МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи

M

Юрьев Ян Игоревич

ОГНЕСТОЙКОСТЬ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ

Специальность: 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность» (технические науки, отрасль строительство)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, доцент Швырков Сергей Александрович

Москва - 2018

оглавление

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН
РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ
1.1 Анализ нормативных требований к огнестойкости ограждающих стен
резервуарных парков
1.2 Анализ температурных режимов пожаров для определения
огнестойкости строительных конструкций
1.3 Особенности возникновения и развития пожаров проливов горючих
жидкостей при разрушениях резервуаров
1.4 Температурно-временная зависимость для определения огнестойкости
ограждающих стен резервуарных парков
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ БЕТОНОВ
В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА
2.1 Исследование теплотехнических характеристик образцов бетонов
2.2 Исследование прочностных характеристик образцов бетонов
ГЛАВА З ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГРЕВА ОБРАЗЦОВ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ
УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА
3.1 Численное моделирование процесса прогрева образцов бетонов
3.2 Экспериментальное исследование процесса прогрева образцов бетонов
3.3 Оценка погрешностей измерений температуры в контрольных точках
образцов бетонов
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯЖЕЛОГО, ТОРКРЕТ
И ФИБРОТОРКРЕТ БЕТОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ
ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
Приложение А РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	
ДАННЫХ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЛОТНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ,	
УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	
ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БЕТОНОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	126
Приложение Б РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	
ПРОГРЕВА ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ	
УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА	139
Приложение В АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ	149

введение

Актуальность темы исследования. С целью предупреждения каскадного и катастрофического развития аварий, обусловленных проливами нефти или нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных цилиндрических резервуаров (PBC), в соответствии с требованиями п. 5 ст. 70 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1], в резервуарных парках складов нефти и нефтепродуктов следует предусматривать дополнительные мероприятия.

Непосредственно требования пожарной безопасности к таким мероприятиям установлены ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности» [2]. Так, по периметру отдельно стоящего РВС или каждой группы наземных РВС необходимо предусматривать замкнутое ограждение, в качестве которого могут использоваться ограждающая стена (выполненное из строительных материалов ограждение, предназначенное для ограничения площади пролива жидкости) или ограждающая стена с волноотражающим козырьком (выполненное из строительных материалов ограждение, рассчитанное на гидродинамическое воздействие и полное удержание волны жидкости, образующейся при разрушении РВС). Такие ограждения должны быть сплошными по периметру, выполняться из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее *E* 150.

В соответствии с нормативно принятой терминологией [3] под пределом огнестойкости строительной конструкции (СК) понимается промежуток времени от начала огневого испытания при стандартном температурном режиме пожара (СТРП) [3, 4] до наступления одного из нормированных для данной СК предельных состояний по огнестойкости [1]. В связи с этим, возникает вопрос о корректности применения для определения предела огнестойкости рассматриваемых ограждающих стен стандартного метода испытаний, так как температурный режим пожара пролива нефти или нефтепродукта при авариях PBC имеет ряд существенных отличий от СТРП [5–30]:

 пожарная нагрузка (нефть, нефтепродукты) с максимальной среднеповерхностной температурой пламени 1200 °С;

 – быстрый рост температуры пожара за счет сгорания большого количества пожарной нагрузки и поддержание ее до полного выгорания пожарной нагрузки;

 – пожар пролива горючей жидкости на открытой местности (в границах ограждения) с постоянным и неограниченным доступом кислорода;

 непосредственное воздействие пламени пожара пролива горючей жидкости на ограждающую стену.

При этом важно отметить, что в мировой практике при определении предела огнестойкости СК, используемых, в частности, при строительстве объектов нефтехимического производства, туннелей, морских буровых платформ и других ответственных сооружений производственных объектов, широко применяются температурные режимы пожаров [31–44], существенно отличающиеся от СТРП.

Кроме этого, все большее применение для обустройства, в том числе и противопожарных преград, находят новые виды бетонов, в частности, торкрет бетон (ТБ) и фиброторкрет бетон (ФТБ). Это обусловлено тем, что благодаря особенностям технологии изготовления СК из таких видов бетонов, в отличие от традиционного железобетона, они способны на порядок успешнее работать на растяжение и изгиб, а также ударные нагрузки [45–52], что особенно важно при проектировании ограждающих стен с волноотражающим козырьком. Однако вопросам огнестойкости СК из ТБ и ФТБ в условиях воздействия высоких температур пожара до настоящего времени уделено недостаточно внимания.

Таким образом, для возможности определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, проектируемых как на основе традиционного тяжелого бетона (Б), так и в перспективе из ТБ или ФТБ, необходимо проведение дальнейших исследований по изучению устойчивости выполненных на их основе СК в условиях воздействия «реального» пожара пролива нефти или нефтепродукта при авариях РВС, что и определяет актуальность темы исследования.

5

Степень разработанности темы исследования. Настоящая работа является продолжением ряда исследований, выполненных на кафедре пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России (С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.В. Воробьев, С.В. Батманов) и посвященных непосредственно разработке различных вариантов ограждений для резервуарных парков, что и нашло отражение в ГОСТ Р 53324-2009 [2]. Однако в рамках этих исследований вопросы огнестойкости ограждений до настоящего времени не рассматривались.

Также важно отметить, что несмотря на имеющееся большое количество как отечественных, так и зарубежных работ, посвященных разработке основ и принципов расчета СК на огнестойкость, а также результатов экспериментальных исследований в этой области (М.Я. Ройтман, В.М. Ройтман, И.Г. Романенков, Н.А. Стрельчук, А.И. Яковлев, В.А. Пчелинцев, В.П. Бушев, К.С. Молчадский, В.Л. Страхов, А.Ф. Милованов, Н.Ф. Давыдкин, К.Д. Некрасов, В.В. Жуков, В.И. Голованов, А.А. Гвоздев, Н.А. Ильин, Ю.В. Соломонов и др. [23, 53–70]; *В. Bartnelety, J. Kruppa, S. Thelandersson, T.Z. Harmathy, H.L. Malhotra, P.C. Tatnall, К. Kordina* [71–76] и др.), вопросам определения фактического предела огнестой-кости СК в условиях отличных от СТРП также уделено недостаточно внимания. При этом для таких видов бетонов как ТБ и ФТБ данные по их устойчивости к воздействию пожара пролива нефти или нефтепродукта в литературных источниках практически отсутствуют.

Таким образом **целью работы** являлась разработка рекомендаций по определению теплотехнических и прочностных характеристик Б, ТБ и ФТБ для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков. Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

 обоснование углеводородного режима пожара для определения огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков;

 – экспериментальное определение теплотехнических и прочностных параметров образцов бетонов в условиях углеводородного режима пожара;

 – численное моделирование и экспериментальное определение прогрева образцов бетонов в условиях углеводородного режима пожара; – разработка рекомендаций по определению теплотехнических и прочностных характеристик Б, ТБ и ФТБ для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков.

Объектом исследования являлся процесс воздействия пламени пожара пролива нефтепродукта на монолитную железобетонную ограждающую стену резервуарного парка. В качестве **предмета исследования** рассматривалась огнестойкость ограждающей стены из различных видов бетона.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснован углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости при разрушении PBC – *hydrocarbon curve oil spill (HCOS)*, необходимый для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков.

2. Получены эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS* (от 20 до 1200 °C).

3. Получены экспериментальные данные по кубической и призменной прочности образцов на основе Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*.

4. Разработаны номограммы для определения температуры в слое конструкции ограждающей стены на основе Б, ТБ и ФТБ толщиной от 400 до 1000 мм при одностороннем воздействии *HCOS* до 600 мин.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных при ее выполнении результатов теоретических и экспериментальных исследований при разработке конструкций ограждающих стен резервуарных парков на основе Б, ТБ и ФТБ с необходимым пределом огнестойкости, а также нормативных положений для создания правил обеспечения пожарной безопасности при строительстве и эксплуатации объектов с резервуарными парками хранения нефти и нефтепродуктов в РВС.

Методология и методы исследования.

Основу экспериментальных исследований теплотехнических параметров бетонов составляли методы синхронного термического анализа и лазерной вспышки, а их прочностных характеристик – стандартные методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Основу теоретических исследований составляли методы теории теплообмена, теории вероятностей и математической статистики, выявления закономерностей, описания, обобщения. Результаты численного моделирования процесса прогрева бетонных образцов в условиях углеводородного режима пожара подтверждены результатами огневых испытаний с использованием современных поверенных приборов и оборудования.

Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные, правовые и нормативные источники, материалы расследования аварий и пожаров при разрушениях РВС с нефтью и нефтепродуктами, а также научно-исследовательские работы в области оценки огнестойкости СК.

Положения, выносимые на защиту:

углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости при разрушении PBC, необходимый для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков;

– эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров
Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*;

– экспериментальные данные по кубической и призменной прочности образцов на основе Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*;

– номограммы для определения температуры в слое конструкции ограждающей стены на основе Б, ТБ и ФТБ толщиной от 400 до 1000 мм при одностороннем воздействии *HCOS* до 600 мин.

Степень достоверности полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается: обоснованностью выбора параметров и критериев, позволяющих сравнивать теоретические и экспериментальные данные; соответствием методик проведения экспериментальных исследований реальным условиям воздействия углеводородного режима пожара на ограждающие стены; использованием аттестованной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения и обработки экспериментальных данных; внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

Материалы диссертации реализованы:

– при разработке проектной документации на строительство ограждающей стены с волноотражающим козырьком для резервуарного парка мазутного хозяйства ТЭЦ-11 в г. Москве. М.: ООО «Институт «Мосинжпроект», 2018 г.;

– при разработке проектной документации на объекты капитального строительства с использованием торкрет и фиброторкрет бетона по технологии «ГрантСтрой». Ставрополь: ЗАО НППСО «ГрантСтрой», 2018 г.;

в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре».
М.: Академия ГПС МЧС России, 2018 г.

Основные результаты работы доложены на: 6-й Научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2011); Научно-практической конференции «Совершенствование противопожарной защиты производственных объектов с повышенной пожарной опасностью» (г. Екатеринбург, Уральский институт ГПС МЧС России, 2012); Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов: «Проблемы техносферной безопасности – 2012» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2012); 25-й Международной научно-практической конференции «Системы безопасности – 2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); 4-й Всероссийской научно-практической конференции, посвященной году гражданской обороны: «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Содержание работы изложено на 152 страницах текста, включает в себя 42 таблицы, 66 рисунков, список литературы из 140 наименований.

9

ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ

1.1 Анализ нормативных требований к огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков

В соответствии с требованиями п. 5 ст. 70 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] при размещении резервуарных парков нефти и нефтепродуктов на площадках, имеющих более высокие отметки по сравнению с отметками территорий соседних населенных пунктов, организаций и путей железных дорог общей сети, расположенных на расстоянии до 200 м от резервуарного парка, а также при размещении складов нефти и нефтепродуктов у берегов рек на расстоянии 200 и менее метров от уреза воды следует предусматривать дополнительные мероприятия, исключающие при аварии РВС возможность разлива нефти и нефтепродуктов на территории населенных пунктов, организаций, на пути железных дорог общей сети или в водоем.

Непосредственно требования пожарной безопасности к таким дополнительным мероприятиям установлены ГОСТ Р 53324-2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности» [2]. Так, по периметру отдельно стоящего РВС или каждой группы наземных РВС необходимо предусматривать замкнутое ограждение, в качестве которого могут использоваться ограждающая стена (выполненное ИЗ строительных материалов ограждение, предназначенное для ограничения площади пролива жидкости), ограждающая стена с волноотражающим козырьком (выполненное из строительных материалов ограждение, рассчитанное на гидродинамическое воздействие и полное удержание волны жидкости, образующейся при разрушении РВС) или дополнительная защитная стена, устраиваемая на определенном расстоянии от нормативного обвалования (ограждения).

Следует отметить, что в основу разработки рассматриваемых дополнительных мероприятий, направленных на предупреждение каскадного и катастрофического развития аварий в резервуарных парках, обусловленных проливом нефти или нефтепродукта при полном разрушении PBC, положены результаты многолетних научных исследований, выполненных на кафедре пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России [5–11, 13, 20]. На рисунках 1.1 и 1.2 показаны соответственно принципиальная схема ограждающей стены с волноотражающим козырьком и расчетная схема для обустройства дополнительной защитной стены.



Рисунок 1.2 – Расчетная схема дополнительной защитной стены: D_p – диаметр резервуара; H_p – высота резервуара; h_{ct} – высота дополнительной защитной вертикальной стены; a – высота ограждения; L – расстояние от резервуара до ограждения; L_B – расстояние от ограждения до дополнительной защитной стены

Методы определения геометрических параметров рассматриваемых защитных стен приведены в ГОСТ Р 53324-2009 [2], в котором также отмечается, что такие ограждения должны быть сплошными по периметру, выполняться из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее *E* 150.

В соответствии с нормативно установленной терминологией [3] под пределом огнестойкости СК понимается промежуток времени от начала огневого испытания при СТРП до наступления одного из нормированных для данной СК предельных состояний по огнестойкости. В связи с этим, возникает вопрос о корректности применения для определения предела огнестойкости рассматриваемых ограждающих стен резервуарных парков стандартного метода испытаний, так как температурный режим пожара пролива нефти или нефтепродукта при авариях PBC имеет ряд существенных отличий от СТРП (см. раздел 1.3). При этом важно указать, что в мировой практике при определении предела огнестойкости СК, используемых, в частности, при строительстве объектов нефтехимического производства, туннелей, морских буровых платформ и других ответственных сооружений производственных объектов, широко применяются температурно-временные зависимости, существенно отличающиеся от зависимости СТРП [5–30].

Кроме этого, в настоящее время при производстве работ, связанных с возведением, ремонтом несущих и ограждающих СК зданий и сооружений, все большее применение находит торкретирование – способ нанесения на обрабатываемую поверхность одного или нескольких слоев раствора или бетона из цемента, песка, щебня или гравия и воды, в том числе с возможностью применения традиционной арматуры или с возможностью использования в качестве армирующих компонентов металлических (преимущественно стальных) или неметаллических фибр, осуществляемого под давлением сжатого воздуха [77]. В результате нанесения раствора или бетона на поверхность под давлением образуется уплотненный слой торкрета, свойства которого значительно отличаются от свойств обычного бетона или раствора. По сравнению с обычным бетоном ТБ (ФТБ) обладает повышенной механической прочностью, морозостойкостью, водонепроницаемостью, лучшим сцеплением с поверхность обрабатываемой конструкции. Также преимущество торкретирования перед другими методами состоит в полной механизации процессов, обычно требующих больших затрат труда, и в соединении в одной технологической операции транспортирования, укладки и уплотнения раствора или бетона.

Поскольку ТБ и ФТБ способны на порядок успешнее работать на ударные нагрузки, растяжение и изгиб в отличие от Б, то очевидно, что они могут найти широкое применение и при строительстве ограждающих стен резервуарных парков, особенно, при необходимости обустройства ограждающих стен с волноотражающим козырьком, расчет которых производится с учетом гидродинамического воздействия потока жидкости, образующегося при полном разрушении PBC. Однако при проектировании таких сооружений необходимо учитывать специфику условий, в которых они могут оказаться в случае аварии PBC в резервуарном парке, то есть необходимы данные об их поведении в условиях пожара пролива нефти или нефтепродукта. При этом важно отметить, что до настоящего времени вопросам огнестойкости СК из ТБ и ФТБ в условиях воздействия высоких температур пожара пролива нефти или нефтепродукта уделено недостаточно внимания.

Таким образом, для возможности определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, проектируемых как из Б, так и в перспективе из ТБ (ФТБ), необходимо проведение дальнейших исследований по изучению устойчивости выполненных на их основе СК в условиях воздействия «реального» пожара пролива нефти или нефтепродукта при авариях PBC.

1.2 Анализ температурных режимов пожаров для определения огнестойкости строительных конструкций

В общем случае под температурным режимом пожара понимается изменение среднеобъемной температуры среды при пожаре, в зависимости от времени его развития. При этом известно, что температурные режимы пожаров в помещениях различных зданий и сооружений могут иметь существенное отличие друг от друга.

Так, например, наиболее «жесткий» температурный режим пожара может наблюдаться в дорожных, железнодорожных туннелях, шахтах, метро. В отличие от пожаров в обычных зданиях и сооружениях, при возникновении пожара в туннеле, отвод тепла от очага пожара затруднен, в результате чего температура может достигать значений более 1300 °C. На объектах нефтегазового комплекса температурные режимы пожаров также характеризуются быстрым ростом температуры до 1100 °C и более [32–39].

Рассмотрение температурных режимов пожара в различных помещениях позволяет представить развитие пожара в виде трех стадий [23]:

1) начальная стадия пожара – от возникновения неконтролируемого локального очага горения до полного охвата помещения пламенем. Средняя температура среды в помещении имеет небольшие значения, но внутри и вокруг зоны горения местные температуры могут достигать значительных величин;

2) стадия полного развития пожара – горят все горючие вещества и материалы, находящиеся в помещении. Интенсивность тепловыделения от горящей нагрузки достигает максимума, что приводит к быстрому нарастанию температуры в помещении до максимальных, которые могут достигать 1100 °C и более;

 стадия затухания пожара – интенсивность процесса горения в помещении начинает уменьшаться за счет израсходования основной массы горючей нагрузки в помещении или воздействия средств тушения пожара.

Скорость изменения температуры в каждой стадии пожара, максимальная температура пожара и время ее достижения в помещениях зданий и сооружений зависят от многих факторов, к основным из которых относятся [23, 78, 79]: геометрия помещения, вид и количество в нем проемов; вид и количество пожарной нагрузки в помещении; материал и толщина СК, ограждающих помещение.

В связи с тем, что различные строительные материалы, элементы конструкций, здания в целом по-разному ведут себя в условиях пожара, то для возможности сравнения способности объектов защиты сопротивляться воздействию пожара и разработки системы мер по противопожарной защите помещений, зданий, сооружений было введено понятие об огнестойкости объектов [1]. Следует отметить, что огнестойкость является международной пожарно-технической характеристикой, регламентируемой строительными нормами и правилами, и характеризует способность конструкций и зданий сопротивляться воздействию пожара.

Количественным параметром огнестойкости является «предел огнестойкости» под которым, как уже отмечалось ранее, понимается промежуток времени (в минутах) от начала огневого испытания конструкции при СТРП до наступления одного или последовательно нескольких, нормируемых для данной СК, признаков предельных состояний по огнестойкости [1]:

1) потеря несущей способности – обрушение или недопустимый прогиб («*R*»);

2) потеря целостности – образование в конструкциях или стыках сквозных трещин или сквозных отверстий, через которые на необогреваемую поверхность проникают продукты горения или пламя («*E*»);

3) потеря теплоизолирующей способности – повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции в среднем более чем на 140 °С или в любой точке этой поверхности более чем на 180 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания или более 220 °С независимо от температуры конструкции до испытания («*I*»); [80]

4) достижения допустимой величины плотности потока теплового излучения, равной 3,5 кВт/м² (с отклонением \pm 5 %) («*W*») [81];

5) достижение предельной величины дымогазонепроницаемости определяется временем от начала нагрева и нагружения избыточным давлением испытываемой конструкции до момента уменьшения сопротивления дымогазопроницанию этой конструкции ниже минимально допустимого значения («*S*») [81].

Практически во всех развитых странах в настоящее время имеются специализированные лаборатории или полигоны, где проводятся исследования огнестойкости СК, включающие в себя [57]: натурные наблюдения пожаров, огневые испытания фрагментов зданий, огневые стандартные и нестандартные испытания элементов СК в натуральную величину, огневые испытания модельных образцов СК. При этом значения фактических пределов огнестойкости СК определяются экспериментальным способом или используя расчетные методы. Сравнение поведения СК при воздействии пожара возможно лишь тогда, когда они подвергаются воздействию одного и того же температурного режима пожара. Однако, как было показано выше, температурные режимы пожаров могут значительно отличаться друг от друга в зависимости от назначения здания, сооружения. В связи с этим, возникла необходимость в выборе некоторого характерного режима пожара, который можно было бы использовать для оценки сопротивления СК воздействию пожара. Так, на основании многолетнего опыта испытаний СК на воздействие пожара, Международной организацией по стандартизации (ИСО) был разработан стандарт № 834 на огневые испытания СК [39]. Этим стандартом был регламентирован единый температурный режим для проведения огневых испытаний СК на воздействие пожара, получивший название СТРП.

В настоящее время в Российской Федерации применение СТРП регламентируется ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» [4], который представляется в виде следующей зависимости температуры среды от времени (рисунок 1.3):

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \tag{1.1}$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t, °C; T_0 – температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °C; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.



Рисунок 1.3 – Общий вид зависимости СТРП ($T_0 = 20$ °C)

Из рисунка 1.3 видно, что кривая СТРП не имеет ниспадающей ветви (стадии затухания), а представляет собой непрерывно возрастающую логарифмическую функцию времени. По своей сути, кривая СТРП представляет собой некоторую усредненную зависимость, которая и используется при стандартных огневых испытаниях различных СК [57]. При этом наиболее близко СТРП отражает развитие пожара в помещениях жилых и общественных зданий при пожарной нагрузке примерно эквивалентной 50 кг/м² древесины [23], что значительно отличается от режима пожара пролива нефти или нефтепродукта при аварии РВС и указывает, по всей видимости, на некорректность использования СТРП для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков.

Следует отметить, что действующими в Российской Федерации нормативными документами определение предела огнестойкости СК в условиях, приближенных к «реальному» пожару, в данном случае пожару пролива нефтепродукта, не регламентируется. При этом известно, что в мировой практике при определении предела огнестойкости СК, используемых, в частности, при строительстве объектов нефтехимического производства, туннелей, морских буровых платформ и других ответственных сооружений производственных объектов, широко применяются температурные режимы пожаров, существенно отличающиеся от СТРП.

Так, например, в европейском EN 1363-2:1999 «Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures» [32] и американском UL 1709 «Rapid Rise Fire Test of Protection Materials for Structural Steel» [33] стандартах указано, что огневые испытания конструкций и материалов для дальнейшего их использования в нефтехимической промышленности необходимо проводить, используя углеводородный режим пожара (HC), описываемый зависимостью:

$$T = 20 + 1080 \left(1 - 0.325 e^{-0.167t} - 0.675 e^{-2.5t} \right), \tag{1.2}$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t, °C; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Общий вид кривой *HC* показан на рисунке 1.4.



Характерной особенностью этого вида пожара является быстрое повышение температуры до высоких значений (более 1000 °C) уже на 10 мин. огневых испытаний. После 30 мин. температура в 1100 °C поддерживается на протяжении всего периода испытаний СК на огнестойкость. Как правило, *HC* применяется для моделирования пожаров при небольших проливах нефти или нефтепродуктов, например, при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с проливом автомобильного бензина или дизельного топлива из топливных баков автотранспортных средств или проливом нефтепродуктов из различного технологического оборудования на объектах нефтехимического производства.

