРОСТОЙКИХ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Бирюк В.А., Давыдик М.А., Кравчук А.П.

Цель. Исследование термомеханических свойств листового стекла, используемого для светопрозрачных ограждающих конструкций, с разработкой мероприятий по повышению уровня пожарной безопасности высотных зданий.

Методы. Применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретический метод основан на решении задач теплового режима твердых тел и анализе критериев разрушения светопрозрачных конструкций при пожаре. Экспериментальный метод основан на выявлении зависимостей между параметрами пожара и критериями разрушения светопрозрачного фасада на этаже пожара и вышележащих этажах.

Результаты. Выполнен обзор состояния проблемы в области обеспечения пожарной безопасности высотных зданий с фасадным остеклением. Установлено, что применяемые в настоящее время светопрозрачные ограждающие конструкции выполнены в основном из многослойного или закаленного стекла, вызывающего повышенную нагрузку на фундамент, имеющего высокую стоимость и не всегда сохраняющего целостность конструкции в случае возникновения пожара. Проведены экспериментальные исследования упрочнения листового стекла разных номиналов методом химической закалки, дана оценка возможности применения данного метода для создания пожаробезопасных стекол.

Область применения исследований. Пожарная безопасность в строительстве высотных зданий, светопрозрачные ограждающие конструкции.

Ключевые слова: пожарная безопасность, светопрозрачные конструкции, огнестойкость, термостойкость, химическая закалка.

(Поступила в редакцию 20 июля 2021 г.)

Введение

Пожары в высотных зданиях отличаются сложностью и длительностью проведения аварийно-спасательных работ и действий по их тушению. С увеличением темпов строительства высотных зданий растет и количество пожаров в них. Пожары в зданиях жилого назначения представляют наибольшую опасность для людей, т.к. происходят наиболее часто (около 70 % от общего числа пожаров). С каждым годом темпы роста высотного строительства увеличиваются, при этом все чаще фасады высотных зданий выполняются из светопрозрачных конструкций¹. Стекло из-за воздействия высоких температур во время пожара разрушается, предоставляя возможность выходу пожара на внешний фасад и дальнейшему его распространению на вышележащие этажи.

Конструирование высотных зданий имеет особую специфику, ведь нужно учитывать не только устойчивость, но и пожарную безопасность объекта. В строительстве высотных зданий преимущество отдается закаленному стеклу, которое в случае возникновения пожара будет орошаться огнетушащим веществом, поступающим из спринклерной системы. Пожаростойкие стеклопакеты при строительстве высотных зданий не применяются, т.к. они отличаются большим весом и увеличивают стоимость строительства, не гарантируя при этом дей-

¹ ГОСТ 33079-2014. Конструкции фасадные светопрозрачные навесные. Классификация. Термины и определения: государственный стандарт // Консорциум КОДЕКС: электронный фонд правовой и нормативно-технической литературы. – Электрон. дан. – М., 2015. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118287>. – Дата доступа: 15.12.2019.

ствительной безопасности при возникновении пожара. Поэтому исследование динамики разрушения светопрозрачных ограждающих конструкций из неорганических силикатных материалов и разработка технологии получения противопожарных стекол для светопрозрачных ограждающих конструкций приобретает исключительно важное теоретическое и практическое значение и являются актуальным направлением исследования, что подтверждается серьезными последствиями и сложностью ведения боевых действий по тушению пожара в высотных зданиях.

Основная часть

Существующие теории разрушения стекла, а также критерии оценки устойчивости стекла при пожаре основаны на результатах лабораторных экспериментов. Так, было установлено, что главным критерием, способствующим разрушению стекла, является скорость нарастания температурного воздействия на него [1]. В условиях реальных пожаров при разрушении светопрозрачного заполнения происходит выход пламени на фасад здания, реализуется максимально быстрый прирост температуры вдоль плоскости фасада. На сегодня отсутствуют сведения о поведении стекол, в том числе из неорганических силикатных материалов, при внешнем воздействии пожара, а также методика расчета устойчивости при пожаре светопрозрачных конструкций.

Нормативными документами в области пожарной безопасности определено, что для высотных зданий следует предусматривать мероприятия по ограничению распространения пожара по внешнему фасаду здания, при этом степень эффективности этих мероприятий не приведена.

Мероприятия по ограничению распространения пожара по фасаду здания представляют собой активные и пассивные меры противопожарной защиты зданий. К активным мерам относятся установки автоматического пожаротушения или водяного орошения светопрозрачных фасадов зданий. К пассивным – конструктивные решения фасадов, а также самих зданий, локализирующие размеры пожара в пределах помещения и препятствующие выходу пламени на фасад.

Пассивные методы противопожарной защиты считаются наиболее надежными и эффективными, на их работу не оказывают влияния внешние факторы окружающей среды. Научные исследования находят отражение в критериях безопасности, методах их определения или сформулированных требованиях нормативных правовых актов в области пожарной безопасности. Только на основании результатов исследований можно произвести оценку эффективности применения тех или иных способов защиты светопрозрачных фасадов зданий.

Стекло является негорючим материалом. Несмотря на то что стекло не способствует распространению пожара по фасаду, оно обладает низкой устойчивостью к воздействию высоких температур [1], что может послужить причиной распространения пожара по фасаду здания в его начальной стадии вследствие выхода пламени наружу через разрушенное остекление оконного проема [2].

Основными факторами, обуславливающими способность листовых стекол сопротивляться воздействию значительных перепадов температур, возникающих при развитии пожара, ветровым и динамическим нагрузкам, попаданию влаги на нагретую поверхность при пожаротушении, являются предел прочности стекла, его термостойкость и толщина. Существенное влияние на пожаростойкость стекол также оказывают площадь стеклоконструкции, условия закрепления стекла и его дистанция в пространстве относительно источника горения [3].

Согласно данным литературы причиной разрушения стекла под воздействием пожара являются механические напряжения, возникающие в результате неравномерного прогрева краевых и центральных зон листового стекла [4].

В связи с этим для повышения жаростойкости листовых стекол целесообразно использовать методы термической или химической закалки, которые позволяют повысить механическую прочность и термостойкость стекол.

Преимуществами метода химической закалки в сравнении с термической являются: возможность закалки стекол тонких номиналов и крупногабаритных изделий, исключение саморазрушения при транспортировке, что позволяет рекомендовать его для получения жаростойких листовых стекол.

В качестве сред для химической закалки могут использоваться различные расплавы солей или их композиций, например KNO_3 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, Li_2CO_3 , KNO_3+3KCl , $\text{KNO}_3+3\text{K}_2\text{CO}_3$ и др.

Высокотемпературный ионный обмен, предполагающий использование солей лития, несмотря на многочисленные исследования, не нашел практической реализации. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- необходимость нагрева стекла до высоких температур выше температуры стеклования, что приводит к искажению его геометрических размеров и оптических свойств;
- требуется использование дорогостоящих солей лития;
- достигаемый уровень прочности не превышает 150–250 МПа.

Наибольшее распространение для улучшения механических свойств и термостойкости стекол получил метод низкотемпературного ионного обмена в расплаве KNO_3 или расплава смеси KNO_3 с другими компонентами. Поэтому для проведения исследований в области получения жаростойких стекол был выбран этот метод.

На первом этапе исследований были изучены механические и термические характеристики исходных листовых стекол различных номиналов, которые в дальнейшем подвергались химической закалке в расплаве KNO_3 при различных температурах и времени выдержки.

Для проведения исследований свойств микротвердости, механической прочности, термостойкости светопропускания использовались образцы листового флоат-стекла ОАО «Гомельстекло» с различной толщиной – 2, 3, 4 и 6 мм.

Проведены измерения микротвердости образцов стекла различной толщины методом вдавливания алмазной пирамиды.

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Микротвердость листовых стекол различной толщины

Толщина стекла, мм	Среднее значение микротвердости, МПа
2	5215
3	5180
4	5525
6	5309

Полученные значения микротвердости варьируются в пределах от 5180 до 5525 МПа, что вполне характерно для листовых стекол.

Для жаростойких стекол большое значение имеет такой показатель, как механическая прочность. Это обуславливается тем, что механическая прочность положительно коррелирует с термостойкостью, а значит, с жаростойкостью.

Для определения механической прочности листового стекла проведены испытания на изгиб методом нагружения образца сосредоточенной силой 3 образцов стекол каждой толщины. Испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной машине Galdabini Quasar 100.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Механическая прочность

Толщина стекла, мм	Среднее значение механической прочности, МПа
2	60
3	78
4	82
6	70

Кривые нагружения листовых стекол различной толщины, представленные на рисунке 1, соответствуют кривым нагружения хрупкого материала.

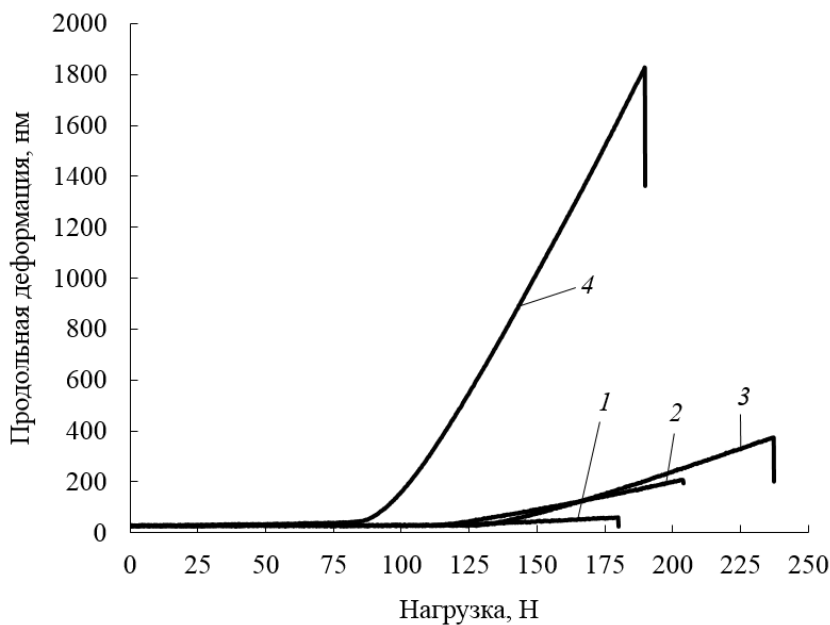


Рисунок 1. – Кривые нагружения листовых стекол различной толщины: 1 – 2 мм; 2 – 3 мм; 3 – 4 мм; 4 – 6 мм

По мере роста внешних усилий внутренние напряжения также растут и достигают предела прочности, после чего материал разрушается.

Хрупкое разрушение – наиболее опасный вид разрушения, т.к. оно идет с большой скоростью и при относительно небольшой деформации, предшествующей ему.

Согласно полученным данным с увеличением толщины листового стекла механическая прочность увеличивается, однако при этом следует учитывать, что увеличивается и вес изделий.

Термостойкость характеризует способность материала выдерживать резкие перепады температур без разрушения. Поскольку изделия из стекла обладают более высокой прочностью при сжатии, термостойкость изделий из стекла к резкому нагреву оказывается более высокой, чем к резкому охлаждению. В связи с этим термостойкость стекла определяется максимальной разностью температур, которую оно выдерживает при быстром охлаждении.

Наибольшее влияние на термостойкость оказывают такие факторы, как механическая прочность, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), толщина образца, а также большое значение имеет состояние поверхности стекла, т.к. при наличии дефектов в поверхностных слоях термостойкость снижается.

Пожаростойкость листовых стекол положительно коррелирует с их термостойкостью, т.е. при увеличении термостойкости пожаростойкость листового стекла возрастает. В связи с этим проведены исследования термостойкости исходных листовых стекол.

Определение термостойкости листовых стекол осуществлялось методом разрушающего температурного перепада. Результаты измерения термостойкости приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Термостойкость листовых стекол различной толщины

Толщина стекла, мм	Термостойкость ΔT , °С
2	145
3	125
4	110
6	85

По данным, отображенным в таблице 3, можно сделать вывод, что при увеличении толщины стекла его термостойкость закономерно снижается. Таким образом, листовое стекло толщиной 6 мм обладает максимальной термостойкостью 85 °С, а листовое стекло толщиной 2 мм – термостойкостью 145 °С.

При охлаждении стекла его наружные слои стремятся уменьшиться в объеме. Этому препятствуют внутренние слои, остывающие медленно из-за малой теплопроводности стекла. Образующиеся напряжения между наружными и внутренними слоями приводят к разрушению стекла. Те же процессы протекают и при резком нагревании стекла. Разница заключается в том, что при охлаждении в стекле образуются напряжения растяжения, а при нагревании – напряжения сжатия.

Наблюдаемое поведение листовых стекол разной толщины обусловлено масштабным эффектом, согласно которому увеличение размеров образцов приводит к большей величине перепада температур по толщине стекла, а значит, и увеличению напряжений, возникающих в объеме стекла при его охлаждении. Это вызывает разрушение при перепадах температур на 20–60 °С ниже для образцов толщиной 3–6 мм, в сравнении с листовыми стеклами толщиной 2 мм.

Выбран интервал варьирования температуры и времени обработки листовых стекол в расплаве KNO_3 . Для температуры он составлял 440–500 °С и обусловлен тем, что, с одной стороны, ее значение должно обеспечивать получение расплава, с другой – температура расплава не должна быть выше, чем температура стеклования листового стекла, чтобы не вызывать релаксацию напряжений, возникающих в результате диффузии ионов калия в поверхностный слой стекла.

Время выдержки листового стекла в расплаве KNO_3 составляло 1 ч. Обработка проводилась в сушильном шкафу при различных температурах – 440, 470 и 500 °С.

Температурно-временной режим обработки образцов листовых стекол приведен в таблице 4.

Таблица 4. – Температурно-временной режим обработки

Условия обработки в расплаве KNO_3		
Время выдержки, ч	Толщина стекла, мм	Температура обработки, °С
1	2	440
		470
		500
1	3	440
		470
		500

Перед обработкой стекла дополнительно подогревались, чтобы при помещении в расплав для обработки не имело место явление термоудара и образцы не разрушились. Образцы помещались в кювету из проволоки и затем в расплав. Длительность обработки составила 1 ч. Температура обработки измерялась хромель-алюмелевой термопарой в пределах ± 5 °С. После обработки кювета с образцами извлекалась из расплава и помещалась в сушильный шкаф для последующего медленного охлаждения. После охлаждения образцов и извлечения из кюветы производились измерения их свойств.

Микротвердость. Результаты измерения микротвердости образцов листового стекла толщиной 2 и 3 мм представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Микротвердость стекол до и после обработки в расплаве KNO₃

Толщина, мм	Микротвердость, МПа			
	до обработки	после обработки при температурах, °С		
		440	470	500
2	5212	6159	6039	5403
3	5180	6102	5890	5413

По представленным данным в таблице 5 можно сделать вывод, что в результате обработки в расплаве KNO₃ наблюдается увеличение микротвердости опытных образцов листовых стекол на 190–950 МПа для образцов толщиной 2 мм и 230–920 МПа для 3 мм.

Механическая прочность. Результаты измерения механической прочности образцов толщиной 2 и 3 мм представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Механическая прочность листовых стекол до и после обработки в расплаве KNO₃

Толщина, мм	Механическая прочность, МПа			
	до обработки	после обработки при температурах, °С		
		440	470	500
2	60	136,4	126,7	75,4
3	78	144,4	127,3	80,8

В результате обработки в расплаве KNO₃ произошло увеличение механической прочности опытных образцов листового стекла на 15–75 МПа для образцов толщиной 2 мм и 10–75 МПа для 3 мм, что обусловлено образованием напряжений сжатия в поверхностном слое в результате диффузии ионов K⁺.

Наибольший эффект повышения прочности стекол достигается при температуре обработки 440 °С, дальнейшее увеличение температуры выдержки в расплаве KNO₃ также обеспечивает увеличение прочности стекол, но в меньшей степени.

Обработка стекол при более высоких температурах 470 и 500 °С позволяет интенсифицировать процесс диффузионного обмена ионов Na⁺ на K⁺ в поверхностном слое стекла, что обеспечивает быстрое увеличение концентрации ионов K⁺ в стекле, а значит, и рост напряжений сжатия. Однако, по-видимому, возникающие напряжения сжатия частично релаксируют.

Термостойкость. Результаты измерения термостойкости образцов листового стекла толщиной 2 и 3 мм представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Термостойкость листовых стекол до и после обработки в расплаве KNO₃

Толщина, мм	Термостойкость ΔТ, °С			
	до обработки	после обработки при температурах, °С		
		440	470	500
2	145	165	160	150
3	125	135	130	130

После термообработки в расплаве KNO₃ термостойкость листовых стекол увеличилась до 130–165 °С. Изменение термостойкости опытных образцов листового стекла толщиной 2 мм составило 5–20 °С и для 3 мм 5–10 °С. Это вполне закономерно с учетом увеличения механической прочности у образцов листового стекла, которая положительно коррелирует с термостойкостью.

Анализ полученных данных показывает, что при обработке образцов листового стекла номиналами 2 и 3 мм в расплаве соли KNO₃ наибольшее положительное влияние оказала обработка при температуре 440 °С: значение микротвердости увеличилось на 150 МПа для образцов толщиной 2 мм, для образцов толщиной 3 мм – на 230 МПа; значение механической прочности увеличилось на 75 МПа для обоих номиналов образцов листового стекла; значение термостойкости увеличилось на 20 °С для образцов листового стекла толщиной 2 мм, для образцов толщиной 3 мм – на 10 °С.

Для дальнейших исследований было выбрано листовое стекло толщиной 2 мм, поскольку для него был достигнут больший эффект в повышении механической прочности и термостойкости, чем для листового стекла толщиной 3 мм. Следует отметить, что положительным фактором, указывающим на целесообразность применения стекла толщиной 2 мм, является его меньший вес, что позволит снизить трудо- и энергозатраты при его транспортировке и установке.

При выполнении экспериментальных исследований порядок опытов в матрице планирования был рандомизирован. Каждый опыт повторялся несколько раз для оценки дисперсии воспроизводимости.

Проведены исследования микротвердости, прочности при изгибе и термостойкости обработанных образцов. Результаты исследований представлены в таблице 8.

Таблица 8. – Усредненные значения свойств обработанных стекол

№ опыта	T, °C	τ, ч	Микротвердость, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Термостойкость, °C
1	470	2	6419	157,40	170
2	500	2	5635	94,10	160
3	440	2	6483	162,60	175
4	470	3	6597	171,73	175
5	500	3	6374	153,73	170
6	440	3	6672	258,50	200
7	470	1	6039	126,70	160
8	500	1	5403	75,40	150
9	440	1	6159	136,40	165

Примечание. Значения свойств исходного стекла: микротвердость – 5215 МПа; прочность при изгибе – 60 МПа; термостойкость – 145 °C.

Заключение

В данной работе исследованы исходные свойства листовых стекол различной толщины (2, 3, 4 и 6 мм). Показано, что с увеличением толщины стекла снижается значение термостойкости. Наибольшей термостойкостью обладают стекла толщиной 2 и 3 мм, которые в дальнейшем были подвергнуты ионообменной обработке.

Использование упрочняющего реагента KNO_3 в интервале температур 440–500 °C в течение 1 ч для стекол толщиной 2 и 3 мм показало, что свойства (микротвердость, механическая прочность и термостойкость) листового стекла толщиной 2 мм значительно улучшаются. Механическая прочность возрастает в 2–2,5 раза, термостойкость на 20–30 °C. Использование листовых стекол толщиной 2 мм позволяет снизить вес светопрозрачных конструкций. Уменьшить расходы на транспортировку листового стекла, упростить процесс их установки. В связи с этим в дальнейшем исследования выполнялись на образцах стекол толщиной 2 мм.

Для оптимизации температурно-временного режима обработки листовых стекол использован метод математического планирования. Получены регрессионные зависимости свойств образцов стекол от режима обработки в расплаве KNO_3 .

Установлено, что определяющим фактором, влияющим на термостойкость и механические свойства (микротвердость и механическая прочность) стекла толщиной 2 мм при низкотемпературной ионообменной обработке в расплаве KNO_3 является время выдержки образцов в расплаве KNO_3 при максимальной температуре обработки. Определен оптимальный температурно-временной режим обработки листового стекла толщиной 2 мм: температура обработки – 440 °C и время выдержки – 3 ч. Обработанное стекло характеризуется высокими показателями механических свойств и термостойкости: микротвердость – 6672 МПа; механическая прочность – 258,5 МПа; термостойкость – 200 °C при сохранении оптических свойств.

Полученные данные можно использовать для создания пожаростойких светопрозрачных ограждающих конструкций, прошедших химическую закалку и обладающих повышенными термомеханическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казиев, М.М. Разрушение светопрозрачных строительных конструкций при тепловом воздействии в условиях пожара / М.М. Казиев, А.В. Подгрушный, А.В. Дудунов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 2. – С. 5–10.
2. Liu, W. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study / W. Liu, Z. Lian, Q. Deng, Y. Liu // Building and Environment. – 2011. – Vol. 46, Iss. 2. – P. 478–488. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.08.011.
3. Дудунов, А.В. Пожароустойчивость светопрозрачного заполнения оконных строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / А.В. Дудунов. – М., 2010. – 128 с.
4. Святкин, Г.К. Расчетная модель разрушения остекления при тепловом воздействии пожара / Г.К. Святкин // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 4. – С. 54–57.

Повышение термомеханических свойств листовых стекол с целью создания пожаростойких светопрозрачных ограждающих конструкций высотных зданий
Increasing the thermomechanical properties of sheet glasses for the purpose of creation of fire-resistant light-transparent enclosures of high buildings

Бирюк Виктор Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра промышленной
безопасности, заведующий кафедрой
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: vik_biruk@tut.by
ORCID: 0000-0002-3110-9557

Viktor A. Biryuk

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Head of the Chair
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: vik_biruk@tut.by
ORCID: 0000-0002-3110-9557

Давыдик Максим Анатольевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра промышленной
безопасности, адъюнкт
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: maximdavidik@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9451-9513

Maksim A. Davydik

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Adjunct
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: maximdavidik@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9451-9513

Кравчук Александр Петрович

кандидат технических наук, доцент
Учреждение образования «Белорусский
государственный технологический
университет», кафедра технологии стекла
и керамики, доцент
Адрес: ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Беларусь
e-mail: kravchuk@belstu.by
ORCID: 0000-0002-6951-0717

Kravchuk A. Petrovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Belarusian State Technological University,
Chair of Glass and Ceramics Technology,
Associate Professor
Address: Sverdlova str., 13a,
220006, Minsk, Belarus
e-mail: kravchuk@belstu.by
ORCID: 0000-0002-6951-0717

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.311>

INCREASING THE THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF SHEET GLASSES FOR THE PURPOSE OF CREATION OF FIRE-RESISTANT LIGHT-TRANSPARENT ENCLOSURES OF HIGH BUILDINGS

Biryuk V.A., Davydik M.A., Kravchuk A.P.

Purpose. Investigation of the thermomechanical properties of sheet glass used for translucent enclosing structures with the development of measures to increase the level of fire safety of high-rise buildings.

Methods. To solve the set tasks, theoretical and experimental research methods are used. The theoretical method is based on solving the problems of the thermal regime of solids and analyzing the criteria for the destruction of translucent structures in a fire. The experimental method is based on the identification of the relationship between the parameters of the fire and the criteria for the destruction of the translucent facade on the fire floor and upper lying floors.

Findings. The review of the state of the problem in the field of fire safety of high-rise buildings with facade glazing is carried out. It is established that the currently used translucent enclosing structures are made mainly of multilayer or tempered glass, which causes an increased load on the foundation, high cost and does not always preserve the integrity of the structure in the event of a fire. Experimental studies of the hardening of sheet glass of different denominations by chemical quenching were carried out, the possibility of using this method to create fireproof glasses was evaluated.

Application field of research. Fire safety in construction, translucent building envelopes.

Keywords: fire safety, translucent structures, fire resistance, heat resistance, chemical hardening.

(The date of submitting: July 20, 2021)

REFERENCES

1. Kaziev M.M., Podgrushnyi A.V., Dudunov A.V. Razrushenie svetoprozrachnykh stroitel'nykh konstruksiy pri teplovom vozdeystvii v usloviyakh pozhara [Destruction of translucent building structures during heat exposure in fire]. *Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2009. No. 2. Pp. 5–10. (rus)
2. Liu W., Lian Z., Deng Q., Liu Y. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study. *Building and Environment*, 2011. Vol. 46, Iss. 2. Pp. 478–488. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.08.011.
3. Dudunov A.V. *Pozharoustoychivost' svetoprozrachnogo zapolneniya okonnykh stroitel'nykh konstruksiy* [Fire resistance of translucent window building structure]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2010. 128 p. (rus)
4. Sviatkin G.K. Raschetnaya model' razrusheniya ostekleniya pri teplovom vozdeystvii pozhara [Computational model of the destruction of glazing under the thermal effect of a fire]. *Fire and Explosion Safety*, 1993. No 4. Pp. 54–57. (rus)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.321>

УДК 502.55:628.192

СОРБЦИЯ И УДЕРЖИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТАМ

Жукалов В.И., Гольдаде В.А., Зотов С.В.

Цель. Исследование влияния электризации полимерных волокнисто-пористых материалов на сорбцию нефти и нефтепродуктов.

Методы. Пневмоэкструзия полипропилена марки Borealis. Электризация образцов в поле коронного разряда положительной и отрицательной полярности напряженностью 25 кВ/см. Обработка образцов в низкотемпературной кислородной плазме тлеющего разряда с частотой 35 кГц. Весовой метод определения сорбционных характеристик. Метод растровой электронной микроскопии. Метод электретно-термического анализа.

Результаты. Установлена зависимость сорбционных параметров материалов из полипропилена от вида физического модифицирования – коронного разряда различной полярности и низкотемпературной плазмы тлеющего разряда. Показано, что модифицирование в поле коронного разряда для придания электретных свойств несколько снижает сорбционные характеристики данных материалов по отношению к нефти. При изготовлении сорбционных материалов для сбора сырой нефти следует применять немодифицированный волокнисто-пористый полипропилен. Экспериментально установлено, что при изготовлении сорбционных материалов для сбора легких фракций нефти предпочтительным является метод модифицирования волокон в поле коронного разряда отрицательной полярности. Электризация оказывает значительное влияние на процессы сорбции волокнами ее липофильных компонентов. Предлагается физическая модель сорбции нефтепродуктов электретными образцами полимерных волокнисто-пористых материалов.