В Нидерландах туннельные сооружения испытывают в соответствии с зависимостью *RWS*, предложенной Министерством транспорта (*Rijkswaterstaat*) по результатам исследований, выполненных в 1979 г. в *TNO Fire Research Centre* [38]. В основу этого температурного режима положена модель пожара пролива 50 м³ топлива, масла или бензина с суммарной пожарной нагрузкой в 300 MBт и продолжительностью до 120 мин. Зависимость *RWS* имитирует первоначальный быстрый рост температуры пожара за счет сгорания большого количества нефтепродукта и постепенное ее снижение за счет выгорания пожарной нагрузки (рисунок 1.5).



Можно отметить, что основное различие между зависимостями *RWS* и *HC* заключается в том, что последняя основывается на температуре пожара, которая может возникнуть на относительно открытом пространстве, то есть с рассеиванием тепла. Зависимость же *RWS* основана на температуре пожара, происходящего в замкнутом пространстве (туннеле), где нет или незначительно происходит теплоотдача в окружающую среду. При этом важно указать, что возможность применения *RWS* на практике было подтверждено удовлетворительной сходимостью с результатами натурных испытаний, выполненных в туннеле «*Runehamar*» (Норвегия). Отметим также, что кривая *RWS* была принята, либо указана к использованию для конкретных проектов, местным законодательством таких стран как США (*NFPA* 502), Италия (*UNI* 11076), Австрия (*OVBB*), Сингапур, ОАЭ (развитие *Palm Jumeirah*).

Французский стандарт «Inter-ministry circular № 2000-63» [34] предписывает проводить аналогичные испытания СК с использованием модифицированной от *HC* углеводородной кривой (*HCM*), вида (рисунок 1.6):

$$T = 20 + 1280 \left(1 - 0.325 e^{-0.167t} - 0.675 e^{-2.5t} \right), \tag{1.3}$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t, °C; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

19



Рисунок 1.6 – Общий вид зависимости НСМ

Как правило, режим *HCM* используется при моделировании пожаров проливов нефтепродуктов в туннелях в рамках разработки крупных международных инфраструктурных проектов. Следует отметить, что при этом режиме температурный градиент в первые минуты пожара является настолько сильным, что может привести к хрупкому разрушению бетонных конструкций. В отличие от максимально возможной температуры в *HC* (1100 °C), в *HCM* температурный пик достигает 1300 °C.

В Германии туннельные сооружения испытывают согласно «Руководству по оснащению и эксплуатации дорожных туннелей» (*RABT*) [35], а конструктивная противопожарная защита тоннелей проверяется по «Дополнительным техническим контрактным условиям» (*ZTV*) [36]. Температурная зависимость модели пожара *RABT/ZTV* [37] была получена в результате обработки результатов ряда натурных испытаний. В этой зависимости за первые 5 мин. испытаний температура достигает максимального значения в 1200 °C. Однако, продолжительность пожара при данной температуре не велика, снижение происходит уже на 30-ой мин. при моделировании пожара с участием автомобилей, и на 60-ой мин. – с участием железнодорожных вагонов. Стадия снижения температуры с 1200 °C до начальной температуры для этих зависимостей длится 110 мин. Общий вид температуреной зависимости *RABT/ZTV* представлен на рисунке 1.7.



Следует также отметить, что в ряде случаев СК могут подвергаться менее жестким по сравнению с СТРП условиям нагрева, например, при воздействии на стены по периметру здания вырывающегося из его окон пламени пожара. В этом случае огневые испытания не несущих ограждающих внешних конструкций могут проводиться при пониженном температурном режиме, так как при реальном пожаре происходит смешение продуктов горения с наружным воздухом, что и влияет на снижение температуры горения. Температурный режим в этом случае задается зависимостью вида [32, 40]:

$$T = 660 \left(1 - 0,687 \mathrm{e}^{-0,32t} - 0,313 \mathrm{e}^{-3.8t} \right) + 20, \tag{1.4}$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t, °C; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Общий вид температурной зависимости при так называемом пониженном СТРП показан на рисунке 1.8.

При этом важно указать, что использовать такой температурный режим можно только для оценки огнестойкости разделяющих конструкций. Для оценки огнестойкости балок и колонн используются другие методы.



Рисунок 1.8 – Общий вид зависимости при пониженном СТРП

Кроме выше рассмотренных режимов пожаров для оценки огнестойкости некоторых изделий может использоваться также зависимость «тлеющего пожара» (*SHC*) [32]. Такой режим характерен для медленного распространения пожара, при этом огнестойкость изделий, рассчитанная на основе СТРП, может быть значительно меньшей, например, в случае с изделиями, которые под воздействием тепла выделяют химически активные вещества.

Режимы SHC описываются следующими зависимостями: при 0 < $t \le 21$

$$T = 154t^{0.25} + 20; (1.5)$$

при *t* > 21

$$T = 345 \lg(8(t-20)+1) + 20, \tag{1.6}$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t, °C; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Общий вид зависимости SHC показан на рисунке 1.9.



Важно также отметить, что с 2014 г. на территории Российской Федерации введен в действие ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014 [40], являющийся, по сути, полным переводным изданием европейского нормативного документа *EN* 1363-2:1999 [32]. Поэтому приведенные в этих нормативных документах соответствующие температурно-временные зависимости идентичны друг другу (см. рисунки 1.4, 1.8, 1.9).

Анализируя требования выше рассмотренных как отечественных, так и зарубежных нормативных документов, можно видеть, что для определения фактических пределов огнестойкости СК в общем случае необходимо проведение огневых испытаний по утвержденным методикам обязательным к применению с использованием СТРП. При этом, на отдельных видах объектов огнестойкость СК может быть оценена на добровольной основе по методикам, содержащим альтернативные режимы, учитывающие специфику возможных «реальных» пожаров.

Анализ существующих режимов пожаров также показал, что ни одна из выше рассмотренных температурных зависимостей не может быть явно применена для определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, так как в них не учитываются отличительные особенности пожара

23

пролива нефти или нефтепродукта при разрушении PBC. То есть применение существующих режимов пожаров приведет либо к существенному завышению, либо к занижению фактических пределов огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, что, очевидно, является недопустимым.

Таким образом, обуславливается необходимость обоснования альтернативной температурно-временной зависимости «реального» пожара пролива горючей жидкости при разрушении PBC для чего, в первую очередь, следует рассмотреть особенности его возникновения и развития, а также воздействия на ограждающие стены резервуарных парков.

1.3 Особенности возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей при разрушениях резервуаров

Наиболее полные сведения о разрушениях РВС с горючими жидкостями, произошедшими в резервуарных парках объектов топливно-энергетического комплекса как в России, так и за рубежом, а также их негативных последствиях, приведены в работах [5–31], анализ которых, в контексте решения поставленной в настоящей работе задачи, показал следующее.

Во-первых, отличительными признаками такой аварии являются полная потеря целостности корпуса РВС и выход в течение короткого промежутка времени (не более 10–15 с) на прилегающую территорию всей хранящейся в резервуаре жидкости в виде мощного потока, так называемой волны прорыва. При этом волна характеризуется резкой нестационарностью, наличием фронта в виде бора (вала), движущегося со значительной скоростью и обладающего большой разрушительной силой. На рисунке 1.10 представлены характерные кадры видеосъемки полного разрушения РВС-700 м³ с водой на Филатовской нефтебазе ОАО «Липецк – Терминал» при ранее выполненных экспериментальных исследованиях процесса образования и движения волны прорыва [5, 6, 18].



Рисунок 1.10 – Кадры видеосъемки полного разрушения PBC-700 м³ с водой

На кадрах видеосъемки (рисунок 1.10) отчетливо прослеживаются основные стадии процесса: образование волны прорыва при разрушении PBC (поз. 2); распространение потока в направлении земляного обвалования, сопровождающееся понижением уровня жидкости в PBC (поз. 3); удар волны об обвалование и резкий выброс жидкости вверх и вдоль него (поз. 4); образование частичного обратного вала жидкости, отраженного от преграды и распространяющегося по направлению к центру PBC (поз. 5); перехлест основной массы жидкости через обвалование (поз. 6, 7) с разливом на значительной площади (поз. 8). При этом, общее время от момента разрушения PBC до прекращения образования площади пролива воды (видимого изменения ее границ) составило около 20 с.

В работе [18] приводятся также характерные фрагменты течения жидкости, полученные в результате численного моделирования процесса разрушения типовых РВС номинальным объемом от 700 до 50000 м³, некоторые из которых представлены на рисунках 1.11–1.14.



Рисунок 1.11 – Характерные фрагменты течения жидкости при моделировании процесса разрушения PBC-700 м³



Рисунок 1.12 – Характерные фрагменты течения жидкости при моделировании процесса разрушения РВС-10000 м³



Рисунок 1.13 – Характерные фрагменты течения жидкости при моделировании процесса разрушения PBC-30000 м³



Рисунок 1.14 – Характерные фрагменты течения жидкости при моделировании процесса разрушения РВС-50000 м³

Анализ результатов этих исследований позволяет сделать вывод о том, что основная масса жидкости при разрушении PBC рассматриваемых объемов, с учетом их заполнения до аварии на 95 %, разливается по площади в течение первых 12–15 с. В течение этого же времени происходит и движение основных конструктивных элементов резервуара (разрушение стенки на всю высоту, ее отрыв от днища, развертывание на 120–180° и опрокидывание в сторону, противоположную направлению истечения жидкости, обрушение крыши на днище). Максимальное же время от момента разрушения PBC соответствующего номинального объема до прекращения образования площади пролива жидкости составляет от 17 до 75 с.

Во-вторых, в работе [18] представлен подробный анализ данных о полных разрушениях РВС с нефтью и нефтепродуктами (105 инцидентов), произошедших за период с 1951 по 2010 гг. в резервуарных парках объектов топливноэнергетического комплекса, расположенных на территории Российской Федерации, в котором, в том числе, отмечаются следующие особенности возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей. Так, в 39 случаях после разрушений PBC с горючими жидкостями имеющими температуру вспышки не превышающую 28 °C (в 61 инциденте) происходило мгновенное воспламенение поступившего в открытое пространство продукта, в 10 случаях – образование и последующее воспламенение паровоздушной смеси, в 12 случаях не происходило ни мгновенное воспламенение продукта, ни последующее воспламенение паровоздушной смеси или пролива, то есть аварии не сопровождались возникновением пожара-вспышки, волны избыточного давления или пожара пролива. Разрушения PBC с горючими жидкостями, имеющими температуру вспышки более 28 °C, в 9 случаях сопровождались мгновенным воспламенением, в 4 случаях – последующим воспламенением, в 31 случае при поступлении в открытое пространство продукта не происходило мгновенное или последующее воспламенение. При этом отмечается, что выход в открытое пространство горящей жидкости (мгновенное воспламенение) не зависело от ее температуры вспышки и обуславливалось, в основном, следующими причинами:

– взрывом паровоздушной смеси в РВС и его разрушением;

- пожаром на PBC с его последующим разрушением;

 воспламенением паров от фрикционных искр, образовавшихся при соударении конструкций аварийного РВС друг с другом или с соседними резервуарами, трубопроводами и др.

Последующее воспламенение горючих паровоздушных смесей и проливов жидкостей происходило при их контакте с такими источниками зажигания, как высоко нагретые части технологического оборудования, автотранспортных средств, открытый огонь и пр. При этом время последующего воспламенения (при отсутствии мгновенного) не превышало времени полного разлива жидкости по территории объекта, что указывает на отсутствие возможности образования значительных размеров зон взрывоопасных концентраций.

Следует отметить, что анализируемые аварии РВС происходили в резервуарных парках, имеющих ограждения, рассчитанные только на гидростатическое давление пролитой жидкости, вследствие чего площади проливов достигали десятки и сотни тысяч квадратных метров. При обустройстве же ограждений, способных удержать волну прорыва (см. раздел 1.1), и обустраиваемых от РВС на расстояниях, как правило, не более 10–15 м, независимо от мгновенного или последующего воспламенения горючей жидкости будет происходить непосредственное воздействие пламени пожара пролива на ограждение, что и необходимо учитывать при обосновании альтернативной температурно-временной кривой.

В-третьих, к особенностям пожаров проливов нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках следует отнести их высокое температурное воздействие, в том числе, и на ограждающие стены. Так, анализ научно-исследовательских работ В.И. Блинова, В.Н. Худякова, Е.Н. Иванова, И.М. Абдурагимова, В.Ю. Говорова, В.Е. Макарова, А.Н. Баратова, О.М. Волкова, Г.А. Проскурякова, А.Я. Корольченко, Д.С. Михайлова и др. [7, 15, 16, 19, 21, 82], посвященных вопросам оценки температуры горения (максимальной температуры пламени) нефти и нефтепродуктов (бензины, дизельные топлива, керосины, реактивные топлива и др.) показал, что в зависимости от размера очага горения, погодных условий, ветровых нагрузок и других факторов ее значение с учетом теплопотерь находится в диапазоне от 1000 до 1250 °С.

В справочной литературе [82, 83] приводятся следующие значения температуры пламени: для нефти – 1100 °C; для бензинов – 1200 °C. В справочнике «Руководителя тушения пожара» [84], а также в «Методических рекомендациях по организации тушения пожаров, расчету сил и средств» [85] приблизительная температура пламени нефти и нефтепродуктов при пожарах в резервуарах указана в диапазоне от 1100 до 1300 °C. В учебном пособии М.А. Джафарова [86] приводится также значение среднеповерхностной температуры пламени горящего авиатоплива марки TC-1 в 1070 °C при температуре окружающей среды 18 °C.

При этом следует отметить ограниченность работ, в которых приводятся значения максимальных температур пламени (температур горения) для различных горючих жидкостей. По всей видимости на это влияет необязательность определения значений рассматриваемого показателя, поскольку он не входит в основные показатели пожаровзрывоопасности для нефти и нефтепродуктов [87].

Таким образом, на основании результатов анализируемых выше научноисследовательских работ, а также нормативной и справочной литературы можно сделать вывод о том, что при пожарах проливов большинства горючих жидкостей в резервуарных парках среднеповерхностная температура пламени будет находиться в диапазоне от 1100 до 1200 °C. Тогда, для альтернативной температурновременной кривой «реального» пожара пролива горючей жидкости при разрушении PBC может быть предложено значение максимальной среднеповерхностной температуры пламени в 1200 °C.

В-четвертых, к специфическим особенностям развития пожаров проливов горючих жидкостей в резервуарных парках при разрушениях PBC следует отнести их продолжительность, которая будет оказывать непосредственное влияние и на огнестойкость ограждающих стен. В этой связи, опираясь на опыт применения в резервуарных парках ограждающих стен с волноотражающим козырьком [18], отметим, что такие преграды обустраиваются либо по периметру единичного PBC (рисунок 1.15), либо по периметру группы резервуаров или резервуарного парка (рисунок 1.16).



Рисунок 1.15 – Общий вид ограждающей стены с волноотражающим козырьком для PBC-30000 м³ на площадке «Шесхарис» в г. Новороссийске



Рисунок 1.16 – Общий вид ограждающей стены с волноотражающим козырьком для группы резервуаров мазутного хозяйства ТЭЦ-11 в г. Москве

При разрушении единичного РВС и пролива горючей жидкости в границах ограждения высота ее слоя будет иметь максимальное значение, то есть может доходить до отметки волноотражающего козырька (в зависимости от высоты ограждающей стены, длины вылета козырька и расстояния до РВС, соответствующего объема). В случае воспламенения горючей жидкости продолжительность ее выгорания, а, следовательно, и воздействия пламени пожара на ограждающую стену, будет зависеть, в основном, от скорости свободного выгорания продукта, времени сосредоточения сил и средств, необходимых для ликвидации пожара, а также от эффективности подачи огнетушащих веществ. Кроме этого, на снижение продолжительности пожара пролива существенное влияние может оказать своевременная подача огнетушащих веществ от автоматических установок пожаротушения, расположенных за пределами ограждения, а также возможность откачки продукта из замкнутого контура ограждения в аварийный резервуар, амбар и т. п. При этом следует учитывать также факторы, способные значительно усложнить обстановку на пожаре, например, такие как вскипание и выброс продукта, повреждение автоматических средств пожаротушения и др.

При разрушении PBC в группе (резервуарном парке) высота слоя горючей жидкости будет иметь минимальное значение, как правило, не превышающее половины высоты ограждающей стены, и зависящее, в основном, от количества резервуаров и их объемов, геометрических параметров ограждающей стены и расстояний до нее от PBC. В случае воспламенения горючей жидкости на продолжительность ее выгорания будут оказывать, в основном, те же факторы, что и при единичном разрушении PBC. При этом значительно усложнить обстановку на пожаре может его каскадное развитие, поскольку соседние резервуары в группе могут оказаться непосредственно в очаге пожара пролива. В таких случаях, как показывает статистика пожаров в резервуарных парках [5–22, 24], они могут иметь затяжной характер и продолжаться несколько суток до полной ликвидации.

Таким образом, при разрушении резервуара продолжительность пожара пролива горючей жидкости в границах ограждения зависит от многих факторов, при этом учесть весь спектр их влияния для нормирования предела огнестойкости ограждающих стен практически не представляется возможным. В связи с этим в ГОСТ Р 53324-2009 [2], как уже отмечалось, установлено требование, что такие ограждающие стены должны иметь предел огнестойкости не менее E 150, то есть по аналогии с нормируемым пределом огнестойкости для противопожарных стен 1-го типа, так как основное функциональное назначение этих противопожарных преград – предотвращение распространения пожара.

Однако следует отметить, что для ограждающих стен резервуарных парков предел их огнестойкости должен определяться в условиях альтернативных испытаний, то есть с учетом ранее рассмотренных особенностей возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей. Кроме этого, при необходимости, максимальная продолжительность пожара пролива горючей жидкости (без учета возможности его каскадного развития и/или успешного тушения) может устанавливаться исходя из времени полного ее выгорания, определяемого в каждом конкретном случае высотой слоя жидкости в замкнутом контуре ограждения и линейной скоростью выгорания рассматриваемой жидкости.

33

С учетом вышеизложенного, к основным особенностям возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей при разрушениях PBC следует отнести:

 пожарная нагрузка (нефть, нефтепродукты) с максимальной среднеповерхностной температурой пламени 1200 °C;

 – быстрый рост температуры пожара за счет сгорания большого количества пожарной нагрузки и поддержание ее до полного выгорания пожарной нагрузки;

 – пожар пролива горючей жидкости на открытой местности (в границах ограждения) с постоянным и неограниченным доступом кислорода;

 непосредственное воздействие пламени пожара пролива горючей жидкости на ограждающую стену.

При этом, по аналогии построения различных температурно-временных зависимостей, подробно рассмотренных в разделе 1.2 настоящей работы, могут быть приняты следующие временные значения для получения температурновременной зависимости «реального» пожара пролива горючей жидкости в резервуарном парке: не более 1 мин. – время выхода на постоянную температуру горения; не менее 150 мин. – минимальное время продолжительности горения; не более 600 мин. – условное максимальное время продолжительности горения (при обосновании возможности реализации затяжных пожаров).

1.4 Температурно-временная зависимость для определения огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков

На основе общего подхода к построению температурно-временных зависимостей для определения огнестойкости СК и с учетом выявленных особенностей возникновения и развития пожаров при авариях PBC предложен углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости – *hydrocarbon curve oil spill (HCOS)*, необходимый для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков. Общий вид *HCOS* и его сравнительная характеристика с рассмотренными ранее стандартным и альтернативными режимами пожаров (см. раздел 1.2 настоящей работы) представлены соответственно на рисунке 1.17 и в таблице 1.1.



для проведения испытаний строительных конструкций на огнестойкость

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика температурных режимов по	ожаров
для проведения испытаний строительных конструкций на огнестойкость	1

Парамотр	Режим пожара						
Параметр	СТРП	SHC	НС	НСМ	RABT/ZTV	RWS	HCOS
Модель пожара	В помещении					На открытом	
(имитация горения)						пространстве	
Вид температуры		Сранисоба оннов					Средне-
пожара	Среднеооъемная					поверхностная	
Место замера	0,1 м от поверхности конструкции						
температуры							
Максимальная	968 ¹	885 ¹	1180	1200	1200	1350	1200
температура пожара, °С	1214^{2}	1205^2	1160	1300	1200	1550	1200
Минимальная	_						
продолжительность	360^{3}	360^{3}	180	180	140–170	180	150
испытаний, мин.							

¹на 60 мин.; ²на 360 мин.; ³как правило, не более 6 ч., что обусловлено полным выгоранием пожарной нагрузки

Из рисунка 1.17 видно, что предлагаемый режим пожара (*HCOS*) по такому параметру как максимальная температура незначительно отличается от существующих углеводородных кривых альтернативных моделей пожаров, однако имеет ряд существенных особенностей по остальным параметрам, представленным в таблице 1.1.

Таким образом, на основе анализа применяемых в мировой практике температурно-временных кривых для проведения испытаний строительных конструкций на огнестойкость, результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров волны прорыва, образующейся при полном разрушении PBC, а также выявленных особенностей возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей в резервуарных парках, обоснован углеводородный режим пожара (*HCOS*), необходимый для определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков объектов хранения нефти и нефтепродуктов.

При этом важно отметить, что до настоящего времени практически остаются неизученными вопросы устойчивости ограждающих стен резервуарных парков к длительному (более 150 мин.) воздействию пламени пожаров проливов горючих жидкостей. В связи с этим необходимо решать задачи, связанные с подбором материала для ограждающих стен, когда они будут способны не только удерживать волну прорыва при разрушении PBC, но обеспечивать устойчивость к длительному воздействию пламени пожара пролива горючей жидкости. В качестве такого перспективного материала, как уже отмечалось ранее, может рассматриваться торкрет или фиброторкрет бетон, которые в отличие от традиционного железобетона, способны на порядок успешнее работать на растяжение, изгиб и ударные нагрузки. Однако для решения поставленной задачи требуется проведение экспериментальных исследований, направленных, в первую очередь, на определение теплотехнических и механических свойств этих видов бетонов в условиях углеводородного режима пожара, чему и посвящены дальнейшие исследования.
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА

Известно, что предел огнестойкости железобетонных конструкций наступает в результате потери несущей способности за счет снижения прочности, теплового расширения и температурной ползучести арматуры и бетона при нагревании [64]. Определяется фактический предел огнестойкости железобетонной конструкции в условиях стандартных натурных испытаний или используя расчетноаналитический метод в случае невозможности проведения таких испытаний. В общем случае расчетным методом предел огнестойкости СК определяется по следующим признакам предельных состояний: *R* – потеря несущей способности; *I* – потеря теплоизолирующей способности; *E* – потеря целостности.

В основе расчетно-аналитических методов определения времени наступления признаков предельных состояний СК по огнестойкости лежит решение теплотехнической и статической задач [64, 88]. Для решения таких задач и корректного расчета предела огнестойкости в данном случае ограждающих стен резервуарных парков необходимо иметь данные по теплофизическим и прочностным характеристикам рассматриваемых видов бетонов в условиях углеводородного режима пожара, чему и посвящены дальнейшие исследования.

2.1 Исследование теплотехнических характеристик образцов бетонов

Целью теплотехнической части расчета является определение температуры в сечении ограждающей стены, конструктивно выполненной из определенного вида бетона, в условиях одностороннего огневого воздействия углеводородного пожара (*HCOS*). Для решения поставленной задачи необходимо в диапазоне температур от 20 до 1200 °С иметь данные по изменению значений следующих параметров исследуемых видов бетонов: плотность (объемная масса) ρ , кг/м³; коэффициент удельной теплоемкости c_p , Дж/(кг·К); коэффициент температуропроводности a, мм²/с; коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К).

Значение коэффициента теплопроводности материала в зависимости от температуры (*T*) может быть определено по формуле [89, 90]:

$$\lambda(T) = a(T)c_{p}(T)\rho(T). \qquad (2.1)$$

Однако, для возможности использования формулы (2.1) с целью нахождения зависимости вида $\lambda = f(T)$ необходимо прежде иметь зависимости вида $a = f(T), c_p = f(T)$ и $\rho = f(T)$, в данном случае, в диапазоне изменения температуры от 20 до 1100 °C. На нахождение этих зависимостей и были направлены следующие экспериментальные исследования.

Предварительно были изготовлены заготовки кубической формы со стороной грани 0,15 м, отлитые из бетонов соответственно по классической технологии (Б), методом торкретирования (ТБ) и торкретирования с добавлением стальной фибры (ФТБ) диаметром 0,4 мм и длиной 20 мм.

При подготовке бетонной смеси по ГОСТ 7473-2010 [91] для всех заготовок применялся цемент марки M400 с заполнителем из гранитной крошки, с размером фракции не более 5 мм. Далее с использованием полого сверла и низкоскоростного отрезного станка из заготовок были сделаны цилиндрические образцы диаметром $12,5 \pm 0,1$ мм и высотой $3,0 \pm 0,1$ мм. Начальная плотность образцов при температуре 20 °C, определяемая по методу, изложенному в ГОСТ 12730.1-78 [92], составляла для образцов из Б – 2080 ± 0,04 кг/м³, ТБ – 2116 ± 0,04 кг/м³, ФТБ – 2330 ± 0,05 кг/м³. Необходимость придания образцам цилиндрической формы с определенными размерами определялась возможностью их исследования на высокоточном современном приборном оборудовании для термического анализа и измерения теплофизических характеристик в лаборатории термического анализа химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [93–95].

Так, для исследования калориметрических эффектов и изменения массы в образцах с высокой разрешающей способностью и точностью использовался синхронный термоаналитический комплекс *STA* 449 *C Jupiter* [93], сочетающий методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) в одном измерении [96–98]. Общий вид и конструктивное исполнение комплекса показаны на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Общий вид (а) и конструктивное исполнение (б) синхронного термоаналитического комплекса *STA* 449 *C Jupiter*:

1 – весовая система; 2 – защита от теплового излучения; 3 – защитная трубка; 4 – держатель образца; 5 – нагревательный элемент; 6 – термопара печи; 7 – клапан выхода газа;
 8 – подъемное устройство

Ниже приведены основные технические характеристики синхронного термоаналитического комплекса *STA* 449 *C Jupite*r:

температурный диапазон, °С	минус 1201650
точность измерения температуры, °С	
скорость нагрева и охлаждения, К/мин	0,0150
разрешение весов (ТГ), мкг	0,1
максимальная масса образца, г	5
точность измерения энтальпии, %	±3
линейность базовой линии (ДСК), мкВт	
точность измерения теплоемкости, %	±5
сигнал шума (ДСК), мкВт	

Комплекс *STA* 449 *C Jupiter* использовался для проведения термоаналитических исследований, которые позволяют изучить термические свойства материалов. Характерной особенностью прибора являются стабильные и воспроизводимые ТГ и ДСК базовые линии. Электромагнитные компенсационные микровесы с верхней загрузкой отличаются высокой точностью и разрешением в области мкг, а также стабильностью. С помощью синхронного термоанализатора в образце одновременно измерялись изменения массы (ТГ) и тепловые эффекты (ДСК).

При синхронном термическом анализе (СТА) образцы исследовались в условиях программированного изменения температуры, при этом непосредственно определялись изменение массы, абсолютная температура образцов и разница температур, возникающая между образцами и эталоном. Прибором измерялись такие калориметрические эффекты как энтальпия, температура фазовых переходов и удельная теплоемкость образцов. С помощью термического анализа исследовались физико-химические и химические превращения, происходящие в веществе в условиях программированного (непрерывного или ступенчатого) изменения температуры. Процессы, имеющие тепловую природу, регистрировались по отклонениям скорости нагревания вещества от заданной программы. Методом термического анализа обнаруживался сам факт протекания процесса, температурный интервал, в котором он происходит, его эндо- или экзотермический характер [99–103]. Характерные ТГ и ДТГ кривые, характеризующие процесс термолиза в образцах бетонов Б, ТБ и ФТБ в интервале температур от 20 до 1100 °C, представлены на рисунке 2.2, из которого видно, что процесс удаления адсорбционной воды наблюдается в интервале температур от 40 до 300 °C, а воды конституционной – от 400 до 500 °С независимо от вида бетона.

Удельная теплоемкость определялась путем сравнения сигнала повышения температуры образца (при прохождении теплового фронта) с сигналом повышения температуры эталонного образца (диски *Pyroceram* 9606), удельная теплоемкость которого в тех же условиях известна. Расчет проводился в предположении, что энергия импульса света и его взаимодействие с образцом остаются неизменными, факторы теплопотерь исследуемого образца и эталонного образца близки.

40



Рисунок 2.2 – ТГ и ДТГ кривые образцов бетонов Б (а), ТБ (б) и ФТБ (в) (*Mass Change* – изменение массы образца; *Value* – значение температуры)

На рисунках 2.3 и 2.4 представлены результаты экспериментальных исследований по изменению плотности и удельной теплоемкости в образцах бетонов при их нагреве от 20 до 1100 °C.



Рисунок 2.3 – Результаты экспериментальных исследований по изменению плотности образцов бетонов от температуры



Рисунок 2.4 – Результаты экспериментальных исследований по изменению удельной теплоемкости образцов бетонов от температуры

Для определения коэффициента теплопроводности образца были проанализированы различные методы его экспериментального измерения (рисунок 2.5 [6]), которые показали, что для решения поставленной задачи наиболее приемлемыми являются методы горячей проволоки и лазерной вспышки [104–108].



Рисунок 2.5 – Основные методы определения коэффициента теплопроводности материалов

При этом следует отметить, что метод лазерной вспышки имеет ряд преимуществ перед методом горячей проволоки: это абсолютный метод измерения температуропроводности, не требующий калибровки прибора; высокая точность измерений и возможность испытывать небольшие размеры образцов; метод бесконтактный, то есть он не разрушает образец, который после измерений может быть проанализирован другими методами. Таким образом, исходя из вышеперечисленных преимуществ, для определения коэффициентов температуропроводности исследуемых образцов бетонов был выбран метод лазерной вспышки.

Измерения параметра температуропроводности образцов бетонов в диапазоне температур от 20 до 1100 °C проводились с использованием универсального прибора высокой точности *LFA* 457 *MicroFlash* [94], общий вид и конструктивное исполнение которого представлены на рисунке 2.6.



прибора LFA 457 MicroFlash:

В общем виде прибор представляет собой высокотемпературную печь с воздушным охлаждением. Он обеспечивает в диапазоне температур от минус 125 до 1100 °C (в зависимости от модели печи) измерение температуропроводности материалов от 0,01 до 1000 мм²/с с погрешностью не более 5 %.

Принцип работы прибора состоит в следующем. Импульс лазера направляется зеркалом к держателю образца в печи. Инфракрасный детектор направлен сверху вниз на обратную сторону образца. Передняя сторона плоскопараллельного образца твердого тела нагревается коротким лазерным импульсом. Тепло распространяется через образец и вызывает повышение температуры на его задней поверхности. Это изменение температуры в зависимости от времени фиксируется с помощью инфракрасного детектора, по измеренному сигналу которого и определяется температуропроводность образца.

 ^{1 –} лазер; 2 – электронная часть системы; 3 – подъемное устройство печи; 4 – держатель образца; 5 – печь; 6 – ирисовая диафрагма; 7 – детектор

	Ниже	приведены	основные	технические	характеристики	прибора
LFA	457 Mici	roFlash:				
	темпер лазер Л	атурный диап Nd-YAG:	азон, °С		минус 12511	00
	энерги	я, Дж				8,5
	ширин	а импульса, м	c		(0,5
	держат	ель образцов.			граф	ОИТ
	диапаз	он температур	опроводност	ги, мм ² /с	0,0110	000
	воспро	изводимость	температуров	проводности, %	••••••	.±3
	погрец	ность измере	ния температ	гуропроводност	ти, %	± 5
	атмосф	ера измерени	як	ине	ртная, окислителы	ная
				ИЛИ	і вакуум (>10 ⁻² мба	up)

На рисунке 2.7 представлены результаты экспериментальных исследований по изменению температуропроводности образцов исследуемых бетонов при их нагреве от 20 до 1100 °C.



Рисунок 2.7 – Результаты экспериментальных исследований по изменению температуропроводности образцов бетонов от температуры

Далее по формуле (2.1) определяли значения коэффициентов теплопроводности образцов бетонов в исследуемом диапазоне температур. С целью нахождения эмпирических зависимостей видов a = f(T), $c_p = f(T)$, $\rho = f(T)$ и $\lambda = f(T)$ полученные экспериментальные данные обрабатывались методом регрессионного анализа с использованием программы *STATGRAPHICS* [99]. Указанная программа позволяет: вычислять вариации; выборочные коэффициенты множественной детерминации и коэффициенты множественной корреляции; найти интервальные оценки для коэффициентов регрессии; проверить коэффициенты регрессии на значимость; построить таблицу дисперсионного анализа и проверить коэффициенты детерминации на значимость; найти доверительные интервалы для значений функции регрессии; доверительные интервалы для значений отклика при заданном уровне значимости; установить связь между объясняемой переменной и объясняющими переменными [87–89].

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблицах А.1–А.12 (см. приложение А), где в соответствующих столбцах многофакторного регрессионного анализа (*Dependent variable: y*) приводятся: параметр, коэффициент регрессии, стандартная ошибка коэффициента, *t*-критерий и вероятность нулевой гипотезы; в столбцах дисперсионного анализа *ANOVA* (*Analysis of Variance*): источник вариации зависимой переменной, сумма квадратов отклонений, число степеней свободы, среднеквадратичное отклонение, *F*-отношение и вероятность нулевой гипотезы. Далее приведены коэффициенты детерминации, стандартная ошибка оценки, средняя абсолютная ошибка, вероятность автокорреляции (*Durbin-Watson statistic*), ожидаемый уровень результата авторегрессии первого типа.

В результате обработки данных методом многофакторного регрессионного анализа были получены эмпирические зависимости, величины достоверности аппроксимации (R^2), критические значения *F*-критерия Фишера ($F_{\rm kp}$), значения *F*-критерия Фишера в моделях ($F_{\rm M}$), а также доверительные интервалы (Δ) при уровне значимости $\alpha = 5$ %, общий вид и указанные значения которых, представлены в таблице 2.1. Таблица 2.1 – Эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в температурном диапазоне от 20 до 1100 °C и соответствующие статистические параметры

Вид	Эмпирическая	Статистический параметр			
бетона	зависимость		$F_{\kappa p}$	Fм	Δ
Б	$a = 1/(-0.037 + 0.48 \ln(T - 273))$, mm ² /c	98,11	4,84	571,01	0,18
	$c_p = 382,352 + 34,1068\sqrt{T}$, Дж/(кг·К)	94,44	4,84	186,74	129,93
	$\rho = 2090,64 - 0,43(T - 273) + 0,00019(T - 273)^2$, кг/м ³	99,11	4,84	557,18	19,71
	$\lambda = \sqrt{0,71 + 32,92/(T - 273)}$, BT/(M·K)	95,06	4,84	211,70	0,20
	$a = 1/(-0.056 + 0.49 \ln(T - 273))$, mm ² /c	96,72	4,84	324,72	0,25
ТБ	$c_p = 440,563 + 32,6772\sqrt{T}$, Дж/(кг·К)	95,85	4,84	253,91	106,75
Ιb	$ρ = 2119,91 - 0,46(T - 273) + 0,0002(T - 273)^2$, κγ/m ³	98,80	4,84	412,20	24,63
	$\lambda = \sqrt{0,73 + 29,28/(T - 273)}$, BT/(M·K)	94,96	4,84	207,42	0,18
ФТБ	$a = 1/(0,11+0,44\ln(T-273))$, MM ² /c	96,16	4,84	272,18	0,24
	$c_p = 339,727 + 26,9526\sqrt{T}$, Дж/(кг·К)	96,91	4,84	344,52	75,59
	$\rho = 2345,8 - 0,65(T - 273) + 0,00035(T - 273)^2$, кг/м ³	98,72	4,84	386,92	29,90
	$\lambda = \sqrt{0,66 + 20,3/(T - 273)}$, BT/(M·K)	95,60	4,84	239,13	0,11

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований и обработки полученных данных найдены теплотехнические характеристики тяжелого бетона на гранитном заполнителе, торкрет бетона и фиброторкрет бетона в условиях углеводородного режима пожара, которые могут использоваться для определения огнестойкости строительных конструкций, выполненных с использованием рассматриваемых видов бетонов, в том числе, при строительстве ограждающих стен резервуарных парков.

2.2 Исследование прочностных характеристик образцов бетонов

Целью решения статической задачи при оценке огнестойкости является определение несущей способности нагреваемой конструкции в условиях одностороннего огневого воздействия, в данном случае, углеводородного пожара (*HCOS*).

Важно указать, что проведенный анализ работ в области исследования влияния высоких температур на прочностные характеристики бетонов показал, что их механические свойства достаточно хорошо изучены в интервале температур от 200 до 300 °C, несколько меньше опытных данных имеется в диапазоне температур от 300 до 800 °C и крайне мало данных для температур свыше 800 °C [25]. При этом отмечается, что такая ситуация обусловлена, прежде всего, редкостью проведения такого рода экспериментов, ввиду их сложности и трудозатратности. Кроме этого, в литературных источниках отсутствуют данные по прочностным характеристикам ТБ и ФТБ в условиях воздействия высоких температур при пожарах проливов углеводородов.

Таким образом, для возможности решения статической задачи, в данном случае определения прочности монолитной железобетонной конструкции ограждающей стены в условиях углеводородного режима пожара, необходимо провести ряд лабораторных испытаний на контрольных образцах из рассматриваемых видов бетонов в исследуемом диапазоне температур от 20 до 1100 °C.

Наиболее распространенным способом определения прочности бетона являются испытания предварительно изготовленных образцов-кубов размером $150 \times 150 \times 150$ мм на специальном прессе на, так называемую, «кубиковую прочность», за которую принимают временное сопротивление эталонных кубов. Стоит отметить, что при испытании бетонных кубов края пресса препятствуют поперечным деформациям опорных граней кубиков создавая эффект обоймы, что приводит к завышению прочности образцов по сравнению с реальной прочностью бетона. При увеличении длины образца отношение его прочности к прочности кубика уменьшается и устанавливается при соотношении $h/a \ge 4$ (здесь h – высота

48

образца; *а* – основание образца). В большей степени результаты таких испытаний подходят для определения качества бетона и установления его класса прочности.

Наиболее же достоверный результат для тестирования бетона на осевое сжатие показывает призменная прочность, которая получается в результате сдавливания образцов призм с размером сторон 150×150×600 мм. Под призменной прочностью понимают временное сопротивление осевому сжатию призмы с отношением высоты призмы к размеру стороны квадрата, равным четырем. Призменная прочность показывает реальную прочность бетона. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона приводятся в ГОСТ 24452-80 [112]. В соответствии с требованиями этого документа испытания для определения призменной прочности бетона производят путем постепенного (ступенями) нагружения образцов призм стандартных размеров осевой сжимающей нагрузкой до разрушения при определении призменной прочности и до уровня 30 % разрушающей нагрузки с измерением в процессе нагружения образцов их деформации. Призменная прочность вычисляется по определенным в процессе испытаний нагрузкам (P_p и 0,3P_p), а также продольным и поперечным относительным упругомгновенным деформациям (ε_{1v} и ε_{2v}). Кроме этого, в [112] приводятся также дополнительные требования к методам определения призменной прочности и модуля упругости бетона при нагреве, а также к прессу, оборудованному камерной печью, и другому оборудованию для проведения таких испытаний.

В данном случае, провести испытания на таком оборудовании не представлялось возможным в силу ряда причин, в первую очередь, связанных с территориальным удалением друг от друга лабораторий, в одной из которых образцы подвергались длительному воздействию углеводородного режима пожара, а в другой, определялась их призменная прочность на прессе. Возможность такого подхода к проведению испытаний образцов на прочность обусловлена тем фактом, что физико-механические свойства бетона как в нагретом, так и в остывшем состояниях остаются практически неизменными, что подтверждено многочисленными экспериментальными данными [25, 55, 113]. Необходимо также отметить, что в диапазоне температур от 800 до 1100 °C показатель прочности у всех рассматриваемых видов бетонов становится практически идентичным. Это объясняется тем, что независимо от метода изготовления, к этому моменту бетоны начинают размягчаться, у них значительно снижается модуль упругости и увеличивается ползучесть. На рисунке 2.8 представлены графические зависимости изменения коэффициента снижения прочности бетона (γ_{bt}) от температуры, который представляет собой отношение прочности бетона при нагреве (R_{bt}) к начальной прочности бетона (R_b) [25].



Из представленных на рисунке 2.8 зависимостей видно, что для рассматриваемого бетона, как в его нагретом, так и в охлажденном после нагрева состоянии, коэффициенты снижения прочности в одноименных температурных значениях существенно не отличаются друг от друга. Максимальное расхождение одноименных величин не превышает 7 % (при температуре в 1100 °C), при этом относительная погрешность не превышает 7,8 %.

Аналогичные зависимости для рассматриваемого бетона, как под нагрузкой, так и без нее, представлены также в работах [55, 113] (рисунки 2.9, 2.10).



Рисунок 2.9 – Влияние высоких температур на изменение прочности при сжатии тяжелого бетона на гранитном заполнителе под нагрузкой 0,3*R*_b



Рисунок 2.10 – Влияние высоких температур на изменение прочности при сжатии тяжелого бетона на гранитном заполнителе без нагрузки

Анализ зависимостей на рисунках 2.9 и 2.10 также показал не существенные различия коэффициентов снижения прочности в одноименных температурных значениях как для бетона под нагрузкой, так и без нее. Максимальное расхождение одноименных величин для бетона под нагрузкой не превышает 10 % (при 200 °C), при этом относительная погрешность не превышает 5,8 %, без нагрузки, соответственно 6 % (при 200 °C) и 2,9 %.

Таким образом, с целью решения поставленной задачи были проведены две серии экспериментов. Первая серия экспериментов выполнялась при температуре окружающей среды 20 °C для нахождения начальной прочности в образцах из исследуемых видов бетонов (Б, ТБ и ФТБ), имеющих как кубическую (150×150×150 мм), так и призменную (150×150×600 мм) форму, а также для нахождения между этими формами образцов переводных коэффициентов (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Общий вид образцов бетонов призменной (а) и кубической (б) форм для проведения испытаний на прочность

При подготовке бетонной смеси по ГОСТ 7473-2010 [91] для всех образцов применялся цемент марки М400 с крупным заполнителем из гранитной крошки, размером фракции не более 5 мм. Все образцы были получены методом отливки в формы при одинаковых температурных условиях из расчета один замес на один тип бетона, всего три замеса. Всего было изготовлено и испытано 18 образцов (по 3 образца на каждый вид бетона для кубической и призменной форм, соответственно).

Эксперименты по определению прочности образцов бетонов производились в испытательной лаборатории ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко на лабораторном испытательном гидравлическом прессе с электрическим силоизмерением модели ИП 6013-2000-1 (рисунок 2.12), предназначенном для статических испытаний на сжатие и проверки стандартных образцов бетонов по ГОСТ 10180-2012 [114].



Рисунок 2.12 – Общий вид пресса модели ИП 6013-2000-1

Испытательный пресс состоял из нагружающего устройства (силовая рама вертикального исполнения с нижним расположением гидроцилиндра), пульта с насосной установкой и системы измерения, отображающей в реальном времени создаваемую на образце действительную скорость нагружения от заданного значения скорости нагружения в кН/с. Для измерения нагрузки использовался датчик давления. Нагружающий модуль пресса был оснащен двумя винтовыми вертикальными колоннами, по которым вручную перемещалась подвижная траверса. Ниже представлены основные технические характеристики пресса:

наибольшая создаваемая нагрузка, кН	2000
диапазон измерения основной/дополнительный, кН	40÷2000/20÷40
погрешность при нагружении, %	±1
рабочий ход гидравлического поршня, мм	100
высота рабочего пространства, мм	610
расстояние между колоннами, мм	530
размеры плит сжатия, мм	320×320
максимальная скорость перемещения поршня, мм/мин	60
масса испытательной машины, кг	3160
тип привода и силоизмерителяэлектрогидравли	ческий, торсионный

Призменная прочность (*R*_{пр}, МПа) для каждого образца определялась в соответствии с ГОСТ 24452-80 [112] по формуле:

$$R_{\rm np} = P / F, \qquad (2.2)$$

где P – разрушающая нагрузка, измеренная по шкале силоизмерителя пресса, кH; F – среднее значение площади поперечного сечения образца, определяемое по его линейным размерам [114], см². Перед началом испытаний на боковых поверхностях образцов размечались центральные линии для центрирования образцов по оси испытательного пресса. Для точного центрирования на каждый образец устанавливались стальные рамки с закрепленными в них тензометрами (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Центровка образца призмы в испытательном прессе

Тензометры устанавливались на боковых гранях образца по осевым размеченным линиям. Образец с приборами устанавливался центрально по разметке плиты пресса и проверялось совмещение начального отсчета с делением шкалы прибора. Начальное усилие обжатия образца, которое в последующем принималось за условный нуль, не превышало 2 % от ожидаемой разрушающей нагрузки. Значение ожидаемой разрушающей нагрузки при испытании образцов устанавливалось по данным о прочности бетона, полученной по результатам определения прочности на сжатие образцов кубов, изготовленных из одного замеса. Ее значение при одинаковых сечениях кубов и призм принималось от 80 до 90 % от средней разрушающей нагрузки образцов кубов, полученной в соответствии с [114].

Следует отметить, что особое внимание к центрированию образцов обусловлено необходимостью соблюдения условия, когда в начале испытания от условного нуля до нагрузки, равной $(40 \pm 5 \%)P$, отклонения деформаций по каждой грани (образующей) не превышали 15 % их среднего арифметического значения. При несоблюдении этого требования образец разгружался, смещался относительно центральной оси разметки плиты пресса в сторону больших деформаций, и вновь производилось его центрирование.