Область применения исследований. Волокнисто-пористые полимерные материалы, подвергнутые физическому модифицированию с формированием электретного состояния, могут быть использованы для сорбции некоторых фракций нефти, фильтрации жидкостей от загрязнений диэлектрической природы, очистки воздуха от содержащей радиоактивные частицы ионизированной пыли, а также разделения биологических жидкостей, содержащих диэлектрические и (или) электретные компоненты.

Ключевые слова: сорбция, нефть, дизельное топливо, коронный разряд, электретное состояние, физическая модель.

(Поступила в редакцию 20 апреля 2021 г.)

Введение

Разливы нефти и нефтепродуктов – один из наиболее опасных вариантов техногенных экологических катастроф. На территории Беларуси водные объекты 214 раз пересекаются трубопроводами нефти и нефтепродуктов. Нарушение условий эксплуатации трубопроводов иногда приводит к их разгерметизации, вызывая впоследствии аварийные ситуации различного масштаба. Так, 23 марта 2007 г. в Бешенковичском районе Витебской области на нефтепроводе Унеча – Вентспилс из-за порыва трубопроводов объем утечки нефти составил более 100 тыс. т, причем в водную систему мелиоративного канала рек Улла и Западная Двина попало около 80 м³ дизельного топлива, а пятно загрязнения дошло до территории Латвии. Также 14 февраля 2008 г. в Речицком районе Гомельской области в результате порыва трубопровода Унеча – Ровно произошел разлив около 70 м³ дизтоплива¹. В мире известны и более крупномасштабные аварии такого рода (Мексиканский залив, Норильск и др.).

¹ Авария трубопровода Унеча – Ровно: в Днепр может вылиться до 400 кубометров топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://news.tut.by/society/103371.html>. – Дата доступа: 25.02.2021.

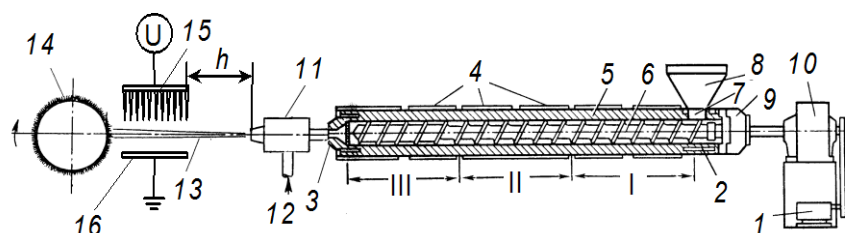
Для борьбы с разливами нефти и нефтепродуктов по поверхности почв и водоемов применяются различные технологии [1–5]. Одним из эффективных методов ликвидации последствий данных разливов является применение специальных сорбционных материалов, в частности волокнисто-пористых [6]. В настоящее время ведутся активные разработки в области создания новых синтетических сорбентов, в максимальной степени отвечающих комплексному критерию «цена/эффективность». Кроме того, разрабатывается оборудование, которое позволяет проводить эффективный сбор нефтепродуктов с водной поверхности и прямо на месте отделять воду от нефти.

Нетканый волокнисто-пористый материал из полипропилена обладает высокой сорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам, что обусловлено липофильностью полипропилена и его физико-химическим сродством к углеводородам. Полученные методом пневмоэкструзии (melt blowing) полимерные волокнистые материалы обладают уникальным сочетанием свойств, благодаря чему применяются при фильтрации многофазных сред от загрязнений [7; 8]. К настоящему времени достигнут некоторый предел технологических возможностей по обеспечению уровня свойств этих материалов.

Известно существование в полимерных пневмоэкструзионных материалах явления электрической поляризации за счет интенсивного термоокисления формирующихся волокон. Обработка в физических полях различной интенсивности полипропилена, особенно в вязко-текучем состоянии на этапе формирования melt-blown волокна, усиливает этот процесс, что особенно характерно для поверхностного слоя волокон. Для повышения эффективности осуществляемых посредством этих материалов процессов фильтрации сред и сорбции загрязнений требуется разработка новых технических решений, в том числе связанных с целевым физико-химическим модифицированием волокон. Тем самым увеличение сорбционной способности волокнистых материалов путем их модифицирования различными методами является актуальной задачей.

Методика исследований

Из гранулированного полипропилена (ПП) марки Borealis на пневмоэкструзионной установке (рис. 1) изготавливали волокнисто-пористые melt-blown материалы в виде полотен: исходные, модифицированные на стадии диспергирования расплава в отрицательном и положительном коронном разряде с напряженностью 25 кВ/см, а также обработанные в низкотемпературной кислородной плазме тлеющего разряда с частотой 35 кГц. Варьируемые технологические режимы процесса (температура, давление сжатого воздуха и др.) позволяли получать материалы с диаметром волокон от 5 до 100 мкм.



1 – электродвигатель; 2 – канал для охлаждения зоны бункера; 3 – канал для выхода расплава в профилирующую головку; 4 – нагреватели цилиндра; 5 – цилиндр; 6 – червяк; 7 – загрузочная воронка; 8 – бункер; 9 – упорный подшипник; 10 – редуктор; 11 – распылительная головка; 12 – патрубок подачи сжатого воздуха; 13 – газополимерный поток; 14 – формообразующая оправка. Зоны червяка: I – питания (загрузки); II – сжатия (пластикация); III – выдавливания (дозирования). Зона электризации: 15 – высоковольтный электрод; 16 – заземленный электрод

Рисунок 1. – Схема технологического процесса melt blowing

Пористую структуру образцов (рис. 2) изучали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе VEGA II LSH Tescan. При экспериментах по сорбции использовали образцы квадратной формы размерами 50×50 мм и толщиной 8–10 мм, одновременно

помещаемые в емкости с нефтью. Также для оценки сорбционной и удерживающей способности материала в качестве сорбируемой жидкости использовали дизельное топливо марки ДТ-Л-К5, причем образцы размерами 110×20×10 мм выдерживали в течение 10 мин в емкости с дизельным топливом для заполнения пор образца и удаления пузырьков воздуха, после чего заполненный жидкостью образец подвешивали на штативе, установленном на соединенных с компьютером весах (рис. 3), и измеряли изменяющуюся массу образца. Для изучения поляризационных эффектов, возникших вследствие физического модифицирования волокнисто-пористого материала, использовали метод электротно-термического анализа [9] с регистрацией спектров термостимулированных токов (ТСТ).

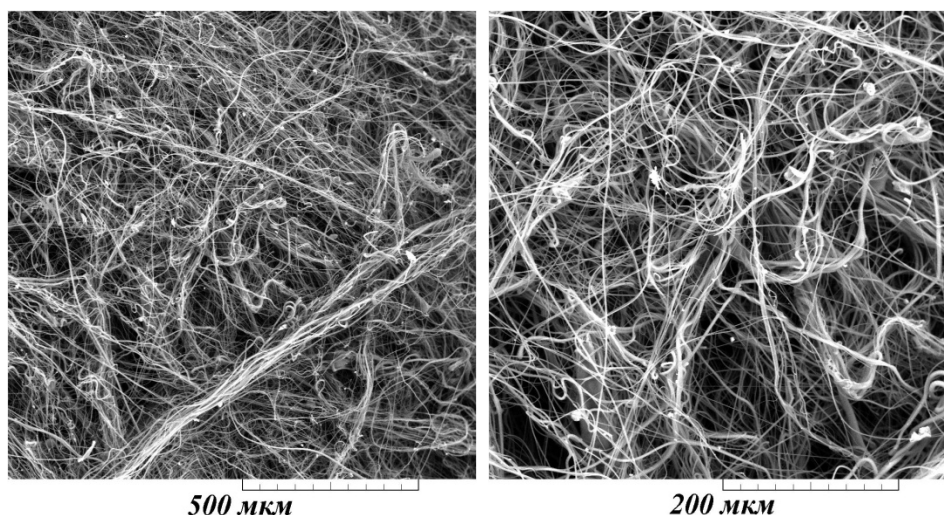
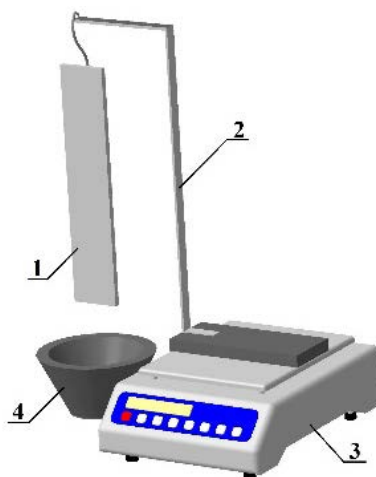


Рисунок 2. – Микрофотографии образца волокнисто-пористого материала из ПП, полученного методом пневмоэкструзии



1 – испытуемый образец материала; 2 – штатив; 3 – электронные веса, подключенные к компьютеру; 4 – емкость с дизельным топливом

Рисунок 3. – Схема испытательного стенда

Основная часть

1. Сорбция нефти. Проведенные ранее исследования показали, что наличие в структуре материала большого количества пор позволяет повысить сорбционную емкость и удерживающую способность. Жесткое полотно волокнистого материала из полипропилена с диаметром волокна 70–100 мкм не способно впитать нефти больше, чем объем порового пространства, образованного хаотичным переплетением когезионно скрепленных волокон. В слое нефти на воде толщиной больше толщины материала полное насыщение образца происходит за 3–5 с. Удерживающая способность остается сравнительно низкой – при извлечении образца из емкости нефть частично вытекает, образуя небольшую лужицу (рис. 4а). При

помещении образца на воду с тонким слоем нефти одновременно с нефтью в поровое пространство материала проникает вода. На поверхности чистой воды материал не тонет, частично погружается в зависимости от веса, а при извлечении образца наблюдается стекание с него воды. Естественная способность материала удерживать нефть в поровом пространстве оказывается недостаточной из-за низкого капиллярного эффекта, обусловленного значительными расстояниями между волокнами, что, в свою очередь, определяется сочетанием их диаметра и плотности упаковки. На значительном количестве образцов экспериментально установлено, что поровое пространство материала заполняется нефтью практически полностью, но в случае, когда полотно построено из жестких и более толстых волокон ПП, предпосылок для дальнейшего увеличения сорбционной способности не наблюдается и набухания не происходит. Стоит отметить также возникающие проблемы при регенерации: для очистки от нефти сорбционных изделий из жесткого волокнисто-пористого полотна потребуются проводить центрифугирование, что значительно сложнее, чем простой отжим [10].

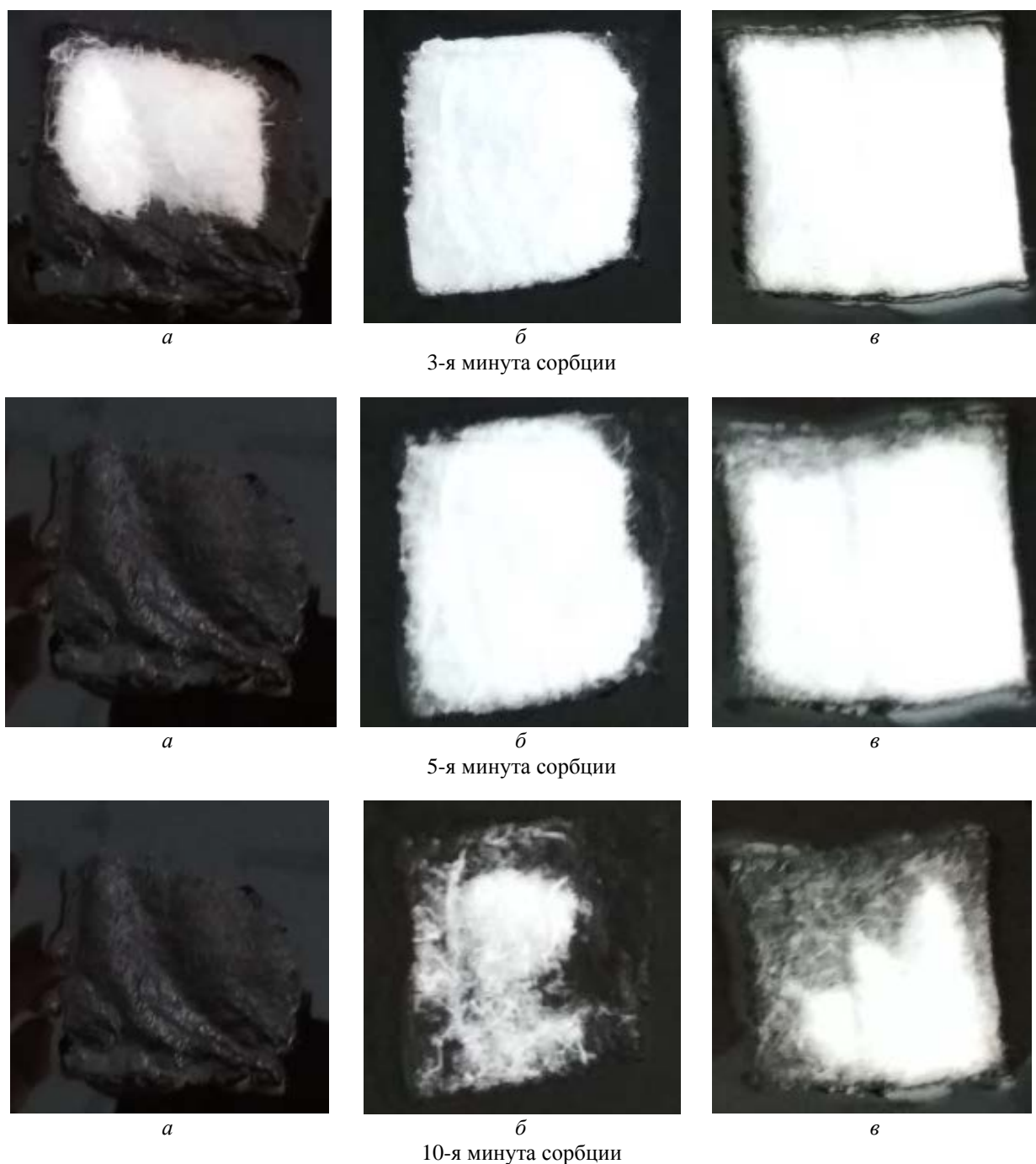


Рисунок 4. – Снимки извлеченных из нефти образцов полимерного волокнистого материала с диаметром волокон 70–100 мкм (а) и около 5 мкм (б)

Волокнисто-пористый материал из ПП с диаметром волокна около 5 мкм имеет отличительные особенности. Время практически полного насыщения образца нефтью составляет 3–5 мин, при этом образец увеличивается в объеме, а при извлечении демонстрирует высокую сорбционную и удерживающую способность (рис. 4б). Наличие открытой мелкопористой структуры способствует эффективной сорбции нефти за счет проявления капиллярного эффекта. Повторное применение такого материала вполне возможно после процесса отжима или центрифугирования (в зависимости от требуемого качества очистки материала) [5]. При сборе тонкого слоя нефти с поверхности воды образец такого материала не впитывает воду, на поверхности чистой воды не тонет. При принудительном погружении образцов под воду их поверхность, не смачиваясь, приобретает серебристый оттенок, что косвенно свидетельствует о ярко выраженной гидрофобности материала. После извлечения из воды вес образцов не увеличивается.

Исходя из полученных данных можно сделать промежуточный вывод о перспективности использования материала из ПП с диаметром волокна около 5 мкм по таким технико-экономическим показателям, как эффективность сорбции нефти и возможность его повторного применения.

Следующая серия экспериментов позволила оценить влияние электризации волокнисто-пористого материала из ПП на его сорбционные характеристики. Из рисунка 5 видно, что скорость впитывания нефти образцами с дополнительно иницированным положительным и отрицательным зарядами ниже, по сравнению с неэлектризованным образцом. На пятой минуте нефть практически полностью пропитала волокна образца исходного материала, в то время как электризованные образцы оказались еще не полностью пропитаны.

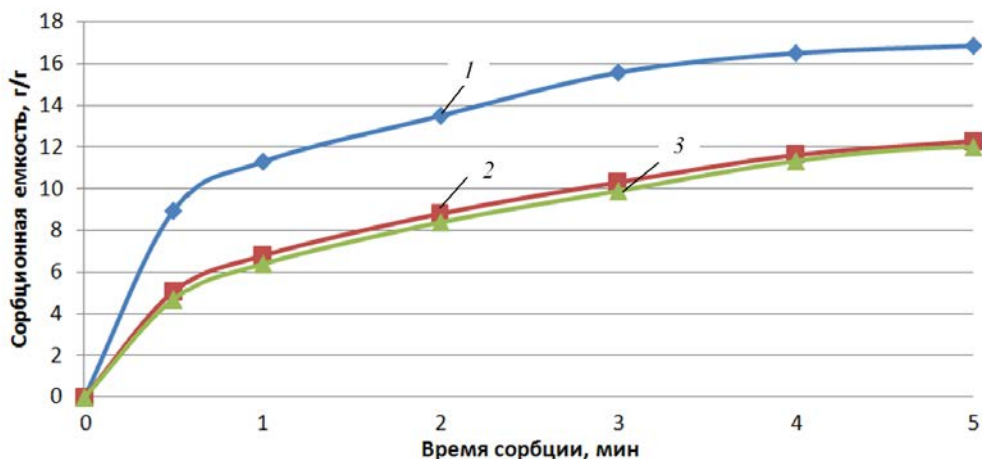


a – образец исходного материала без заряда; *б* – образец материала с отрицательным зарядом;
в – образец материала с положительным зарядом

Рисунок 5. – Фотоснимки результатов сорбции нефти

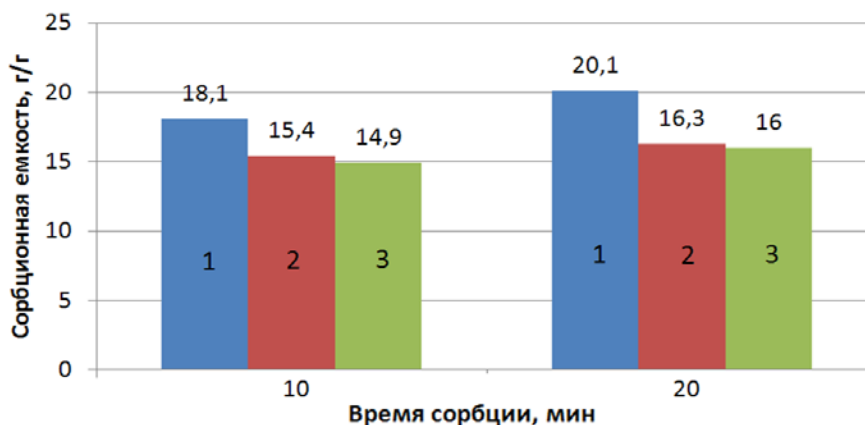
Величина сорбции нефти образцами волокнистого материала за 5 мин представлена в виде графиков на рисунке 6. Видно, что значительное впитывание нефти поровым пространством материала происходит в первые 30–40 с после погружения образцов, а затем количество адсорбированной нефти прекращает увеличиваться. Результаты сорбции нефти образцами за 10 и 20 мин приведены на рисунке 7. Из результатов взвешивания видно, что волокнистый материал без заряда имеет сорбционную емкость на 15–25 % больше, чем материалы с отрицательным и положительным зарядами. После извлечения образцов из емкости с нефтью на поверхности образца без заряда присутствует небольшое количество нефти, образец приобретает слегка утолщенную форму. На поверхности образцов с положительным

и отрицательными зарядами нефть не выступает, что может свидетельствовать о влиянии заряда волокон на особенности капиллярных процессов, в которых участвует нефть. Проведенный эксперимент позволил выявить и проиллюстрировать новую гипотетическую возможность – комбинируя зарядовое состояние волокон, управлять в требуемом направлении капиллярными эффектами в исследуемой волокнисто-пористой системе.



1 – образец исходного материала без заряда; 2 – образец материала с отрицательным зарядом;
3 – образец материала с положительным зарядом

Рисунок 6. – Зависимость сорбционной емкости образцов волокнисто-пористого материала из ПП от времени сорбции



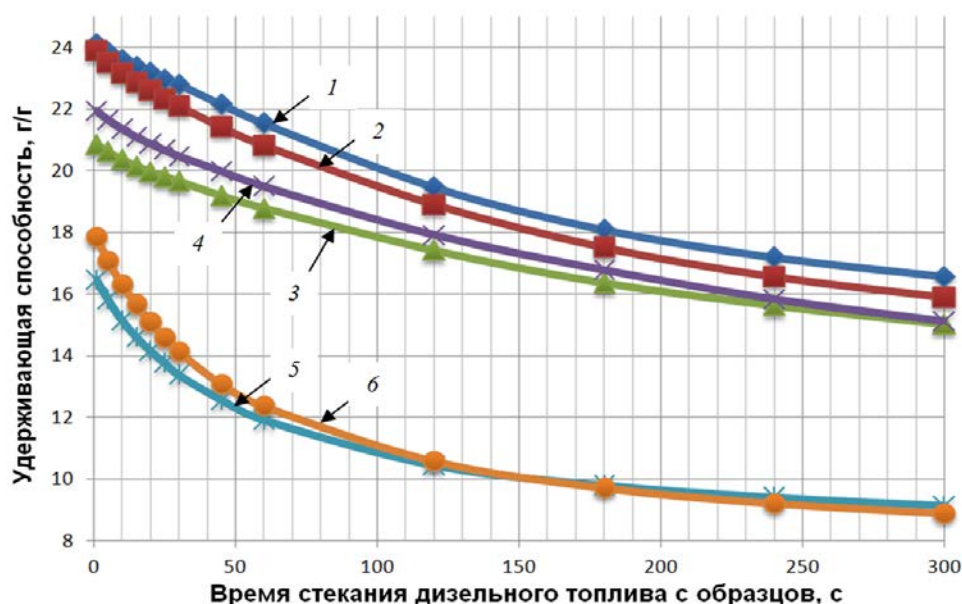
1 – образец исходного материала, без заряда; 2 – образец материала с отрицательным зарядом;
3 – образец материала с положительным зарядом

Рисунок 7. – Сорбционная емкость образцов за 10 и 20 минут сорбции

На основании приведенных результатов можно сделать практический вывод, что модифицирование волокнисто-пористых материалов в поле коронного разряда для придания им электретных свойств несколько снижает сорбционные характеристики этих материалов по отношению к нефти, ввиду чего для сбора сырой нефти предпочтительнее применять исходный волокнисто-пористый материал из ПП.

2. Сорбция дизельного топлива. В отличие от нефти и ее тяжелых фракций легкие углеводородные фракции проникают в поровое пространство волокнисто-пористого материала достаточно быстро. Для оценки взаимосвязи поляризационных эффектов в волокнах и проведения сравнительного анализа сорбционной и удерживающей способностей материала по отношению к фракциям нефти в качестве сорбирующей жидкости использовали дизельное топливо марки ДТ-Л-К5.

Визуально наполнение порового пространства материала топливом происходило одновременно с его погружением, но последующий выход из образцов пузырей воздуха свидетельствовал о необходимости некоторой выдержки материала в емкости перед его последующим взвешиванием и оценкой скорости стекания топлива из образцов. На рисунке 8 начальные значения на кривых соответствуют сорбционной способности материала. Из представленных графиков видно, что наилучшей сорбционной и удерживающей способностью по отношению к дизельному топливу обладает образец 1 полимерного волокнисто-пористого материала из ПП, модифицированный в поле отрицательного коронного разряда. Образец 3, обработанный положительным коронным разрядом, немного уступает первому по величине сорбции (соответственно 21 и 24 г/г). Образец 5 исходного материала обладает наименьшей величиной сорбции (около 17 г/г), и из его порового пространства достаточно быстро (примерно в первые 30–50 с) стекает дизельное топливо, в отличие от образцов 1 и 3, из которых стекание топлива происходит медленнее. Дополнительная обработка в низкотемпературной плазме (образцы 2, 4, 6) практически не влияет на сорбционную способность. Выявленные зависимости снижения веса у образцов 1–4 могут свидетельствовать о влиянии поляризации на увеличение удерживающей способности. Об этом же свидетельствует увеличение сорбции образцов, обработанных в коронном разряде, по сравнению с необработанными (до 46 %).



1 – образец, сформированный в поле отрицательного разряда; 2 – образец, сформированный в поле отрицательного разряда и обработанный в плазме; 3 – образец, сформированный в поле положительного разряда; 4 – образец, сформированный в поле положительного разряда и обработанный в плазме; 5 – исходный волокнисто-пористый материал; 6 – исходный волокнисто-пористый материал, обработанный в плазме
Рисунок 8. – Зависимость удерживающей способности образцов волокнисто-пористого материала из ПП по дизельному топливу от времени его стекания

Таким образом, метод модифицирования волокнисто-пористых материалов в поле отрицательного коронного разряда является предпочтительным при изготовлении сорбционных материалов для сбора легких фракций нефти.

3. О механизмах, ответственных за поляризационные эффекты в волокнах. В пневмоэкструзионных волокнисто-пористых полимерных материалах, модифицированных путем обработки в электрическом поле, возникает многоуровневая сорбционно-фильтрующая среда с комбинацией различных факторов, включая ситовый эффект, капиллярные процессы и влияние физических полей. В результате этого воздействия сорбат с большей вероятностью удерживается волокнисто-пористой системой, которая становится одновременно фильтром (по отношению к фильтруемой очищаемой среде) и сорбентом (по отношению к загряз-

нению). Актуальным представляется исследование закономерностей достигаемой в физических полях электрической поляризации в волокнах, которая оказывает значительное влияние как на процессы капиллярного проникновения жидкостей в межволоконную среду, так и сорбции волокнами ее липофильных компонентов.

Известно существование в полимерных пневмоэкструзионных материалах спонтанной электрической поляризации за счет интенсивного термоокисления формирующихся волокон [11; 12]. Обработка последних в физических полях усиливает это явление [13], что особенно ярко проявляется в окисленном поверхностном слое волокон, содержащем значительное количество полярных функциональных групп. На рисунке 9 приведены спектры ТСТ, которые иллюстрируют специфическую картину термически стимулированной деполаризации таких образцов. Анализ спектров ТСТ позволяет установить, как тот или иной прием модифицирования волокон влияет на возникающее при пневмоэкструзии электретное состояние в волокнах и на характер релаксации заряда в них.