В результате выполненной первой серии экспериментов установлено, что переводной коэффициент с образцов кубической формы на образцы призменной формы, независимо от вида бетона, составил 0,7. При этом образцы призменной формы, выполненные из Б и ТБ, имели идентичный характер разрушения (рисунок 2.14), сопоставимый с характерным разрушением образцов из обычного тяжелого бетона.



Рисунок 2.14 – Общий вид образцов призменной формы из ТБ (слева) и Б после испытаний на прочность

Иной характер разрушения имели образцы призменной формы, выполненные из ФТБ. Так, при приложении максимальных значений нагрузки до трети образца взрывалось, что свидетельствует о высоких прочностных характеристиках этих образцов, сравнимых с образцами из высокопрочных бетонов. На рисунке 2.15 представлены характерные кадры видеосъемки (~1 с) процесса разрушения одного из образцов призменной формы из ФТБ при достижении максимального значения нагрузки.

Вторая серия экспериментов выполнялась для нахождения прочностных характеристик образцов из исследуемых видов бетонов, предварительно ступенчато прогретых в течение 8 ч. в горизонтальной муфельной печи до 300, 500, 600 и 1100 °C соответственно. Затем образцы остывали до температуры окружающей среды внутри печи в течение суток.



Рисунок 2.15 – Кадры видеосъемки (~1 с) процесса разрушения образца призменной формы из ФТБ при достижении максимального значения нагрузки

Такие условия прогрева и остывания исключали возникновение температурных напряжений внутри исследуемых образцов, связанных с градиентом температур по глубине сечения, и позволили добиться равномерного прогрева по всему сечению образца. Всего было изготовлено 36 образцов кубической формы для соответствующих видов бетонов, прогрев которых до указанных выше температур производился в лаборатории Центра испытаний и сертификации «НИИЖБ-ПОЛИГОН». Далее образцы доставлялись в лабораторию ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, где и производились итоговые испытания на прочность исследуемых образцов бетонов кубической формы. Для определения прочности образцов призменной формы использовался переводной коэффициент, найденный при ранее выполненных экспериментах. Таблица 2.2 – Результаты экспериментального исследования кубической ($R_{\kappa y \delta}$) и призменной (R_{np}) прочности образцов из Б, ТБ и ФТБ в диапазоне от 20 до 1100 °C

T, ℃	<i>R</i> _{куб} , МПа			$R_{\rm пр}, { m M}\Pi{ m a}$		
	Б	ТБ	ФТБ	Б	ТБ	ФТБ
20	45,52	80,38	104,50	31,86	56,27	73,15
300	38,80	71,86	90,60	27,16	50,30	63,42
500	29,97	47,36	66,38	20,98	33,15	46,47
700	21,95	35,21	49,40	15,37	24,65	34,58
900	6,96	9,75	13,40	4,87	6,83	9,38
1100	5,18	7,31	10,30	3,63	5,12	7,21



Рисунок 2.16 – Графическое отображение экспериментальных данных по изменению призменной прочности в образцах бетонов от температуры

Анализ полученных данных показал, что, как и предполагалось, ФТБ обладает более высокой начальной прочностью, значение которой в 2,3 раза превышает аналогичный показатель у Б и в 1,3 раза – у ТБ. При этом ТБ также имеет высокий показатель начальной прочности, значение которого более чем в 1,7 раза превышает аналогичный показатель у Б.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований получены данные по изменению прочности на сжатие Б, ТБ и ФТБ в температурном диапазоне от 20 до 1100 °C, которые могут использоваться в инженерных расчетах для определения огнестойкости строительных конструкций, выполненных с использованием рассматриваемых видов бетонов, в том числе, и при строительстве ограждений резервуарных парков. Кроме этого, можно сделать вывод о перспективности использования метода торкретирования для строительства ограждающих стен PBC, особенно, при необходимости обустройства ограждающих стен с волноотражающим козырьком, расчет которых должен производиться на гидродинамические нагрузки от волны прорыва [2].

ГЛАВА З ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГРЕВА ОБРАЗЦОВ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА

3.1 Численное моделирование процесса прогрева образцов бетонов

Используя в качестве исходных данных результаты исследований по изменению плотности, удельной теплоемкости и температуропроводности в образцах рассматриваемых видов бетонов, а также вычисленные соответствующие коэффициенты теплопроводности, в интервале температур от 20 до 1100 °C (см. главу 2 настоящей работы), стало возможным проведение численного моделирования процесса прогрева аналогичных образцов, но с геометрическими размерами, соответствующими размерам натурных ограждающих стен резервуарных парков, в условиях углеводородного режима пожара. Отметим, что ранее выполненные исследования теплотехнических характеристик рассматриваемых видов бетонов проводились на цилиндрических образцах малых размеров (диаметр 12,5 ± 0,1 мм, высота 3,0 ± 0,1 мм), что обуславливалось конструктивными особенностями применяемого высокоточного измерительного оборудования.

Важно также указать, что реальные размеры ограждающих стен резервуарных парков зависят как от геометрических размеров резервуаров, по периметру которых они обустраиваются, так и от расстояний от стен до резервуаров, и могут достигать высоты более 6 м и толщины более 0,4 м [2]. Очевидно, что испытать даже фрагменты таких конструкций в натурную величину не представляется возможным. Поэтому для решения поставленной задачи, в качестве исследуемого был выбран образец с оптимальными размерами (250×250×400 мм), позволяющими с достаточной точностью воспроизвести процессы тепломассопередачи, присущие рассматриваемым ограждениям. Выбор таких размеров также обусловлен идентичностью принятых размеров образцов для дальнейших натурных испытаний. Численное моделирование процесса прогрева образцов рассматриваемых видов бетонов выполнялось в программном комплексе *ANSYS CFX* [115–118].

Предварительно, используя средства сеточного построителя ANSYS ICEM CFD, была построена геометрическая модель исследуемых образцов, имеющая разбивку 10×10×20 ячеек (рисунок 3.1).

Рисунок 3.1 – Геометрические размеры и сеточная модель образца



Распространение тепла внутри твердого тела произвольной формы описывается следующим дифференциальным уравнением [89]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T), \qquad (3.1)$$

где ρ , h, λ – плотность, энтальпия и теплопроводность твердого материала.

Для решения этого уравнения необходимо определить граничные и начальные условия [119, 120]. В данном случае это тепловая изоляция вдоль боковых стенок блока (рисунок 3.2), а для обогреваемой и необогреваемой стенок фиксировался коэффициент теплоотдачи (h_c) и температура окружающего воздуха (T_{nw}):

$$q_w = h_c (T_w - T_{nw}), (3.2)$$

где q_w и T_w – тепловой поток и температура на обогреваемой стенке образца.

В рамках рассматриваемой модели теплофизические свойства бетонов принимались зависящими от температуры по таблице 2.1. Отметим, что значения параметров теплопроводности и плотности рассматриваемых видов бетонов входили явным образом в уравнения распространения тепла, а параметры теплоемкости неявно учитывались в значении энтальпии.



Рисунок 3.2 – Краевые условия задачи

При интегрировании уравнения нестационарного распространения тепла использовался метод конечного объема, что гарантировало выполнение законов сохранения энергии в каждом элементарном объеме, обеспечивая второй порядок аппроксимации по пространству и времени по всей расчетной области [121–123]. Шаг интегрирования по времени составлял 10 с. Основными результатами расчетов являлись временные развертки показаний датчиков температуры, установленных вдоль центральных линий в каждом из исследуемых образцов бетонов (контрольных точках) на соответствующих расстояниях от горячей к холодной стенке: $X_1 = 0,035$ м; $X_2 = 0,120$ м; $X_3 = 0,200$ м; $X_4 = 0,280$ м; $X_5 = 0,360$ м; $X_6 = 0,400$ м (холодная стенка). Полученные временные развертки с отражением *X*-координат датчиков в названии контрольных точек приведены на рисунке 3.3.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что образец на основе ФТБ на расстояниях до 0,2 м от нагреваемой поверхности в течение всего периода исследования прогревался несколько интенсивнее, чем образцы на основе Б и ТБ, что обусловлено, по всей видимости, его большей плотностью из-за наличия равномерно распределенной стальной фибры диаметром 0,4 мм и длиной 20,0 мм. Также можно отметить, что образец на основе ТБ по сравнению с остальными образцами во всех контрольных точках прогревался несколько медленнее. Скорость прогрева образца на основе Б на расстояниях до 0,2 м от нагреваемой поверхности практически соответствовала скорости прогрева образца на основе ТБ, а на остальных расстояниях, была несколько интенсивнее, чем у образцов на основе ТБ и ФТБ.



Рисунок 3.3 – Временные развертки показаний датчиков температуры в контрольных точках соответствующих образцах бетонов при проведении численного моделирования

3.2 Экспериментальное исследование процесса прогрева образцов бетонов

С целью возможности проведения сравнительного анализа с результатами численного моделирования изучаемого процесса были выполнены экспериментальные исследования на образцах бетонов с теми же геометрическими размерами (250×250×400 мм). Для испытаний были изготовлены по два одинаковых образца из каждого вида рассматриваемого бетона, в которые на стадии заливки внедрялись по 25 термоэлектрических преобразователей (термопар), а также непосредственно перед проведением испытаний на необогреваемой поверхности образцов дополнительно закреплялись по 5 термопар (рисунки 3.4, 3.5).



Рисунок 3.4 – Принципиальная схема расстановки термопар в образцах



Рисунок 3.5 – Общий вид образца с термопарами

63

Перед испытанием каждый образец изолировался четырехслойным покрытием кроме обогреваемой и необогреваемой (тыльной) поверхностей. В качестве изоляции для первого слоя применялась алюминиевая фольга толщиной 0,03 мм, способная отражать основную часть лучистой составляющей теплового потока в инфракрасном диапазоне до 97 %. Для второго слоя использовались маты из кремнеземного волокна толщиной 20 мм. Третий слой состоял из асбестоцементных плит толщиной 20 мм. В качестве четвертого слоя использовались газосиликатные блоки толщиной 400 мм. Используемые материалы, обладая очень низкой теплопроводностью, широко применяются в теплоогнезащите конструкций и являются практически идеальными теплоизоляторами (рисунки 3.6, 3.7) [69, 70, 124–127].



Рисунок 3.6 – Принципиальная схема обустройства изоляции образцов: 1 – исследуемый образец; 2 – алюминиевая фольга; 3 – маты из кремнеземного волокна; 4 – асбестоцементные плиты; 5 – газосиликатные блоки



Рисунок 3.7 – Общий вид изоляции с боковой (а) и тыльной (б) сторон образца

Образцы в изоляции устанавливались в камере нагрева на расстоянии 1,5 м от сопла дизельной горелки, что обеспечивало при проведении испытаний прямое воздействие пламени на образец в необходимом температурном режиме. Горелка устанавливалась таким образом, чтобы весь тепловой поток пламени попадал в центр образца за счет чего достигался равномерный нагрев обогреваемой поверхности по всей ее площади (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Общий вид расположения образца в камере нагрева напротив сопла горелки (а) и со стороны обогреваемой поверхности (б)

Заданная температура в камере нагрева создавалась и поддерживалась с помощью дизельной горелки модели *ECO*-20 *Lamborghini* [128] максимальной мощностью 249 кВт при среднем расходе топлива 15 л/ч (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Общий вид и основные геометрические размеры горелки *ECO*-20 *Lamborghini*

Температура пламени внутри камеры измерялась печной термопарой на расстоянии 0,1 м от обогреваемой поверхности образца и составляла 1200 ± 50 °C. Вытяжная система, расположенная на уровне пола в камере нагрева, обеспечивала поддержание необходимой температуры внутри камеры, а также позволила исключить попадание горячих газов из камеры на тыльную сторону образца (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Общий вид камеры нагрева изнутри при работе дизельной горелки и вытяжной системы

Непрерывный мониторинг за изменением температуры в контрольных точках исследуемых образцах бетонов при их нагреве в условиях углеводородного режима пожара производился с использованием универсальной многоканальной системы «Терем» [129] (рисунок 3.11), состоящей из:

– центрального электронного блока, включающего в себя графический дисплей, клавиатуру, аккумуляторы и программное обеспечение;

промежуточного звена (адаптера) для обработки и регистрации сигналов,
 поступающих от локальных групп датчиков температуры, и передачи их в цифровой форме в центральный блок;

 четырехпроводной линии связи, объединяющей адаптер и центральный блок, и датчиков температуры.



Рисунок 3.11 – Общий вид расположения контрольноизмерительного оборудования в камере нагрева

В качестве центрального электронного блока для контроля, регистрации в памяти и отображения информации, поступающей от датчиков температуры, использовался универсальный многоканальный регистратор «Терем-4.1», общий вид которого показан на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Общий вид универсального многоканального регистратора «Терем-4.1»

В соответствии с паспортными данными на регистратор «Терем-4.1» [130] при его использовании в температурной среде от минус 40 до 100 °С пределы основной относительной погрешности измерений составляют ±0,5 %. Регистратор функционировал в режиме непрерывного ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов в память. Интервал времени регистрации сигналов составлял 1 с. Все данные, записанные в память регистратора, после проведения испытаний переносились в персональный компьютер. В качестве датчиков температуры в образцах бетонов использовались хромель-алюмелевые (ХА) термопары типа ТПК 125-0314.1500 с изолированным измерительным спаем относительно корпуса и диапазоном измерения рабочих температур от минус 40 до 1400 °C [131].

Промежуточным звеном являлся универсальный многоканальный адаптер «Терем-4.0» (рисунок 3.13), в соответствии с руководством по эксплуатации которого [130] при использовании в качестве датчиков температур термопар ХА в диапазоне измерения температуры от минус 50 до 1000 °C пределы основной погрешности измерения составляют $\pm 1,0$ %.



Рисунок 3.13 – Общий вид универсального многоканального адаптера «Терем-4.0»

Отличительной особенностью используемого адаптера являлось наличие в нем встроенных датчиков температур на каждую группу из 8 термопар, используемых для компенсации температуры их холодных спаев.

В процессе испытаний визуально регистрировалась возможность появления в образцах трещин, отверстий, отслоений. На рисунке 3.14 приведена принципиальная схема размещения приборного оборудования и регистрирующей аппаратуры, используемых при проведении испытаний.

Влажность образцов до начала испытаний была динамически уравновешенной с окружающей средой (относительная влажность 60 ± 15 %). Испытания образцов проводились без статической нагрузки при одностороннем тепловом воздействии. Для измерения скорости движения воздуха применялся анемометр электронный марки ЭА-70 с диапазоном измерения от 0,2 до 30,0 м/с. Измерение относительной влажности в помещения осуществлялось гигрометром марки ВИТ-1 с диапазоном измерения от 20 до 90 %.



Рисунок 3.14 – Принципиальная схема размещения оборудования и аппаратуры при проведении испытаний по прогреву образцов бетонов:

1 – печь из шамотного кирпича; 2 – дизельная горелка; 3 – исследуемый образец; 4 – изоляция образца; 5 – термические преобразователи; 6 – адаптер; 7 – регистратор сигналов

На рисунке 3.15 представлен общий вид образцов исследуемых видов бетонов после проведения огневых испытаний при *HCOS*.



Рисунок 3.15 – Общий вид образцов на основе Б (а), ТБ (б) и ФТБ (в) после огневых испытаний при *HCOS*

В результате выполненных экспериментов установлено, что в образцах из Б (рисунок 3.15а) на 3–5 минуте их прогрева наблюдалось интенсивное откалывание фрагментов из-за чего испытания приостанавливались во избежание порчи оборудования. Данный факт подтверждает возможность хрупкого разрушения бетонов с высокой влажностью при резком высокотемпературном воздействии [132, 133].

У образцов из ФТБ (рисунок 3.15в) обогреваемая сторона оплавилась и стала похожей на вспененною субстанцию. Такой эффект вспучивания наблюдался, по всей видимости, из-за поведения металлической фибры в образце при длительном воздействии высокой температуры пожара. Появление оплавленного слоя дает возможность предположить исключение трещинообразования в образцах из ФТБ. В образцах из ТБ (рисунок 3.15б) при испытаниях откалывание фрагментов, как и образование оплавленного слоя, не наблюдалось.

На рисунках 3.16–3.18 представлены результаты испытаний по прогреву образцов исследуемых видов бетонов в условиях *HCOS*, а также аналогичные данные, полученные при численном моделировании. Сравнительный анализ данных позволяет говорить об их удовлетворительной сходимости (максимальное расхождение одноименных величин не превышало 20,5 %, см. раздел 3.3) и возможности использования полученных эмпирических зависимостей для определения теплофизических свойств Б, ТБ и ФТБ (см. таблицу 2.1) при выполнении расчетов по оценке пределов огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, проектируемых на основе этих видов бетонов.

3.3 Оценка погрешностей измерений температуры в контрольных точках образцов бетонов

Как уже отмечалось раннее, непрерывный (в течение 2,5 ч.) мониторинг изменения температуры в контрольных точках образцах бетонов при их нагреве в условиях углеводородного режима пожара производился с использованием универсальной многоканальной системы «Терем». В качестве центрального электронного блока для контроля, регистрации в памяти и отображения информации, поступающей от датчиков температуры, использовался универсальный многоканальный регистратор «Терем-4.1», в соответствии с паспортными данными на который [130], пределы основной относительной погрешности измерений составляют $\pm 0,5$ %.



Рисунок 3.16 – Временные развертки средних показаний датчиков температуры в контрольных точках образцах из Б при численном моделировании (сплошная линия) и при проведении испытаний



Рисунок 3.17 – Временные развертки средних показаний датчиков температуры в контрольных точках образцах из ТБ при численном моделировании (сплошная линия) и при проведении испытаний


Рисунок 3.18 – Временные развертки средних показаний датчиков температуры в контрольных точках образцах из ФТБ при численном моделировании (сплошная линия) и при проведении испытаний

В качестве датчиков температуры использовались хромель-алюмелевые термопары типа ТПК 125-0314.1500 с изолированным измерительным спаем относительно корпуса и диапазоном измерения рабочих температур от минус 40 до 1400 °C [131].

Промежуточным звеном являлся универсальный многоканальный адаптер «Терем-4», в соответствии с руководством по эксплуатации которого [129] при использовании в качестве датчиков температур термопар ХА в диапазоне измерения температуры от минус 50 до 1000 °С пределы основной погрешности измерения составляют ±1,0 %. При этом, отличительной особенностью используемого адаптера являлось наличие в нем встроенных датчиков температур на каждую группу из 8 термопар, используемых для компенсации температуры их холодных спаев. Используемые в адаптере каналы были настроены на указанные выше ХА термопары с индивидуальной калибровкой, выполненной в заводских условиях, при этом значение температуры вычислялось по формуле:

$$T = A_4 U^4 + A_3 U^3 + A_2 U^2 + A_1 U + A_0, \qquad (3.3)$$

где $A_4 \dots A_0$ – калибровочные коэффициенты; U – ЭДС термопары с учетом компенсации температуры холодного спая, вычисленное по формуле:

$$U = U_{\text{M3M}} + B_4 T_x^4 + B_3 T_x^3 + B_2 T_x^2 + B_1 T_x + B_0, \qquad (3.4)$$

где $U_{\rm изм}$ – измеренное напряжение, В; T_x – температура датчика холодного спая; $B_4 \dots B_0$ – калибровочные коэффициенты.

Методика определения погрешностей прямых измерений приводится, в частности, в [134–137], в соответствии с которой, суммарная погрешность результатов измерений величины *x* определяется как среднее квадратичное значение систематической и случайной погрешностей по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} x = \sqrt{\delta x^2 + \Delta x^2} ; \qquad (3.5)$$

где δx – приборная погрешность; Δx – случайная погрешность.

Приборная погрешность используемой измерительной системы складывается из погрешностей средств измерений, образующих систему, и рассчитывается как статическая сумма абсолютных погрешностей средств измерений по формуле:

$$\delta x = \sqrt{\Delta_p^2 + \Delta_a^2} , \qquad (3.6)$$

где Δ_p^2 – абсолютная погрешность регистратора; Δ_a^2 – абсолютная погрешность адаптера.

Абсолютная погрешность через класс точности прибора оценивается по формуле:

$$\Delta x_{\rm \tiny KT} = \frac{\gamma}{100} A \,, \tag{3.7}$$

где γ – класс точности прибора, %; $A = A_{max}$ – предел измерения, либо текущее значение для магазинов сопротивления, индуктивности, емкости и т. п.

В данном случае, эксперименты проводились при температуре окружающей среды 22 ± 2 °C. Таким образом максимальная абсолютная погрешность регистратора составляла:

$$\Delta_p = \frac{0.5}{100} 24 = 0.12 \,^{\circ}\text{C}.$$

Максимальная абсолютная погрешность адаптера зависела непосредственно от пределов измерений температуры в образцах в каждом временном интервале, поэтому вычислялась по формуле:

$$\Delta_a = \frac{1.0}{100} x_{\max} , \qquad (3.8)$$

где x_{max} – максимальное измеренное значение температуры в контрольных точках образцах бетонов в каждом временном интервале, °С.

Случайная погрешность вычисляется, используя следующую процедуру:

– вычисляется среднее арифметическое *x* из *n* одинаковых измерений, которое принимается за наиболее вероятное значение измеряемой величины:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x_i;$$
 (3.9)

– находятся абсолютные погрешности отдельных измерений: $\Delta x_i = |x_i - \overline{x}|;$ – вычисляются квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений: $\Delta x_i^2;$

– определяется средняя квадратичная погрешность результата всех измерений:

$$S_{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_{i})^{2}}{n(n-1)}};$$
(3.10)

– учитывая коэффициент надежности (принято $\alpha = 0,95$) и число произведенных измерений (в данном случае для каждого временного интервала n = 10), по таблице находится коэффициент Стьюдента (используя таблицу из приложения 7 [137], $t_{\alpha, n} = 2,2$);

- определяется случайная погрешность:

$$\Delta x = t_{\alpha,n} S_x; \tag{3.11}$$

- по формуле (3.5) определяется суммарная погрешность;

- оценивается относительная погрешность результатов измерений:

$$E = \pm \frac{\Delta_{\Sigma} x}{\overline{x}} 100\%; \qquad (3.12)$$

- записывается окончательный результат в виде:

$$\mu = \overline{x} \pm \Delta_{\Sigma} x$$
, c $\alpha = 0.95$, $E = \pm \dots \%$.

Используя выше рассмотренную методику оценки погрешностей прямых измерений и результаты экспериментального исследования прогрева образцов различных видов бетонов в условиях углеводородного режима пожара, в таблицах 3.1–3.6 представлены основные результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках образцах исследуемых видов бетонов.