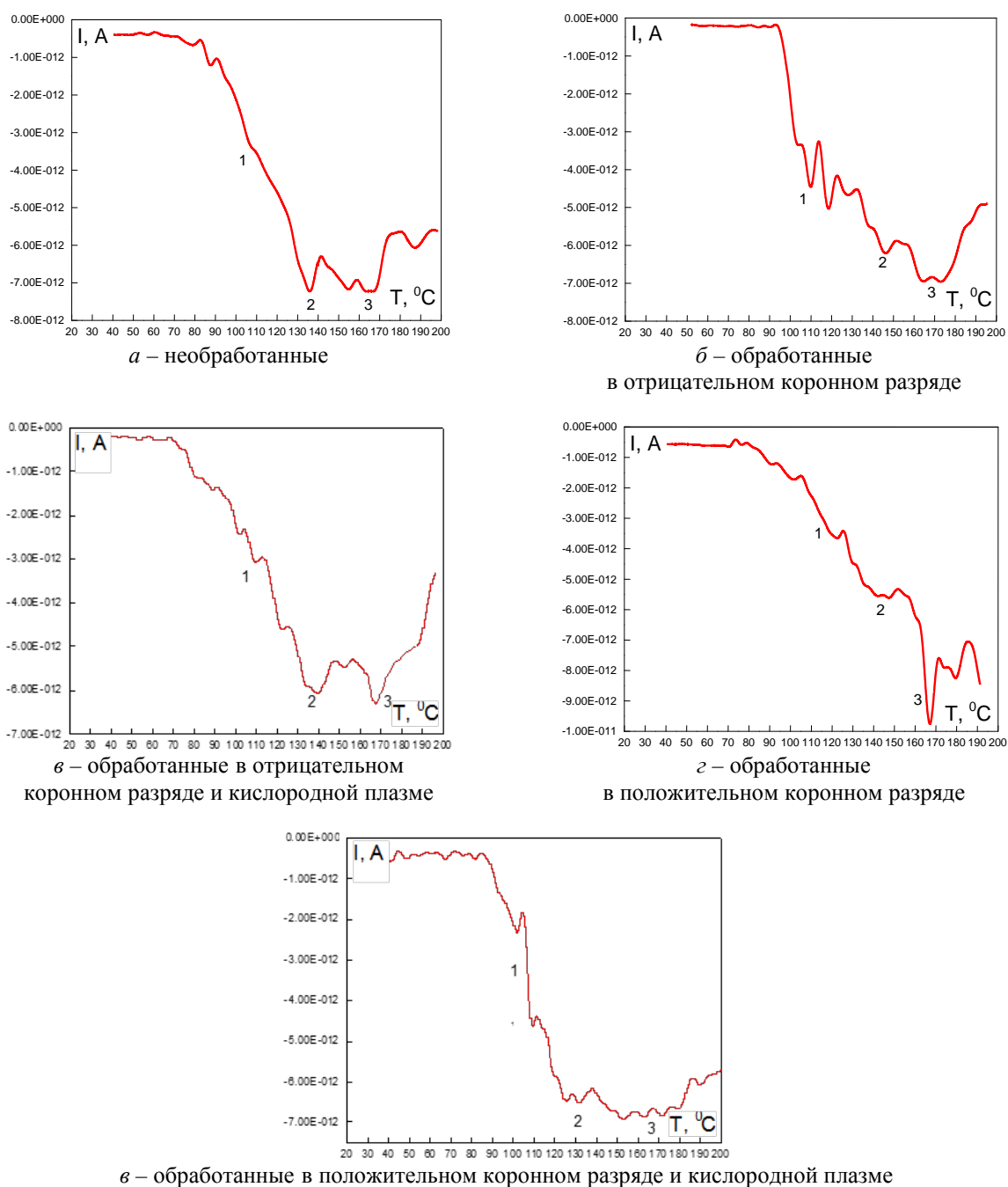


Рисунок 9. – Спектры ТСТ пневмоэкструзионных волокон ПШ

В необработанных волокнах ПП, обладающих технологическим зарядом (рис. 9а), процесс деполяризации происходит плавно, экстремумы 2 и 3 соизмеримы по величине. Деполяризация в волокнах, обработанных в отрицательном коронном разряде (рис. 9б), происходит ступенчато с возникновением на спектре ТСТ экстремумов разной величины. В спектрах образцов, обработанных в отрицательном коронном разряде и кислородной плазме (рис. 9в), экстремумы 1 снижены, пики 2 и 3 снова соизмеримы. В спектрах волокон, обработанных в положительном коронном разряде (рис. 9г), пик 2 выражен слабо, а дополнительная обработка в кислородной плазме (рис. 9д) вновь приводит к выравниванию пиков 2 и 3. В температурном диапазоне до 100 °С токовых пиков, соответствующих высвобождению заряда, не наблюдается. Однако после 100 °С происходит медленный ступенчатый рост величины тока отрицательной полярности, который имеет максимум величиной 5–7 пА около 150 °С, т.е. на 15 °С ниже температуры плавления кристаллической фазы ПП (165 °С). Достижение температуры плавления, в свою очередь, также сопровождается близким по интенсивности токовым пиком. Экстремумы на кривых соответствуют температурам, при которых происходит релаксация электретного заряда из энергетических ловушек. Эти ловушки различаются по энергии, поскольку сформированы разными электрически активными объектами (диполи, кислородсодержащие группы, инжесктированные носители заряда и др.). По факту наличия нескольких пиков на спектрах ТСТ можно интерпретировать последовательность происходящих процессов деполяризации:

1) ступенчатая релаксация зарядов, связанных с окисленными группами поверхностного слоя; полярные кислородсодержащие группы (преимущественно карбонильные) возникают при термоокислительной деструкции ПП волокон в вязко-текучем состоянии, причем при затвердевании волокна образуется своеобразный окисленный поверхностный слой с повышенным содержанием таких групп [7; 8];

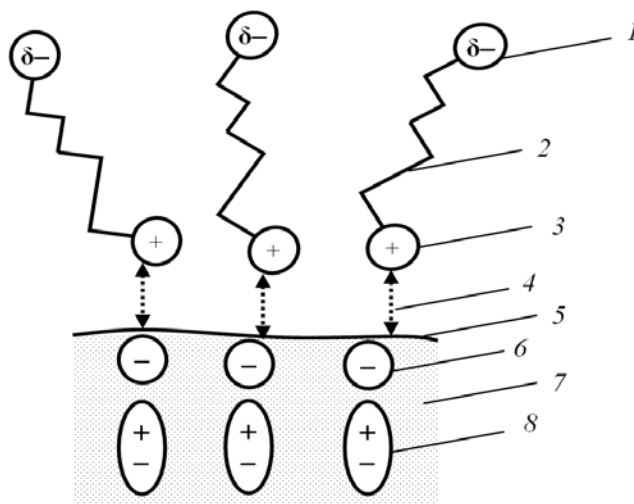
2) экстремальное завершение этой релаксации;

3) релаксация всех оставшихся зарядов при температурах выше температуры плавления ПП.

Таким образом, спектры ТСТ волокон, подвергнутых разным видам физического модифицирования, основные отличия демонстрируют в количестве локальных экстремумов процесса 1 и в сравнительной величине пиков 2 и 3. Следовательно, характер и интенсивность физического модифицирования специфически влияют на перераспределение зарядов в окисленном поверхностном слое волокон ПП.

Предложена физическая модель происходящих процессов, основанная на нижеследующих представлениях. Электретный заряд, существующий в различных формах, будет особым образом реагировать на любые поляризующиеся (диэлектрические) объекты. Один из вероятных механизмов, ответственных за выявленные эффекты, – стимулированное физическими полями перемещение электрических зарядов между энергетическими состояниями с формированием поляризованных структур различного типа. Деполяризация последних при нагреве волокон происходит ступенчато, а для зарядов, которые смогли локализоваться преимущественно в некристаллической фазе полимера, завершается до достижения температуры плавления кристаллической фазы полипропилена. Кроме того, в зависимости от своего молекулярного строения входящие в состав нефтепродуктов углеводороды, по-видимому, могут иметь неравномерное распределение электронной плотности по молекуле. Благодаря этому данные молекулы будут склонны взаимодействовать преимущественно с участками волокон, несущих заряд определенного знака, и сорбироваться ими. В частности, углеводороды, содержащие ароматические фрагменты или полярные функциональные группы, имеют следующее преимущественное распределение электронной плотности по молекуле: δ^- – на участках с повышенной электронной плотностью и δ^+ с пониженной. Алифатические фрагменты молекул углеводородов, во-первых, обладают повышенной подвижностью и, во-вторых, обычно несут δ^+ в сравнении с неалифатическими (например, ароматическими) фрагментами. Поэтому такие углеводороды более склонны к преимущественной сорбции

подвижными «концами» на отрицательно заряженных участках волокон. Эти участки содержат гомозаряд отрицательной полярности, сформированный посредством инъекции электронов в полимер при отрицательном коронном разряде. Это объясняет несколько более высокую сорбционную способность волокон, полученных в условиях воздействия отрицательного коронного разряда – у них реализуется преимущественное взаимодействие с легкими фракциями. Предполагаемая схема вышеописанных взаимодействий приведена на рисунке 10.



1 – фрагмент молекулы углеводорода с преимущественно отрицательным зарядом; 2 – условная углеводородная цепочка; 3 – фрагмент молекулы углеводорода с преимущественно положительным зарядом; 4 – адсорбционные силы, удерживающие сорбированную молекулу на поверхности волокна 5; 6 – зоны локализации электретного гомозаряда отрицательной полярности; 7 – объем волокна; 8 – зоны локализации гетерозаряда полимерного волокна

Рисунок 10. – Схема взаимодействий в системе волокно – углеводороды с неравномерным распределением электронной плотности

Заключение

При формировании волокнистых материалов из ПП методом melt-blowing именно электризация волокон (в частности, в коронном разряде различной полярности) оказывает значительное влияние на их сорбционные свойства. Изменения касаются в основном процессов сорбции липофильными волокнами органических компонентов сорбируемых жидкостей. Предложенная физическая модель сорбции нефтепродуктов электретными образцами полимерных волокнисто-пористых материалов предполагает наличие электростатического взаимодействия между молекулами углеводородов, имеющими различные подвижность и распределение электронной плотности, с участками волокон, на которых сформирован электретный заряд положительной или отрицательной полярности.

Практическая значимость волокнисто-пористых электретных материалов не ограничивается эффективной сорбцией некоторых фракций нефти. Такие материалы широко используются в инженерной экологии (фильтрация жидкостей от некоторых загрязнений диэлектрической природы [13] и фильтрация воздуха [14; 15]). Следует ожидать расширения областей применения подобных волокнисто-пористых систем в технике.

Работа выполнена в рамках задания 6.52 ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии», и в рамках темы 4.2.2 (НИР 2) задания Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов, Н.А. Сорбционный метод ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Н.А. Самойлов, Р.В. Хлесткин, А.В. Шеметов. – М.: Химия, 2001. – 189 с.

2. Radetic, M.M. Recycled wool-based nonwoven material as an oil sorbent / M.M. Radetic [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2003. – Vol. 37, No 5. – P. 1008–1012. DOI: 10.1021/es0201303.
3. Чикина, Н.С. Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов с использованием сорбента на основе пенополиуретана и отходов зерновых культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / Н.С. Чикина. – Казань, 2010. – 20 с.
4. Собгайда, Н.А. Новые углеродные сорбенты для очистки воды от нефтепродуктов / Н.А. Собгайда, А.И. Финаенов // *Экология и промышленность России*. – 2005. – № 12. – С. 8–10.
5. Сироткина, Е.Е. Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов / Е.Е. Сироткина, Л.Ю. Новоселова // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2005. – № 3. – С. 359–377.
6. Goldade, V.A. Fibrous sorbents for gathering of oil and petroleum products / V.A. Goldade, V.I. Zhukolov, S.V. Zotov // *International Scientific Journal Theoretical & Applied Science*. – 2018. – No. 6 (62). – P. 139–149. DOI: 10.15863/TAS.2018.06.62.26.
7. Гольдаде, В.А. Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В.А. Гольдаде [и др.]. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2000. – 260 с.
8. Pinchuk, L.S. Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials / L.S. Pinchuk, V.A. Goldade, A.V. Makarevich, V.N. Kestelman. – Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg-New York, 2002. – 224 p.
9. Луцейкин, Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г.А. Луцейкин. – М.: Химия, 1988. – 160 с.
10. Фонарева, К.А. Сорбция нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном и его регенерация центробежным способом: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / К.А. Фонарева. – Ижевск, 2017. – 158 с.
11. Goldade, V.A. On the mechanism of charge storage in melt-blown fibrous polymer materials / V.A. Goldade, L.S. Pinchuk, S.V. Zotov, A.G. Kravtsov, A.A. Rychkov // *Proceedings of the 3-rd International Conference on advances in processing, testing and application of dielectric materials (APTADM-2007)*, Wroclaw, Poland, 2007. – P. 185–190.
12. Pinchuk, L.S. Spontaneous polarization of polymer blends / L.S. Pinchuk, V.A. Goldade, A.G. Kravtsov, S.V. Zotov, B. Jurkowski, K. Kelar // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, Iss. 17. – P. 5031–5037. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00375-6.
13. Кравцов, А.Г. Электрические и магнитные поля в полимерных волокнистых элементах для тонкой очистки многофазных сред: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 01.04.07 / А.Г. Кравцов. – Гомель, 2007. – 45 с.
14. Петрянов, И.В. Волокнистые фильтрующие материалы ФП / И.В. Петрянов, В.И. Козлов, П.И. Басманов. – М.: Знание, 1963. – 65 с.
15. Кравцов, А.Г. Полимерные электретные фильтроматериалы для защиты органов дыхания / А.Г. Кравцов, В.А. Гольдаде, С.В. Зотов: под ред. Л.С. Пинчука. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2003. – 204 с.

Сорбция и удерживающая способность модифицированных волокнисто-пористых материалов по отношению к нефти и нефтепродуктам

Sorption and retention capacity of modified fibrous-porous materials in relation to oil and petroleum products

Жукалов Владимир Иванович

Гомельский филиал государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра оперативно-тактической деятельности и техники, старший преподаватель

Адрес: пр-т Речицкий, 35А,
246023, г. Гомель, Беларусь
e-mail: jukalov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9877-7322

Vladimir I. Zhukalov

Gomel Branch of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Operational-Tactical Activity and Technical Equipment, Senior Lecturer

Address: av. Rechitskiy, 35A,
246023, Gomel, Belarus
e-mail: jukalov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9877-7322

Гольдаде Виктор Антонович

доктор технических наук, профессор

Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», кафедра радиофизики и электроники, профессор

Адрес: ул. Советская, 104,
246019, г. Гомель, Беларусь
e-mail: victor.goldade@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7964-8034

Victor A. Goldade

Grand PhD in Technical Sciences, Professor Educational Institution «Francisk Skorina Gomel State University», Chair of Radiophysics and Electronics, Professor

Address: Sovetskaya str., 104,
246019, Gomel, Belarus
e-mail: victor.goldade@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7964-8034

Зотов Сергей Валентинович

кандидат технических наук

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», отдел № 1 «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», ведущий научный сотрудник

Адрес: ул. Кирова, 32а,
246050, г. Гомель, Беларусь
e-mail: zotov-1969@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4480-6503

Sergey V. Zotov

PhD in Technical Sciences

State Scientific Institution «V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Belarus academy of Sciences», Department 1 «Composite Materials and Recycling of Polymers», Leading Researcher

Address: Kirova str., 32a,
246050, Gomel, Belarus
e-mail: zotov-1969@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4480-6503

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.321>

SORPTION AND RETENTION CAPACITY OF MODIFIED FIBROUS-POROUS MATERIALS IN RELATION TO OIL AND PETROLEUM PRODUCTS

Zhukalov V.I., Goldade V.A., Zotov S.V.

Purpose. Investigation of the effect of electric polarization of polymeric fibrous materials on the sorption of oil and petroleum products.

Methods. Melt blowing of Borealis brand polypropylene. Polarization of samples in a corona discharge field of positive and negative polarity with a strength of 25 kV/cm. Sample processing in low-temperature oxygen plasma of a glow discharge with a frequency of 35 kHz. Weighting method for determining sorption characteristics. Scanning electron microscopy method. Electret thermal analysis method.

Findings. The dependence of sorption parameters of materials on the type of physical modification – corona discharge of different polarity and low-temperature plasma of a glow discharge – has been established. It is shown that the modification of fibrous-porous materials in a corona discharge field to impart electret properties to them somewhat reduces the sorption characteristics of these materials in relation to oil. In the manufacture of sorption materials for the collection of crude oil, the original unmodified fibrous-porous material should be used. It has been experimentally established that in the manufacture of sorption materials for the collection of light oil fractions, the preferred method is the modification of fibers in a corona discharge field of negative polarity. Electrization has a significant effect on the processes of sorption by fibers of its lipophilic components. A physical model of the sorption of petroleum products by electret samples of polymeric fibrous-porous materials is proposed.

Application field of research. Fibrous-porous polymeric materials subjected to physical modification with the formation of an electret state can be used for: sorption of some oil fractions, filtration of liquids from contaminants of a dielectric nature, purification of air from ionized dust containing radioactive particles, targeted separation of biological fluids containing dielectric and (or) electret components.

Keywords: sorption, oil, diesel fuel, corona discharge, polarization, electret state, physical model.

(The date of submitting: April 20, 2021)

REFERENCES

1. Samoilov N.A., Khlestkin R.V., Shemetov A.V. *Sorbtsionnyy metod likvidatsii avariynykh razlivov nefi i nefteproduktov* [Sorption method for liquidation of emergency oil and petroleum products spills]. Moscow: Khimiya, 2001. 189 p. (rus)
2. Radetić M.M., Jocić D.M., Jovančić P.M., Petrović Z.L., Thomas H.F. Recycled wool-based nonwoven material as an oil sorbent. *Environmental Science & Technology*, 2003. Vol. 37, No 5. – P. 1008–1012. DOI: 10.1021/es0201303.
3. Chikina N.S. *Likvidatsiya rozlivov nefi i nefteproduktov s ispol'zovaniem sorbenta na osnove penopolimernoy i otkhodov zernovykh kul'tur* [Liquidation of spills of oil and oil products with the use of a sorbent based on polyurethane foam and grain crop waste]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 03.00.16. Kazan, 2010. 20 p. (rus)
4. Sobgayda N.A., Finaenov A.I. Novye uglerodnye sorbenty dlya ochistki vody ot nefteproduktov [New carbon sorbents for water purification from oil products]. *Ecology and Industry of Russia*, 2005. No. 12. Pp. 8–10. (rus)
5. Sirotkina E.E., Novoselova L.Yu. Materials for adsorption purification of water from petroleum and oil products. *Chemistry for Sustainable Development*, 2005. No. 3, Pp. 359–375. Url: https://sibran.ru/en/journals/issue.php?ID=119852&ARTICLE_ID=125452.
6. Goldade V.A., Zhukalov V.I., Zotov S.V. Fibrous sorbents for gathering of oil and petroleum products. *International Scientific Journal Theoretical & Applied Science*, 2018. No. 06 (62). Pp. 139–149. DOI: 10.15863/TAS.2018.06.62.26.
7. Goldade V.A., Makarevich A.V., Pinchuk L.S., Sikanovich A.V., Chernorubashkin A.I. *Polimernye voloknistye melt-blown materialy* [Polymer fibrous melt-blown materials]. Gomel: Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 2000. 260 p. (rus)
8. Pinchuk L.S., Goldade V.A., Makarevich A.V., Kestelman V.N. *Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials*. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg-New York, 2002. 224 p. Url: <https://www.springer.com/gp/book/9783642627859>.

9. Lushcheykin G.A. *Metody issledovaniya elektricheskikh svoystv polimerov* [Methods for studying the electrical properties of polymers]. Moscow: Khimiya, 1988. 160 p. (rus)
10. Fonareva K.A. *Sorbtsiya nefteproduktov polietilentereftalatnym voloknom i ego regeneratsiya tsen-trobezhnym sposobom* [Sorption of petroleum products by polyethylene terephthalate fiber and its re-generation by centrifugal method]: PhD tech. sci. diss.: 05.17.08. Izhevsk, 2017. 158 p. (rus)
11. Goldade V.A., Pinchuk L.S., Zotov S.V., Kravtsov A.G., Rychkov A.A. On the mechanism of charge storage in melt-blown fibrous polymer materials. *Proceedings of the 3-rd International Conference on advances in processing, testing and application of dielectric materials (APTADM-2007)*. Wroclaw, Poland, 2007. Pp. 185–190.
12. Pinchuk L.S., Goldade V.A., Kravtsov A.G., Zotov S.V., Jurkowski B., Kelar K. Spontaneous polarization of polymer blends. *Polymer*, 2003. Vol. 44, Iss. 17. Pp. 5031–5037. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00375-6.
13. Kravtsov, A.G. *Elektricheskie i magnitnye polya v polimernykh voloknistykh elementakh dlya tonkoy ochildki mnogofaznykh sred* [Electric and magnetic fields in polymeric fibrous elements for fine cleaning of multiphase media]: Grand PhD tech. sci. diss. Synopsis: 01.04.07. Gomel, 2007. 45 p. (rus)
14. Petryanov I.V., Kozlov V.I., Basmanov P.I. *Voloknistye fil'truyushchie materialy FP* [Fiber filter media FP]. Moscow: Znanie, 1963. 65 p. (rus)
15. Kravtsov A.G., Goldade V.A., Zotov S.V. *Polimernye elektretnye fil'tromaterialy dlya zashchity organov dykhaniya* [Polymer electret filter materials for respiratory protection]. Ed. L.S. Pinchuk. Gomel: Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 2003. 204 p. (rus)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.335>

УДК 69.059.14

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С РАЗРУШЕНИЕМ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ковтун В.А., Пасовец В.Н., Танырверди А.М., Антоненко М.А.

Цель. Провести анализ разработок по обеспечению безопасной эксплуатации объектов (зданий и сооружений, мостов и тоннелей, шахт и других строительных конструкций) за счет организации дистанционного мониторинга их напряженно-деформированного состояния путем применения систем тензометрических, потенциометрических и пьезоэлектрических датчиков механической деформации и усилий.

Методы. Теоретический анализ.

Результаты. Представлен обзор научной информации, посвященной исследованиям в области разработки систем непрерывного мониторинга технического состояния строительных конструкций. Показана необходимость применения данных систем на объектах, представляющих потенциальную опасность для персонала, населения и окружающей среды.

Область применения исследований. Представленные результаты могут быть использованы в сфере обеспечения безопасности зданий и сооружений.

Ключевые слова: системы непрерывного мониторинга, техническое состояние, строительные конструкции, технология контроля.

(Поступила в редакцию 6 апреля 2021 г.)

Введение

С каждым годом затраты, связанные с обслуживанием сложных строительных конструкций военного и гражданского назначения, неуклонно возрастают, причем для проведения регламентных ремонтных работ требуются все большие объемы финансирования. Данная тенденция наблюдается как за счет ежегодного увеличения количества обслуживаемых объектов, так и за счет естественного старения зданий и сооружений, а также снижения коэффициента запаса прочности, что связано со снижением материалоемкости конструкций. Временное прекращение эксплуатации таких объектов, как горнодобывающие шахты, морские буровые установки, нефтяные и газовые перекачивающие станции, аэропорты, пешеходные, автомобильные и железнодорожные мосты, а также других сооружений на профилактические и регламентные ремонтные работы обходится чрезвычайно дорого. Бездействие в таких ситуациях неизбежно приведет к выходу из строя несущих конструкций данных объектов и, как следствие, к техногенным катастрофам, ликвидация которых в денежном эквиваленте соизмерима с бюджетом отрасли. Вполне очевидно, что в этом случае необходима разработка новых подходов для непрерывного мониторинга функционирования сложных строительных конструкций в реальном масштабе времени, обладающих предсказательной возможностью ее безопасного срока эксплуатации [1].

Необходимость создания систем мониторинга строительных конструкций также вытекает из того факта, что ряд объектов инфраструктуры как гражданского, так и военного назначения находятся в эксплуатации уже многие годы. Как ожидается, многие объекты, созданные 20–30 лет тому назад, будут эксплуатироваться в ближайшем будущем. Снижение вероятности техногенных катастроф при дальнейшей эксплуатации, например пешеходных, автомобильных, железнодорожных мостов и других промышленных объектов, возможно только при наличии систем контроля, адекватно отображающих как целостность конструкций, так безопасность эксплуатации. Необходимо отметить, что мониторинг позволит устранить дорогой, а также иногда непомерно частый и необоснованный ремонт. Кроме того, с вводом в эксплуатацию новых военных и промышленных объектов, плавучих буровых установок, уникальных высотных зданий и целого ряда других конструкций, требующих

применения новых материалов и новых конструкторских решений, потребность мониторинга их технического состояния и прогнозирования срока службы становится чрезвычайно важной задачей [2].

В США ведущими научно-исследовательскими центрами, такими как NASA Langley Research Center, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Los Alamos National Laboratory, Naval Research Laboratory, с 2000 г. интенсивно ведутся работы по программе SHM (Structural Health Monitoring), цель которой заключается в разработке расчетных и экспериментальных методов отслеживания технического состояния конструкций в целом по их собственным деформационным и акустическим колебаниям в условиях старения и экстремальных воздействий, а также систем диагностики на их основе. Необходимо отметить, что в статистической постановке концепция мониторинга ресурса и состояния конструкций предполагает решение следующих задач: оперативная оценка, сбор и селекция данных, выделение параметров и обработка данных, разработка статистических моделей и критериев для выявления особенностей снижения ресурса. В результате выполнения этих исследований и разработок был сделан вывод, что создание систем мониторинга и диагностики сдерживается в первую очередь отсутствием сверхширокополосных сенсоров динамической деформации генераторного типа, чувствительность которых на порядок превосходит чувствительность современных аналогов на основе полупроводниковых материалов.

Все вышесказанное определяет актуальность решения проблемы создания систем непрерывного мониторинга функционирования сложных конструкций в реальном масштабе времени на основе применения новых датчиков динамической деформации и новых технологий анализа состояния объекта.

Цель работы: провести анализ разработок по обеспечению безопасной эксплуатации объектов (зданий и сооружений, мостов и тоннелей, шахт и других строительных конструкций) за счет организации дистанционного мониторинга их напряженно-деформированного состояния путем применения систем тензометрических, потенциометрических и пьезоэлектрических датчиков механической деформации и усилий.

Основная часть

Современные системы контроля технического состояния

Широко используемые в настоящее время системы неразрушающего контроля (СНК) – ультразвуковая дефектоскопия, магнитная рентгенография, акустическая эмиссия, метод проникающих жидкостей и т.д., хорошо зарекомендовали себя на стадии производства отдельных компонентов сложных систем [3], но оказались малопригодными для мониторинга сложных и ответственных конструкций во время всего срока эксплуатации. Поэтому неудивительно, что системы непрерывного мониторинга (СНМ) появились как естественное развитие традиционных технологий СНК, чтобы удовлетворить новым техническим условиям и требованиям. Более того, в связи с бурным развитием вычислительной техники, электроники, устройств сбора данных, систем передачи информации с использованием радио- и оптоволоконной связи задача разработки систем непрерывного мониторинга стала реально выполнимой. Существенное отличие систем непрерывного мониторинга от традиционных концепций неразрушающего контроля состоит в том, что окончательная цель СНМ заключается в установлении истинного срока службы конструкций в автоматическом режиме с минимальными трудозатратами [4].

Технология контроля СНМ включает четыре основных уровня:

- 1) определение существования повреждения в конструкции;
- 2) определение типа повреждения и его локализации;
- 3) классификация серьезности повреждения;
- 4) прогноз остающегося срока службы, основанный на оценке степени влияния эксплуатационных условий на повреждение конструкции.

Основные задачи, решаемые с помощью СНМ:

- 1) сбор первичной информации от датчиков на объекте и передача информации в центр мониторинга технического состояния;
- 2) визуализация информации с объекта;
- 3) анализ информации, полученной от датчиков, с проведением оценки состояния объекта, выявления критичности состояния объекта и формирование отчета о критическом состоянии объекта;
- 4) визуализация отчета о критическом состоянии объекта с одновременным определением адреса объекта и оповещением органов аварийно-восстановительной службы, органов и подразделений МЧС, администрации населенного пункта.

Краткое сравнение традиционных методов СНК и новой технологии СНМ приведено в таблице, где показаны очевидные различия между этими двумя подходами.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика технологий СНК и СНМ

Показатели	Система неразрушающего контроля (СНК)	Система непрерывного мониторинга (СНМ)
Цели	Обнаружение локального структурного повреждения	Непрерывная количественная оценка степени целостности конструкции, включая обнаружение повреждения и его влияния на функционирование конструкции в целом
Временной интервал эксплуатации	Не используется история развития дефекта	Эволюция развития дефектов является основным параметром непрерывного контроля
Обслуживание	На основе заранее составленного списка профилактического осмотра	На основе количественных данных, поступающих в режиме онлайн
Типичные методы	Визуальный осмотр, применение проникающей жидкости, ультразвуковая дефектоскопия, магнитная рентгенография, акустическая эмиссия отдельных элементов системы, замена частей системы по регламентному списку	На основе обнаружения и эволюции развития нелинейных эффектов в системе в частотном представлении
Физика	Капиллярное действие, электрические и магнитные свойства материалов, распространение волн, рентгеновское излучение	Динамические изменения физических свойств в результате появления нарушений целостности конструкции
Формат повреждения	Трещины (внутренние и поверхностные), пустоты, поверхностная коррозия и т.д.	Любой вид структурного повреждения
Аппаратура	Хорошо инструментированный	Аппаратурное обеспечение только разрабатывается
Датчик	Строго определенный тип датчика, соответствующий используемому методу контроля	Интеграция массива однотипных датчиков в систему элементов
Возможности	Прямой доступ с целью определения местоположения повреждения	Прямой доступ не является необходимым
Стоимость обслуживания	Высокая	Низкая
Операционное руководство	Отсутствие информации в интервале между проведением регламентных осмотров	Непрерывный автоматический мониторинг, обеспечивающий при возникновении дефекта и установлении степени повреждения автоматическое подключение экспертной системы, которая после анализа назначает время проведения регламентных работ

Впервые система непрерывного мониторинга была применена для обнаружения возможного появления трещин в фундаменте крупного радара [5]. В работе [6] впервые было

предложено использовать для контроля технического состояния мостов распределенную диагностическую систему СНМ.

В Лос-Аламосской Национальной лаборатории [7] проведены исследования по применению СНМ с использованием методики распознавания образов на основе данных виброметрии с целью обнаружения повреждений в гражданских строениях (мосты, крупные здания, хранилища нефтепродуктов и т.д.). На сегодня наиболее законченные исследования по разработке и использованию СНМ, стимулированные потребностью в диагностике на герметичность авиационных и космических конструкций (шаттлов и ракеты X-33 – носителя многократного использования), проведены в NASA и Lockheed Martin [8].

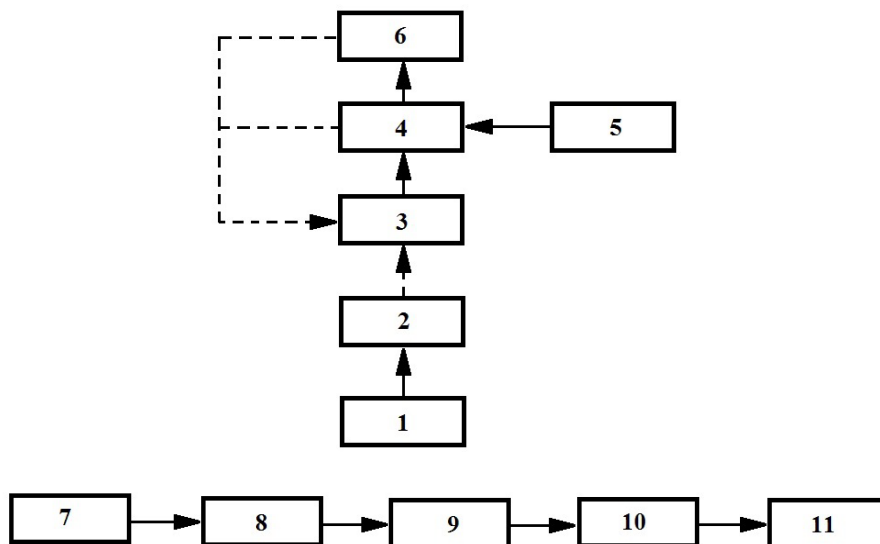
Системы непрерывного мониторинга строительных конструкций в ближайшем будущем непременно войдут в число стандартизованных методик при условии опережающего развития технологий производства чувствительных элементов, специально предназначенных для данных систем, и создания алгоритма обработки информации, поступающей с системы датчиков. С учетом того обстоятельства, что стоимость обслуживания объектов военного и гражданского назначения увеличивается весьма быстро и определяется растущими финансовыми потребностями стареющей инфраструктуры, проведение исследований в области создания СНМ является одним из приоритетных направлений научно-исследовательской деятельности как в Республике Беларусь, так и в Азербайджанской Республике. Например, одной из главных причин высокой стоимости обслуживания мостов является тот факт, что проверку технического состояния конструкций специалисты выполняют вручную, причем с увеличением времени эксплуатации требуется проведение дополнительной инспекции, что опять же увеличивает стоимость обслуживания, которая может уменьшиться только при использовании мониторинга целостности конструкции, проводимого с применением СНМ в режиме онлайн, объективно отображающем состояние конструкции. Замена ежедневных инспекций, проводимых вручную, на автоматический мониторинг позволит существенно уменьшить издержки, связанные с поддержанием жизненного цикла сложных конструкций. Таким образом, как в Республике Беларусь, так и в Азербайджанской Республике существует острая потребность в разработке и применении надежных систем мониторинга состояния строительных конструкций, которые могут автоматически обрабатывать данные, оценивать техническое состояние и сигнализировать о необходимости вмешательства человека.

В настоящее время в Российской Федерации разработаны и запатентованы системы мониторинга технического состояния строительных объектов, которые могут быть использованы при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений¹. Данные системы, по сравнению с существующими аналогами, позволяют устранить проблемы, связанные с недостаточной точностью диагностирования текущего технического состояния строительного объекта, повысить достоверность контроля конструкций, находящихся в аварийном или предаварийном состоянии за счет исключения систематических ошибок измерительных приборов и возможности взаимоувязанного анализа измерений с различных приборов, повысить быстродействие за счет уменьшения массива обрабатываемой информации. При этом принцип действия систем основан на подготовке логической цепочки вывода данных, сформированной с использованием множества правил, основанных на применении булевых операций.

Принцип действия систем заключается в следующем (рис. 1). Из множества строительных конструкций выделяется подмножество, элементы которого подлежат контролю системой мониторинга (множество контролируемых элементов). Для каждого из таких элементов определяют один или несколько параметров, изменения значений которых позволяют судить об изменении деформационного состояния строительного элемента. Данный массив параметров образует множество, каждый из элементов которого может быть получен

¹ Способ мониторинга технического состояния строительных объектов и система мониторинга технического состояния строительных объектов: пат. RU 2672532 / А.М. Шахраманьян, Ю.А. Колотовичев, Д.А. Мозжухин. – Опубл. 11.05.2018.

на основе измерений, проведенных датчиками различной физической природы, что позволяет минимизировать систематическую ошибку измерений. Сплошными линиями на рисунке 1 показаны связи, которые будут присутствовать вне зависимости от выбора контролируемых элементов, измеряемых параметров и вида алгоритмов/обработчиков, пунктиром показаны связи, которые могут образовываться в частных случаях.



1 – множество датчиков; 2 – множество измеряемых величин; 3 – множество обработчиков; 4 – множество контролируемых параметров; 5 – множество отклонений; 6 – множество контролируемых элементов; 7 – блок датчиков; 8 – блок регистрации измерений; 9 – блок расчета контролируемых параметров; 10 – блок аналитической обработки; 11 – блок отображения мониторинговой информации

Рисунок 1. – Схема системы мониторинга технического состояния зданий и сооружений

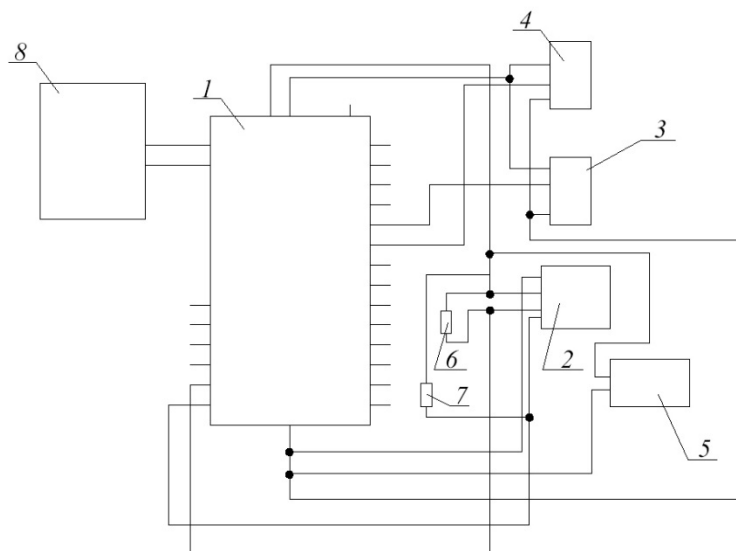
Заключение

Перспективы развития систем непрерывного мониторинга

В различных отраслях промышленности эксплуатируются объекты и используются технологии, представляющие потенциальную опасность для персонала, населения и окружающей среды. В связи с этим возникла необходимость применения систем непрерывного мониторинга в течение всего цикла эксплуатации объектов.

В Республике Беларусь и Азербайджанской Республике, несмотря на значительное число теоретических и экспериментальных работ в области неразрушающего контроля, технической диагностики, дефектоскопии и оценки ресурса прочности распределенных систем вида «конструкция – воздействия», появление законченных теоретических и практических результатов по оценке ресурса прочности конструкции на сегодня не получило повсеместного применения. В настоящее время экспериментальные исследования строительных конструкций посвящены в основном изучению подсистем и элементов. Экспериментальные исследования широкополосных динамических деформаций в области упругости и упруго-пластичности материалов конструкций для их ранней диагностики в первую очередь затруднены отсутствием миниатюрных средств измерения динамической деформации с высокой чувствительностью и широкой полосой спектра измерения.

Следует отметить, что проведены исследования по разработке противопожарных систем непрерывного мониторинга, предназначенных для обнаружения и ликвидации пожара на начальной стадии в автоматическом режиме [9]. При этом за счет точности определения очага пожара обеспечивается использование минимального количества огнетушащих веществ. Конструкция разработанной системы представлена на схеме (рис. 2).



1 – программируемый модуль обработки сигналов датчиков и управления сервоприводами; 2 – пиродатчик; 3 – горизонтальный сервопривод; 4 – вертикальный сервопривод; 5 – целеуказатель пиродатчика; 6, 7 – резисторы; 8 – визуализатор

Рисунок 2. – Схема противопожарной системы непрерывного мониторинга [9]

Мониторинг защищаемого пространства происходит по заранее заданному алгоритму работы программы. На основании результатов мониторинга подается сигнал на включение системы пожаротушения. При этом процесс обхода контролируемых точек проводится два раза для исключения ложного срабатывания устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасовец, В.Н. Пути снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением строительных конструкций / В.Н. Пасовец [и др.] // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 3–7.
2. Пасовец, В.Н. Применение тензометрических датчиков в системах непрерывного мониторинга основных несущих конструкций зданий и сооружений / В.Н. Пасовец, В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 34–38.
3. Пасовец, В.Н. Практическое применение систем непрерывного мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений различного назначения с целью снижения риска возникновения чрезвычайных ситуаций / В.Н. Пасовец, С.Г. Короткевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 42–47.
4. Бирюк, В.А. Неразрушающие методы контроля агрегатов и узлов пожарной аварийно-спасательной техники / В.А. Бирюк, В.Н. Пасовец, М.М. Журов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 387–396. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-4.389.
5. Bridge deck evaluation with ground penetrating radar / D. Huston [et al.] // Proceedings of the International workshop on structural health monitoring, Stanford, 18–20 September 1997. – Stanford: Stanford University. – Pp. 91–102.
6. Vector auto-regressive modal analysis with application to ship structures / C.-S. Li [et al.] // Journal of Sound and Vibration, 1997. – Vol. 167, No. 1. – Pp. 1–15.
7. A Review of Structural Health Monitoring. Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Report. – Los Alamos: LA-47656-MS, 2002. – 320 p.
8. Derriso, M.M. Integrated vehicle health management: the key to future aerospace systems / M.M. Derriso // Proceedings of the 4th International workshop on structural health monitoring, Stanford, 15-17 September 2003. Stanford. – P. 3–11.
9. Пасовец, В.Н. Система точного обнаружения очага возгорания / В.Н. Пасовец, Я.С. Волчек, А.Г. Савчук // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 153–158. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.153.

**Предупреждение чрезвычайных ситуаций, связанных
с разрушением инженерных конструкций**
Prevention of emergencies caused by destruction of engineering structures

Ковтун Вадим Анатольевич

доктор технических наук, профессор

Гомельский филиал государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра оперативно-тактической деятельности и техники, профессор

Адрес: пр-т Речицкий, 35А,
246023, г. Гомель, Беларусь

e-mail: vadimkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9510-132X

Vadim A. Kovtun

Grand PhD in Technical Sciences, Professor

Gomel Branch of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Operational-Tactical Activity and Technical Equipment, Professor

Address: av. Rechitskiy, 35A,
246023, Gomel, Belarus

e-mail: vadimkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9510-132X

Пасовец Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной аварийно-спасательной техники, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: pasovets_v@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9451-9513

Vladimir N. Pasovets

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Rescue Equipment, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: pasovets_v@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9451-9513

Танырверди Али Магамед оглы

Министерство по чрезвычайным ситуациям Азербайджанской Республики, Государственная служба пожарного надзора, инспектор-инженер

Адрес: ул. М. Мушвига, 501,
AZ1073, г. Баку, Азербайджан

e-mail: ali_can92@mail.ru

Ali M. Tanirverdi

Ministry for Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan, State Fire Supervision Service, Inspector-engineer

Address: M. Mushviq str., 501,
AZ1073, Baku, Azerbaijan

e-mail: ali_can92@mail.ru

Антоненко Максим Алексеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», магистрант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: keksss2007@mail.ru

Maksim A. Antonenko

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Graduate Student

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: keksss2007@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.335>

PREVENTION OF EMERGENCIES CAUSED BY DESTRUCTION OF ENGINEERING STRUCTURES

Kovtun V.A., Pasovets V.N., Tanirverdi A.M., Antonenko M.M.

Purpose. To analyze developments to ensure the safe operation of objects (buildings and structures, bridges and tunnels, mines and other building structures) by organizing remote monitoring of their stress-strain state by using systems of strain-gauge, potentiometric and piezoelectric sensors of mechanical deformation and forces.

Methods. Theoretical analysis.

Findings. An overview of scientific information devoted to research in the development of systems for continuous monitoring of the technical condition of building structures is presented. The necessity of using these systems at facilities that pose a potential danger to personnel, population and the environment is shown.

Application field of research. The results can be used in the field of ensuring the safety of buildings and structures.

Keywords: continuous monitoring systems, technical condition, building structures, control technology.

(The date of submitting: April 6, 2021)

REFERENCES

1. Pasovets V.N., Kovtun V.A., Pleskachevskiy Yu.M., Ukrainets A.A., Marchenko S.A. Puti snizheniya riskov vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy, svyazannykh s razrusheniem stroitel'nykh konstruksiy [Ways to reduce the risks of emergencies associated with the destruction of building structures]. *Chrezvychaynie situacii: obrazovanie i nauka*, 2011. Vol. 6, No. 2. Pp. 3–7. (rus)
2. Pasovets V.N., Kovtun V.A., Korotkevich S.G. Primenenie tenzometrichekikh datchikov v sistemakh nepreryvnogo monitoringa osnovnykh nesushchikh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy [Application of strain gauge sensors in continuous monitoring systems of the main bearing structures of buildings and structures]. *Chrezvychaynie situacii: obrazovanie i nauka*, 2012. Vol. 7, No. 1. Pp. 34–38. (rus)
3. Pasovets V.N., Korotkevich S.G. Prakticheskoe primeneniye sistem nepreryvnogo monitoringa nesushchikh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy razlichnogo naznacheniya s tsel'yu snizheniya riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy [Practical application of systems for continuous monitoring of load-bearing structures of buildings and structures for various purposes in order to reduce the risk of emergencies]. *Chrezvychaynie situacii: obrazovanie i nauka*, 2013. Vol. 8, No. 1. Pp. 42–47. (rus)
4. Biryuk V.A., Pasovets V.N., Zhurov M.M. Nerazrushayushchie metody kontrolya agregatov i uzlov pozharnoy avariyno-spatatel'noy tekhniki [Non-destructive testing methods of assemblies and units in fire emergency technique]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 4. Pp. 387–396. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-4.389.
5. Huston D. [et al.]. Bridge deck evaluation with ground penetrating radar / *Proc. International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, 18-20 September, 1997*. Stanford: Stanford University. Pp. 91–102.
6. Li C.-S., Ko W.J., Lin H.T., Shyu R.J. Vector auto-regressive modal analysis with application to ship structures. *Journal of Sound and Vibration*, 1997. Vol. 167, No. 1. Pp. 1–15.
7. *A review of structural health monitoring. Literature: 1996-2001*. Los Alamos National Laboratory Report. Los Alamos: LA-47656-MS, 2002. 320 p.
8. Derriso M.M. Integrated vehicle health management: the key to future aerospace systems. *Proc. 4th International workshop on structural health monitoring, Stanford, 15–17 September 2003*. Stanford. Pp. 3–11.
9. Pasovets V., Volchek Ja., Savchuk A. Sistema tochnogo obnaruzheniya ochaga vozgoraniya [System of precise detection of the fire seat]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 153–158. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.153.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.343>

УДК 627.8.058.22.:711.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Кобяк В.В., Миканович Д.С., Журов М.М.

Цель. Провести анализ методов по определению риска возникновения гидродинамических аварий на гидротехнических сооружениях различного типа (водохранилищ, шламоохранилищ, водоемов технического назначения и др.). Обосновать основные направления по улучшению системы обеспечения безопасности и надежности гидротехнических сооружений.

Методы. Метод теоретического анализа литературных источников применен при проведении оценки нормативно-правовой базы стран мира по оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях различного типа. Выполнена обработка полученных результатов с использованием метода оценивания и теоретического обобщения полученных данных.

Результаты. Установлено, что существующие методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях различного типа (водохранилища, шламоохранилища, водоемы технического назначения и др.) сложны, громоздки и трудоемки в использовании из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. В связи с этим требуется разработка методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях с учетом их конструктивных особенностей.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы при комплексной оценке состояния гидротехнических сооружений Министерством природных ресурсов, а также Министерством по чрезвычайным ситуациям при разработке средне- и долгосрочных прогнозов возникновения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: безопасность гидротехнических сооружений, риск возникновения чрезвычайных ситуаций, дамба, плотина, мониторинг, критерии безопасности, гидродинамическая авария.

(Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.)

Введение

Актуальность исследований по вопросам оценки рисков аварий на гидротехнических сооружениях (ГТС) обусловлена произошедшими за последние 20 лет тяжелыми авариями на крупных гидроэлектростанциях (ГЭС) и плотинах Российской Федерации (Саяно-Шушенская ГЭС, 2009), США (плотина Оровилл, 2018), Бразилии (дамба Брумадиньо, 2019), Колумбии (ГЭС Итуанго, 2018) и других странах мира [1] (табл. 1).

Причины аварий на ГТС многогранны:

1) человеческий фактор (ошибки при проектировании и строительстве, авиаудары и т.д.);

2) природные условия (разнообразие климатических, топографических, геологических, гидрогеологических факторов и условий в створах плотин, а также их неблагоприятное сочетание);

3) катаклизмы (сверхрасчетные (катастрофические) паводки, горные обвалы), что создает сложности при прогнозировании гидродинамических аварий, оценке условий жизнедеятельности населения и функционирования объектов экономики при их возникновении.

Несмотря на то что ГТС, построенные в странах с различными природными условиями, зарекомендовали себя устойчивыми и долговечными сооружениями, мировая статистика и события последних лет свидетельствуют о том, что возможность их повреждений и разрушений исключать нельзя. Вероятность возникновения гидродинамических аварий на

ГТС порядка 10^{-3} – 10^{-5} 1/год допускают многие современные нормы проектирования различных стран^{1, 2}.

Таблица 1. – Наиболее крупные гидродинамические аварии в мире [1]

Название плотины	Год разрушения, страна	Причины разрушения	Количество пострадавших, чел.	Количество погибших, чел.	Последствия
Байлес	1902, США	ошибки при строительстве	1500	100	смыто 5 деревень
Сен-Френис	1928, США	ошибки в проекте	–	421	ущерб 150 млн долларов США
Речная дамба (р. Янцзы)	1931, Китай	катастрофический паводок	40 млн	140 тыс.	затоплено 55 000 км ²
Зербино	1935, Италия	катастрофический паводок	–	130	ущерб 12 млн долларов США
ДнепроГЭС	1942, Украина	разрушения после взрыва ГЭС	–	несколько тыс.	разрушена плотина
Мольпасье	1959, Франция	катастрофический паводок	3100	500	ущерб 68 млн долларов США
Орос	1960, Бразилия	катастрофический паводок	2000	150	разрушено 50 населенных пунктов
Болдуни Хилз	1963, США	катастрофический паводок	800	300	ущерб 11 млн долларов США
Вайонт	1963, Италия	горный обвал	–	более 4000	полное разрушение ГТС
Байньцяо	1975, Китай	катастрофический паводок	11 млн	171 тыс.	разрушено около 6 млн домов
Гондо	2000, Швейцария	обильный паводок	25	–	плотина разрушена
«Большая вода» (р. Эльба)	2002, Германия	катастрофический паводок	–	–	затоплено 19 департаментов

Основная часть

Вероятность аварий на ГТС имеет тенденцию роста, особенно после их эксплуатации более 40–50 лет³. Так, Комитетом по авариям и разрушениям Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) были приведены данные более чем за 150-летний период по авариям на ГТС в 43 странах мира. Исходя из анализа данных⁴, в мире по разным причинам на плотинах происходит свыше 300 аварий, нередко с большим материальным ущербом и человеческими жертвами.

Наибольшее число аварий отмечено на грунтовых плотинах, при этом повреждения основания составили 25 %, тела плотины – 47 %, водосбросов – 23 % и прочие повреждения – 5 %⁵. Аварии бетонных плотин происходили из-за повреждения основания, а на каменных – из-за дефектов строительных материалов. В зависимости от типа плотин в таблице 2 указана доля распределения аварий на ГТС [2].

¹ Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов / Открытое акционерное общество ордена Трудового Красного Знамени комплексный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии. – Москва, 2002. – 12 с.

² ICOLD (International Commission on Large Dams), Bulletin 99, Dam Failures, Statistical Analysis, Commission Internationale des Grands Barrages. – 1995. Paris. – 73 p.

³ См. сноску 2.

⁴ См. сноску 2.

⁵ Методика оперативного прогнозирования инженерных последствий прорыва гидроузлов / С.М. Нигметов [и др.] // Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки населения и специалистов к действиям в чрезвычайных условиях: тез. Междунар. симпозиума, Москва, 4 июня 1999 г. – С. 441–442.

Таблица 2. – Доля аварий на ГТС в зависимости от их типа

Тип плотины	Доля, %
Земляная	53
Бетонная гравитационная	23
Плотины других типов	17
Защитная дамба из местных материалов	4
Арочная железобетонная	3

Из зарегистрированных аварий 62 % происходило до начала эксплуатации водохранилищ, а также в период ввода их в эксплуатацию. Основные причины аварий:

- 1) перелив паводковых вод через недостроенные сооружения;
- 2) заполнение водохранилища в период строительства;
- 3) проявление неосторожности при нагружении плотин [2].

В таблице 3 представлено процентное соотношение аварий в зависимости от причины их возникновения [1].

Таблица 3. – Распределение причин аварий на ГТС

Причина разрушения	Доля, %
Недостаточная пропускная способность	35
Разрушение основания	25
Разрушение конструкций	12
Разрушение и оползание откосов	11
Высокое граничное давление (в намытых плотинах)	5
Военные действия	3
Неравномерное оседание	3
Неправильная эксплуатация	3
Дефекты материалов	2
Землетрясение	1

В настоящее время в мире не существует утвержденных нормативно-технических документов по оценке риска аварий ГТС, однако имеется ряд ведомственных методик, позволяющих оценить риск аварии на этих сооружениях.

СИГБ рекомендует оценивать риск в виде математического ожидания последствий наступления опасного события (как произведение вероятности этого события на математическое ожидание величины его последствий) или в виде сценария вероятностей событий и их последствий. Таким образом, риск зависит от вероятности аварии плотины и ее последствий и представляет собой большую величину, даже если эта вероятность очень мала⁶.

В настоящее время в странах, где имеются ГТС, в целях контроля за их безопасностью применяются три уровня оценок приемлемости риска⁷:

- 1) в первой группе стран (Канада, Норвегия, Нидерланды и др.) осуществляется регламентный анализ риска аварий и разработаны критерии его проведения;
- 2) во второй группе (Швеция, Испания и др.) анализ риска рекомендован, но применяется только в критических ситуациях;
- 3) в третьей группе стран (Российская Федерация, Франция, США, Англия и др.) анализ риска используют только в промышленности, а применение его в условиях ГТС проводится в исключительных случаях.