Время нагрева	X1		X_2		<i>X</i> ₃	
образца, мин.	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %
0,5	$21,0 \pm 0,5$	±2,3	$21,1 \pm 0,3$	±1,6	$21,0 \pm 0,4$	±1,7
3,0	$37,0 \pm 0,7$	±1,8	$21,4 \pm 0,3$	±1,3	$21,1 \pm 0,4$	±1,6
10,0	$105,0 \pm 1,5$	±1,5	$21,5 \pm 0,3$	±1,3	$21,1 \pm 0,3$	±1,6
20,0	$200,3 \pm 2,6$	±1,3	$25,0 \pm 0,5$	±1,8	$21,6 \pm 0,3$	±1,6
30,0	$270,4 \pm 3,2$	±1,2	$35,0 \pm 0,6$	±1,7	$22,0 \pm 0,4$	±1,8
40,0	$340,4 \pm 3,8$	±1,1	$43,0 \pm 0,6$	±1,3	$23,0 \pm 0,7$	±2,9
50,0	$410,4 \pm 4,5$	±1,1	$59,0 \pm 1,2$	±2,0	$24,0 \pm 0,8$	±3,3
60,0	$475,4 \pm 5,1$	±1,1	$77,0 \pm 1,1$	±1,4	$27,0 \pm 0,6$	±2,3
70,0	$520,3 \pm 5,5$	±1,1	$87,0 \pm 1,2$	±1,4	$29,1 \pm 0,8$	±2,9
80,0	$580,4 \pm 6,1$	±1,1	$98,1 \pm 1,3$	±1,3	$33,1 \pm 0,8$	±2,4
90,0	$610,1 \pm 6,4$	±1,1	$103,0 \pm 1,3$	±1,2	$37,0 \pm 0,8$	±2,1
100,0	$640,4 \pm 6,7$	±1,0	$112,0 \pm 1,4$	±1,2	$40,0 \pm 1,0$	±2,4
110,0	$670,4 \pm 7,0$	±1,0	$125,0 \pm 1,6$	±1,3	$43,0 \pm 1,0$	±2,4
120,0	$690,2 \pm 7,1$	±1,0	$140,1 \pm 1,8$	±1,3	$48,1 \pm 0,9$	±1,8
130,0	$705,1 \pm 7,3$	±1,0	$160,0 \pm 1,9$	±1,2	$53,0 \pm 1,0$	±1,9
140,0	$725,0 \pm 7,5$	±1,0	$180,1 \pm 2,3$	±1,3	$60,1 \pm 1,1$	±1,9
150,0	$738,2 \pm 7,7$	±1,1	$185,0 \pm 2,2$	±1,2	$65,0 \pm 1,3$	±2,0
160,0	$760,4 \pm 7,9$	±1,0	$190,0 \pm 2,4$	±1,3	$72,0 \pm 1,4$	±2,0

Таблица 3.1 – Результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках *X*₁–*X*₃ образцов на основе Б

Таблица 3.2 – Результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках *X*₄–*X*₆ образцов на основе Б

Время нагрева	X_4		X_5	-	X ₆	-
образца, мин.	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %
0,5	$21,0 \pm 0,4$	±1,7	$21,0 \pm 0,3$	±1,5	$21,0 \pm 0,3$	±1,3
3,0	$21,0 \pm 0,4$	±1,7	$21,0 \pm 0,3$	±1,5	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
10,0	$21,1 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,3$	±1,5	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
20,0	$21,1 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,3$	±1,4	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
30,0	$21,1 \pm 0,4$	±1,8	$21,1 \pm 0,3$	±1,4	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
40,0	$21,2 \pm 0,4$	±1,8	$21,2 \pm 0,3$	±1,3	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
50,0	$21,2 \pm 0,4$	±1,7	$21,3 \pm 0,3$	±1,2	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
60,0	$21,5 \pm 0,4$	±1,7	$21,4 \pm 0,3$	±1,2	$21,0 \pm 0,3$	±1,2
70,0	$22,0 \pm 0,4$	±1,7	$22,1 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,3$	±1,2
80,0	$22,5 \pm 0,5$	±2,2	$22,5 \pm 0,3$	±1,5	$21,2 \pm 0,3$	±1,2
90,0	$24,0 \pm 0,6$	±2,6	$23,2 \pm 0,3$	±1,3	$21,3 \pm 0,3$	±1,2
100,0	$24,5 \pm 0,6$	±2,3	$23,5 \pm 0,4$	±1,6	$21,4 \pm 0,3$	±1,2
110,0	$25,8 \pm 0,6$	±2,3	$25,0 \pm 0,4$	±1,5	$21,5 \pm 0,3$	±1,2
120,0	$27,0 \pm 0,5$	±1,9	$26,0 \pm 0,6$	±2,2	$22,0 \pm 0,4$	±1,9
130,0	$30,0 \pm 0,7$	±2,2	$28,0 \pm 0,5$	±1,6	$23,0 \pm 0,5$	±2,0
140,0	$32,0 \pm 0,6$	±2,0	$30,1 \pm 0,6$	±1,9	$24,0 \pm 0,5$	±2,1
150,0	$35,1 \pm 0,8$	±2,2	$31,0 \pm 0,6$	±2,0	$25,0 \pm 0,8$	±3,0
160,0	$38,1 \pm 0,8$	±2,0	$34,1 \pm 0,5$	±1,6	$27,0 \pm 0,8$	±2,9

Время нагрева	X_1		X_2	X_2		
образца, мин.	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %
0,5	$20,4 \pm 0,4$	±1,7	$20,3 \pm 0,3$	±1,5	$20,1 \pm 0,3$	±1,3
3,0	$36,0 \pm 0,8$	±2,3	$20,4 \pm 0,3$	±1,4	$20,2 \pm 0,3$	±1,2
10,0	$100,4 \pm 1,8$	±1,8	$20,5 \pm 0,3$	±1,4	$20,3 \pm 0,3$	±1,3
20,0	$159,6 \pm 2,5$	±1,6	$25,3 \pm 0,7$	±2,6	$20,4 \pm 0,3$	±1,3
30,0	$255,9 \pm 3,3$	±1,3	$31,0 \pm 1,2$	±3,8	$20,5 \pm 0,3$	±1,2
40,0	$331,7 \pm 4,0$	±1,2	$43,1 \pm 1,5$	±3,4	$21,6 \pm 0,3$	±1,5
50,0	$395,5 \pm 5,5$	±1,4	$58,0 \pm 1,4$	±2,4	$23,7 \pm 0,4$	±1,7
60,0	$449,9 \pm 5,6$	±1,2	$80,1 \pm 1,7$	±2,1	$25,0 \pm 0,6$	±2,2
70,0	$496,9 \pm 6,2$	±1,3	$96,0 \pm 1,7$	±1,8	$28,0 \pm 0,5$	±1,7
80,0	$542,4 \pm 6,6$	±1,2	$99,1 \pm 1,4$	±1,4	$32,0 \pm 0,6$	±1,9
90,0	$583,8 \pm 7,2$	±1,2	$101,1 \pm 1,7$	±1,7	$35,0 \pm 0,6$	±1,8
100,0	$621,9 \pm 6,8$	±1,1	$110,0 \pm 2,7$	±2,5	$40,0 \pm 0,9$	±2,2
110,0	$660,6 \pm 7,3$	±1,1	$120,0 \pm 2,5$	±2,1	$42,0 \pm 0,8$	±1,9
120,0	$677,6 \pm 7,4$	±1,1	$130,0 \pm 2,2$	±1,7	$45,0 \pm 0,7$	±1,6
130,0	$694,3 \pm 7,5$	±1,1	$145,1 \pm 3,6$	±2,5	$52,0 \pm 1,1$	±2,1
140,0	$720,4 \pm 7,8$	±1,1	$165,1 \pm 3,2$	±1,9	$55,0 \pm 1,1$	±2,0
150,0	$742,1 \pm 8,1$	±1,1	$175,1 \pm 3,5$	±2,0	$60,1 \pm 1,4$	±2,4
160,0	$760,3 \pm 8,7$	±1,1	$185,0 \pm 3,5$	±1,9	$70,1 \pm 1,2$	±1,7

Таблица 3.3 – Результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках *X*₁–*X*₃ образцов на основе ТБ

Таблица 3.4 – Результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках *X*₄–*X*₆ образцов на основе ТБ

Время нагрева	X_4		X_5	-	X_6	-
образца, мин.	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %
0,5	$20,1 \pm 0,3$	±1,2	$20,1 \pm 0,2$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
3,0	$20,1 \pm 0,3$	±1,2	$20,1 \pm 0,2$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
10,0	$20,2 \pm 0,3$	±1,2	$20,1 \pm 0,2$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
20,0	$20,4 \pm 0,2$	±1,2	$20,2 \pm 0,2$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
30,0	$20,4 \pm 0,2$	±1,2	$20,3 \pm 0,2$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
40,0	$20,5 \pm 0,2$	±1,2	$20,4 \pm 0,3$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
50,0	$20,6 \pm 0,2$	±1,2	$20,5 \pm 0,3$	±1,2	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
60,0	$21,0 \pm 0,3$	±1,4	$21,0 \pm 0,3$	±1,5	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
70,0	$22,1 \pm 0,4$	±1,9	$22,0 \pm 0,4$	±1,7	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
80,0	$22,2 \pm 0,4$	±2,0	$22,2 \pm 0,4$	±1,8	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
90,0	$24,0 \pm 0,5$	±1,9	$23,0 \pm 0,5$	±2,0	$20,0 \pm 0,2$	±1,2
100,0	$24,5 \pm 0,4$	±1,5	$24,1 \pm 0,4$	±1,8	$20,1 \pm 0,2$	±1,2
110,0	$25,6 \pm 0,5$	±2,0	$25,0 \pm 0,4$	±1,5	$20,1 \pm 0,2$	±1,2
120,0	$27,0 \pm 0,5$	±1,9	$26,0 \pm 0,5$	±1,9	$20,2 \pm 0,3$	±1,2
130,0	$30,0 \pm 0,7$	±2,3	$28,0 \pm 0,5$	±1,7	$21,1 \pm 0,4$	±1,9
140,0	$32,0 \pm 0,7$	±2,2	$29,0 \pm 0,5$	±1,9	$22,1 \pm 0,5$	±2,2
150,0	$34,1 \pm 0,7$	±2,0	$31,0 \pm 0,7$	±2,3	$23,1 \pm 0,6$	±2,6
160,0	$36,1 \pm 0,7$	±2,0	$33,1 \pm 0,7$	±2,1	$25,0 \pm 0,5$	±1,9

Время нагрева	X_1		X_2		<i>X</i> ₃	
образца, мин.	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %
0,5	$21,2 \pm 0,3$	±1,6	$21,0 \pm 0,4$	±1,7	$21,0 \pm 0,4$	±1,7
3,0	$38,0 \pm 1,0$	±2,6	$21,0 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,4$	±1,8
10,0	$110,0 \pm 4,9$	±4,4	$21,5 \pm 0,3$	±1,6	$21,3 \pm 0,3$	±1,3
20,0	$220,0 \pm 5,6$	±2,5	$25,0 \pm 0,5$	±1,8	$21,6 \pm 0,3$	±1,3
30,0	$280,0 \pm 7,8$	±2,8	$38,0 \pm 0,7$	±1,9	$23,0 \pm 0,4$	±1,7
40,0	$360,0 \pm 6,9$	±1,9	$44,0 \pm 1,0$	±2,2	$24,0 \pm 0,5$	±2,3
50,0	$433,0 \pm 11,4$	±2,6	$60,0 \pm 1,6$	±2,7	$25,0 \pm 0,5$	±1,9
60,0	$500,0 \pm 9,0$	±1,8	$75,0 \pm 1,4$	±1,9	$28,0 \pm 0,5$	±1,7
70,0	$550,0 \pm 12,0$	±2,2	$93,0 \pm 2,5$	±2,7	$30,0 \pm 0,6$	±2,0
80,0	$608,0 \pm 7,8$	±1,3	$98,0 \pm 1,7$	±1,7	$34,0 \pm 0,6$	±1,8
90,0	$630,0 \pm 9,5$	±1,5	$104,0 \pm 1,8$	±1,8	$38,0 \pm 0,6$	±1,7
100,0	$670,0 \pm 8,0$	±1,2	$115,0 \pm 2,3$	±2,0	$40,0 \pm 0,8$	±2,0
110,0	$680,0 \pm 10,2$	±1,5	$130,0 \pm 2,8$	±2,1	$45,0 \pm 0,9$	±2,0
120,0	$700,0 \pm 9,0$	±1,3	$152,1 \pm 2,7$	±1,8	$52,0 \pm 0,9$	±1,6
130,0	$722,0 \pm 8,9$	±1,2	$172,0 \pm 3,2$	±1,8	$55,0 \pm 0,8$	±1,4
140,0	$745,0 \pm 8,6$	±1,2	$190,6 \pm 3,4$	±1,8	$64,0 \pm 1,0$	±1,6
150,0	$770,0 \pm 9,6$	±1,2	$200,0 \pm 3,3$	±1,7	$68,0 \pm 1,0$	±1,4
160,0	$780,0 \pm 9,3$	±1,2	$220,0 \pm 3,4$	±1,5	$75,0 \pm 1,0$	±1,4

Таблица 3.5 – Результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках *X*₁–*X*₃ образцов на основе ФТБ

Таблица 3.6 – Результаты оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках *X*₄–*X*₆ образцов на основе ФТБ

1	1 0	1					
Время нагрева	X_4		X_5	X_5		X_6	
образца, мин.	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	μ, °C	<i>E</i> , %	
0,5	$21,0 \pm 0,3$	±1,6	$21,0 \pm 0,3$	±1,6	$20,8 \pm 0,4$	±1,9	
3,0	$21,0 \pm 0,4$	±1,7	$21,0 \pm 0,3$	±1,6	$20,9 \pm 0,3$	±1,6	
10,0	$21,1 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,3$	±1,2	
20,0	$21,2 \pm 0,4$	±1,6	$21,1 \pm 0,4$	±1,7	$21,1 \pm 0,2$	±1,2	
30,0	$21,3 \pm 0,3$	±1,6	$21,2 \pm 0,3$	±1,4	$21,1 \pm 0,2$	±1,2	
40,0	$21,4 \pm 0,3$	±1,4	$21,3 \pm 0,3$	±1,2	$21,2 \pm 0,3$	±1,2	
50,0	$21,7 \pm 0,3$	±1,4	$21,4 \pm 0,3$	±1,2	$21,3 \pm 0,3$	±1,2	
60,0	$22,0 \pm 0,3$	±1,2	$21,6 \pm 0,3$	±1,4	$21,5 \pm 0,3$	±1,2	
70,0	$22,2 \pm 0,3$	±1,4	$22,0 \pm 0,3$	±1,5	$21,9 \pm 0,3$	±1,4	
80,0	$23,0 \pm 0,4$	±1,8	$22,8 \pm 0,4$	±1,8	$22,5 \pm 0,3$	±1,4	
90,0	$24,0 \pm 0,6$	±2,4	$23,5 \pm 0,4$	±1,8	$23,0 \pm 0,3$	±1,5	
100,0	$25,0 \pm 0,5$	±2,0	$24,0 \pm 0,5$	±2,0	$23,5 \pm 0,4$	±1,5	
110,0	$26,0 \pm 0,7$	±2,6	$25,0 \pm 0,6$	±2,3	$24,1 \pm 0,3$	±1,4	
120,0	$27,0 \pm 0,5$	±2,0	$26,0 \pm 0,5$	±1,9	$24,5 \pm 0,4$	±1,6	
130,0	$30,0 \pm 0,8$	±2,7	$28,1 \pm 0,7$	±2,5	$26,0 \pm 0,6$	±2,4	
140,0	$32,0 \pm 0,7$	±2,3	$\overline{31,1\pm 1,0}$	±3,2	$28,0 \pm 0,5$	±1,8	
150,0	$36,0 \pm 1,0$	±2,7	$32,1 \pm 0,8$	±2,3	$29,0 \pm 0,4$	±1,5	
160,0	$40,0 \pm 1,0$	±2,6	$35,0 \pm 0,6$	±1,8	$30,0 \pm 0,6$	±1,9	

Анализ данных представленных в таблицах 3.1-3.6 показал, что значение максимальной суммарной погрешности результатов измерений температуры достигалось для всех исследуемых образцов в контрольной точке X_1 (наиболее близко расположенной к обогреваемой поверхности образцов, см. рисунки 3.16-3.18) при превышении в ней значения температуры в 400 °C и находилось в диапазоне от $\pm 4,5$ до $\pm 12,0$ °C ($E = \pm 1,0 \dots \pm 2,8$ %). В остальных контрольных точках образцов (X_2-X_6) значение максимальной суммарной погрешности результатов измерений температуры находилось в диапазоне от $\pm 0,2$ до $\pm 3,6$ °C ($E = \pm 1,2 \dots \pm 3,8$ %). Максимальное расхождение данных полученных в результате проведения серий экспериментов (см. приложение Б), от данных полученных в результате численного моделирования изучаемого процесса, представленных в графическом виде на рисунках 3.16-3.18, не превышало 20,5 %, что говорит об удовлетворительной сходимости результатов.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯЖЕЛОГО, ТОРКРЕТ И ФИБРОТОРКРЕТ БЕТОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ

4.1 Введение

Настоящие рекомендации подготовлены на основании результатов научноисследовательских работ, выполненных в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, и анализа данных о пожарах проливов нефти и нефтепродуктов при полных разрушениях вертикальных стальных цилиндрических резервуаров (PBC) на производственных объектах.

Рекомендации предназначены для использования в практической работе подразделениями, уполномоченными на решение задач в области пожарной безопасности, персоналом, осуществляющим эксплуатацию резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов, организациями, разрабатывающими проектную документацию на ограждения PBC, а также предприятиями, выпускающими строительные конструкции на основе тяжелого бетона (Б), торкрет бетона (ТБ) или фиброторкрет бетона (ФТБ).

В рекомендациях представлены:

– углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости – *hydrocarbon curve oil spill (HCOS)*, необходимый для определения огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, проектируемых на основе Б, ТБ или ФТБ;

– эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*;

– экспериментальные зависимости изменения призменной прочности Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*;

– номограммы для определения температуры прогрева Б, ТБ и ФТБ в ограждениях РВС при одностороннем огневом воздействии *HCOS* до 600 мин.;

 пример определения фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком.

4.2 Углеводородный режим пожара для определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, проектируемых на основе Б, ТБ или ФТБ

Для исключения при аварии PBC возможности разлива нефти или нефтепродукта на территории населенных пунктов, организаций, на пути железных дорог общей сети или в водоем следует предусматривать дополнительные мероприятия. В качестве таких мероприятий могут использоваться ограждающая стена (выполненное из строительных материалов ограждение, предназначенное для ограничения площади пролива жидкости), ограждающая стена с волноотражающим козырьком (выполненное из строительных материалов ограждение, рассчитанное на гидродинамическое воздействие и полное удержание волны жидкости, образующейся при разрушении PBC) или дополнительная защитная стена, устраиваемая на определенном расстоянии от нормативного обвалования (ограждения). Такие ограждения должны быть сплошными по периметру, выполняться из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее E 150.

В соответствии с нормативно установленной терминологией под пределом огнестойкости строительной конструкции (СК) понимается промежуток времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления одного из нормированных для данной СК предельных состояний. В связи с этим, возникает вопрос о корректности применения для определения предела огнестойкости рассматриваемых ограждений стандартного метода испытаний, так как температурный режим пожара пролива нефти или нефтепродукта при авариях РВС имеет ряд существенных отличий:

 пожарная нагрузка (нефть, нефтепродукты) с максимальной среднеповерхностной температурой пламени 1200 °С; – пожар пролива горючей жидкости на открытой местности (в границах ограждения) с постоянным и неограниченным доступом кислорода;

– быстрый рост температуры пожара за счет сгорания большого количества пожарной нагрузки и поддержание ее до полного выгорания пожарной нагрузки (не более 1 мин. – время выхода на постоянную температуру горения; не менее 150 мин. – минимальное время продолжительности горения; не более 600 мин. – условное максимальное время продолжительности горения при обосновании возможности реализации затяжных пожаров);

 непосредственное воздействие пламени пожара пролива горючей жидкости на ограждающую стену.

Таким образом, обуславливается необходимость введения альтернативной температурно-временной кривой «реального» пожара пролива горючей жидкости при разрушении PBC.

На основе общего подхода к построению температурно-временных зависимостей для определения огнестойкости СК и с учетом особенностей возникновения и развития пожаров при авариях РВС для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков необходимо использовать углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости (*HCOS*), представленный на рисунке 4.1.



4.3 Эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*

Для решения теплотехнической части инженерного расчета по определению предела огнестойкости СК необходимы данные по теплофизическим характеристикам строительных материалов в диапазоне температур, воздействующих на них в результате пожара. В связи с этим, были проведены лабораторные исследования теплотехнических свойств образцов СК на основе Б, ТБ и ФТБ в диапазоне температур от 20 до 1100 °С. Используя методы синхронного термического анализа и лазерной вспышки выявлены изменения плотности (ρ), удельной теплоемкости (c_p) и температуропроводности (a) в образцах исследуемых бетонов, а также найдены соответствующие коэффициенты теплопроводности (λ) в рассматриваемом температурном диапазоне. В результате обработки экспериментальных данных методом многофакторного регрессионного анализа получены эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров исследуемых видов бетонов (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в температурном диапазоне от 20 до 1100 °C

Вид бетона	Эмпирические зависимости вида: $a = f(T)$, мм ² /с; $c_p = f(T)$, Дж/(кг·К); $\rho = f(T)$, кг/м ³ ; $\lambda = f(T)$, Вт/(м·К)
Б	$a = 1/(-0,037+0,48\ln(T-273)); c_p = 382,352+34,1068\sqrt{T};$ $\rho = 2090,64-0,43(T-273)+0,00019(T-273)^2; \ \lambda = \sqrt{0,71+32,92/(T-273)}$
ТБ	$a = 1/(-0.056 + 0.49 \ln(T - 273)); c_p = 440.563 + 32.6772\sqrt{T};$ $\rho = 2119.91 - 0.46(T - 273) + 0.0002(T - 273)^2; \lambda = \sqrt{0.73 + 29.28/(T - 273)}$
ФТБ	$a = 1/(0,11+0,44\ln(T-273)); c_p = 339,727+26,9526\sqrt{T};$ $\rho = 2345,8-0,65(T-273)+0,00035(T-273)^2; \lambda = \sqrt{0,66+20,3/(T-273)}$

Используя полученные эмпирические зависимости в качестве исходных данных для определения теплофизических параметров бетонов в условиях воздействия *HCOS*, проведено численное моделирование процесса прогрева образцов из рассматриваемых видов бетонов с геометрическими размерами, соответствующими натурным конструкциям ограждающих стен РВС. Для подтверждения идентичности процесса прогрева образцов, также были выполнены огневые испытания фрагментов конструкций ограждающих стен с натурной толщиной. Сравнительный анализ показал удовлетворительную сходимость результатов численных и экспериментальных исследований (максимальное расхождение одноименных величин не превышало 20,5 %).

Таким образом, представленные в таблице 4.1 эмпирические зависимости рекомендуются к использованию при расчетном определении пределов огнестойкости СК в условиях *HCOS*, проектируемых на основе Б, ТБ или ФТБ.