Начиная с 2000 г. Российская Федерация начала активно изучать проблемы анализа и оценки риска аварий на ГТС. Так, в 2000 г. акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (ОАО «НИИ ВОДГЕО») разработало Методические указания по проведению анализа риска аварий ГТС, где были определены методические принципы, термины и определения анализа риска, а также методы

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 2.

анализа риска аварий ГТС разных типов и классов. В 2005 г. данное издание было переработано⁸. Далее в 2001 и 2004 гг. ОАО «Научно-испытательный институт эргатических систем» (ФГУП РосНИИВХ) разработало Методику определения критериев безопасности гидротехнических сооружений и Методику оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений^{9, 10}, которые определяют основные понятия, регламентируют процедуру и последовательность действий при выборе контролируемых и диагностических показателей состояния ГТС в составе проекта, а также на стадии их эксплуатации, помогают осуществлять определение критериальных значений показателей на уровне качественного и количественного анализа факторов, оказывающих значительное влияние на безопасность сооружения (детерминированный подход), разработку прогнозных математических моделей без оценки риска.

В своде правил¹¹ приводятся допустимые значения вероятностей возникновения аварий на напорных ГТС I–IV классов (табл. 4).

Таблица 4. – Допускаемые значения вероятностей возникновения аварий на напорных ГТС, 1/год

№ п/п	Класс сооружения	Вероятность возникновения аварий
1	I	5×10^{-5}
2	II	5×10^{-4}
3	III	$2,5 \times 10^{-3}$
4	IV	5×10^{-3}

В работе [3] приведены данные ранжирования гидротехнических сооружений по степени опасности (табл. 5).

Таблица 5. – Расчетные коэффициенты рисков аварий для различных уровней безопасности ГТС

№ п/п	Уровень безопасности	Риск аварии			
		I класс	II класс	III класс	IV класс
1	Нормальный	5×10^{-5}	5×10^{-4}	4×10^{-3}	$5-6 \times 10^{-3}$
2	Пониженный	$6,4 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$4,87 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
3	Неудовлетворительный	$1,18 \times 10^{-3}$	$3,16 \times 10^{-3}$	$7,09 \times 10^{-3}$	$2,75 \times 10^{-2}$
4	Опасный	$3,4 \times 10^{-3}$	$9,2 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-2}$	8×10^{-2}

Основной проблемой при оценке риска аварий на ГТС является правильность определения сценария развития аварийной ситуации. Следует учитывать и тот факт, что сам риск носит условный характер и определяется объективными и субъективными факторами. Правильность оценки риска аварии зависит не только от квалификации экспертов, а также от их умения работать с данными факторами. Оценка риска основывается на результатах контроля и анализа факторов безопасности (количественные и качественные характеристики состояния сооружения, природных воздействий и ожидаемого ущерба от аварии или разрушения ГТС), наиболее существенных для данного сооружения, и условий его эксплуатации.

Задача качественного анализа направлена на идентификацию возможных видов рисков, стоимостной оценки всех возможных последствий, выработке предложений или мероприятий по минимизации и компенсации данных последствий. Их результаты служат основой и фундаментом для осуществления количественного анализа.

Количественный анализ заключается в возможности численно определить экономический ущерб отдельных видов риска или всего риска в целом. По сути, это факторы или их совокупность (показатели), в зависимости от величин, на основании которых строится градация по степеням опасности, уязвимости, риска.

⁸ Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений. – 2-е изд. / Под ред. Е.Н. Беллендира, Н.Я. Никитиной. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005. – 115 с.

⁹ Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. – М.: 2001. – 24 с.

¹⁰ Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений. Стандарт предприятия / Под ред. И.Н. Иващенко. – М.: ОАО «НИИЭС», 2004. – 24 с.

¹¹ См. сноску 10.

В работе [4] было проведено сравнение возможных рисков по трем методикам [2–4]. В ходе анализа было установлено, что по [2] оценка риска проводилась методом экспертных оценок и сводилась к получению нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу.

Опасность аварии ГТС определялась по следующим показателям:

- 1) возможность превышения природных нагрузок и воздействий на сооружения;
- 2) соответствие проектных решений современным требованиям, изложенным в нормативно-технической документации;
- 3) соответствие проекту конструкции сооружения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания;
- 4) возможные последствия и ущерб при аварии ГТС.

В таблице 6 приведены данные результатов расчета риска возникновения аварий грунтовых плотин на основании экспертных оценок вследствие потери статической устойчивости (уязвимости) [5]. Степень уязвимости ГТС определялась их восприимчивостью к воздействию следующих факторов опасности:

- 1) состояние сооружения (инструментальные наблюдения и визуальный контроль);
- 2) метеорологические условия в зоне размещения ГТС (по данным мониторинга);
- 3) организация эксплуатации ГТС (соблюдение требований безопасной эксплуатации);
- 4) готовность объекта к ликвидации чрезвычайной ситуации.

Таблица 6. – Результаты расчета риска возникновения аварий грунтовых плотин вследствие потери статической устойчивости различными методами

Номер плотины	Риск аварии P_1 по методике R. Fell, 1/год	Риск аварии P_2 по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО», 1/год	Риск аварии P_3 по методике ФГУП РосНИИВХ, 1/год	Риск аварии P_4 по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО», 1/год (с учетом состояния водосбросного сооружения)
1	$4,7 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$	17×10^{-2}
2	$2,7 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-2}$
3	$2,9 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$9,3 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-2}$
4	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$7,7 \times 10^{-3}$

Оценка вероятности отказа грунтовых плотин по методу R. Fell [5] осуществляется по среднегодовым отказам грунтовых плотин и дамб при нормальных условиях их эксплуатации по следующим причинам:

- 1) потеря устойчивости откосов;
- 2) нарушение фильтрационной прочности тела плотины;
- 3) нарушение фильтрационной прочности основания плотины.

При этом данная оценка по указанным причинам включала следующие этапы:

- 1) определение категории грунтовой плотины или дамбы;
- 2) выбор коэффициентов, влияющих на вероятность отказов грунтовой плотины по внутренним причинам;
- 3) вычисление коэффициентов риска, характеризующих соответственно устойчивость откосов плотины или дамбы, фильтрационную прочность грунтов тела сооружения и его основания (выполнялась экспертной группой с учетом условий размещения и эксплуатации, класса и категории исследуемого сооружения);
- 4) определение вероятности отказов грунтовой плотины за время ее срока службы по графикам связи коэффициентов риска с вероятностью отказа;
- 5) определение среднегодовой вероятности отказа, допустимой для среднего срока службы грунтовых плотин;
- 6) корректировка результатов с учетом качества мониторинга, уровня эксплуатации плотины, признаков нарушения устойчивости откосов или развивающихся фильтрационных деформаций.

Вероятности отказа грунтовой плотины или дамбы в результате нарушения устойчивости откосов сооружения, нарушения фильтрационной прочности грунтов тела плотины или дамбы и их оснований определялась по графику связи коэффициентов риска с вероятностью отказа.

Среднегодовые значения вероятности отказа грунтовой плотины или дамбы по внутренним причинам определялись путем деления величин определенных коэффициентов на 30 лет (средний срок эксплуатации плотин – объектов СИГБ).

Оценка риска аварии ГТС по методике ФГУП РосНИИВХ [3] производится на основе анализа дерева событий, в котором в качестве основных причин возникновения аварий на грунтовых плотинах рассматривались четыре независимых фактора:

- 1) перелив воды через гребень;
- 2) образование оползня;
- 3) суффозионные процессы;
- 4) ошибки при проектировании и эксплуатации гидроузла.

На основании сопоставительного анализа по каждому из основных факторов дерева событий выбираются два-три сценария. Для каждого фактора возникновения аварии определяется значение риска. Суммарный же риск аварийной опасности ГТС определяется как сумма рисков, определяемых независимыми факторами.

Результаты оценок, представленные в таблице 6, указывают на тот факт, что количественные оценки риска, полученные по разным методикам, имеют значительное расхождение (до двух порядков).

Заключение

Существующие методики оценки риска возникновения ЧС на ГТС сложны, громоздки и трудоемки из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. Так, анализ работы [2] показал, что:

- 1) некоторые показатели уровней оценки уязвимостей и их отличительные признаки не имеют точной градации (дифференциации), а описывают возможность возникновения того или иного процесса, т.е. носят качественный анализ;
- 2) с учетом значительной разбежки в относительной погрешности расчетов риска возникновения аварий на ГТС возникает необходимость в проведении дополнительных исследований и определении показателей опасности, уязвимости и т.д. (возможность обрушения береговых склонов, сейсмическое воздействие, движение наносов и т.д.);
- 3) определение таких численных характеристик, как коэффициент значимости показателя опасности, затруднителен, и определение его значимости, т.е. численной характеристики, будет зависеть от степени квалификации эксперта. При этом значение данного коэффициента одинаково для трех показателей опасностей и их кодов, в связи с чем возникает вопрос о его физической нагрузке при определении коэффициента опасности.

Таким образом, для оценки риска возникновения гидродинамической аварии на ГТС требуется разработка методики (методических рекомендаций), позволяющих проводить анализ для разных типов и классов грунтовых и бетонных плотин, работающих в различных условиях и имеющих различный уровень и степень повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малик, Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности / Л.К. Малик. – М.: Наука, 2005. – 354 с.
2. Розанов, Н.С. Аварии и повреждения плотин / Н.С. Розанов [и др.]; под общ. ред. А.А. Борового. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 126 с.
3. Зотеев, В.Г. Методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема / В.Г. Зотеев [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 10. – С. 41–48.

4. Волков, В.И. Анализ результатов оценки риска аварий гидротехнических сооружений, полученных по различным методикам / В.И. Волков, Е.В. Добровольский // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 39–44.
5. Fell, R. Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams under Normal Operating Conditions // Repair and Upgrading of Dams: Symposium in Stockholm. – Stockholm, 1996. – P. 567–576.

**Определение вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций
на гидротехнических сооружениях**

Determination of emergencies probability at hydraulic structures

Кобяк Валерий Викторович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: valkobkii@gmail.com

Valery V. Kobyak

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Chair of
Emergency Elimination, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: valkobkii@gmail.com

Миканович Дмитрий Станиславович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра управления
защитой от чрезвычайных ситуаций, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Dmitry S. Mikanovich

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Management,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Журов Марк Михайлович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра процессов
горения и взрыва, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

Mark M. Zhurov

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Combustion and Explosion Processes,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.343>

DETERMINATION OF EMERGENCIES PROBABILITY AT HYDRAULIC STRUCTURES

Kobyak V.V., Mikanovich D.S., Zhurov M.M.

Purpose. Analyze the methods for determining the risk of hydrodynamic accidents on hydraulic structures of various types (reservoirs, sludge storage, technical reservoirs, etc.). Substantiate the main directions for improving the system of ensuring the safety and reliability of hydraulic structures.

Methods. The method of theoretical analysis of literary sources was applied in assessing the regulatory and legal framework of the Central Asian countries in the field of ensuring the safety of hydraulic structures of various types. The processing of the obtained results is carried out using the method of estimation and theoretical generalization of the data obtained.

Findings. It has been established that the existing methods for assessing the risk of emergencies at hydraulic structures of various types (reservoirs, sludge storage, technical reservoirs, etc.) are complex, cumbersome and laborious to use due to the lack, inaccuracy and uncertainty of the initial data. In this regard, it is required to develop a methodology for assessing the risk of emergencies at hydraulic structures, taking into account their design features.

Application field of research. The research results can be used for a comprehensive assessment of the state of hydraulic structures of the Ministry of Natural Resources, as well as the Ministry of Emergency Situations in the development of medium and long-term forecasts of emergencies.

Keywords: safety of hydraulic structures, risk of emergencies, dam, dike, monitoring, safety criteria, hydrodynamic accident.

(The date of submitting: March 9, 2021)

REFERENCES

1. Malik L.K. *Fakторы riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Risk factors of damage to hydraulic structures. Security concerns]. Moscow: Nauka, 2005. 354 p. (rus)
2. Rozanov N.S., Tsarev A.I., Mikhaylov L.P., Sokolov I.B. *Avarii i povrezhdeniya plotin* [Accident and damage of dams]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 126 p. (rus)
3. Zoteev V.G., Shakhov I.S., Morozov M.G., Prikhod'ko M.A. Methodological principles for risk assessing at small-capacity reservoirs. *Power Technology and Engineering*, 2003. No. 5. Pp. 290–296. DOI: 10.1023/B:HYCO.0000009795.94800.70.
4. Volkov V.I., Dobrovolskiy E.V. Analiz rezul'tatov otsenki riska avariyn gidrotekhnicheskikh sooruzheniy, poluchennykh po razlichnym metodikam [Analysis of the results of the assessment of the risk of accidents of hydraulic structures obtained by various methods]. *Prirodoobustroystvo*, 2015. No. 2. Pp. 39–44. (rus)
5. Fell R. Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams under Normal Operating Conditions: *Repair and Upgrading of Dams: Symposium in Stockholm*. Stockholm, 1996. Pp. 567–576.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.352>

УДК 614.895.5

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЕ

Дмитракович Н.М., Жук Д.В.

Цель. Провести обзор моделей по определению теплофизических и физиологических показателей состояния человека в защитной одежде путем моделирования тепло-массообменных систем.

Методы. Разбор подходов по определению теплопереноса в защитной одежде путем обзора научных работ по исследуемому направлению.

Результаты. Проведен анализ методик по определению теплофизических и физиологических показателей состояния человека в защитной одежде путем моделирования тепло-массообменных систем, определены необходимые условия для получения данных испытаний и сравнения с данными расчета.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы в разработке, исследовании и оптимизации методик по определению теплофизических и физиологических показателей состояния человека в защитной одежде пожарных путем моделирования тепло-массообменных систем.

Ключевые слова: одежда специальная защитная пожарных, метаболизм, коэффициент теплопроводности, тепловой поток, теплоперенос.

(Поступила в редакцию 18 января 2021 г.)

Введение

Разработка специальной экипировки и снаряжения является актуальной задачей для многих отраслевых направлений производства любой страны. Защита человеческого организма, выполнение специализированных работ и поддержание физиологического комфорта невозможны без применения специальной защитной одежды. Одной из основных функций одежды является защита организма человека от колебаний температуры внешней среды. До настоящего времени актуальна проблема разработки специального защитного обмундирования для спасателей-пожарных в условиях перепада температур от высоких положительных до отрицательных значений, в то время как организм стремится поддерживать постоянную температуру.

Традиционно защитная одежда от температурного воздействия состоит из базового комплекта материалов: материал верха, изолятор, материал подложки. В зависимости от специфики выполнения работ и направления применения одежды пакет материалов может дополняться. Состав одежды создает барьерную среду между организмом спасателя-пожарного и внешней средой. Прогнозирование защитных функций одежды путем расчетного моделирования процесса сложного теплопереноса в защитной одежде является актуальным.

Основная часть

В работе [1] P.W. Gibson представил результаты оценки характеристик теплозащитных тканей и одежды на лабораторных установках, исследований их теплофизических свойств на манекене и полигонных испытаний. Основываясь на результатах работы [1], группа зарубежных исследователей разработала различные аналитические и численные модели метаболического переноса тепла, влаги и ее паров через одежду в окружающую среду [1–11]. Эти модели предоставляют возможность для проведения исследований метаболического тепла и передачи избыточной влаги посредством потовыделения через одежду пожарных.

Аналитическая модель

В работе [3] разработана упрощенная аналитическая модель передачи теплоты и избыточной влаги посредством потовыделения через одежду в окружающую среду (рис. 1).

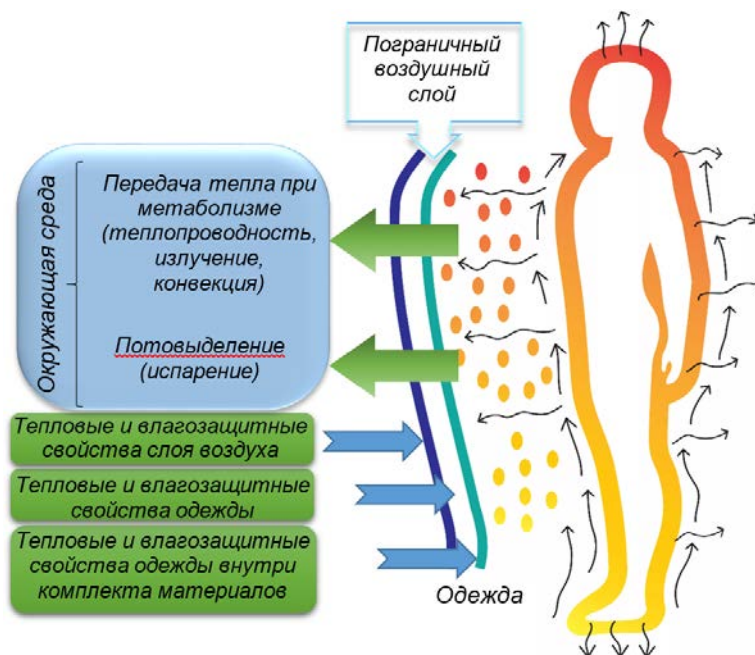


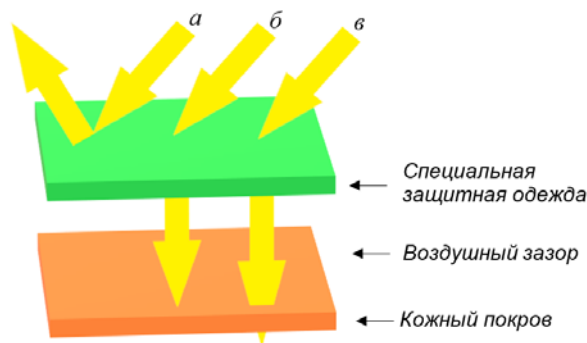
Рисунок 1. – Модель передачи метаболического тепла и рассеивания паров при потовыделении

Выделяемая теплота в результате метаболических реакций организма человека может легко передаваться одежде через область микроклимата посредством теплопроводности, излучения и конвекции [3]. Затем теплота передается внутрь одежды и достигает ее внешней поверхности, в зависимости от характеристик (внутренняя теплоемкость, вес, толщина и т.д.) тканей, используемых в одежде. Наконец, от внешней поверхности одежды в окружающую среду передача происходит за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Этот процесс зависит от разницы температур между человеческим телом и окружающей средой. Пары при потовыделении в первую очередь переходят от человеческого тела к одежде, в зависимости от свойств ткани (впитывающая влага, впитывание, собственное сопротивление испарению и т.д.), используемой в одежде, а потом испаряются во внешнюю среду. Пары при потовыделении могут легко достигать внешней поверхности одежды, если одежда имеет высокую паронепроницаемость [3].

Согласно работам [3–5] тепловую энергию окружающей среды, распространяющуюся на ткань одежды, можно представить в виде отраженной или испускаемой тепловой энергии, поглощенной и передаваемой тепловой энергии (рис. 2). Кроме того, значительное количество поглощенной тепловой энергии в пакете материалов может снова передаваться через ткани путем теплопроводности.

В целом отражательная способность, коэффициент излучения, поглощающая способность и коэффициент теплопроводности являются основными параметрами ткани, которые могут влиять на передачу тепловой энергии через ткань и могут влиять на теплозащитные характеристики специальной одежды [8].

Массообмен возникает при воздействии расплавленных веществ, горячих жидкостей и парообразовании при потовыделении [9; 10].



а – отраженная / испускаемая тепловая энергия, *б* – поглощенная тепловая энергия, *в* – передаваемая тепловая энергия

Рисунок 2. – Принципиальная схема распространения тепловой энергии внешней среды через специальную защитную одежду на организм человека

Численные модели

А.Н. Woodcock в работе [2] численно проанализировал теплоту реакций метаболизма и передачу паров при потовыделении через обычную одежду в окружающую среду. Он предположил, что общий перенос теплоты H_t от человеческого тела в окружающую среду представляет собой комбинацию передачи теплоты H_d и потери теплоты от испарения паров при потовыделении H_e :

$$H_t = H_d + H_e. \quad (1)$$

Тепло H_d может переноситься конвекцией или излучением на основании закона охлаждения Ньютона. Кроме того, H_d может передаваться теплопроводностью при увеличении перепада температуры.

После выдвинутого в работе [2] предположения многие исследователи численно моделировали теплоту человеческого тела и передачу паров при потовыделении через ткань или одежду. Например, разработана численная модель конвективной и диффузионной теплопередачи с фазовым переходом при конденсации и испарении [10]; разработана динамическая численная модель, зависящая от времени, включающая перенос теплоты за счет теплопроводности и излучения, а также перенос паров при потовыделении и пара за счет диффузии [11]; представлена численная модель динамического метаболического переноса тепла и паров при потовыделении в одежде во взаимодействии с двухузловыми моделями терморегуляции человека [12]; разработана подробная динамическая численная модель теплообмена и переноса паров при потовыделении и избыточной влаге, а также осуществлено сравнение результатов, предсказанных моделью с экспериментальными результатами проверки модели [13; 14]; в работах [3; 14] представлена численная модель переноса теплоты и паров при потовыделении в многослойной одежде с учетом различных параметров:

$$C_{\text{од}} \frac{dT_{\text{од}}}{dt} = Q_T^c + Q_T^e - Q_{\text{ср}}^c - Q_{\text{ср}}^e - Q_{\text{ср}}^r + Q_{\text{ср}}^s, \quad (2)$$

где $C_{\text{од}}$ – теплоемкость одежды, Дж/К;

$T_{\text{од}}$ – температура одежды, К;

Q_T^c, Q_T^e – количество передаваемой теплоты от тела человека к одежде за счет конвекции и испарения в единицу времени соответственно, Вт;

$Q_{\text{ср}}^c, Q_{\text{ср}}^e, Q_{\text{ср}}^r$ – количество передаваемой теплоты от одежды к окружающей среде за счет конвекции, испарения и излучения в единицу времени соответственно, Вт;

$Q_{\text{ср}}^s$ – возможный приток теплоты из-за солнечного излучения в единицу времени, Вт.

Особую популярность в зарубежном научном сообществе имеют три численные модели теплопередачи и массопереноса (модель *P.W. Gibson* [1], модель *D.A. Torvi* [16], модель *W.E. Mell* и *J.R. Lawson* [7]).

Модель *P.W. Gibson* была разработана на основе теории *S. Whitaker* тепло-массопереноса через пористую среду. Текстильная ткань представлялась как гигроскопическая многофазная пористая среда (твердая фаза с концентрацией связанной воды, свободная жидкая фаза и газовая фаза водяных паров в воздухе) [1]. Эта модель рассматривает тепло-массообмен в трех состояниях: проводимость всеми тремя фазами, конвекция газовой и жидкой фаз и превращения между всеми тремя фазами. Для разработки модели к ткани были применены уравнения непрерывности, сохранения импульса и энергии. В общем виде разработанная *P.W. Gibson* модель представлена выражением (3), где функционально выражена пространственная взаимосвязь плотности, температуры, теплоемкости материала и ряда других параметров, формирующих объемную модель процесса тепло- и массопереноса [1, с. 34].

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle c_p \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \left(\sum_{i=1}^N (c_p)_{i,\sigma} \langle \rho_{i,\sigma} v_{i,\sigma} \rangle + \rho_\beta (c_p)_\beta \langle v_\beta \rangle + \sum_{j=1}^N (c_p)_{j,\gamma} \langle \rho_{j,\gamma} v_{j,\gamma} \rangle \right) \cdot \nabla \langle T \rangle + \\ + \sum_{i=1}^N \Delta h_{\text{vap},i} \langle \dot{m}_{\text{lv}} \rangle + Q_1 \langle \dot{m}_{\text{sl}} \rangle + \left(Q_1 + \sum_{i=1}^N \Delta h_{\text{vap},i} \right) \langle \dot{m}_{\text{sv}} \rangle = \nabla (K_{\text{eff}}(T) \cdot \nabla \langle T \rangle), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle \rho \rangle$ – среднееобъемное значение плотности системы человек – защитная одежда – внешняя среда, состоящей из N элементов, кг/м³;

$c_p = c_p(x, T)$ – зависимость удельной теплоемкости в системе человек – защитная одежда – внешняя среда в точке x компонента системы при температуре T в этой же точке при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

$\langle T \rangle$ – среднееобъемное значение температуры в системе человек – защитная одежда – внешняя среда, К;

t – время, с;

$(\cdot)_i$ – характеристика i -го компонента системы человек – защитная одежда – внешняя среда;

$(\cdot)_\sigma, (\cdot)_\beta, (\cdot)_\gamma$ – значения характеристики (\cdot) для составляющих системы человек – защитная одежда – внешняя среда, находящихся соответственно в твердой, жидкой и газовой фазах;

$\langle v \rangle$ – среднееобъемное значение скорости десорбции в системе человек – защитная одежда – внешняя среда, м/с;

$\langle \dot{m}_{\text{lv}} \rangle, \langle \dot{m}_{\text{sl}} \rangle, \langle \dot{m}_{\text{sv}} \rangle$ – среднееобъемное значение массовой скорости десорбции веществ компартментов из твердой в жидкую фазу, из твердой в газовую фазу, испарившейся из жидкой фазы на единицу объема, соответственно, кг/(с·м³);

$\Delta h_{\text{vap},i}$ – теплота испарения жидкой фазы веществ в компоненте системы, Дж/кг;

Q_1 – энтальпия десорбции из твердой фазы в компартменте (костный, мышечный, жировой и компартмент защитной одежды) на единицу массы, Дж/кг;

$K_{\text{eff}}(T)$ – эффективная теплопроводность системы, включая защитную одежду, Дж/(с·м·К).

Эта модель была позже расширена с учетом передачи тепла человеческому телу при контакте с тканью [15]. Однако модель требовала модификации, в связи с тем что она недо-

статочно коррелировала с данными, полученными в результате любого эксперимента, смоделированного в лаборатории [1]. Кроме того, эта модель неприменима, когда ткань подвергается воздействию источника теплового потока более 10 кВт/м².

Изложенная в работе [16] модель *D.A. Torvi* напрямую основана на экспериментальной установке по определению тепловых характеристик ткани. Испытательный прибор состоит из ткани, нагреваемой снизу горелкой с использованием предварительно смешанных реагентов (пропана и воздуха), испытательного датчика (медного калориметра), установленного в изолирующем блоке, и полностью закрытого воздушного пространства. В этой модели учитывается передача тепла от горелки через однослойную ткань к медному датчику (кожному покрову). При разработке модели теплопередачи были учтены конвекция и излучение в воздушном зазоре между горелкой и тканью; проводимость, поглощенное излучение и термохимические реакции в ткани; а также конвекция и излучение в воздушном зазоре между тканью и датчиком. Таким образом, в работе [16] представлена формула вычисления лучистого теплового потока q_{rad1} (кВт/м²), приходящегося на единицу площади поверхности одежды:

$$q_{rad1} = \sigma \varepsilon_g T_g^4 - \sigma \varepsilon_f F_a (1 - \varepsilon_g) (T_f^4 - T_a^4) + \frac{\sigma F_b (1 - \varepsilon_g) (T_b^4 - T_f^4)}{1 + F_b (1 - \varepsilon_g) \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} + \frac{A_f}{A_b} \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right)}, \quad (4)$$

где ε_g , ε_f , ε_b – коэффициенты излучения горячих газов, ткани и головки горелки, соответственно;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

T_g , T_f , T_a , T_b – температуры горячих газов, внешней стороны ткани, окружающего воздуха и головки горелки соответственно, К;

F_a , F_b – коэффициенты обзора, учитывающие геометрию ткани по отношению к окружающему воздуху и горелке соответственно;

A_f , A_b – площади поверхности ткани и головки горелки соответственно, м².

Точно так же представлен лучистый тепловой поток q_{rad2} внутри ткани. Учитывая эти лучистые тепловые потоки q_{rad} , наряду с проводимостью, термохимической реакцией и поглощением падающего излучения внутри ткани, в работе [16] разработано уравнение распределения температуры в системе источник излучения – ткань – приемник (датчик теплового потока) и проведено параметрическое исследование полученной модели. Было обнаружено, что предсказанные моделью результаты хорошо коррелируют с результатами, полученными в лаборатории (в пределах 4 %) [16]. Это демонстрирует, что модель *D.A. Torvi* может быть эффективно использована для прогнозирования повышения температуры ткани при воздействии пламени без проведения каких-либо дорогостоящих и громоздких лабораторных экспериментов. Модель была улучшена [17].

Численная модель, предложенная *W.E. Mell* и *J.R. Lawson* в работе [7], является расширением модели *D.A. Torvi*. В ней рассматривается теплопередача через многослойные ткани, состоящие из оболочки (внешнего слоя), влагобарьера (среднего слоя) и теплоизолятора (внутреннего слоя). Для изучения теплопроводности в слоях ткани исследователи проводили эксперимент, подобный эксперименту работы [16], и получили модель, представленную следующим уравнением:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial q_c}{\partial x} - \frac{\partial q_R}{\partial x} + Q_{in}, \quad (5)$$

где $\partial T / \partial t$ – скорость изменения температуры;

$\partial q_c / \partial x$ – проекция градиента теплового потока через слой ткани на нормаль к поверхности;

$\partial q_R / \partial x$ – проекция градиента лучистого теплового потока через ткань на нормаль к поверхности;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

Q_{in} – энергия деформации тестируемых тканей на единицу объема, Вт/м³.

В этом соотношении приняты во внимание падающие тепловые потоки с обеих сторон ткани, чтобы учесть межслойный тепловой поток из-за излучения, отраженного между слоями ткани. Разработанная модель может быть использована для точного прогнозирования изменения температуры тканей в зависимости от времени или термозащитных характеристик тканей.

Вышеприведенные модели позволяют численно анализировать теплоту метаболических реакций организма и передачу паров при потовыделении в тканях и многослойной одежде путем анализа тепломассопереноса каждой ткани, однако в конфигурации защитной одежды состав пакета тканей отличается по своим свойствам. Защитная одежда включает разные тканевые материалы, такие как влагобарьерная мембрана, термоподкладка, огнеупорная ткань. В связи с этим моделирование теплоты метаболических реакций организма и передачи паров при потовыделении через защитную одежду требует более комплексного и частного подхода.

Недостатком данных моделей является расчет пакета материалов с известными характеристиками при известных температурах на верхнем слое и температуре пододежного пространства, при котором упускается вопрос изменения температуры на поверхности тела за счет метаболизма и циркуляции крови.

Кроме того, модели были разработаны с учетом естественной окружающей среды, в то время как для рабочей среды пожарных характерны тепловые воздействия различной интенсивности, что может серьезно повлиять на выделяемую теплоту метаболических реакций и способность одежды переносить избыточную влагу и пар. Этот факт в целом оказывает влияние на тепловой стресс организма спасателя-пожарного. Однако рассмотренные методики позволяют производить расчеты для специальной защитной одежды, не связанной с тушением пожаров.

Компартментный подход

Чтобы изучить реакции человеческого организма с учетом анатомических, физиологических и теплофизических особенностей на изменение внешних условий при использовании рассматриваемого типа одежды, необходимо рассмотреть тело человека как условно разбитого на N элементарных компонентов в виде простых геометрических фигур (сфера, цилиндр, пластина), называемых компартментами. Тепловые процессы описываются через последовательность математических зависимостей, основанных на специальных алгоритмах терморегуляции, устанавливающих связь как между компартментами, так и с окружающей средой. Каждый из компартментов представляется набором K слоев с J ячейками (долями), соответствующих, например, коже, мышечной, костной и другим тканям [18; 19] (рис. 3).

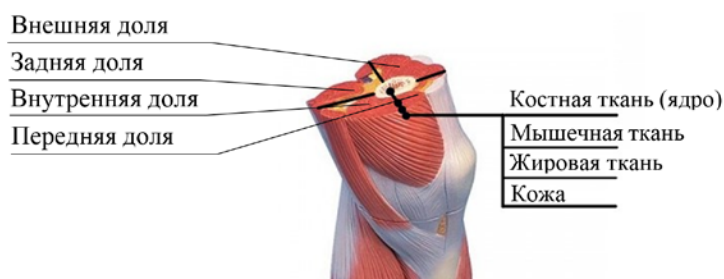


Рисунок 3. – Схема разбивания конечности человека на элементарные компоненты

Система кровообращения обычно выступает в качестве дополнительного компартмента особого типа. Одежда с прослойками воздуха между кожей и ее внутренней поверхностью может рассматриваться либо как дополнительный компартмент со слоями, либо учитывается через эффективные коэффициенты теплоотдачи и влагопереноса от кожи в окружающую среду.

Таким образом, компартментный подход позволяет перейти на основе математических моделей к количественной оценке процессов массопереноса и теплоты как для отдельных частей, так и на их основе тела человека в целом. Для такого анализа, исходя из концептуального уравнения теплового баланса, следует определить пути теплопродукции и теплоотдачи с формулировкой уравнений, включающих члены, которые могут быть измерены или оценены [18].

Компартментные модели в системе человек – защитная одежда – внешняя среда можно разбить на два класса: тепло- и массопереноса. Для первого класса моделей при условном разделении организма на компартментны для отдельной k -й ткани n -го компартмента уравнение теплового баланса можно записать в виде дифференциального уравнения:

$$C_{kn} \frac{\partial T_{kn}}{\partial t} = Q_{kn}^M + Q_{kn}^K \pm Q_{kn}^B \pm Q_{kn}^C \pm Q_{kn}^R - Q_{kn}^E - Q_{kn}^{Sk} + Q_{kn}, \quad (7)$$

где C_{kn} – теплоемкость слоя ткани, Дж/К;

T_{kn} – температура слоя ткани, К;

t – время, с;

$Q_{kn}^M = F(\rho_{O_2})$ – количество тепла, образуемое в единицу времени за счет метаболических процессов и зависящее от плотности кислорода ρ_{O_2} (кг/м³), Вт;

$Q_{kn}^K = S_{kn} a_{kn} (T_{kn} - T_t)$ – количество тепла, рассеиваемое в единицу времени за счет теплопроводности соседних слоев тканей, Вт;

S_{kn} – эффективная площадь поверхности рассматриваемого объема ткани, м²;

a_{kn} – локальный коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

T_t – температура соседних слоев ткани, К;

$Q_{kn}^B = \rho_B C_B \omega_B (T_B - T_{kn})$ – количество тепла в единицу времени, определяемое конвективным переносом тепла кровотоком, Вт;

$\rho_B, C_B, \omega_B, T_B$ – плотность, удельная теплоемкость, объемная скорость и температура крови, кг/м³, Дж/(кг·К), м³/с, К;

$Q_{kn}^C = S_{kn} h_{kn} (T_{kn} - T_a)$ и $Q_{kn}^R = S_{kn} \sigma \epsilon_{kn} (T_{kn}^4 - T_a^4)$ – количество тепла в единицу времени, выделяемое конвективным и радиационным теплообменом в окружающую среду, Вт;

h_{kn} – локальный коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К);

T_a – температура окружающей среды, К;

ϵ_{kn} – коэффициент излучения поверхности ткани (порядка 0,88...0,92);

$Q_{kn}^E = f(V, n, d)$ – количество тепла в единицу времени, выделяемое за счет испарения с верхних дыхательных путей и зависящее от частоты дыхания n (раз в с), вентилируемого объема легких V (м³), разницы влагосодержания вдыхаемого и выдыхаемого воздуха d (%), Вт;

$Q_{kn}^{Sk} = S_{kn} h_{kn}^E (P_{kn} - P_a)$ – количество тепла в единицу времени, выделяемое за счет испарения с поверхности кожи, Вт;

h_{kn}^E – коэффициент теплоотдачи испарением, Вт/(м²·К);

P_{kn} и P_a – давление паров воды, насыщенных при температуре ткани и окружающей среды, соответственно, Па;

Q_{kn} – количество тепла в единицу времени, выделяемое другими факторами (работа, активность и т.д.), Вт.

Другой класс моделей строится на применении дифференциального уравнения в частных производных с соответствующими граничными условиями. Модель была предложена в стационарной формулировке в 1948 г. *Н.Н. Pennes* [20]. Он применил ее для исследования тепловых процессов в предплечье, представленном в виде цилиндра, с учетом радиальной теплопроводности, метаболического выделения тепла в ткани, конвективного теплопереноса за счет циркулирующей крови и теплоотдачи с поверхности кожи (боковой поверхности цилиндра) путем конвекции, излучения и испарения. Дифференциальное уравнение, описывающее модель *Н.Н. Pennes*, в одномерном приближении имеет вид:

$$\rho_{\text{kn}} c_{\text{kn}} \frac{\partial T_{\text{kn}}}{\partial t} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{\text{kn}}}{\partial r} \right) + q^B + q^M, \quad (8)$$

где ρ_{kn} – плотность слоя ткани, кг/м³;

k – теплопроводность в тканях организма человека, Дж/(с·м·К);

c_{kn} – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

r – радиус компартмента, м.

q^B – количество теплоты на единицу объема, переносимое кровяным потоком, Вт/м³;

q^M – количество теплоты на единицу объема, выделяемое при метаболических реакциях в организме, Вт/м³.

Как видно из уравнений (7) и (8), степень разбиения на компартменты и изменение теплофизических параметров слоев тканей человеческого тела в зависимости от состояния организма, условий окружающей среды и индивидуальных особенностей делают сложной математическую модель тепловых процессов в организме. Наличие активных процессов терморегуляции и дополнительного компартмента в виде одежды усложняет данную модель [18; 20].

Компартментный подход с разным уровнем разбиения

Уравнения (7) и (8) служат основой для всех моделей определения теплового состояния организма человека. Их различие заключается прежде всего в степени дискретизации по количеству компартментов и их слоев. Можно выделить четыре уровня дискретизации.

На первом уровне для оценки теплового комфорта в стационарных условиях окружающей среды человеческое тело представляется в виде одного глобального компартмента. Модели, использующие этот подход, представляют собой уравнение, аналогичное биотепловому уравнению, с заданием входящих в него компонентов на основе анализа доступных экспериментальных данных [21].

Второй уровень дискретизации основан на введении понятий ядра и оболочки. В работе [21] представлена одна из первых нестационарных моделей такого рода, использующая для анализа величину ректальной температуры (температуры ядра) и средней температуры кожи (оболочки). Основываясь на уравнении теплового баланса и установив зависимость скорости теплопродукции от приращения температуры ядра и оболочки, модель работы [22] обеспечивает связь между температурой кожи, влажностью кожи, локальным метаболизмом и параметрами окружающей среды.

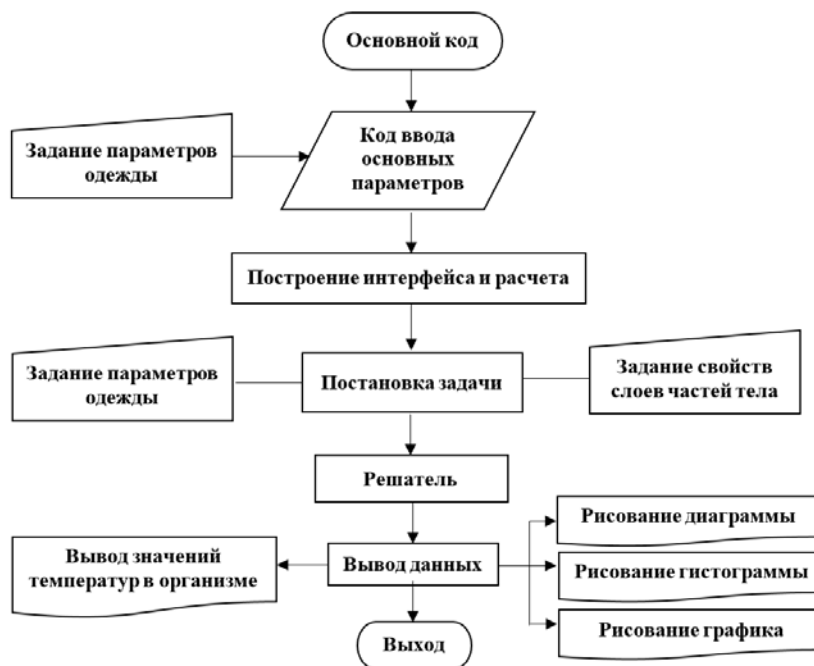
Следующий шаг усложнения моделей за счет разбиения состоял в использовании подхода, предложенного в работе [23], где виртуальное тело состояло из 6 цилиндров, обозначающих туловище, руки, ноги и голову. Для каждого цилиндра записывалось уравнение теплового баланса с дополнительными связями с компартментом, соответствующим ядру тела

(сердце и легкие). Шестикомпартментная модель работы [23] использовалась в [13], где каждый компартмент состоял из четырех элементов (слоев) (костная, мышечная, жировая ткани и кожа), а седьмой компартмент был ответственен за систему кровообращения и связь остальных элементов. Таким образом, модель состояла из 25 элементов с 25 основными уравнениями теплового баланса. В этой модели тепло передается через ткани в отдельных слоях посредством проводимости. Через кожу происходит теплообмен с окружающей средой через конвекцию, излучение, испарение и дыхание. Теплообмен между локальными слоями тканей и кровотоком представлен в упрощенном виде как теплообмен между локальными тканями и компартментом системы кровообращения. Кроме того, предложенная в работе [13] модель учитывает механизмы терморегуляции посредством обработки сигналов о температуре всех элементов и сравнением их с контрольными значениями (*set-points*). Модель была скрупулезно проанализирована и ее обоснованность была доказана с физиологической точки зрения [24], что подтверждает ее востребованность в настоящее время [25].

Рассматриваемая модель продолжает развиваться в направлении увеличения разбиения тела человека [24]. Это связано с возрастанием мощности вычислительных ресурсов, что позволяет представлять и моделировать виртуальное тело человека достаточно реалистично и проводить подробный анализ различного рода специфических эффектов, влияющих на тепловой комфорт, в том числе функциональных особенностей одежды [26].

На основании модели многокомпартментного подхода по определению тепломассопереноса в организме спасателя, а также через защитную одежду Университетом гражданской защиты МЧС Беларуси совместно Институтом тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси был разработан алгоритм (рис. 4) и программный код специального программного обеспечения «ТОРС»¹ в рамках выполнения задания № 3.1.23 «Разработка научно обоснованных методов исследования механизмов теплопередачи в системе «Человек

Защитная одежда – Внешняя среда» (ГР № 20180624) подпрограммы «Научное обеспечение безопасности человека, общества и государства» Государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность».



¹ Специальное программное обеспечение для анализа и прогнозирования состояния теплового комфорта пожарных и спасателей «ТОРС»: свид. № 1331 (НЦИС) / А.Н. Чорный, Н.М. Дмитракович, Д.В. Жук. – Оpubл. 14.09.2020.

Рисунок 4. – Схема построения алгоритма работы специального программного обеспечения «ТОРС»

Программное обеспечение позволяет рассчитывать физические показатели системы человек – одежда – внешняя среда в стационарном и нестационарном режимах. Выходные данные представляют собой зависимости физических показателей от времени и величины воздействия. Данные возможности выстраивают перспективу прогнозирования поведения пакета материалов тканей защитной одежды и позволяют улучшать характеристики пакета материалов под конкретные задачи.

Заключение

Исследованы основные уравнения, описывающие перенос тепла, влаги и паров, позволяющие моделировать процесс эксплуатации одежды. Аналитические и численные подходы исследователей позволили разработать расчетные модели тепломассопереноса. Наиболее распространенные и универсальные подходы к моделированию тепломассопереноса в зарубежных изданиях сформулировали *P.W. Gibson, A.H. Woodcock, D.A. Torvi, W.E. Mell, J.R. Lawson*. Разработанные ими модели позволяют рассчитывать перенос тепла, избыточной влаги через текстильные материалы и могут быть применены к конструкции многослойного пакета материалов. Однако зарубежные модели расчетов не объединены в систему метаболизма человека. В этом ключе появляется необходимость разбиения тепловой системы на составляющие для применения законов переноса тепла. Также малоизучен тепломассоперенос при смене фазовых состояний в материалах при нестационарном режиме.

В ходе научных исследований Университета гражданской защиты МЧС Беларуси и Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси удалось выработать систему компартментного подхода для расчета теплового состояния организма человека. Данный подход позволил учесть в модели метаболизм организма человека с одной стороны и тепломассоперенос в текстильных материалах с другой. Полученная система позволяет моделировать тепловое состояние организма в различных условиях и при нестационарном режиме. В целях эффективности проведения расчетов разработанный подход описан математическими уравнениями и изложен в листинге кода специального программного обеспечения «ТОРС»². Предметом дальнейших исследований в совокупности с экспериментом является зависимость распределения температурно-влажностного режима в слоях пакета материалов защитной одежды и в среде пододежного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibson, P.W. Governing equations for multiphase heat and mass transfer in hygroscopic porous media with applications to clothing materials / P.W. Gibson // Technical report Natick. – USA, 1994. – 60 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/216777883_Multiphase_Heat_and_Mass_Transfer_Through_Hygroscopic_Porous_Media_with_Applications_to_Clothing_MaterialsFinal_Report_Jan_1994-Mar_1996.
2. Woodcock, A.H. Moisture Transfer in Textile Systems, Part I / A.H. Woodcock // Textile Research Journal. – 1962. – Vol. 1, Iss. 32. – P. 628–633. DOI: 10.1177/004051756203200802.
3. Wu, Y.S. Measuring the thermal insulation and evaporative resistance of sleeping bags using a supine sweating fabric manikin / Y.S. Wu, Jintu Fan // Measurement Science and Technology. – 2009. – Vol. 20, No. 9. – P. 95–108. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/095108.
4. Song, G. Modeling thermal protection outfits for fire exposures: Ph.D. thesis / G. Song. – Raleigh, 2004. – 209 p. URI: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/5766>.
5. Torvi, D.A. Heat transfer in thin fibrous material under high heat flux conditions: Ph.D. thesis / D.A. Torvi. – Edmonton, 1997. – 277 p. DOI: 10.7939/R3M03Z33Z.
6. Mandal, S. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures / S. Mandal, G. Song, M. Ackerman, S. Paskaluk, F. Gholamreza // Textile Research Journal. – 2013. – Vol. 83, No. 10. – P. 1005–1019. DOI: 10.1177/0040517512461707.

² См. сноску 1.

7. Mell, W.E. A Heat Transfer Model for Firefighters Protective Clothing / W.E. Mell, J.R. Lawson // *Fire Technology*. – 1999. – Vol. 36, No. 1. – P. 39–68. DOI: 10.1023/A:1015429820426.
8. Lee, Y.M. Effect of Moisture on the Thermal Protective Performance of Heat-Resistant Fabrics / Y.M. Lee, R.L. Barker // *Journal of Fire Sciences*. – 1986. – Vol. 4, No. 5. – P. 315–331. DOI: 10.1177/073490418600400502.
9. Ghazy, A. Numerical Simulation of Heat Transfer in Firefighters' Protective Clothing with Multiple Air Gaps during Flash Fire Exposure / A. Ghazy, D.J. Bergstrom // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. – 2012. – Vol. 61, Iss. 8. – P. 569–593. DOI: 10.1080/10407782.2012.666932.
10. Ogniewicz, Y. Analysis of condensation in porous insulation / Y. Ogniewicz, C.L. Tien // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1981. – Vol. 24, No. 3. – P. 421–429. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90049-1.
11. Farnworth, B. A Numerical Model of the Combined Diffusion of Heat and Water Vapor Through Clothing / B. Farnworth // *Textile Research Journal*. – 1986. – Vol. 56, No. 11. – P. 653–665. DOI: 10.1177/004051758605601101.
12. Li, Y. Mathematical simulation of heat and moisture transfer in a human – clothing – environment system / Y. Li, B. Holcombe // *Textile Research Journal*. – 1998. – Vol. 68, No. 6. – P. 389–397. DOI: 10.1177/004051759806800601.
13. Gagge, A.P. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response / A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi // *Memoirs of the Faculty of Engineering*. – 1971. – P. 21–36. URI: <http://hdl.handle.net/2115/37901>.
14. Fan, J. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin / Jintu Fan, Y.S. Chen // *Measurement Science and Technology*. – 2002. – Vol. 13, No. 7. – P. 1115–1123. DOI: 10.1088/0957-0233/13/7/320.
15. Gibson, P.W. Coupled Heat and Mass Transfer Through Hygroscopic Porous Materials-Application to Clothing Layers / P.W. Gibson, M. Charmchi // *University of Massachusetts Lowell*. – 1997. – Vol. 53, No. 5. – P. 183–194. DOI: 10.2115/fiber.53.5_183.
16. Torvi, D.A. Effects of variations in thermal properties on the performance of flame resistant fabrics for flash fires / D.A. Torvi, J.D. Dale // *Textile Research Journal*. – 1998. – Vol. 68, Iss. 11. – P. 787–796. DOI: 10.1177/004051759806801102.
17. Torvi, D.A. Heat Transfer Model of Flame Resistant Fabrics During Cooling After Exposure to Fire / D.A. Torvi, P. Eng, T.G. Threlfall // *Fire Technology*. – 2006. – Vol. 42, Iss. 1. – P. 27–48. DOI: 10.1007/S10694-005-3733-8.
18. Parsons, K.C. Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance / K.C. Parsons. – London: Taylor & Francis, 2003. – 560 p.
19. Черунова, И.В. Теоретические основы комплексного проектирования специальной теплозащитной одежды: автореф. дис ... д-ра техн. наук: 05.19.04 / И.В. Черунова. – Шахты, 2008. – 41 с.
20. Pennes, H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm / H.H. Pennes // *Journal of Applied Physiology* – 1948. – Vol. 1, No. 2. – P. 93–122. DOI: 10.1152/jappl.1948.1.2.93.
21. Fanger, P.O. Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic equation / P.O. Fanger // *ASHRAE Transactions*. – 1967. – Vol. 73. – P. 4.1–4.16.
22. Machle, W. Heat: Man's exchange and physiological responses / W. Mache, T.F. Hatch // *Physiological Reviews*. – 1947. – Vol. 27. – P. 200–227. DOI: 10.1152/PHYSREV.1947.27.2.200.
23. Wissler, E.H. Steady-state temperature distribution in man / E.H. Wissler // *Journal of Applied Physiology*. – 1961. – Vol. 16. – P. 734–740. DOI: 10.1152/JAPPL.1961.16.4.734.
24. Gordon, R.G. A mathematical model of the human temperature regulatory system – transient cold exposure response / R.G. Gordon, R.B. Roemer, S.M. Horvarth // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 1976. – Vol. 23, No. 6. – P. 434–444. DOI: 10.1109/TBME.1976.324601.
25. Дмитракович, Н.М. Основы проектирования и обеспечение качества специальной защитной одежды пожарных / Н.М. Дмитракович // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 367–375. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.367.
26. Жук, Д.В. Разработка методики испытаний пакетов материалов одежды специальной защитной пожарной с учетом послойного контроля температуры при нагревании / Д.В. Жук, Н.М. Дмитракович // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 176–185. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.176.

Аналитический обзор моделей тепломассопереноса в защитной одежде
Analytical review of heat and mass transfer models in protective clothing

Дмитракович Николай Михайлович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: ontrnic@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5372-1077

Nikolay M. Dmitrakovich

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Rescue Equipment, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: ontrnic@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5372-1077

Жук Дмитрий Викторович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, начальник лаборатории

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: z.d.vic@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-8244-3291

Dmitry V. Zhuk

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific,
Head of Laboratory

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: z.d.vic@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-8244-3291

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.352>

ANALYTICAL REVIEW OF HEAT AND MASS TRANSFER MODELS IN PROTECTIVE CLOTHING

Dmitrakovich N.M., Zhuk D.V.

Purpose. Review the models for determining the thermophysical and physiological indicators of the state of a person in protective clothing by modeling heat and mass transfer systems.

Methods. Analysis of approaches to the determination of heat and mass transfer in protective clothing by reviewing scientific works in the area under study.

Findings. The analysis of methods for determining the thermophysical and physiological indicators of the state of a person in protective clothing by modeling heat and mass transfer systems is carried out, the necessary conditions for obtaining test data and comparison with calculation data are determined.

Application field of research. The results of the research can be used in the development, research and optimization of methods for determining the thermophysical and physiological indicators of the human condition in protective clothing of firefighters by modeling heat and mass transfer systems.

Keywords: special protective clothing for firefighters, metabolism, thermal conductivity coefficient, heat flow, heat and mass transfer.