4.4 Экспериментальные зависимости изменения призменной прочности Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*

Для решения статической части инженерного расчета по определению предела огнестойкости СК необходимы данные о физико-механических (прочностных) свойствах Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*. В связи с этим, были проведены лабораторные испытания по определению кубической и призменной прочности образцов из рассматриваемых видов бетонов в диапазоне температур от 20 до 1100 °C. При подготовке бетонной смеси для всех образцов применялся цемент марки М400 и крупный заполнитель из гранитной крошки с размером фракции не более 5 мм. В образцах ФТБ использовалась стальная фибра диаметром 0,4 мм и длиной 20 мм.

На рисунке 4.2 представлено графическое отображение экспериментальных данных по изменению призменной прочности ($R_{\rm np}$) в образцах рассматриваемых бетонов от температуры.



Рисунок 4.2 – Графическое отображение экспериментальных данных по изменению призменной прочности в образцах бетонов от температуры

Результаты экспериментальных исследований по изменению прочности на сжатие Б, ТБ и ФТБ в температурном диапазоне от 20 до 1100 °C рекомендуются к использованию при расчетном определении пределов огнестойкости СК в условиях *HCOS*.

4.5 Номограммы для определения температуры прогрева Б, ТБ и ФТБ в ограждениях РВС при одностороннем огневом воздействии *HCOS*

Для инженерных расчетов при оценке пределов огнестойкости СК, выполненных с использованием рассматриваемых видов бетонов, в том числе, необходимы данные по глубине прогрева бетона до критической температуры в конструкции от нагреваемой грани сечения [138]. На рисунках 4.3–4.8, используя ранее полученные данные по теплотехническим параметрам рассматриваемых видов бетонов, представлены расчетные номограммы для определения температуры прогрева (T) в слое (a_t) соответствующего вида бетона толщиной конструкции от 400 до 1000 мм при одностороннем воздействии *HCOS* до 600 мин.

Рисунок 4.3 – Температура прогрева Б в ограждающих стенах РВС толщиной 400 (а, б) и 600 (в, г) мм при одностороннем огневом воздействии (10-600 – глубина прогрева бетона от нагреваемой поверхности, мм)

Рисунок 4.4 – Температура прогрева Б в ограждающих стенах РВС толщиной 800 (а, б) и 1000 (в, г) мм при одностороннем огневом воздействии (10–1000 – глубина прогрева бетона от нагреваемой поверхности, мм)



Рисунок 4.5 – Температура прогрева ТБ в ограждающих стенах РВС толщиной 400 (а, б) и 600 (в, г) мм при одностороннем огневом воздействии (10-600 – глубина прогрева бетона от нагреваемой поверхности, мм)



Рисунок 4.6 – Температура прогрева ТБ в ограждающих стенах РВС толщиной 800 (а, б) и 1000 (в, г) мм при одностороннем огневом воздействии (10–1000 – глубина прогрева бетона от нагреваемой поверхности, мм)

Рисунок 4.7 – Температура прогрева ФТБ в ограждающих стенах РВС толщиной 400 (а, б) и 600 (в, г) мм при одностороннем огневом воздействии (10–600 – глубина прогрева бетона от нагреваемой поверхности, мм)



Теплотехническим расчетом определена температура в ограждающих стенах РВС из Б, ТБ и ФТБ с соответствующей плотностью 2080 кг/м³, 2116 кг/м³ и 2330 кг/м³, влажностью до 5 %.

Предел огнестойкости по потере несущей способности устанавливается по точке пересечения горизонтальной прямой на уровне критической температуры (500 °C) с кривой прогрева слоя бетона толщиной a_t от обогреваемой поверхности до оси растянутой арматуры.

4.6 Пример определения фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком

Краткая характеристика объекта

Мазутное хозяйство ТЭЦ-11 филиала ОАО «Мосэнерго» расположено по адресу: г. Москва, ул. Перовская, д.1А и предназначено для приема, хранения и подготовки мазута к сжиганию, бесперебойного снабжения подогретым и профильтрованным топочным мазутом в количестве, требуемом нагрузкой котельной, и с необходимым давлением и вязкостью. На территории объекта расположено мазутохранилище, служащее для хранения мазута и подготовки его к сжиганию, состоящее из двух расходных резервуаров (№ 1 и № 2), вместимостью по 20000 м³, каждый, и резервного резервуара (№ 3), вместимостью 10000 м³.

В связи с проектированием вблизи мазутного хозяйства ТЭЦ-11 участка четвертого транспортного кольца (участок от шоссе Энтузиастов до Измайловского шоссе) предусмотрены дополнительные противопожарные мероприятия, в том числе, обустройство по периметру группы мазутных резервуаров ограждающей стены с волноотражающим козырьком (рисунки 4.9, 4.10).

На рисунке 4.11 представлена принятая проектом конструктивная схема ограждающей стены с волноотражающим козырьком и характерными размерами.





Рисунок 4.10 – Общий вид ограждающей стены со стороны PBC № 3



Рисунок 4.11 – Конструктивная схема ограждающей стены (*P*_{ст} – гидростатическое давление жидкости на высоте 2,02 м)

Особенности определения огнестойкости ограждающих стен РВС

Для определения огнестойкости ограждающей стены использовался общий алгоритм расчета, приведенный в СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» [88], при этом в качестве исходных данных приняты результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в настоящих рекомендациях.

Допущения, принятые в расчете

 Допускается при определении огнестойкости ограждающей стены не учитывать действующие на нее гидростатические нагрузки от разлившейся в границах ограждения жидкости на высоте 2,02 м при разрушении PBC № 1 на основании следующего расчета:

$$S_{obb.} = 12582,04 \text{ м}^2$$
 – площадь внутри обвалования;
 $H_{cr.p1} = H_{cr.p2} = H_{cr.p3} = 17,88 \text{ м}$ – высота стенки соответственно РВС №№1–3;
 $D_{p1} = D_{p2} = 39,9 \text{ м}$ – диаметр РВС-20000 м³;
 $D_{p3} = 28,5 \text{ м}$ – диаметр РВС-10000 м³;
 $H_{wp1} = H_{wp2} = H_{wp3} = 17,25 \text{ м}$ – максимальная высота уровня жидкости соот-

 $H_{\text{ж.p1}} = H_{\text{ж.p2}} = H_{\text{ж.p3}} = 17,25 \text{ м} - \text{максимальная высота уровня жидкости соот$ ветственно в PBC №№1-3;

$$\rho_{\text{маз.}} = 960 \text{ кг/м}^3 - \text{плотность топочного мазута;}$$

$$S_{\text{p2}} = \left(\frac{\pi D_{\text{p2}}^{-2}}{4}\right) = \frac{3,14 \cdot 39,9^2}{4} = 1249,73 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{p3}} = \left(\frac{\pi D_{\text{p3}}^{-2}}{4}\right) = \frac{3,14 \cdot 28,5^2}{4} = 637,62 \text{ m}^2;$$

$$S_{\text{разл}} = S_{\text{обв}} - S_{\text{p2}} - S_{\text{p3}} = 12582,04 - 1249,73 - 637,62 = 10694,69 \text{ m}^2;$$

$$V_{\text{p1}} = \left(\frac{\pi D_{\text{p1}}^{-2}}{4}\right) H_{\text{вал.p1}} = \left(\frac{3,14 \cdot 39,9^2}{4}\right) 17,25 = 21557,81 \text{ m}^3;$$

$$H_{\text{разл.}} = \frac{V_{\text{p1}}}{S_{\text{разл}}} = \frac{21557,81}{10694,69} = 2,02 \text{ м} - \text{ высота разлившейся жидкости.}$$

В соответствии с отчетом [139] расчетное гидродинамическое давление жидкости ($P_{rg} = 1,254 \cdot 10^5$ Па) при полном разрушении наибольшего резервуара в группе типа PBC-20000 м³ (№ 1) превышает более чем в 6 раз гидростатическое давление жидкости ($P_{cr} = 0,196 \cdot 10^5$ Па) на ограждающую стену после прекращения образования площади пролива жидкости (на расчетной высоте 2,02 м).

2) Для упрощения расчета огнестойкости допускается принимать толщину всей ограждающей стены по узкой части (1000 мм) по всей высоте.

Расчет огнестойкости ограждающей стены по потере целостности

В железобетонных конструкциях из тяжелого бетона с карбонатным заполнителем и влажностью более 3,5 % возможно взрывообразное разрушение бетона при пожаре [88, 23]. Потеря целостности (образование сквозных отверстий или сквозных трещин во влажном бетоне при одностороннем нагреве) наступает, как правило, через 5–20 мин. после начала пожара и сопровождается отколами бетона от нагреваемой поверхности. Причиной взрывообразного разрушения бетона при пожаре является образование трещин в структуре бетона и их переход в неравновесное спонтанное развитие под воздействием внешней нагрузки и неравномерного нагрева и фильтрации пара по толщине сечения элемента.

Возможность взрывообразного разрушения бетона при пожаре оценивается значением критерия хрупкого разрушения F [88, 23]. При значениях критерия F > 4, возможно хрупкое разрушение бетона при пожаре. При этом предел огнестойкости по потери целостности не будет превышать E 15.

Критерий хрупкого разрушения бетона определяется по формуле [88]:

$$F = \frac{aa_{bt}E_{bt}\rho W_{3}}{K_{1}^{1}\lambda n},$$
(4.1)

где *a* – коэффициент пропорциональности, Вт·м^{-3/2} кг; a_{bt} – коэффициент температурной деформации бетона; E_{bt} – модуль упругости бетона, МН/м²; ρ – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м³); K_1^{1} – коэффициент псевдоинтенсивности напряжений бетона, МН·м^{-3/2}; λ – коэффициент теплопроводности бетона при температуре 250 °C, Вт/(м·°C); W_3 – объемная эксплуатационная влажность бетона, м³/м³; *n* – общая пористость бетона.

Наибольшую влажность бетон имеет после изготовления СК и при эксплуатации во влажных условиях [88]. Поэтому рассмотрим возможность хрупкого разрушения ограждающей стены при пожаре в первый месяц влажного твердения бетона и при эксплуатации во влажных условиях, когда относительная расчетная влажность воздуха выше 73 %.

Определение критерия хрупкого разрушения бетона производили по формуле (4.1), в которой принято:

 $a_{bt} = 8,25 \cdot 10^{-6} \, {}^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$ – коэффициент температурной деформации тяжелого бетона на силикатном заполнителе при нагреве до 250 °C (таблица 2.4 [88]);

 $\lambda = 0,94$ Вт/(м·°С) при 250 °С – коэффициент теплопроводности тяжелого бетона на силикатном заполнителе, определяемый по таблице 4.1 настоящих рекомендаций;

 $K_1^{1} = 0,58 \cdot 10^3 \text{ кH/m}^{-3/2} -$ коэффициент псевдоинтенсивности напряжения бетона;

 $E_b = 36 \cdot 10^3 \text{ MПа} - \text{модуль упругости для бетона класса В40;}$

 $\beta_b = 0,6$ – коэффициент, учитывающий снижение модуля упругости бетона с повышением температуры до 250 °C;

 $E_{bt} = 36 \cdot 10^3 \cdot 0,6 = 21,6 \cdot 10^3 \text{ МH/м}^2 - \text{модуль упругости бетона;}$

 $\rho = 2370 - 150 = 2220$ кг/м³ – плотность сухого бетона;

n = 0,105 – общая пористость бетона с плотными заполнителями. В соответствии с [88] для бетона с В / Ц \geq 0,4: $n = \text{Ц}(\text{B}/\text{Ц} - 0,2)10^{-3}$ (см. таблицу 4.2);

Таблица 4.2

Класс бетона		Состав бето	нной см	еси, кг/м ³		Плот бетон	гность а, кг/м ³		Шабани
по проч-	Цемент	Микро-	Песок	Щебень	Вода	Ест.	Сухого	В/Ц	щеоень, %
ности на	(Ц)	кремне-	(Π)	(Щ)	(B)	ВЛ-ТИ			70
сжатие		зем (МК)							
B40	400	55	700	1030	185	2370	2220	0,46	0,43

При эксплуатации во влажных условиях, когда относительная расчетная влажность воздуха равна 73 %, объемная эксплуатационная влажность бетона определяется по формуле [88]:

$$W_{3} = W_{b} \rho 10^{-3},$$
 (4.2)

где *W_b* – равновесная влажность бетона, принимаемая в зависимости от относительной расчетной влажности воздуха, при которой эксплуатируется конструкция, и расхода цемента (таблица 9.2 [88]).

В данном случае $W_{9} = 0,065$.

Тогда:

$$F = \frac{1,16 \cdot 10^{-2} \cdot 8,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot 2220 \cdot 0,065}{0,58 \cdot 0,94 \cdot 0,105} = 5,21.$$

Так как критерий F = 5,21 > 4, то возможно хрупкое разрушение бетона в течение первых 20 мин. его прогрева на пожаре.

Следует отметить, что в соответствии с положениями [88] в тонкостенных железобетонных конструкциях толщиной от 40 до 200 мм хрупкое разрушение приводит к образованию сквозных отверстий и трещин, при этом предел огнестойкости таких конструкций по целостности не превышает E 15. В конструкциях толщиной более 200 мм возможны отколы кусков бетона толщиной до 100 мм, что уменьшает поперечное сечение элемента конструкции.

Учитывая выше изложенное можно сделать вывод о том, что для рассматриваемой ограждающей стены, имеющей толщину в проектном сечении 1000 мм в узкой части, максимальные отколы кусков бетона также могут составлять толщину до 100 мм. Следовательно, поперечное сечение стенки в результате отколов бетона уменьшится на 100 мм в течение первых 5 мин. прогрева и по потере целостности огнестойкость конструкции будет превышать 15 мин., так как действующая нагрузка в сечении такой толщины изменится незначительно.

Дальнейший расчет огнестойкости ограждающей стены необходимо производить по потере несущей способности с учетом уменьшения сечения на 100 мм, так как фактический предел огнестойкости по E наступает не ранее, чем предел огнестойкости по R (в конструкциях толщиной более 200 мм).

Расчет огнестойкости ограждающей стены по несущей способности

Общий вид ограждающей стены со спецификацией материалов представлен на рисунке 4.12, а расчетное сечение стены на один погонный метр представлено на рисунке 4.13.

Спецификация материалов на стену L=477 м						
Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Масса ед.кг		
5	CTO AC4M 7-93	Ø28 A500C L=8850	3880	42,778		
6		Ø28 А500С м.п.	48985	4,830		
7		Ø28 A500C L=4165	1940	20,132		
8	CTO AC4M 7-93	Ø28 A500C L=4685	1940	22,646		
Дет.5		Ø28 A500C L=2725	1940	13,172		
Дет.6		Ø28 A500C L=3240	1940	15,661		
Дет.7		Ø28 A500C L=2485	1940	12,012		
Дет.8		Ø10 A500C L=1365	25900	0,842		
Дет.9		Ø10 A500C L=530	646	0,327		
Мн-1	FOCT 535-2005	200×10 L=200	323	3,140		
Дет.У	CTO AC4M 7-93	Ø28 A500C L=1210	40	5,850		
		Бетон В40		6044 м ³		





Рисунок 4.13 – Расчетное сечение Г-Г ограждающей стены



Расчет производился при фиксированных параметрах волноотражающего козырька ограждающей стены.

Исходные данные для расчета:

H = 5,48 – высота стены от уровня жидкости вместе с козырьком, м;

 $\Delta b = 1$ – ширина расчетного участка стены, м;

d = 0,9 — ширина стены (принято с учетом вычета 100 мм бетона), для расчета e_{kzrk} принято d = 1,0 м;

h = 4,48 – высота стены до козырька, м;

 $h^{I} = 0,9 -$ высота стены от слоя жидкости до козырька, м;

Армирование стены:

 $N_{\rm H} = 5 -$ количество стержней нижней арматуры (одного ряда), шт.;

 $N_{\rm B} = 9 -$ количество стержней верхней арматуры, шт.;

 $a_{\rm H1} = 90$ – расстояние от низа бетона до оси арматуры нижней, мм;

 $a_{\rm B} = 90 - {\rm pacctoshue}$ от низа бетона до оси арматуры верхней, мм;

 $d_{\rm H} = 28$ – диаметр стержней нижней арматуры, мм;

 $d_{\rm B} = 28$ – диаметр стержней верхней арматуры, мм;

 $T_{\rm H} = 20$ – начальная температура, °C;

 $\rho_t = 2370 - плотность бетона, кг/м³;$

 $B_{kzrk} = 0,4$ – толщина козырька (принято с учетом вычета 100 мм бетона), м;

 $L_{kzrk} = 2,4 - длина козырька (принято с учетом вычета 100 мм бетона), м;$

 $H_{kzrk} = 0,825 -$ высота козырька (принято с учетом вычета 100 мм бетона), м; $P_{g,stnk} -$ нагрузка от собственного веса стенки, Н:

$$P_{gstnk} = \Delta bhh^{T} 10\rho_{t} = 1 \cdot 4,48 \cdot 0,9 \cdot 10 \cdot 2370 = 95558,40;$$

 $P_{g,kzrk}$ – нагрузка от собственного веса козырька, Н: $P_{g,kzrk}$ = 21774,38;

 $P_{g,tot}$ – нагрузка от собственного веса конструкции, Н:

$$P_{g,tot} = P_{g,stnk} + P_{g,kzrk} = 95558,40 + 217743,38 = 117332,775;$$

x_c – расстояние от поверхности стены в месте примыкания козырька до его центра тяжести, мм (рисунок 4.14);



Рисунок 4.14 – Схема к определению расположения центра тяжести козырька (с учетом вычета 100 мм бетона)

*е*_{*kzrk*} =1112,59 мм;

X_c= 612,59 мм;

e_{kzrk} – эксцентриситет приложения нагрузки от веса козырька, мм (см. рисунок 4.14):

$$e_{kzrk} = x_c + \left(\frac{d \cdot 1000}{2}\right) = 612,59 + \left(\frac{1 \cdot 1000}{2}\right) = 1112,59;$$

M_{kzrk}-изгибающий момент от веса козырька, кНм:

$$M_{kzrk} = P_{g,kzrk} e_{kzrk} = 21774,38 \cdot 1112,59 \cdot 10^{-6} = 24,23;$$

 $R_{sn} = 500 - предел прочности арматурной стали, МПа;$

 $E_s = 2 \cdot 10^5 -$ модуль упругости холодной арматуры, МПа;

вид крупного заполнителя – гранит;

 $W_{\rm f} = 3 \ \%$ – влажность бетона;

*R*_{bn} = 29 – предел прочности бетона, МПа;

 $E_b = 36 \cdot 10^3$ – значение начального модуля упругости бетона при сжатии и растяжении, МПа;

a = 2 -коэффициент заделки опор [140];

 $\alpha = 0,85$ [140];

N_n – действующая нагрузка, кН:

- $N_n = P_{g,tot} \cdot 10^{-3} = 117,33;$
- $\mu = 2 \kappa оэффициент расчетной длины;$
- l_0 расчетная длина (высота) конструкции, м:

$$l_0 = H\mu = 5,48 \cdot 2 = 10,96.$$

Параметры в расчетных формулах:

$$A_{sn1} = N_{\mu}\pi \frac{d_{\mu}^2}{4} = 3078,8 \text{ MM}^2;$$

$$A_{se} = N_{e}\pi \frac{d_{e}^{2}}{4} = 5541.8 \text{ MM}^{2};$$

T = 150 – время прогрева, мин.

Теплотехническая задача

температура арматуры

T = 450 °C – температура, при которой определяются теплофизические характеристики бетона;

 λ_{tem} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), по таблице 4.1 настоящих рекомендаций $\lambda_{tem} = 0,885$;

 c_{tem} – удельная теплоемкость, Дж/(кг.°С):

 $c_{\rm tem} = 1292,02;$

 $K_b = 36,32 -$ коэффициент фиктивного слоя бетона [140], с^{1/2};

 $a_{\rm red}$ – приведенный коэффициент температуропроводности, мм²/с:

$$a_{red} = \frac{\lambda_{tem}}{(c_{tem} + 50W)\rho_0} = 0,28;$$

 $K_{b}\sqrt{a_{red}} = 19,10$ – толщина фиктивного слоя бетона, мм;

$$2\sqrt{a_{red}\tau} = 99,76$$
 MM

 $t_{bcr} = 500 - ожидаемая критическая температура прогрева бетона, °C [88];$

 t_{s1} – температура арматуры на уровне $a_{\rm H}$, на момент прогрева равна температуре 1250 °C;

 $t_{s_2} = 20$ – температура арматуры на уровне $a_{\rm B}$, °С;

 $t_{b_cold} = 20$ – температура бетона на необогреваемой поверхности, °C; $t_{b_hot} = 1250$ – температура бетона на обогреваемой поверхности, °C; t_{b_hot} – усредненная температура бетона, °C [88]:

$$t_{btem} = \frac{t_{b_{-cold}} + t_{b_{-hot}}}{2} = 635.$$

толщина ненесущего слоя бетона

 $t_{bcr} = 500 - критическая температура прогрева бетона, °C [88];$

 $\delta = 66,96 - толщина не несущего слоя бетона, мм.$

Прочностная задача

Для арматуры класса A500 на уровне *а*_в:

γ₂=1 – коэффициент снижения прочности арматурной стали;

 $\beta_{s2} = 1 - коэффициент снижения модуля упругости арматурной стали;$

β_{*bt*} = 0,165 – коэффициент снижения модуля упругости бетона необогреваемой поверхности;

 $a_{bt} = 9.10^{-6} \, 1/^{\circ} \text{C}$ – коэффициент температурного расширения бетона;

 R_{su2} – предел прочности арматурной стали при пожаре, МПа:

$$R_{su2} = \gamma_2 R_{sn} = 1.500 = 500.$$

Параметры приведенного сечения стены

$$\begin{split} h_{\rm t} &= d \cdot 1000 - \delta = 0, 9 \cdot 1000 - 66, 96 = 833, 04 \text{ мм}; \\ h_0 &= d \cdot 1000 - a_{\rm B} = 0, 9 \cdot 1000 - 0 = 900 \text{ мм}; \\ b_t &= \Delta b = 1000 \text{ мм}; \\ h_{0\rm t} &= d \cdot 1000 - a_{\rm B} - \delta = 0, 9 \cdot 1000 - 0 - 66, 96 = 833, 04 \text{ мм}; \\ \lambda &= \frac{l_0}{h_t} = \frac{10960}{833, 04} = 13, 16 - \text{гибкость элемента}; \\ M_{11} &= M_{kzrk} = 24, 23 \text{ кHм}; M_1 = M_{11} = 24, 23 \text{ кHм}; \\ \phi_1 - \text{коэффициент продольного изгиба: } \phi_1 = 1 + \frac{M_{11}}{M_1} = 1 + \frac{24, 23}{24, 23} = 2; \\ e_0 - \text{эксцентриситет, мм: } e_0 = \frac{M_{11} \cdot 1000}{N_n} = \frac{24, 23 \cdot 1000}{117, 33} = 206, 47; \end{split}$$

$$\begin{split} \delta_{e} &= \max\left(\frac{e_{0}}{h_{t}}; 0, 15\right) = \max\left(\frac{206, 47}{833, 04}; 0, 15\right) = 0, 25 \text{ mm};\\ \mu\alpha &= \frac{A_{sy1}E_{s} + A_{se}E_{s}\beta_{s2}}{b_{t}h_{t}E_{b}\beta_{bt}} = 0, 35 ; \end{split}$$

D – жесткость сечения, $H \cdot MM^2$:

$$D = E_b \beta_{bt} b_t h_t^3 \left(\frac{0.0125}{\varphi 1(0.3 + \delta_e)} + 0.175 \mu \alpha \left(\frac{h_{0t} - a_d}{h_t} \right)^2 \right) = 2.48 \cdot 10^{14};$$

 $N_{\rm cr}-$ условная критическая сила, к
H:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{1000(l_0 1000)^2} = \frac{3.14^2 \cdot 2.48 \cdot 10^{14}}{1000 \cdot 10960^2} = 20421,83;$$

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N_n}{N_{cr}}} = 1,0057;$$

 e_t – прогиб стены от неравномерного нагрева по высоте сечения, мм:

$$e_t = a(\alpha_{s1}t_{s1} - \alpha_{bt}t_{b_cold}) \frac{(l_0 1000)^2}{8h_{0t}} = 793,35$$
,

где a = 2 - коэффициент заделки;

е – общий эксцентриситет, мм:

$$e = e_0 \eta + 0.5(h_0 - a_{n1}) + e_t = 1451.02;$$

*М*_{*n*} – момент от нормативной нагрузки при пожаре (через 150 мин.), кНм:

$$M_n = N_n \frac{e}{1000} = 170,25.$$

Предположим, что высота сжатой зоны (x) меньше предельного значения, тогда:

$$x = \frac{N_n \cdot 10^3 + R_{su2}A_{se} - R_{su1}A_{su1}}{R_{bn}b} = 99,59 \text{ мм};$$

$$\xi = \frac{x}{h_{0r}} = 0,119; \ \xi_{R2} = 0,49 - \text{граничная относительная высота сжатой зоны.}$$

Так как условие $\xi = \frac{x}{h_{ot}} < \xi_{R2}$ выполняется, то предположение о высоте

сжатой зоны верно и пересчет параметра x не требуется;

М – несущая способность конструкции при пожаре (через 150 мин.), кНм:

$$M = \left(R_{bn} b_t x (h_{0t} - 0.5x) + R_{sn} \gamma_1 A_{sn1} (h_{0t} - a_{n1}) \right) \cdot 10^{-6} = 2262.17;$$

*M*_{*n*} =170,25 кНм.