(The date of submitting: January 18, 2021)

REFERENCES

1. Gibson P.W. *Governing equations for multiphase heat and mass transfer in hygroscopic porous media with applications to clothing materials*: Technical report Natick. USA. 1994. 60 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/216777883_Multiphase_Heat_and_Mass_Transfer_Through_Hygroscopic_Porous_Media_with_Applications_to_Clothing_MaterialsFinal_Report_Jan_1994-_Mar_1996.
2. Woodcock A.H. Moisture Transfer in Textile Systems, Part I. *Textile Research Journal*, 1962. Vol. 1, Iss. 32. Pp. 628–633. DOI: 10.1177/004051756203200802.
3. Wu Y.S., Fan J. Measuring the thermal insulation and evaporative resistance of sleeping bags using a supine sweating fabric manikin, *Measurement Science and Technology*, 2009. Vol. 20, No. 9. Pp. 95–108. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/095108.
4. Song G. *Modeling thermal protection outfits for fire exposures: Ph.D. thesis*. Raleigh, 2004. 209 p. URI: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/5766>.
5. Torvi D. A. *Heat transfer in thin fibrous material under high heat flux conditions: Ph.D. thesis*. Edmonton, 1997. 277 p. DOI: 10.7939/R3M03Z33Z.
6. Mandal S., Song G., Ackerman M., Paskaluk S., Gholamreza F. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures. *Textile Research Journal*, 2013. Vol. 83, No. 10. Pp. 1005–1019. DOI: 10.1177/0040517512461707.
7. Mell W.E., Lawson J.R. A Heat Transfer Model for Firefighters Protective Clothing. *Fire Technology*, 1999. Vol. 36, No. 1. Pp. 39–68. DOI: 10.1023/A:1015429820426.
8. Lee Y.M., Barker R.L. Effect of Moisture on the Thermal Protective Performance of Heat-Resistant Fabrics. *Journal of Fire Sciences*, 1986. Vol. 4, No. 5. Pp. 315–331. DOI: 10.1177/073490418600400502.
9. Ghazy A., Bergstrom D.J. Numerical Simulation of Heat Transfer in Firefighters' Protective Clothing with Multiple Air Gaps during Flash Fire Exposure. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2012. Vol. 61, Iss. 8., Pp. 569–593. DOI: 10.1080/10407782.2012.666932.
10. Ogniewicz Y., Tien C.L. Analysis of condensation in porous insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981. Vol. 24, No. 3. Pp. 421–429. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90049-1.
11. Farnworth B. A Numerical Model of the Combined Diffusion of Heat and Water Vapor Through Clothing. *Textile Research Journal*, 1986. Vol. 56, No. 11. Pp. 653–665. DOI: 10.1177/004051758605601101.
12. Li Y., Holcombe B. Mathematical simulation of heat and moisture transfer in a human–clothing–environment system. *Textile Research Journal*, 1998. Vol. 68, No. 6. Pp. 389–397. DOI: 10.1177/004051759806800601.

13. Gagge A.P., Stolwijk J.A. J., Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 1971. Pp. 21–36. URI: <http://hdl.handle.net/2115/37901>.
14. Fan J., Chen Y.S. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin. *Measurement Science and Technology*, 2002. Vol. 13, No. 7. Pp. 1115–1123. DOI: 10.1088/0957-0233/13/7/320.
15. Gibson P.W., Charmchi M. Coupled Heat and Mass Transfer Through Hygroscopic Porous Materials- Application to Clothing Layers. *University of Massachusetts Lowell*, 1997. Vol. 53, No. 5. Pp. 183–194. DOI: 10.2115/fiber.53.5_183.
16. Torvi D.A., Dale J.D. Effects of variations in thermal properties on the performance of flame resistant fabrics for flash fires. *Textile Research Journal*, 1998. Vol. 68, Iss. 11. Pp. 787–796. DOI: 10.1177/004051759806801102.
17. Torvi D.A., Eng P., Threlfall T.G. Heat Transfer Model of Flame Resistant Fabrics During Cooling After Exposure to Fire. *Fire Technology*, 2006. Vol. 42, Iss. 1. Pp. 27–48. DOI: 10.1007/S10694-005-3733-8.
18. Parsons K.C. *Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. London: Taylor & Francis. 2003. 560 p.
19. Cherunova I. V. Teoreticheskie osnovy kompleksnogo proektirovaniya spetsial'noy teplozashchitnoy odezhdy [Theoretical bases of complex design of special heat-protective clothing]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.19.04, Shakhty, 2008. 41 p. (rus)
20. Pennes H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, 1948. Vol. 1, No. 2. Pp. 93–122. DOI: 10.1152/jappl.1948.1.2.93.
21. Fanger P.O. Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic equation. *ASHRAE Transactions*, 1967. Vol. 73. Pp. 4.1–4.16.
22. Machle W, Hatch T.F. Heat: Man's exchange and physiological responses. *Physiological Reviews*. 1947. Vol. 27. Pp. 200–227. DOI: 10.1152/PHYSREV.1947.27.2.200.
23. Wissler E.H. Steady-state temperature distribution in man. *Journal of Applied Physiology*. 1961. Vol. 16. Pp. 734–740. DOI: 10.1152/JAPPL.1961.16.4.734.
24. Gordon R.G., Roemer R.B., Horvarth S.M. A mathematical model of the human temperature regulatory system – transient cold exposure response. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1976. Vol. 23, No. 6. Pp. 434–444. DOI: 10.1109/TBME.1976.324601.
25. Dmitrakovich N.M. Osnovy proektirovaniya i obespechenie kachestva spetsial'noy zashchitnoy odezhdy pozharnykh [Fundamentals of design and quality assurance of special protective clothing for firefighters]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 3. Pp. 367–375. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.367.
26. Zhuk D.V., Dmitrakovich N.M. Razrabotka metodiki ispytaniy paketov materialov odezhdy spetsial'noy zashchitnoy pozharnykh s uchetom posloynogo kontrolya temperatury pri nagrevanii [Development of a methodology for testing packages of materials for special protective clothing for firefighters, taking into account layer-by-layer temperature control during heating]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.176.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.366>

УДК 519.673:614.841.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Смиловенко О.О., Богданова В.В., Малашенко С.М.,
Полуян А.И., Миргуламлы Ф.О.

Цель. Повышение эффективности научных исследований и решения прикладных задач в области пожарной безопасности путем внедрения вычислительного компьютерного эксперимента – метода многокритериального синтеза, обеспечивающее сокращение временных, материальных и трудовых затрат на проведение эксперимента и корректную системную интерпретацию результатов испытаний.

Методы. Используется метод многокритериального синтеза, дающий возможность прогнозирования поведения исследуемой системы с учетом стохастичности ее параметров и выбора рациональных характеристик, которые обеспечивают требуемые выходные показатели. Поиск оптимальной совокупности параметров технического объекта предусматривает определение расчетных значений принятых критериев по значениям расчетных точек, которые расположены определенным образом в многомерном пространстве варьируемых параметров. При этом происходит преобразование пространства параметров в пространство критериев с учетом принятых ограничений.

Результаты. В статье приведены примеры применения метода многокритериального синтеза при решении задач обеспечения пожарной безопасности. Определена рецептура огнезащитно-огнетушащего состава на основе синтетических фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония, обладающего высокоэффективным воздействием на торф и древесину. С помощью оптимизационно-имитационного подхода спрогнозировано время тушения пожара в резервуаре и выбраны оптимальные параметры тушения при подаче пены низкой кратности непосредственно в слой горючего. На основе многокритериального компьютерного синтеза установлены концентрация модифицирующей добавки в связку алмазных сегментов и режимы резания для инструмента (бензореза) при выполнении аварийно-спасательных работ. Разработан способ оценки совокупного территориального риска методом статистического моделирования, позволивший создать базу для управления риском, включая правовое, экономическое регулирование и обязательное страхование.

Область применения исследований. Представленные результаты исследований направлены на повышение пожарной безопасности различных объектов.

Ключевые слова: пространство параметров, ЛП-последовательности, огнезащитно-огнетушащее средство, подслоный способ тушения, бензорез, модифицированная связка, территориальный риск.

(Поступила в редакцию 14 января 2021 г.)

Введение

Обеспечение пожарной безопасности требует решения различных задач, которые могут быть связаны как с предупреждением, так и с ликвидацией чрезвычайных ситуаций (ЧС). Это могут быть задачи из области химии, связанные с разработкой новых и совершенствованием известных огнетушащих и огнезащитных средств, негорючих материалов. Важным является создание новых способов и технических устройств для борьбы с огнем. Технологии ликвидации последствий ЧС, проведение аварийно-спасательных работ (АСР) и технические устройства для их реализации также являются предметом исследования и разработки. Определение территориальных рисков позволяет планировать количество и расположение пожарных частей и разрабатывать мероприятия по управлению рисками.

Вышеперечисленные задачи имеют общие черты, а именно они являются многопараметрическими и многокритериальными; параметры в них носят динамический и стохастический характер; процессы получения материала, функционирования устройства или системы могут быть описаны математическими моделями; решение этих задач представляет собой поиск оптимальных решений при наличии дрейфа параметров. Все это дает возможность применения к решению задач по обеспечению пожарной безопасности метода многокритериального синтеза.

Многокритериальный синтез [1; 2] выполняется путем вычислительного эксперимента на математической модели и состоит в выделении в многомерном пространстве входных параметров области, в которой значения всех выходных характеристик (критериев) одновременно удовлетворяют поставленным требованиям. В многомерном пространстве параметров выбирают некоторое количество пробных точек, по модели рассчитывают значения критериев в этих точках. Затем определяют, какие значения критериев из полученных при расчете соответствуют заданным требованиям, и выделяют в многомерном пространстве параметров область, в которой находятся значения параметров, обеспечивающие заданные требования.

Итак, конструктивные и эксплуатационно-технологические параметры P_1, P_2, \dots, P_n технической системы (технологического процесса) представляют собой независимые случайные величины, каждая из которых изменяется в своем диапазоне:

$$P_{iн} \leq P_i \leq P_{iв}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $P_{iн}$ и $P_{iв}$ – нижняя и верхняя границы дрейфа параметра P_i .

Множество $D = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$ представляет собой n -мерную априорно допустимую область, ограниченную n -мерным параллелепипедом, ребрами которого являются диапазоны изменений параметров P_1, P_2, \dots, P_n системы, обеспечивающих физическую возможность функционирования системы. Каждой точке этой ограниченной n -мерной области соответствует конкретное сочетание значений параметров системы, т.е. каждая точка характеризует мгновенное состояние системы в момент времени $t_{мгн}$.

Наличие модели функционирования системы, заданной в виде какого-либо математического выражения (например, алгебраические формулы, дифференциальные уравнения и т.д.) и связывающей между собой параметры и критерии, дает возможность вычислить значения критериев (показателей качества функционирования) при различных сочетаниях параметров. Это позволяет судить о функционировании системы в момент времени $t_{мгн}$.

Пусть выбранный критерий K зависит от ряда параметров системы:

$$K = K(P_1, P_2, \dots, P_n),$$

где P_1, P_2, \dots, P_n в фиксированный момент времени могут принимать любые значения из определенных для них интервалов.

Для реализации вычислительного эксперимента в пространстве возможных изменений параметров выбираем N точек, для каждой из которых находим значения критерия K .

Важной проблемой, возникающей при проведении вычислительного эксперимента, является построение оптимальных сетей – пространственного расположения точек. При планировании оптимальных сетей обычно исходят из стоимости вычислений, точности описания различных составляющих поля и т.д. Разработанные различными авторами процедуры поиска рациональной сети исходят либо из обычно прямоугольной, либо из ромбической сетки расположения точек съема информации. Представляется эффективным такое расположение этих точек, чтобы их координаты формировались по алгоритмам планируемого ЛП-поиска, достаточно просто реализуемым на ЭВМ [3].

Разработанные И.М. Соболев ЛП-последовательности [4] используются для анализа математических моделей функционирования объектов. Структура ЛП-последовательностей позволяет строить сетки в n -мерном пространстве параметров исследуемых функций. Для

расчета точек ЛП-последовательностей использовалось программное обеспечение «Синтез МК»¹.

Пусть эффективность системы определяется несколькими критериями K_1, K_2, \dots, K_m , зависящими от параметров (1) системы:

$$K_1 = K_1(P_1, P_2, \dots, P_n), \dots, K_m = K_m(P_1, P_2, \dots, P_n).$$

Пусть G – m -мерное множество сочетаний критериев $\bar{K} = (K_1, K_2, \dots, K_m)$. Технические требования к системе сводятся к назначению допустимых интервалов для каждого из критериев K_j , которые образуют подмножество B в m -мерном пространстве критериев. Будем считать, что исследуемая система функционирует нормально, если $\bar{K} \in B$. В этом случае эффективность системы оценивается вероятностью выполнения требований по всем критериям работоспособности одновременно.

Если заданы величина и допуск критерия, в допустимом пространстве параметров может быть выделена компромиссная область $D_k \in D$, любая точка которой обеспечивает получение значения критерия в пределах его допуска. Нахождение параметров системы в области D_k гарантирует выполнение требований по критерию. Выход параметра или нескольких параметров за пределы области D_k приводит к отказу системы по выбранному критерию или критериям.

Все пробные точки пространства параметров, принадлежащие допустимому интервалу каждого критерия, сравнивают между собой. Для упрощения процедуры это может быть сделано путем сравнительного анализа номеров, а следовательно, значений параметров, входящих в допустимые интервалы критериев. Общие (для всех критериев) эффективные пробные точки характеризуют оптимальные значения параметров процесса.

Блок-схема алгоритма метода исследования пространства параметров при применении компьютерного моделирования показана на рисунке 1.

Покажем, как процедура многомерного синтеза реализована в решении конкретных научных задач. При проведении вычислительного эксперимента будут использованы как теоретические, так и экспериментальные математические модели. Следует отметить, что экспериментальные модели разработаны на основе результатов испытаний, выполненных по сеткам, составленным в соответствии с ЛП-последовательностями.

Основная часть

Разработка огнезащитно-огнетушащего состава, обладающего высокоэффективным воздействием на торф и древесину

Разработка рецептуры огнезащитно-огнетушащего состава (ОЗТС) на основе синтетических фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония, обладающего высокоэффективным воздействием на торф и древесину, сегодня очень актуальна [5]. Выбор концентрационного соотношения реагентов, обеспечивающего выполнение требований к показателям качества получаемого продукта, обуславливает постановку и решение задачи синтеза, относящейся к классу задач со многими критериями [6].

Установлено, что огнезащитные и огнетушащие свойства синтетических продуктов зависят от химического состава и соотношения концентраций реагентов. Для получения математической модели были проведены эксперименты в пределах диапазонов варьирования содержания этих компонентов в реакционной смеси. Сетка эксперимента была составлена на основе ЛП-последовательностей. При этом входными параметрами состава, влияющими на его целевые свойства, является содержание в конечном продукте фосфора (входной параметр P_1), бентонита (входной параметр P_2) и азота (входной параметр P_3).

¹ Компьютерный синтез допусков и номиналов параметров многокритериальных технических объектов и технологических процессов при их проектировании (Синтез МК): свид. № 940376 (РосАПО) / О.Н. Рябов, С.И. Марочкина, К.К. Кузьмич, О.В. Жилинский. – Дата регистр.: 12.09.1994.



Рисунок 1. – Блок-схема алгоритма метода исследования пространства параметров

Экспериментальная математическая модель была сформирована из двух полиномиальных уравнений для расчета эффективности ОЗТС по торфу (K_1) и по древесине (K_2). Для каждого свойства ОЗТС было протестировано 12 типов полиномов первой и второй степени с взаимодействием входных параметров состава в различных комбинациях. Сравнительный анализ свойств протестированных аппроксимаций позволил выбрать наиболее адекватные полиномы [7]:

$$K_1 = 126,747 - 3,258P_1 + 2,690P_2 - 36,644P_3 + 0,438P_1P_3 - 0,837P_2P_3 + 2,912P_3^2,$$

$$K_2 = -445,512 + 152,957P_1 + 16,908P_2 + 204,304P_3 - 68,294P_1P_3 - 5,295P_2P_3 - 12,446P_1^2 + 0,925P_1P_2P_3 - 0,541P_1^2P_2 + 5,627P_1^2P_3.$$

Специалистами по средствам огнезащиты и тушения горючих материалов были сформулированы следующие требования к свойствам рецептуры ОЗТС: потери массы образцов торфа $K_1 \leq 0,6\%$; потери массы образцов древесины $K_2 \leq 3,5\%$ при воспроизводимости

свойств ОЗТС, равной единице. Технически оптимальный вариант рецептуры ОЗТС и значения его выходных характеристик приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Технически оптимальный вариант рецептуры ОЗТС и значения его характеристик

№ п/п	Наименование и размерность параметра	Номинальное значение	Граница рассеивания	
			нижняя	верхняя
1	Содержание фосфора, г	6,14	6,06	6,22
2	Содержание бентонитовой глины, г	3,035	3,00	3,07
3	Содержание азота, г	6,42	6,32	6,51
4	Огнетушательная эффективность по отношению к торфу, %	0,390	0,206	0,588
5	Огнетушательная эффективность по отношению к древесине, %	2,886	2,494	3,522

С предложенной рецептурой ОЗТС проведены химические синтезы и определена ее эффективность по отношению к торфу и древесине. Полученные результаты показали совпадение с расчетом, полностью удовлетворившее специалистов.

Таким образом, решена задача компьютерного синтеза рецептуры ОЗТС по двум заданным характеристикам: потере массы огнезащищенного торфа и потере массы огнезащищенной древесины. Определено множество рецептов, одновременно обеспечивающих заданные эффективности ОЗТС по отношению к торфу и древесине, и среди них выбран технически оптимальный вариант с воспроизводимостью свойств ОЗТС, равной единице.

Прогнозирование времени тушения пожара в резервуаре и выбор оптимальных режимов при применении подслоного способа тушения

Большинство пожаров на территории объектов хранения и переработки нефти и нефтепродуктов происходит в вертикальных наземных резервуарах (далее – резервуар). Одним из наиболее эффективных и безопасных способов тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах является подслоный способ, при котором пена низкой кратности, получаемая из фторсодержащих пленкообразующих пенообразователей, подается по трубопроводу в нижнюю часть резервуара непосредственно в слой горючего. Схема движения пены в слое нефтепродукта приведена на рисунке 2.

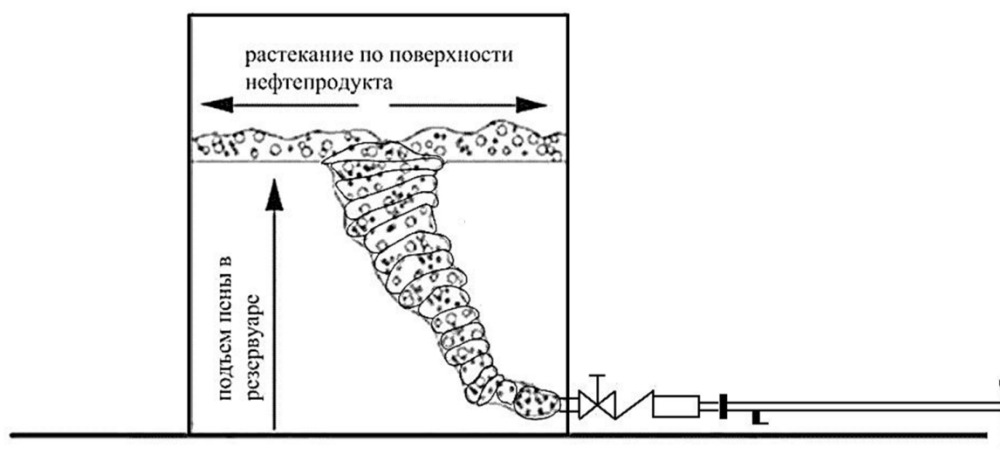


Рисунок 2. – Схема движения пены в слое нефтепродукта

Задача состоит в том, чтобы путем математического моделирования прогнозировать время при изменении условий тушения как объективно изменяющихся под действием факторов внешней среды, так и связанных с погрешностью работы технических средств тушения и нестабильностью состава и консистенции огнетушащего вещества.

Пространство варьируемых параметров определено на основании системного анализа факторов, влияющих на эффективность тушения, и представляет собой n -мерный объем, границами которого являются диапазоны изменения параметров тушения, входящих в математическую модель. Таких параметров назначено пять: плотность пены, толщина слоя пены, коэффициент разрушения пены, расход раствора, скорость растекания пены по поверхности нефтепродукта. Границы изменения параметров определены на основе анализа реально действующих факторов.

Теоретическая модель [8] движения пены связывает параметры и критерии – такие выходные параметры системы, которые приняты нами за показатели эффективности.

Суммируя время движения огнетушащей пены на этапах – подъем в резервуаре и растекание по поверхности нефтепродукта – получим полное время тушения. Следует отметить, что время подъема пены в слое горючего значительно меньше, чем время покрытия пеной поверхности нефтепродукта и накопления слоя пены, который позволит полностью изолировать поверхность горючего и прекратить горение. После достижения струей пены, поданной снизу, верхнего слоя нефтепродукта, процессы подъема пены в жидкости и растекания по поверхности идут параллельно и одновременно. Поэтому проводим моделирование по теоретической модели растекания пены по поверхности, а полное время тушения получим, добавив детерминированное время подъема пены, полученное экспериментально.

$$t_p = \frac{\rho_n h_n}{(1 + c \cdot v_n)(J - J_{кр})}, \quad (3)$$

где ρ_n – плотность пены, кг/м³; c – коэффициент разрушения пены; h_n – толщина слоя пены на поверхности, при котором горение прекращается, м; v_n – скорость движения пены по поверхности нефтепродукта в радиальном направлении, м/с; J – удельная интенсивность подачи пены, которая определяется как отношение расхода огнетушащего средства Q к площади горения (площадь поверхности нефтепродукта) S , $J = Q / S$; $J_{кр}$ – критическая интенсивность подачи пены, дм³/с.

Согласно рекомендациям [4] рассчитаны координаты зондирующих точек. Для заполнения пространства параметров выбрано 2048 зондирующих точек. Координаты каждой из них характеризуют мгновенное состояние системы при изменяющихся параметрах. По математической модели путем вычислительного эксперимента рассчитываем суммарное время растекания по поверхности для всех зондирующих точек. В результате вычислений получены ряды значений времени подъема пены и времени растекания пены по поверхности, каждый из которых состоит из 2048 компонентов. В таблице 2 приведены крайние значения рядов вычисленных критериев.

Таблица 2. – Крайние значения рядов критериев

Критерий	Обозначение критерия	Минимальное значение	Максимальное значение
Время подъема пены в резервуаре, с	K_1	5,5	22,1
Время растекания пены по поверхности нефтепродукта, с	K_2	9,2	261,0

Допустимые диапазоны изменения критериев назначаем в пределах от минимального значения, полученного при вычислительном эксперименте, до максимума, ограниченного значениями, выбранными с учетом результатов эксперимента и анализа научных источников (табл. 3).

Таблица 3. – Ограничения на критерии

Наименование критерия	Минимальное значение критерия	Максимальное значение критерия
Время подъема пены в резервуаре, с	5,5	20,0
Время растекания по поверхности нефтепродукта, с	9,2	35

Для определения оптимальных параметров, которые обеспечат выполнение требований по критериям с гарантированной вероятностью 100 %, решаем задачу путем отражения ограниченного пространства критериев в пространстве параметров. Такое «отражение» производим на основе вычислительного эксперимента также с использованием метода сеточного зондирования пространства параметров. В результате сформировано новое пространство параметров, которое обеспечит выполнение назначенных требований. При моделировании в ограниченном пространстве критериев установлено, что необходимо поддерживать значения управляемых параметров следующими:

- плотность пены – 219,0 кг/м³, т.е. кратность 4,57 (допустимый разброс 3,9–5,1);
- расход пены 20,4 дм³/с (допустимый разброс 18,5–21,6 дм³/с);
- оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения 52 мм (допустимый разброс 42–64 мм).

Предложенная методика определения оптимальных параметров тушения позволяет назначить допустимые интервалы изменения (допуски) управляемых параметров тушения (подачи пены) для выполнения требований по минимизации времени тушения.

Повышение работоспособности аварийно-спасательного инструмента путем оптимизации режущих свойств алмазных кругов

В практике аварийно-спасательных работ спасательные и пожарные формирования применяют специальный инструмент и средства малой механизации. К таким инструментам относится бензорез, назначением которого является вскрытие конструкций, разрушенных или поврежденных зданий и сооружений, а также выполнение технологических отверстий для проведения разведки, отвода воздуха, обеспечения связи и эвакуации пострадавших людей, находящихся в завалах и труднодоступных местах. Основным критерий при конструировании бензореа – фактор времени, т.е. скорость реза. На прочность закрепления алмазных зерен в связке влияют такие ее физико-механические свойства, как твердость, микротвердость, ударная вязкость и триботехнические свойства – коэффициент трения и износ. Легирование или модификация металлических связок алмазными наноконпонентами (ультрадисперсным алмазом – УДА) позволяет улучшить перечисленные свойства [9].

Следует отметить, что повышение значений механических характеристик связок режущих сегментов только позволяет прогнозировать улучшение эксплуатационных качеств всего круга в целом при работе без охлаждения (как это часто происходит при АСР) и с увеличенными скоростью резания и подачей. Требуется провести испытания экспериментальных образцов сегментов на модифицированной связке в реальных условиях эксплуатации [10]. Результаты этих испытаний могут быть использованы для построения математической модели процесса резания.

Назначены три изменяемых параметра: один технологический – концентрация модификатора в связке и два эксплуатационных – скорость резания и подача.

Область исследований представлена многомерным пространством параметров (табл. 4).

Таблица 4. – Пространство параметров

Управляемые параметры процесса резания (наименование и размерность)	Границы возможных изменений параметров	
	Нижняя граница	Верхняя граница
P_1 – концентрация УДА, добавляемого в связку, %	0,5	1,5
P_2 – окружная скорость круга, м/с	20,0	40,0
P_3 – подача, см	20,0	30,0

Программа эксперимента включает 8 опытов. Такой объем экспериментальной информации позволяет сформировать полиномиальное уравнение выше второго порядка для определения критериев: удельной производительности резания (K_1) и удельного расхода алмаза (K_2).

Выбраны модели для критериев, наиболее точно описывающие процесс:

$$K_1 = 344,662P_1 + 0,0961P_2 - 46,393P_3 - 2,172P_1^2 + 0,00619P_2^2 + 15,863P_3^2,$$

$$K_2 = 8618,896000 - 129,380900P_1 + 220,985900P_2 - 1996,198000P_3 + \\ + 0,009702P_1P_2 - 1,073320P_1P_3 + 2,109242P_1^2 - 2,241094P_2^2 + 115,296000P_3^2 - \\ - 0,009474P_1^3 + 0,000806P_2^3 - 2,059746P_3^3.$$

Таким образом, построена математическая модель, позволяющая прогнозировать и целенаправленно задавать требуемые эксплуатационные показатели отрезных кругов. Это сделано путем введения ограничений на критерии и определения оптимальных параметров в ограниченном пространстве критериев. Назначены диапазоны изменений критериев (табл. 5) и определены допустимые интервалы изменений режимов резания (табл. 6).

Таблица 5. – Ограничения на критерии

Наименование критерия	Минимальное значение критерия	Максимальное значение критерия
K_1 – удельная производительность резания, см ² /мин	500	600
K_2 – удельный расход алмаза, карат/м ²	0,6	0,7

Таблица 6. – Оптимальные значения параметров

Параметр	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра	Среднее значение параметра
P_1 – концентрация УДА, добавляемого в связку, %	0,59	0,75	0,67
P_2 – окружная скорость круга, м/с	26,3	31,4	28,7
P_3 – подача, см	227	269	245

Данные значения управляемых параметров обеспечивают заданные удельную производительность и удельный расход алмаза с вероятностью 100 % при учете разброса остальных параметров.

Оценка совокупного территориального риска на базе системного анализа чрезвычайных ситуаций и анализ соответствия технических средств для их ликвидации уровню совокупного риска

Безопасность людей в чрезвычайных ситуациях должна обеспечиваться в первую очередь снижением вероятности возникновения и уменьшением возможных последствий природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. При этом система защиты формируется на основе анализа вероятности возникновения, прогнозирования характера, масштаба и времени существования чрезвычайной ситуации, оценки возможных факторов риска, интенсивности формирования, проявления опасных факторов чрезвычайных ситуаций и т.д.

Наиболее годным для практического прогнозирования территориального риска оказался метод оценки рисков, предлагаемый нашими соседями из Польской Республики. Этот метод характеризуется системным подходом – учтены все возможные факторы угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на данной территории как техногенного, так и природного характера, причем в связи с плотностью застройки и количеством проживающего населения, что также влияет на серьезность последствий ЧС от этих факторов.

Однако авторы данного метода используют детерминированные оценки по каждому из факторов риска. Такой подход несколько снижает точность метода и не отражает сути оценки риска как вероятности возникновения ЧС. Для того чтобы учесть случайность и стохастичность возникновения ЧС, для каждого фактора должен быть назначен ранг (оценка) в виде интервала значений. Причем принято, что внутри этого интервала вероятность наступления ЧС распределена равномерно. Обобщенный территориальный риск определяют

методом статистического моделирования. В результате моделирования получен ряд (последовательность) значений критерия – обобщенного территориального риска.

В калькуляционном листе перечислены все основные факторы риска на территории города (например, столица Азербайджана – Баку). В их число включены: численность населения, тип застройки, горючесть строительных конструкции, высота застройки, промышленное предприятия, объекты с наличием опасных химически веществ, нефтепроводы и газопроводы, дороги, железные дороги, перевозка опасных веществ на транспорте (дорожный), перевозка опасных веществ на транспорте (железнодорожный), угроза затопления, аэродромы. Эти факторы являются параметрами многомерного пространства, в котором производится статистическое моделирование.

При заполнении калькуляционного листа было принято пять степеней угрозы: Z_I – очень маленькая угроза; Z_{II} – маленькая угроза; Z_{III} – средняя угроза; Z_{IV} – большая угроза; Z_V – очень большая угроза. Для каждого из параметров путем ранжирования в диапазоне от 1 до 5 определена степень угрозы. Причем ранг (степень) угрозы назначен не в детерминированных значениях (1, 2, 3 и т.д.), а в интервалах (0–1, 1–2, 1–4 и т.д.). Таким образом осуществляется переход от качественной оценки к количественной. Принято, что внутри интервала вероятность риска возникновения ЧС от этого фактора распределена равномерно.

Проведено зондирование многомерного пространства параметров пробными точками, каждая из которых характеризует определенное сочетание рангов риска всех параметров одновременно. В результате получена последовательность значений (256 точек) обобщенного критерия территориального риска в интервале от 6,0 до 374,0, т.е. максимальный территориальный риск для данного региона оценивается в 374 балла. Однако вероятность такого риска (по результатам моделирования) составляет всего 0,017 %.

С точки зрения обеспечения безопасности проживания на территории необходимо минимизировать показатель совокупного риска [11]. Интервал приемлемого совокупного риска был принят в диапазоне от 6,0 до 10,0 баллов. Для этого интервала обобщенного риска решена обратная задача – определено, в каких интервалах должна находиться степень угрозы (ранги параметров) для обеспечения уровня обобщенного риска в принятом минимальном интервале.

При анализе результатов моделирования выбирают параметры (факторы риска), наиболее влияющие на показатель совокупного риска, и определяют возможность управления степенью угрозы. Например, выявлено, что значимым параметром является такой фактор, как плотность застройки. Может быть рекомендовано учесть риск повышенной плотности застройки при проектировании новых районов города и реконструкции уже существующих. Если в качестве значимого параметра выступает фактор наличия дорог, по которым перевозят опасные грузы, – это необходимо учесть при планировании маршрутов их перевозки. Здесь уместна рекомендация о вынесении таких маршрутов за городскую черту или в районы с меньшей плотностью жилой застройки.

Заключение

Все приведенные задачи решены с использованием стохастических подходов, учитывающих объективно существующую случайность входных параметров, влекущую случайность характеристик. При выборе номиналов входных параметров учитывали влияние на них дестабилизирующих факторов. В процессе решения определены допустимые размеры полей рассеивания входных параметров, что обеспечивает выполнение требований по воспроизводимости свойств. В результате решения многокритериальной задачи синтеза систем с заданными свойствами устанавливаются номинальные значения входных параметров и допустимые границы их рассеивания.

Решена задача компьютерного синтеза рецептуры ОЗТС по двум заданным характеристикам: потере массы огнезащищенного торфа и потере массы огнезащищенной древесины. Определено множество рецептов, обеспечивающих заданные эффективности ОЗТС по

отношению к торфу и древесине, и среди них выбран технически оптимальный вариант с воспроизводимостью свойств ОЗТС, равной единице. Применение метода многомерного компьютерного синтеза обеспечило корректную системную интерпретацию результатов огневых испытаний, а также сокращение временных, материальных и трудовых затрат на разработку и внедрение варианта рецептуры ОЗТС, отличающегося надежной воспроизводимостью заданных свойств.

На основании теоретической модели процесса движения огнетушащей пены в слое горючей жидкости с учетом разработанного на основе системного анализа пространства изменяемых параметров выполнено прогнозирование времени тушения пожара в резервуаре подслоиным методом. Решена задача оптимизации режимов тушения (выбора оптимальных параметров) по критерию минимизации времени тушения. Оптимальные параметры тушения (плотность пены, расход пены, оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения) не являются детерминированными величинами, должны поддерживаться в пределах определенного допуска, что обеспечивает возможность технической реализации требований по минимизации времени тушения пожара в резервуаре.

Разработана сетка эксперимента и экспериментальная модель процесса резания алмазным режущим сегментным кругом с модифицированной ультрадисперсным алмазом-связкой. Решена задача оптимизации режимов резания и концентрации модифицирующей добавки (ультрадисперсного алмаза) в связке режущего сегмента по критериям максимальной удельной производительности и наибольшей стойкости режущего инструмента при проведении аварийно-спасательных работ.

С точки зрения обеспечения безопасности проживания на территории необходимо минимизировать показатель совокупного риска. Для заданного интервала обобщенного риска определено, в каких интервалах должна находиться степень угрозы (ранги параметров) для обеспечения уровня обобщенного риска в принятом минимальном интервале. При исследовании структуры пространства параметров получена информация о механизме обеспечения требуемого уровня значений критерия. Выявлены наиболее значимые факторы риска возникновения ЧС. Результат проанализирован с точки зрения разработки мер и средств снижения рисков по этим факторам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поцелуев, А.В. Статистический анализ и синтез сложных динамических систем / А.В. Поцелуев. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
2. Смиловенко, О.О. Разработка метода оценки качества функционирования технической системы / О.О. Смиловенко // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. науч. тр. междунар. научн.-техн. конф., Донецк, 9–13 сент. 2002 г. – Донецк, 2002. – С. 112–117.
3. Статников, И.Н. Планирование вычислительного эксперимента в задачах многокритериального моделирования динамических систем / И.Н. Статников, Г.И. Фирсов // Компьютерное моделирование 2005: сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. – С. 104–112.
4. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
5. Богданова, В.В. Регулирование физико-химических свойств композиций на основе фосфатов металлов-аммония, проявляющих огнезащитный и огнетушащий эффект / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Свиридовские чтения: сб. ст. Вып. 7. – Минск: БГУ, 2011. – С. 21–27.
6. Витязь, П.А. Фундаментальные основы компьютерного проектирования материалов с заданными свойствами / П.А. Витязь, О.В. Жилинский, Т.В. Лактюшина // Сб. материалов междунар. конф. по физической мезомеханике, компьютерному проектированию и разработке новых материалов, Томск, 19–22 сент. 2006 г. – Томск, 2006. – С. 82–85.
7. Богданова, В.В. Регулирование эффективности синтетических средств огнезащиты и тушения природных горючих материалов методом многомерного компьютерного синтеза / В.В. Богданова [и др.] // Вестник БГУ. Серия 2. Химия. Биология. География. – 2015. – № 1. – С. 12–18.

8. Малашенко, С.М. Математическая модель движения пены при подслоном тушении нефтепродуктов / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 27–31.
9. Рустамов, А.П. Влияние модифицирующей добавки на механические свойства режущих элементов аварийно-спасательного инструмента / А.П. Рустамов [и др.] // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – Т. 32. – С. 220–224.
10. Рустамов, А.П. Экспериментальная модель процесса резания при проведении аварийно-спасательных работ алмазными кругами на модифицированной связке / А.П. Рустамов, О.О. Смиловенко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 49–54.
11. Шойгу, С.К. Теоретические предпосылки оценки опасности территорий и рисков чрезвычайных ситуаций / С.К. Шойгу, В.Р. Болов // Анализ и оценка природных рисков в строительстве: материалы междунар. конф. – М.: ПНИИС, 1997. – С. 74–75.

**Применение метода многокритериального синтеза в решении задач
по обеспечению пожарной безопасности**
**Application of the method of multi-criterial synthesis
in solving problems to ensure fire safety**

Смиловенко Ольга Олеговна

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, профессор
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: smilovenkoolga@tut.by
ORCID: 0000-0003-1612-9573

Olga O. Smilovenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: smilovenkoolga@tut.by
ORCID: 0000-0003-1612-9573

Богданова Валентина Владимировна

доктор химических наук, профессор
Учреждение Белорусского государственного
университета «Научно-исследовательский
институт физико-химических проблем»,
лаборатория огнетушащих материалов,
заведующий лабораторией
Адрес: ул. Ленинградская, 14,
220006, г. Минск, Беларусь
e-mail: bogdanova@bsu.by
ORCID: 0000-0002-8557-9925

Valentina V. Bogdanova

Grand PhD in Chemistry Sciences, Professor
Research Institute for Physical Chemical
Problems of the Belarusian State University,
Laboratory of Fire Extinguishing Materials,
Materials, Head of the Laboratory
Address: Leningradskaya str., 14,
220006, Minsk, Belarus
e-mail: bogdanova@bsu.by
ORCID: 0000-0002-8557-9925

Малашенко Сергей Михайлович

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики
Беларусь, отдел научно-технической
информации и маркетинга, начальник отдела
Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь
e-mail: 3337044@gmail.com

Sergey M. Malashenko

Research Institute for Fire Safety and Problems
of Emergencies of the Ministry of Emergency
Situations of the Republic of Belarus,
Department of Scientific and Technical
Information and Marketing,
Head of Department
Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus
e-mail: 3337044@gmail.com

Полуян Александр Иванович

Объединенный институт машиностроения
НАН Беларуси, лаборатория наноструктурных
и сверхтвердых материалов, старший научный
сотрудник
Адрес: ул. Академическая, 12,
220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: APoluyun.1954@tut.by

Alexander I. Poluyan

Joint Institute of Mechanical Engineering
of the NAS of Belarus, Laboratory
of Nanostructured and Superhard Materials,
Leading Researcher
Address: Akademicheskaya str., 12,
220072, Minsk, Belarus
e-mail: APoluyun.1954@tut.by

Миргуламлы Фуад Октай оглы

Министерство по чрезвычайным ситуациям
Азербайджанской Республики, Центр
управления в кризисных ситуациях,
старший офицер
Адрес: ул. Микаила Мушвига, 501,
AZ1073, г. Баку, Азербайджан

Fuad O. Mirgulamly

Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Azerbaijan,
Crisis Management Center, Senior Officer
Address: Mikail Mushviga str., 501,
AZ1073, Baku, Azerbaijan

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.366>

APPLICATION OF THE METHOD OF MULTI-CRITERIAL SYNTHESIS IN SOLVING PROBLEMS TO ENSURE FIRE SAFETY

Smilovenko O.O., Bogdanova V.V., Malashenko S.M., Poluyan A.I., Mirgulamy F.O.

Purpose. Increasing the efficiency of scientific research and solving applied problems in the field of fire safety by introducing a computational computer experiment – the method of multi-criteria synthesis to reduce the time, material and labor costs for the experiment and provide correct systemic interpretation of test results.

Methods. To solve the problems of fire safety, the method of multi-criteria synthesis was applied. It makes it possible to predict the behavior of the system, taking into account the stochasticity of its parameters and the choice of rational characteristics that provide the required output parameters. The search for the optimal set of parameters of a technical object involves the determination of the calculated values of the criteria by the values of the calculated points, which are located in the multidimensional space of variable parameters. In this case, the space of parameters is transformed into the space of criteria, taking into account the accepted restrictions.

Findings. The article provides examples of the application of the method of multi-criteria synthesis in solving problems of ensuring fire safety. The formulation of a fire retardant and fire extinguishing composition based on synthetic phosphates of bivalent and trivalent ammonium metals, being highly effective in impact on peat and wood, was determined. The using of an optimization-simulation approach made it possible to predict the time of extinguishing a fire in a tank and to select the optimal parameters of extinguishing by supply of low expansion foam directly into the fuel layer. On the basis of multi-criteria computer synthesis, the concentration of the modifying additive in the set of diamond segments and the cutting conditions for the tool during emergency rescue operations was determined. The way of assessing the aggregate territorial risk by the method of statistical modeling was developed which created a framework for risk management, including legal, economic regulation and compulsory insurance.

Application field of research. The presented research results are aimed at improving the fire safety of various objects.

Keywords: parameter space, LP-sequence, fire retardant and fire extinguishing agent, sub-layer extinguishing method, concrete saw, modified set, territorial risk.

(The date of submitting: January 14, 2021)

REFERENCES

1. Potseluev A.V. *Statisticheskiy analiz i sintez slozhnykh dinamicheskikh sistem [Statistical analysis and synthesis of complex dynamic systems]*. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 208 p. (rus)
2. Smilovenko O.O. Razrabotka metoda otsenki kachestva funktsionirovaniya tekhnicheskoy sistemy [Development of a method for assessing the quality of the technical system functioning]. *Proc. Intern. scientific-technical conf. «Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka», Donetsk, September 9–13, 2002*. Pp. 112–117. (rus)
3. Statnikov I.N., Firsov G.I. Planirovanie vychislitel'nogo eksperimenta v zadachakh mnogokriterial'nogo modelirovaniya dinamicheskikh sistem [Planning of a computational experiment in problems of multi-criteria modeling of dynamic systems]. *Proc. VI Intern. scientific-technical conf. «Komp'yuternoe modelirovanie 2005»*. St. Petersburg State Polytechnic University, 2005. Pp. 104–112. (rus)
4. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami [Selection of optimal parameters in problems with many criteria]*. Moscow: Drofa, 2006. 175 p. (rus)
5. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Regulyrovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv kompozitsiy na osnove fosfatov metallov-ammoniya, proyavlyayushchikh ogneshchitnyy i ogetushashchiy effekt [Regulation of the physico-chemical properties of compositions based on ammonium-metal phosphates that exhibit a fire-retardant and fire-extinguishing effect]. *Sviridovskie chteniya*, 2011. Iss. 7. Pp. 21–27. (rus). URI: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/24996>.

6. Vityaz' P.A., Zhilinskiy O.V., Laktyushina T.V. Fundamental'nye osnovy komp'yuternogo proektirovaniya materialov s zadannymi svoystvami [Fundamental principles of computer-aided design of materials with specified properties]. *Proc. Intern. Conf. on Physical Mesomechanics, Computer Design and Development of New Materials, Tomsk, September 19–22, 2006*. Tomsk, 2006. Pp. 82–85. (rus)
7. Bogdanova V.V., Laktiushina T.V., Dobrego K.V., Jilinsky O.V., Kobets O.I., Laktiushin A.N. Regulirovanie effektivnosti sinteticheskikh sredstv ognezashchity i tusheniya prirodnykh goryuchikh materialov metodom mnogomernogo komp'yuternogo sinteza [Regulation of efficiency of synthetic agents for fire protection and extinguishing of natural combustible materials by method of the multidimensional computer synthesis]. *Vestnik BGU. Ser. 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 2015. No. 1. Pp. 12–18. (rus). URI: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/141843>.
8. Malashenko S.M., Smilovenko O.O. Matematicheskaya model' dvizheniya peny pri podsloynom tushenii nefteproduktov [Mathematical model of foam movement during sublayer extinguishing of petroleum products]. *Proc. XII Intern. scientific-technical conf. «Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii»*. Kursk, 2015. Pp. 27–31. (rus)
9. Rustamov A.P., Smilovenko O.O., Losik S.A., Kurlovich I.G. Vliyanie modifitsiruyushchey dobavki na mekhanicheskie svoystva rezhushchikh elementov avariyno-spatatel'nogo instrumenta [The effect of a modifying additive on the mechanical properties of the cutting elements of an emergency rescue tool]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2017. Vol. 32. Pp. 220–224. (rus)
10. Rustamov A.P., Smilovenko O.O. Eksperimental'naya model' protsessa rezaniya pri provedenii avariyno-spatatel'nykh rabot almaznymi krugami na modifitsirovannoy svyazke [Experimental model of the cutting process in the conduct of rescue work in the diamond circles on a modified bundle]. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, 2017. No. 3. Pp. 49–54, available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29822351_50427987.pdf (accessed: January 10, 2021). (rus)
11. Shoygu S.K., Bolov V.R. Teoreticheskie predposylki otsenki opasnosti territoriy i riskov chrezvychaynykh situatsiy [Theoretical prerequisites for assessing the danger of territories and the risks of emergency situations]. *Proc. Intern. conf. «Analiz i otsenka prirodnykh riskov v stroitel'stve»*. Moscow: Industrial and Research Institute for Engineering Research in Construction, 1997. Pp. 74–75. (rus)

**ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
статей для публикации в научном журнале
«Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси»**

1. Направляемые в Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси статьи должны представлять результаты научных исследований и испытаний, описания технических устройств и программно-информационных продуктов, проблемные обзоры, краткие сообщения, комментарии к нормативным техническим документам, справочные материалы и т.п.

2. Объем научной статьи, учитываемой в качестве публикации по теме диссертации, должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.). В этот объем входят таблицы, фотографии, графики, рисунки и список литературы.

3. Статья предоставляется в двух экземплярах. Второй экземпляр статьи должен быть постранично пронумерован и подписан всеми авторами. К рукописи статьи прилагаются: а) рекомендация кафедры, научной лаборатории или учреждения образования; б) экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати; в) подписанный лицензионный договор на право опубликования статьи (заключается с каждым автором отдельно и печатается с двух сторон на одном листе). Форма договора размещена на сайте журнала: <https://journals.ucp.by>.

4. Электронная версия статьи, подготовленная в текстовом редакторе Microsoft Word, предоставляется на стандартных носителях либо по электронной почте на адрес: vestnik@ucp.by. Рисунки прилагаются дополнительно как отдельные файлы графического формата.

5. Материал статьи излагается в следующем порядке:

1) информация об авторах (на отдельном листе): фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название, адрес с указанием индекса и страны), должность, рабочий телефон, e-mail (обязательно), имеющиеся персональные идентификационные номера в наукометрических базах (при этом обязательным является указание SPIN-кода РИНЦ, идентификатора ORCID). Если авторов несколько, указывается корреспондент по вопросам содержания статьи;

2) номер УДК (универсальная десятичная классификация);

3) название статьи;

4) аннотация (не менее 200 и не более 300 слов) является основным источником информации о статье, может публиковаться самостоятельно в реферативных журналах и информационных системах в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Аннотация должна раскрывать: *цель* (определяется круг рассматриваемых вопросов, обозначаются цель и задачи работы, объект и предмет исследования); *методы* (излагаются подходы, методы и технологии исследования); *результаты* (приводятся наиболее значимые теоретические положения, экспериментальные данные, подчеркивается их актуальность и новизна); *область применения исследований* (описываются возможности использования полученных результатов, отмечается их научно-практическая значимость);

5) ключевые слова и словосочетания статьи (не более 12 слов);

6) дата поступления статьи (месяц и год);

7) введение; основная часть статьи; заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

8) указание на источник финансирования (если статья подготовлена в рамках выполнения гранта научных исследований);

9) список цитированной литературы. Для каждого источника указывается (при наличии) его DOI. Эксперты международных наукометрических баз данных негативно воспринимают включение в список цитированной литературы источников локального характера (постановлений, законов, инструкций, неопубликованных отчетов, диссертаций, авторефератов и т.п.), электронных материалов и ресурсов сети Интернет. Поэтому ссылки на такие источники рекомендуем оформлять в виде постраничных сносок со сквозной нумерацией.

На отдельной странице на английском языке приводятся следующие сведения: информация об авторах; название статьи; аннотация, обязательно включающая следующие пункты: purpose, methods, findings, application field of research; ключевые слова и словосочетания; транслитерация на латинице и перевод на английский язык списка цитированной литературы.

Для русскоязычных источников в транслитерации на латинице приводятся фамилия, имя, отчество авторов, названия статей, журналов (если нет англоязычного названия), материалов конференций, издательств и на английском языке – названия публикаций и выходные сведения (город, том и номер издания, страницы). Для транслитерации на латиницу следует применять систему транслитерации BGN, при этом можно использовать интернет-ресурсы, например сайт: <http://translit.net>.

Основные требования к оформлению статей, предоставляемых в научный журнал, и пример оформления статьи размещены на сайте издания: <https://journals.ucp.by>.

6. Содержание разделов статьи, таблицы, рисунки, цитированная литература должны отвечать требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 7.1-2003 и Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением ВАК Беларуси от 28 февраля 2014 г. № 3.

7. Редакция оставляет за собой право на изменения, не искажающие основного содержания статьи. Рукописи отклоненных статей авторам не возвращаются.

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
МИНИСТЕРСТВА ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»**

Факультет заочного обучения

Проводит:

Подготовку по специальностям:

1-94 01 01 «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» с присвоением квалификации «Инженер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций». Форма обучения – заочная. Полный срок обучения – 5 лет, сокращенный – 3 года.

По окончании обучения выдается диплом о высшем образовании государственного образца.

Факультет безопасности жизнедеятельности

Проводит:

Переподготовку лиц с высшим образованием по специальностям:

1-94 02 73 «Ликвидация чрезвычайных ситуаций и гражданская оборона» с присвоением квалификации «Инженер по безопасности». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

1-94 02 72 «Инжиниринг безопасности объектов строительства» с присвоением квалификации «Инженер по безопасности». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

1-94 02 71 «Промышленная безопасность» с присвоением квалификации «Инженер по промышленной безопасности». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

1-59 01 06 «Охрана труда в отраслях непромышленной сферы» с присвоением квалификации «Специалист по охране труда». Срок обучения – 19 месяцев. Форма обучения – заочная (четыре сессии).

По окончании обучения выдается диплом государственного образца о переподготовке на уровне высшего образования.

Повышение квалификации для руководящих работников и специалистов, имеющих высшее или среднее специальное образование, по образовательным программам:

- «Экспертная деятельность»;
- «Экспертная деятельность» для работников проектных организаций;
- «Экспертная деятельность» для работников органов и подразделений по ЧС;
- «Пожарная безопасность. Предупреждение чрезвычайных ситуаций. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны»;
- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики и противодымной защиты» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Проектирование систем пожарной автоматики и противодымной защиты» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Лица, осуществляющие капитальный ремонт (перезарядку) огнетушителей, торговлю средствами противопожарной защиты» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (инженерно-технические работники)» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах Республики Беларусь» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах с массовым пребыванием людей» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Промышленная безопасность» (заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Организация и обеспечение промышленной безопасности предприятий химической промышленности, хранения и переработки зерна, аммиачных и хлораторных установок» (заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях) (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Радиационная безопасность, радиационный контроль» (при использовании источников ионизирующего излучения, в целях отличных от медицинских) (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Основы обеспечения ядерной и радиационной безопасности» (для лиц, участвующих в обеспечении ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации объектов использования атомной энергии) (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Охрана труда» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);

- «Противодействие коррупции» (заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Защита от чрезвычайных ситуаций» (заочная (дистанционная) форма обучения).

Обучающие курсы для лиц, имеющих профессионально-техническое и общее среднее образование, по образовательным программам:

- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики и противодымной защиты» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (исполнители работ)» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Защита от чрезвычайных ситуаций» (заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах с массовым пребыванием людей»;
- «Пожарно-технический минимум».

Семинары по образовательным программам:

- «Оказание первой помощи пострадавшим в ЧС»;
- «Расчет предела огнестойкости (железобетонных, металлических, деревянных, каменных строительных конструкций»;
- «Расчет времени эвакуации людей при пожаре»;
- «Расчет температурного режима пожара в помещении»;
- «Расчет величины противопожарных разрывов между зданиями, сооружениями и наружными установками»;
- «Расчет площади легкосбрасываемых конструкций»;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Порядок проектирования пассивной противопожарной защиты зданий различного назначения»;
- «Оптимизация затрат на обеспечение требований пожарной безопасности на основании расчетных методов»;
- «Порядок подготовки организации к пожарно-техническому обследованию»;
- «Охрана труда в организациях непромышленной сферы».

Подготовку лиц к поступлению в учреждения образования Республики Беларусь по учебным предметам: математика, физика, русский язык, русский язык как иностранный, белорусский язык, английский язык, немецкий язык, французский язык, история, обществоведение, химия (очная/заочная (дистанционная) форма обучения).

Обучение проводит профессорско-преподавательский состав университета и ведущие специалисты Республики Беларусь в области пожарной и промышленной безопасности.

Наш адрес: 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25,
ФЗО: тел/факс: (017) 340-71-89,
ФБЖ: тел.: (017) 340-69-55, факс: (017) 340-35-58, e-mail: fpipk@ucp.by.

Дополнительная информация размещена на сайте университета: <http://ucp.by>
в разделе «Повышение квалификации».

Научный журнал

Вестник
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси
Том 5, № 3, 2021

Подписано в печать 13.08.2021.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 13,83. Уч.-изд. л. 13,08.
Тираж 110 экз. Заказ 068-2021.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/259 от 14.10.2016.
Ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.