По результатам проведения девяти расчетных итераций для различного времени обогрева составлена таблица 4.3 и построен график зависимости несущей способности стены от времени пожара, представленный на рисунке 4.15.

Таблица 4.3 – Результаты расчета несущей способности стены при пожаре

Время прогрева, мин.	Несущая способность М, кНм	Действующая нагрузка <i>М_n</i> , кНм
150	2262,17	170,25
180	2243,51	170,98
240	2210,54	172,30
300	2181,19	173,51
360	2149,42	174,84
420	2117,65	176,22
480	2091,66	177,38
540	2068,55	178,43
600	2045,44	179,50



Рисунок 4.15 – График зависимости несущей способности ограждающей стены с волноотражающим козырьком от времени пожара пролива мазута (время прогрева 600 мин., толщина сечения стены 900 мм, арматура класса А500 диаметром 28 мм)

Таким образом, результаты расчетов показывают, что конструкция ограждающей стены с волноотражающим козырьком сохраняет прочность и устойчивость при воздействии пожара пролива мазута в границах ограждения в течение не менее 10 ч. При этом можно отметить, что несущая способность ограждающей стены много больше изгибающего момента от нормативной нагрузки $(M = 2045,44 \text{ кHm} > M_n = 179,50 \text{ кHm})$, то есть огнестойкость рассматриваемой стены составляет не менее *RE* 600, что в 4 раза превышает нормативный показатель для ограждений резервуаров (не менее *E* 150 [2]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа применяемых в мировой практике температурновременных зависимостей для проведения испытаний СК на огнестойкость, результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров волны прорыва, образующейся при полном разрушении PBC, а также выявленных особенностей возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей в резервуарных парках, обоснован углеводородный режим пожара – *hydrocarbon curve oil spill (HCOS)*, необходимый для определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков объектов хранения нефти и нефтепродуктов.

2. В результате выполненных экспериментальных исследований и обработки данных найдены эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS* (от 20 до 1200 °C) вида $a = f(T), c_p = f(T), \rho = f(T)$ и $\lambda = f(T)$, которые рекомендуются к использованию при определении огнестойкости СК, выполненных с использованием рассматриваемых видов бетона, в том числе, при строительстве ограждающих стен резервуарных парков.

3. Получены экспериментальные данные по изменению прочности на сжатие Б, ТБ и ФТБ в исследуемом температурном диапазоне, которые рекомендуются к использованию в инженерных расчетах для определения огнестойкости СК, выполненных с использованием рассматриваемых видов бетона, в том числе, при строительстве ограждений резервуарных парков. Анализ полученных данных показал, что ФТБ обладает более высокой начальной прочностью, значение которой в 2,3 раза превышает аналогичный показатель у Б и в 1,3 раза – у ТБ. При этом ТБ также имеет высокий показатель начальной прочности, значение которого более чем в 1,7 раза превышает аналогичный показатель у Б. В связи с этим, сделан вывод о перспективности использования метода торкретирования для строительства ограждающих стен резервуарных парков.
4. Вследствие удовлетворительной сходимости результатов численного моделирования процесса прогрева образцов исследуемых видов бетона в условиях воздействия *HCOS* с аналогичными результатами, полученными при выполнении крупномасштабных огневых испытаний (максимальное расхождение одноименных величин не превышает 20,5 %), подтвержден вывод о возможности использования полученных эмпирических зависимостей для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ при определении огнестойкости СК. При этом в ходе испытаний образцов из Б на 3-5 минуте их прогрева наблюдалось интенсивное откалывание фрагментов, что подтверждает возможность хрупкого разрушения бетонов с высокой влажностью при резком высокотемпературном воздействии. У образцов из ФТБ обогреваемая сторона оплавливалась и становилась похожей на вспененною субстанцию, что обуславливалось поведением металлической фибры в образцах при длительном воздействии *HCOS*. Появление оплавленного слоя дает возможность предположить исключение трещинообразования в образцах из ФТБ. В образцах из ТБ откалывание фрагментов, как и образование оплавленного слоя, не наблюдалось.

5. По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по определению теплотехнических и прочностных характеристик Б, ТБ и ФТБ, необходимые для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, содержащие, в том числе, номограммы для определения температуры в слое конструкции ограждающей стены толщиной от 400 до 1000 мм при одностороннем воздействии *HCOS* до 600 мин., а также пример определения фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: (в ред. от 29 июля 2017 г.) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

2. ГОСТ Р 53324-2009. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: государственный стандарт (утв. Приказом Ростехрегулирования от 18.02.2009 г. № 100-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

3. СТ СЭВ 383. Пожарная безопасность в строительстве. Термины и определения [Электронный ресурс]: стандарт СЭВ (утв. Постоянной Комиссией по сотрудничеству в области стандартизации, июль 1987 г.) // СПС Консультант-Плюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

4. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования [Электронный ресурс]: государственный стандарт (введен в действие Постановлением Минстроя РФ от 23.03.1995 г. № 18-26) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

5. Швырков, С.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтебаз ограничением разлива нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Швырков Сергей Александрович. – М., 2001. – 180 с.

6. Батманов, С.В. Устойчивость противопожарных преград резервуарных парков к воздействию волны прорыва при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Батманов Сергей Васильевич. – М., 2009. – 175 с.

110

 Волков, О.М. Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов [Текст] / О.М. Волков, Г.А. Проскуряков. – М.: Недра, 1981. – 256 с.

Волков, О.М. Проблема городских нефтебаз [Текст] / О.М. Волков,
 Г.А. Проскуряков, А.Н. Швырков // Пожарное дело. – 1994. – № 8. – С. 10–13.

9. Швырков, А.Н. Волна прорыва на нефтебазе плюс эффект «Домино». Техногенные катастрофы при разрушении резервуаров и защита от них [Текст] / А.Н. Швырков, С.А. Швырков, С.А. Горячев // Охрана труда и социальное страхование. – 1997. – Вып. 11. – С. 42–45.

10. Швырков, А.Н. Обеспечение пожарной безопасности реконструируемых производств при вынужденных отступлениях от противопожарных норм проектирования: лекция [Текст] / А.Н. Швырков, О.М. Волков. – М.: ВИПТШ, 1992. – 36 с.

11. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 398 с.

12. Брусневич, Х. Пожары резервуаров с нефтепродуктами – факты и опыт [Текст] / Х. Брусневич. – М.: Недра, 1986. – 134 с.

13. Сучков, В.П. Пожарная безопасность при хранении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей на промышленных предприятиях [Текст] / В.П. Сучков. – М.: Стройиздат, 1985. – С. 76–80.

14. Котляревский, В.А. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий [Текст]: уч. пособ. в 3-х кн. / В.А. Котляревский [и др.]. – М.: Издательство АСВ, 1995. – Кн. 1. – 320 с.

15. Иванов, Е.Н. Пожарная защита открытых технологических установок [Текст] / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1975. – 220 с.

16. Блинов, В.И. Диффузионное горение жидкостей [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – АН СССР, 1961. – 208 с.

17. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов [Текст] / А.Ф. Шароварников [и др.]. – М.: Издательский дом «Калан», 2002. – 448 с.

18. Швырков, С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.03 / Швырков Сергей Александрович. – М., 2013. – 355 с.

19. Абдурагимов, И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров [Текст] / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ, 1980. – 255 с.

20. Тушение нефти и нефтепродуктов: пособие [Текст] / И.Ф. Безродный [и др.]. – М.: ВНИИПО, 1996. – 216 с.

21. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – М.: Недра, 1984. – 153 с.

22. Мустафин, Ф.М. Строительные конструкции нефтегазовых объектов [Текст] / Ф.М. Мустафин [и др.]. – СПб.: ООО «Недра», 2008. – 780 с.

23. Ройтман, В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий [Текст] / В.М. Ройтман. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.

24. Швырков, С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара [Текст]: монография / С.А. Швырков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 289 с.

25. Милованов, А.Ф. Высокотемпературный нагрев железобетонных перекрытий при аварии на Чернобыльской АЭС [Текст] / А.Ф. Милованов, В.В. Соломонов, З.М. Ларионов. – М: Энергоатомиздат, 2000. – 80 с.

26. Процессы горения: пособие [Текст] / И.М. Абдурагимов [и др.]. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.

27. Raj, P.K. Large hydrocarbon fuel pool fires: physical characteristics and thermal emission variations with height [Text] / P.K. Raj // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 140, Issue 1–2. – P. 280–292.

28. Muñoz, M. Predicting the predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires [Text] / M. Muñoz, E. Planas, F. Ferrero, J. Casal // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 144, Issue 3. – P. 725–729.

29. Яковлев, В.В. Нефть. Газ. Последствия аварийных ситуаций [Текст]: монография / В.В. Яковлев. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – 420 с.

30. Кошмаров, Ю.А. Экспериментальные исследования теплового воздействия пламени [Текст] / Ю.А. Кошмаров, Я. Решетар, В.Г. Лимонов // Сб. научн. тр.: Противопожарная защита объектов народного хозяйства. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1979. – С. 82–87.

31. Dennis, P. Handbook of Fire & Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities: Noyes Publications [Electronic resource] /
P. Dennis, P.E. Nolan. – U.S.A.: Westwood: New Jersey, 1996. – 291 p. – Mode of access: https://www.sciencedirect.com/science/book/9780815513940.

32. CSN EN 1363-2:1999. Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures [Electronic resource]: European Standards. – Mode of access: https://www.en-standard.eu/csn-en-1363-2-fire-resistance-tests-part-2-altrenative-and-additional-procedures.

33. UL 1709. Rapid Rise Fire Test of Protection Materials for Structal Steel [Electronic resource]: Third Edition, Dated March 23, 2005 / Underwriters Laboratories Standard. – Mode of access: http://fs.gongkong.com/files/technicalData/201106/2011060300193200001.pdf.

34. Circulaire interministerielle № 2000-63 DU 25 AOUT 2000, relative à la réglementation de la sécurité dans les tunnels routiers du réseau national. Annexe 2 – Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation). Extraits – Comportement au feu, Exploitation [Electronic resource]: Transmis par la France. – Mode of access: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2001/ac7/TRANS-AC7-2001-04f.pdf.

35. RABT. Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln [Electronic resource]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. – FGSV-Verl. – Köln. – 2006. – Mode of access: https://ru.scribd.com/document/88474222/RABT-2006-eng.

36. ZTV-ING. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten [Electronic resource]: Teil 5, Tunnelbau Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, 1995. – Mode of access: https://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Publikationen/ Regelwerke/Baudurchfuehrung/EC-ZTV-ING-Teil-5-Tunnelbau-Baudurchfuehrung.pdf?_ blob=publicationFile&v=2. 37. ZTV-Tunnel: zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strassentunneln [Electronic resource]: Teil 2: Offene Bauweise. – Dortmund: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Strassenbau, Straßenverkehr. Aufgestellt: Bund/Länder-Hauptausschuss Brücken- und Ingenieurbau, 1999. – Mode of access: https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT% 3A303623888/ZTV-Tunnel-zusätzliche-technische-Vertragsbedingungen.

38. Breunese, Ir. A.J. Fire testing procedure for concrete tunnel linings: Report № 2008-Efectis-R0695 [Electronic resource] / Ir. A.J. Breunese, Dr. Ir. C. Both, Ir. G.M. Wolsink. – Netherlands, September 2008. – Mode of access: http://az668117.vo. msecnd.net/-/media/files/promat/segment/tunnel/repository%20content/downloads/2008efectis-r0695_fire_testing_procedure_concrete_tunnel.ashx?la=en&rev=5563a73dc7214cc1 b13f497c5a637c3f&hash=2C53D706FD55C937D2561A2C2EFDC1B64E04DD93.

39. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction [Electronic resource]: Standard of International Organization for Standardization. – Mode of access: https://www.iso.org/standard/2576.html.

40. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы [Электронный ресурс]: государственный стандарт (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 06.10.2014 г. № 1275-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

41. Гравит, М. В. Огнестойкость строительных конструкций в европейских и российских стандартах [Текст] / М.В. Гравит // Стандарты и качество. – 2014. – № 2. – С. 36–37.

42. Гравит, М.В. Углеводородный режим пожара в нормативных документах [Текст] / М.В. Гравит, А.В. Бардин, Э.И. Гумерова // Материалы IX Всероссийской научн.-практ. конф.: Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение комплексной безопасности жизнедеятельности населения. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – С. 67–72. 43. Гравит, М.В. Гармонизация российских и европейских нормативных документов, регламентирующих методы испытаний на огнестойкость строительных конструкций с использованием средств огнезащиты [Текст] / М.В. Гравит // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 5. – С. 38–46.

44. Хасанов, И.Р. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара [Текст] / И.Р. Хасанов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 3. – С. 49–57.

45. РТМ 17-03-2005. Руководящие технические материалы по проектированию, изготовлению и применению сталефибробетонных конструкций на фибре из стальной проволоки [Электронный ресурс]: руководящие технические материалы (рек. к прим. в строительстве письмом Департамента строительства и ЖКХ Минрегионов России от 28.09.2005 г. № 5786-ВД/70). – Режим доступа: https:// ohranatruda.ru/upload/iblock/611/4293817853.pdf.

46. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом ФГУП «НИЦ «Строительство» от 03.10.2006 г. № 143) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

47. Ahmed S. Eisa. Behaviour of steel fiber reinforced high strength selfcompacting concrete beams under combined bending and torsio [Text] / Ahmed S. Eisa, Khaled S. Ragab // International journal of civil and structural engineering. – 2014. – V. $4 - N_{\odot} 3. - P. 315-331.$

48. Mahar, J. W. Shotcrete Practice in Underground Construction [Text] / J.W. Mahar, H.W. Parker, W.W. Wuellner // Report No. FRA-OR&D 75-90. – Washington: Federal railroad Administration, Aug. 1975. – P. 482.

49. Henager, C.H. A New Wrinkle – Shotcrete Containing Steel Fibers [Text] /
C.H. Henager // Concrete Construction. – 1975. – V. 20. – № 8. – P. 345–347.

50. Henager, C.H. The Technology and Uses of Steel Fibrous Shotcrete [Text] / C.H. Henager // A State-of-the-Art Report. – Richland: Battelle-Northwest, 1977. – P 60.

51. Дидевич, А. Фибробетоны: новый взгляд на традиционный композит [Текст] / А. Дидевич // Технологии бетонов. – 2011. – № 11–12. – С. 72–74.

52. Мусин, В.Г. Восстановление и защита строительных конструкций методом торкретирования [Текст] / В.Г. Мусин, П.И. Мирошниченко // Промышленное строительство и инженерные сооружения. – 1972. – № 3. – С. 29–30.

53. Голованов, В.И. Прогнозирование огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой [Текст] / дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Голованов Владимир Ильич. – М., 2008. – 337 с.

54. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве [Текст] / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.

55. Ильин, Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции [Текст] / Н.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1979. – 128 с.

56. Некрасов, К.Д. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур [Текст] / К.Д. Некрасов, В.В. Жуков, В.Ф. Гуляева. – М.: Стройиздат, 1972. – 128 с.

57. Бушев, В.П. Огнестойкость зданий [Текст] / В.П. Бушев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.

58. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве [Текст] / Под ред. Н.А. Стрельчука. – М.: Стройиздат, 1970. – 127 с.

59. Работа железобетонных конструкций при высоких температурах [Текст] / Под ред. А.Ф. Милованова. – М.: Стройиздат, 1972. – 150 с.

60. Романенков, И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов [Текст] / И.Г. Романенков, В.Н. Зигерн-Корн. – М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.

61. Страхов, В.Л. Методика и сертифицированные программные комплексы для расчетов огнестойкости железобетонных строительных конструкций [Текст] / В.Л. Страхов, Н.Ф. Давыдкин, В.О. Каледин // Пожарная безопасность в строительстве. – 2010. – № 6. – С. 36–42.

62. Ройтман, В.М. Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара [Текст] / В.М. Ройтман, В.И. Голованов // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 86–93.

63. Голованов, В.И. Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара [Текст] / В.И. Голованов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – № 5. – С. 37–44.

64. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций [Текст] / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.

65. Федоров, В.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций [Текст] / В.С. Федоров [и др.]. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 408 с.

66. Каледин, В.О. Экспериментальное исследование влияния высокотемпературного нагрева на реологические процессы в бетоне [Текст] / В.О. Каледин, В.Л. Страхов // Материаловедение. – 2012. – № 9. – С. 14–17.

67. Гвоздев, А.А. Задачи и перспективы развития теории железобетона [Текст] / А.А. Гвоздев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – № 6. – С. 14–17.

68. Милованов, А.Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций [Текст] / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1975. – 230 с.

69. Страхов, В.Л. Огнезащита строительных конструкций [Текст] /
В.Л. Страхов, А.М. Крутов, Н.Ф. Давыдкин; под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.:
Инф.-изд. центр «ТИМР», 2000. – 433 с.

70. Давыдкин, Н.Ф. Огнестойкость конструкций подземных сооружений [Текст] / Н.Ф. Давыдкин, В.Л. Страхов; Под ред. И.Я. Дормана. – М.: Инф.-изд. центр «ТИМР», 1998. – 296 с.

71. Бартелеми, Б. Огнестойкость строительных конструкций [Текст] /
Б. Бартелеми, Ж. Крюппа; пер. с франц.: под ред. В.В. Жукова. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

72. Thelandersson, S. Mechanical behavior of concrete under torsional loading at transient high-temperature conditions [Electronic resource] / S. Thelandersson. – Sweden, Lund: Lund Institute of Technology, 1974. – 81 p. – Mode of access: https://prozask.ru/d/798454/d/sthelandersson-mechanical_behaviour_of_concrete_under_t.pdf.

73. Tatnall, P.C. Shotcrete in fires: effects of fibers on explosive spalling [Electronic resource] / P.C. Tatnall // Shotcrete. – 2002. – № 1. – P. 10–12. – Mode of access: https://prozask.ru/d/798454/d/shotcret_in_fires.pdf.

74. Tiam T. Lie. Fire Performance of Reinforced Concrete Columns [Electronic resource] / Tiam T. Lie, Tung D. Lin // ASTM special technical publication A symposium sponsored by ASTM Committee E-5 on Fire Standards and by The Society of Fire Protection Engineers: Fire Safety: Science and Engineering; Editor T.Z. Harmathy. – Denver, CO: National Research Council of Canada, 1985. – P. 179–205. – Mode of access: http://dlx.b-ok.org/genesis/1055000/c96ec01f1352f964639e1322b2c4f6e1/_as/ [T._Z._Harmathy]_Fire_Safety,_Science_and_Engineer(b-ok.org).pdf.

75. Malhotra, H.L. Fire safety in assembly buildings [Electronic resource] / H.L. Malhotra // Fire Safety. -1984. -N 27. -P. 285–291. -Mode of access: http://booksc.org/book/3192462/5e12bc.

76. Zerna, W. Probleme des Spannbetons. Über das Brandverhalten von Bauteilen und Bauwerken [Electronic resource]: Vorträge № 281 / W. Zerna, K. Kordina. – Düsseldorf: Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, 1979. – 100 p. – Mode of access: http://dlx.b-ok.org/genesis/955000/8a82a930bc9373e7a2b722bb5b3c27dd/ _as/[Wolfgang_Zerna,_Karl_Kordina_(auth.)]_Probleme_(b-ok.org).pdf.

77. Руководство по применению торкрет-бетона при возведении, ремонте и восстановлении строительных конструкций зданий и сооружений [Электронный ресурс]: руководство – Шифр М10.1/06 (разр. ОАО «ЦНИИПромзданий», утв. 24.05.2007 г.). – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/397084.

78. Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / В.М. Астапенко [и др.]; под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.

79. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драйздейл; пер. с англ. К.Г. Бомштейна: под ред. Ю.А. Кошмарова, К.Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

80. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции [Электронный ресурс]: государственный стандарт (введен в действие Постановлением Минстроя РФ

от 23.03.1995 г. № 18-26) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

81. ГОСТ Р 53303-2009. Конструкции строительные. Противопожарные двери и ворота. Метод испытаний на дымогазопроницаемость [Электронный ресурс]: государственный стандарт (утв. Приказом Ростехрегулирования от 18.02.2009 г. № 79-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

82. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения
[Текст]: справ. изд. в 2-х кн. / А.Н. Баратов [и др.]. – М.: Химия, 1990. – Кн. 1. – 490 с.; Кн. 2. – 384 с.

83. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: справ. изд. в 2-х ч. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пожнаука, 2004. – Ч.1. – 713 с.; Ч.2. – 774 с.

84. Теребнев, В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений [Текст] / В.В. Теребнев. – М.: Пожкнига, 2004. – 256 с.

85. Лазаренко, А.Б. Методические рекомендации по организации тушения пожаров, расчету сил и средств [Текст] / А.Б. Лазаренко, М.Б. Карницкий. – Ростов-на-Дону: Тип. им. М.И. Калинина Ростовского уприздата, 1980 г. – 88 с.

86. Джафаров, М.А. Обеспечение пожарной безопасности на аэродромах гражданской авиации [Текст] / М.А. Джафаров [и др.]. – М.: Транспорт, 1987. – 261 с.

87. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 12.12.1989 г. № 3683) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

88. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций [Электронный ресурс]: стандарт организации (утв. и введ. в действ. Приказом ФГУП «НИЦ «Строительство»

от 20.10.2006 г. № 156) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

89. Лыков, А.В. Теория теплопроводности: учебное пособие [Текст] /А.В. Лыков. – М.: Высшая Школа, 1967. – 600 с.

90. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики [Текст] / А.В. Лыков. – Минск: Изд-во Ан Белр., 1961. – 525 с.

91. ГОСТ 7473-2010 (EN 206-1:2000). Смеси бетонные. Технические условия [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (введ. в действ. Приказом Росстандарта от 13.05.2011 г. № 71-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

92. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности [Электронный ресурс]: государственный стандарт (утв. Постановлением Госстроя СССР от 22.12.1978 г. № 242) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

93. STA 449 C Jupiter [Электронный ресурс]: описание и технические характеристики прибора (разр. Компания NETZSCH). – Режим доступа: https://www. speciation.net/Database/Instruments/NetzschGeraetebau-GmbH/STA-449-C-Jupiter-Thermomicrobalance-;i2006.

94. LFA 457 MicroFlash [Электронный ресурс]: описание и технические характеристики прибора (разр. Компания NETZSCH). – Режим доступа: https://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/produkty-reshenija/temperaturoprovodnost-i-teplopro-vodnost/lfa-457-microflash.

95. Архангельский, И.В. Термоаналитические методы исследования: методическое пособие и руководство к задаче специального лабораторного практикума по дисциплине «Физико-химические методы исследования веществ и материалов» [Текст] / И.В. Архангельский, А.В. Дунаев, С.Г. Ионов. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 44 с.

96. Jayaweera, Shanath Amarasiri A. Some aspects on the history of thermal analysis [Text] / Shanath Amarasiri A. Jayaweera, Erich Robensa // Annales UMCS Chemia. $-2012. - V. 67. - N_{2} 1-2. - P. 1-29.$

97. Дашко, Л.В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия [Текст] / Л.В. Дашко, В.Д. Синюк, Г.В. Плотникова // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – № 12. – С. 22–32.

98. Lua J. A temperature and mass dependent thermal model for fire response prediction of marine [Text] / J. Lua, J. O'Brien, C.T. Key, Y. Wu, B.Y. Lattimer // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2006. – V. 37, № 7. – P. 1024–1039.

99. Рубан, А.И. Методы обработки экспериментальных данных: учебное пособие по циклу лабораторных работ по курсу «Методы обработки экспериментальных данных» [Электронный ресурс] / А.И. Рубан, А.В. Кузнецов. – Красноярск, 2008. – 80 с. – Режим доступа: http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/17/lab/lab.pdf.

100. Шаталова, Т.Б. Термические методы анализа [Текст] / Т.Б. Шаталова, О.А. Шляхтин, Е.А. Веряева. – М.: МГУ, 2011. – 72 с.

101. Уэндландт, У. Термические методы анализа [Текст] / У. Уэндландт; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 527 с.

102. Шестак, Я. Теория термического анализа: физико-химические свойства твердых неорганических веществ [Текст] / Я. Шестак. – М.: Мир, 1987. – 456 с.

103. Ключников, В.Ю. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз [Текст] / В.Ю. Ключников [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 7. – С. 47–51.

104. Вартанян, М.А. Исследование теплопроводности теплоизоляционных материалов методом горячей проволоки / М.А. Вартанян [и др.] // Новые огнеупоры. – 2016. – № 6. – С. 67–68.

105. Скидан, Б.С. Высокотемпературные испытания теплоизоляционных огнеупорных материалов на теплопроводность [Текст] / Б.С. Скидан, С.А. Борисов // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – № 4. – С. 38–41.

106. Parker, W.J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity [Text] / W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler // J. Appl. Phys. $-1961. - V. 32. - N_{2} 9. - P. 1675-1684.$

107. Akoshima, M. Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements [Text] / M. Akoshima, T. Baba // Int. J. Thermophys. $-2006. - V. 27. - N_{2} 4. - P. 1189-1203.$

108. Кузнецов, Г.В. Об условиях применения импульсных методов определения теплофизических характеристик конструкционных материалов [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.Д. Кац // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 4. – С. 10–13.

109. Рубан, А.И. Методы анализа данных: учеб. пособие [Текст] / А.И. Рубан; 2-е изд., испр. и доп. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 319 с.

110. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие для студентов втузов [Текст] / В.Е. Гмурман; 3-е изд. – М.: ВШ, 1979. – 400 с.

111. Брушлинский, Н.Н. Математические методы и модели управления в Государственной противопожарной службе: учебник [Текст] / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2011. – 173 с.

112. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона [Электронный ресурс]: государственный стандарт (введен Постановлением Госстроя СССР от 18.11.1980 г. № 177) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

113. Зенков, Н.И. Строительные материалы и их поведение в условиях пожара [Текст] / Н.И. Зенков. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1974. – 176 с.

114. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (введен в действие Приказом Росстандарта от 27.12.2012 г. № 2071-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

115. Жидков, А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования [Текст] / А.В. Жидков. – Нижний Новгород: ННГУ, 2006. – 115 с.

116. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: руководство [Текст] /

А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с. 117. Бруяка, В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие

[Текст] / В.А. Бруяка [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

118. Вальгер, С.А. Основы работы в ПК ANSYS 16.0 [Текст] / С.А. Вальгер [и др.]. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2015. – 240 с.

119. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника: учебник для ВУЗов [Текст] / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. – 501 с.

120. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

121. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст] / К. Флетчер: пер. с англ.; в 2-х томах. – М.: Мир, 1991. – Т. 2. – 552 с.

122. Magnussen, B.F. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion [Text] / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager // Proceedings of the Combustion Institute. – 1977. – V. 16. – \mathbb{N} 1. – P. 719–728.

123. Westbrook, C.K. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames [Text] / C.K. Westbrook, F.L. Dryer // Combustion Science and Technology. – 1981. – V. 27. – P. 31–43.

124. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник [Текст] / Х. Уонг; пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

125. Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций [Текст] / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1979. – 224 с.

126. Гравит, М.В. Конструктивные методы повышения огнестойкости несущих стальных конструкций: учебн. пособие [Текст] / М.В. Гравит [и др.]. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. – 81 с.

127. Гравит, М.В. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в европейских и российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации [Текст] / М.В. Гравит [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 10. – С. 16–29.

128. ECO 15-20-15/2-20/2. Light oil burners. Installation and maintenance manual [Text]. – Italia: Lambordghini calor S.p.A., via Statele, 342, 2002. – 101 p.

129. Руководство по эксплуатации на универсальный многоканальный регистратор «Терем 4.1» [Текст]. – Челябинск: НПП «ИНТЕРПРИБОР», 2016. – 55 с.

130. Паспорт на универсальный многоканальный регистратор «Терем 4.1» [Текст]. – Челябинск: НПП «ИНТЕРПРИБОР», 2016. – 8 с.

131. Паспорт ВИТА.400522.010ПС. Преобразователи термоэлектрические типа ТПL005(004), ТПК005, ТПК 125-0314.1500 [Текст]. – М.: ЗАО НПЦ «НАВИГАТОР», 2013. – 2 с.

132. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре [Электронный ресурс]: рекомендации (разр. НИИЖБ Госстроя СССР, 1979 г.). – Режим доступа: http://files.stroyinf.ru/Data1/9/9999.

133. Еналеев, Р.Ш. Огнестойкость бетона: европейское нормирование в строительстве [Электронный ресурс] / Р.Ш. Еналеев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9-4. – С. 904–908. – Режим доступа: https://elibrary.ru/ download/elibrary_18376682_31155221.pdf.

134. Курепин, В.В. Обработка экспериментальных данных: метод. указания к лабор. раб. [Текст] / В.В. Курепин, И.В. Баранов; под ред. В.А. Самолетова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 57 с.

135. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии [Текст] / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 312 с.

136. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования [Электронный ресурс]: государственный стандарт (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 12.11.1980 г. № 5320) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2018. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

137. Кассандрова, О.Н. Обработка результатов наблюдений [Текст] / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 104 с.

138. Демехин, В.Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: учебник [Текст] / В.Н. Демехин [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2003. – 656 с. 139. Экспериментально-расчетное определение основных параметров защитной стены для ограждения резервуарного парка мазутного хозяйства ТЭЦ-11, предназначенного для удержания потока мазута (волны прорыва), образующегося при квазимгновенном разрушении наибольшего резервуара группы (PBC-20000), в составе противопожарной защиты объекта, расположенного по адресу: г. Москва, участок 4-го транспортного кольца, ш. Энтузиастов – Измайловское ш., ул. Перовская, д.1А: отчет о НИР / Крутов А.М. [и др.]. – Сергиев-Посад: ЗАО «Теплоогнезащита», 2007. – 90 с.

140. Бубнов, В.М. Огнестойкость железобетонных конструкций: учебн. пособие [Текст] / В.М. Бубнов, А.С. Карпов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 76 с.

Приложение А (обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЛОТНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ, УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БЕТОНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

	Deper	ıdent varid	able: $\rho = f$	<i>(T</i>)		
Parameter	Estimate	Standard	Error	TS	Statistic	P-Value
CONSTANT	2345,8	8,86567		264,594		0,0000
Т	0,64913	0,	0404738		-16,0383	0,0000
T^2	0,0003455948	0,000	0363724		9,51128	0,0000
	Aı	nalysis of	Variance	<u>.</u>		
Source	Sum of Squares	Df	Mean Sqi	uare	F-Ratio	P-Value
Model	142809,0	2	71	404,3	386,92	0,0000
Residual	1845,45	10	18	4,545		
Total (Corr.)	144654,45	12				
R-squared = 98,72 R-squared (adjuste Standard Error of L	42 percent d for d.f.) = 98,4691 p Est. = 13,5847	percent				

Mean absolute error = 9,62527

Durbin-Watson statistic = 2,00809 (P = 0,2310)

плотности образцов из ФТБ от температуры

Lag 1 residual autocorrelation = -0,0405726

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a second order polynomial model to describe the relationship between ρ and f(T). The equation of the fitted model is

 $\rho = 2345,8 - 0,65(T - 273) + 0,00035(T - 273)^2.$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between ρ and f(T) at the 95 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 98,7242 % of the variability in p. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 98,4691 %. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 13,5847. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 9,62527 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95 % confidence level.

In determining whether the order of the polynomial is appropriate, note first that the P-value on the highest order term of the polynomial equals 0,00000251119. Since the P-value is less than 0,05, the highest order term is statistically significant at the 95 % confidence level. Consequently, you probably don't want to consider any model of lower order.

Таблица А.1 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению

Таблица А.2 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению температуропроводности образцов из ФТБ от температуры

	Depe	ndent vari	able: a =	f(T)			
Parameter	Estimate	Standard	l Error	Statistic	P-Value		
Intercept	0,112411		0,156168		0,719806	0,4867	
Slope	0,436191	0	,0264394		16,4978	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square		F-Ratio	P-Value	
Model	3,330560	1	3,3305600		272,18	0,0000	
Residual	0,134605	11	0,01	22368			
Total (Corr.)	3,46517	12					
Correlation Coeffic R-squared = 96,113 R-squared (adjuste Standard Error of D Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = 0,980385 55 percent d for d.f.) = 95,7624 p Est. = 0,11062 or = 0,081851 tistic = 0,789242 (P = pcorrelation = 0,48049	97					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a reciprocal-Y logarithmic-X model to describe the relationship between a and f(T). The equation of the fitted model is

 $a = 1/(-0.037 + 0.48\ln(T - 273)).$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between a and f(T) at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96,1155 % of the variability in a. The correlation coefficient equals 0,980385, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,11062. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,081851 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.

Таблица А.3 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению удельной теплоемкости образцов из ФТБ от температуры

	Depe	ndent varid	able: $c_p =$	<i>f</i> (<i>T</i>)			
Parameter	Estimate	Standara	Error	TS	Statistic	P-Value	
Intercept	339,727	40,7222		8,34255		0,0000	
Slope	26,9526		1,45209		18,5613	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square		F-Ratio	P-Value	
Model	406349,0	1	406	5349,0	344,52	0,0000	
Residual	12974,1	11	11	79,46			
Total (Corr.)	419323,0	12					
Correlation Coeffic R-squared = 96,903 R-squared (adjuste Standard Error of Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = 0,984408 59 percent d for d.f.) = 96,6247 μ Est. = 34,3433 or = 23,8876 tistic = 1,26079 (P = percorrelation = 0,1216	oercent 0,0355) 85					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a linear model to describe the relationship between c_p and \sqrt{T} . The equation of the fitted model is

$$c_p = 339,727 + 26,9526\sqrt{T}.$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between c_p and \sqrt{T} at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96,9059 % of the variability in C_p . The correlation coefficient equals 0,984408, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 34,3433. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 23,8876 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen. Таблица А.4 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению коэффициента теплопроводности образцов из ФТБ от температуры

	Deper	ndent varie	able: $\lambda = \frac{1}{2}$	f(T)			
Parameter	Estimate	Standard	l Error	T S	Statistic	P-Value	
Intercept	0,657364	0	,0169052		38,8853	0,0000	
Slope	20,3004		1,31277		15,4638	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Sq	juare	F-Ratio	P-Value	
Model	0,6305110	1	0,630	51100	239,13	0,0000	
Residual	0,0290036	11	0,002	63669			
Total (Corr.)	0,659515	12					
Correlation Coeffic R-squared = 95,602 R-squared (adjuste Standard Error of 1 Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = $0,977764$ 23 percent d for d.f.) = $95,2025$ p Est. = $0,0513487$ or = $0,0347007$ tistic = $1,11069$ (P = 0 pcorrelation = $0,40660$	0,0205) 08					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a reciprocal-Y logarithmic-X model to describe the relationship between λ and f(T). The equation of the fitted model is

$$\lambda = \sqrt{0,66 + 20,3/(T - 273)}.$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between λ and f(T) at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 97,4446 % of the variability in λ . The correlation coefficient equals 0,98714, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,11062. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 49716,8 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.

Parameter	Estimate	Standard	Error TS	Statistic	P-Value
CONSTANT	2119,91		7,30188	290,324	0,0000
Т	-0,463488	0,	0333347	-13,9041	0,0000
T^2	0,000204428	0,000	0299568	6,82411	0,0000
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Source	Sum of Squares	D_f	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	105202,0		51600,9	412,20	0,0000
Rosidual	1251.84	10	125,184		
пезишии					
Total (Corr.)	104454	12			

Таблица А.5 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению плотности образцов из ТБ от температуры

The StatAdvisor

Durbin-Watson statistic = 1,20355 (P = 0,0086) Lag 1 residual autocorrelation = 0,369666

The output shows the results of fitting a second order polynomial model to describe the relationship between ρ and f(T). The equation of the fitted model is

 $\rho = 2119,91 - 0,46(T - 273) + 0,0002(T - 273)^2.$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between ρ and f(T) at the 95 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 98,8015 % of the variability in p. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 98,5618 %. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 11,1885. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 7,3902 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial auto-correlation in the residuals at the 95 % confidence level.

In determining whether the order of the polynomial is appropriate, note first that the P-value on the highest order term of the polynomial equals 0,0000460223. Since the P-value is less than 0,05, the highest order term is statistically significant at the 95 % confidence level. Consequently, you probably don't want to consider any model of lower order.

Таблица А.6 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению температуропроводности образцов из ТБ от температуры

	Depe	ndent vari	able: a =	f(T)			
Parameter	Estimate	Standard Error TS			Statistic	P-Value	
Intercept	-0,0566906		0,161725		-0,350537	0,7326	
Slope	0,49339	0	,0273801		18,02	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square		F-Ratio	P-Value	
Model	4,26133	1	4,	26133	324,7	0,0000	
Residual	0,144354	11	0,01	31231			
Total (Corr.)	4,40569	12					
Correlation Coeffic R-squared = 96,722 R-squared (adjuste Standard Error of Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = 0,983481 35 percent d for d.f.) = 96,4256 p Est. = 0,114556 or = 0,0861908 tistic = 0,851316 (P = pcorrelation = 0,4310	percent = 0,0031) 34					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a reciprocal-Y logarithmic-X model to describe the relationship between a and f(T). The equation of the fitted model is

 $a = 1/(-0.056 + 0.49\ln(T - 273)).$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between a and f(T) at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96,7235 % of the variability in a. The correlation coefficient equals 0,983481, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,114556. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,0861908 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.

Таблица А.7 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению удельной теплоемкости образцов из ТБ от температуры

	Deper	ident varic	able: $c_p = f$	f(T)		
Parameter	Estimate	Standard	Error	T St	tatistic	P-Value
Intercept	440,563	57,5097		7,66069		0,0000
Slope	32,6772		2,0507		15,9347	0,0000
	Ai	nalysis of	Variance			
Source	Sum of Squares	Df	Mean Sqi	ıare	F-Ratio	P-Value
Model	597293,0	1	5972	293,0	253,91	0,0000
Residual	25875,9	11	235	52,35		
Total (Corr.)	623169,0	12				
Correlation Coeffic R-squared = 95,84' R-squared (adjuste Standard Error of 1 Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = 0,979018 77 percent ed for d.f.) = 95,4702 p Est. = 48,5011 or = 36,5948 etistic = 0,879308 (P = pcorrelation = 0,35160	<i>ercent</i> 0,0036))8				

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a linear model to describe the relationship between c_p and \sqrt{T} The equation of the fitted model is

$$c_p = 440,563 + 32,6772\sqrt{T}.$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between c_p and \sqrt{T} at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 95,8477 % of the variability in C_p . The correlation coefficient equals 0,979018, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 48,5011. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 36,5948 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen. Таблица А.8 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению коэффициента теплопроводности образцов из ТБ от температуры

	Depe	ndent varie	able: $\lambda =$	f(T)			
Parameter	Estimate	Standara	l Error	T S	Statistic	P-Value	
Intercept	0,729276	0	,0261802	27,856		0,0000	
Slope	29,2799		2,03302		14,4022	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Se	juare	F-Ratio	P-Value	
Model	1,31167	1	1,31167		207,4	2 0,0000	
Residual	0,0290036	11	0,006	32361			
Total (Corr.)	1,38123	12					
Correlation Coeffic R-squared = 94,963 R-squared (adjuste Standard Error of Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = $0,974494$ 39 percent d for d.f.) = $95,2025 pEst. = 0,0795211br = 0,0604325tistic = 1,46825 (P = 0)pocorrelation = 0,20112$	percent 0,0965) 28					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a reciprocal-Y logarithmic-X model to describe the relationship between λ and f(T). The equation of the fitted model is

$$\lambda = \sqrt{0,73 + 29,28} / (T - 273).$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between λ and f(T) at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 94,9639 % of the variability in λ . The correlation coefficient equals 0,974494, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0795211. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,0604325 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level.

	Deper	ndent varid	<i>able:</i> $\rho = f(T)$			
Parameter	Estimate	Standard	Error T	Statistic	P-Value	
CONSTANT	2090,64		5,84345	357,775	0,0000	
Т	-0,42776	0,	0266767	-16,035	0,0000	
T^2	0,000186736	0,000	0239734	7,78929	0,0000	
Analysis of Variance						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
Model	89339,9	2	44669,9	557,18	3 0,0000	
Residual	801,709	10	80,1709			
Total (Corr.)	90141,6	12				
R-squared = 99,11 R-squared (adjuste Standard Error of I Mean absolute erro Durbin-Watson sta	06 percent d for d.f.) = 98,9327 p Est.= 8,95382 or = 5,55512 tistic = 1,87275 (P = 0	oercent 0,1587)				

Таблица А.9 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению плотности образцов из Б от температуры

The StatAdvisor

Lag 1 residual autocorrelation = 0,0633386

The output shows the results of fitting a second order polynomial model to describe the relationship between ρ and f(T). The equation of the fitted model is

 $\rho = 2090,64 - 0,43(T - 273) + 0,00019(T - 273)^2$.

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between ρ and f(T) at the 95 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,1106 % of the variability in p. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 98,9327 %. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 8,95382. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 5,55512 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95 % confidence level.

In determining whether the order of the polynomial is appropriate, note first that the P-value on the highest order term of the polynomial equals 0,0000148647. Since the P-value is less than 0,05, the highest order term is statistically significant at the 95 % confidence level. Consequently, you probably don't want to consider any model of lower order.

Таблица А.10 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению температуропроводности образцов из Б от температуры

	Depe	ndent varie	able: a =	f(T)			
Parameter	Estimate	Standard	Error	TS	P-Value		
Intercept	-0,0367644		0,118054		-0,311422	0,7613	
Slope	0,477595	0,	,0199865		23,8958	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square		F-Ratio	P-Value	
Model	3,99286	1	3,99286		571,0	0,0000	
Residual	0,0769189	11	0,006	99263			
Total (Corr.)	4,06978	12					
Correlation Coeffic R-squared = 98,11 R-squared (adjuste Standard Error of Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = $0,990505$ percent d for d.f.) = $97,9382$ p Est. = $0,083622$ or = $0,0861908$ tistic = $0,989262$ (P = pcorrelation = $0,37955$	<i>0,0082)</i> 51					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a reciprocal-Y logarithmic-X model to describe the relationship between a and f(T). The equation of the fitted model is

 $a = 1/(0,11 + 0,44\ln(T - 273)).$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between a and f(T) at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 98,11 % of the variability in a. The correlation coefficient equals 0,990505, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,083622. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,0634689 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.

Таблица А.11 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению удельной теплоемкости образцов из Б от температуры

	Deper	ndent varid	able: $c_p =$	f(T)			
Parameter	Estimate	Standara	l Error	TS	Statistic	P-Value	
Intercept	382,352		69,9941		5,46263	0,0002	
Slope	34,1068		2,49587		13,6653	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square		F-Ratio	P-Value	
Model	650701,0	1	650)701,0	186,7	4 0,0000	
Residual	38329,8	11	34	484,53			
Total (Corr.)	689031,0	12					
Correlation Coeffic R-squared = 94,43 R-squared (adjuste Standard Error of Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = 0.971788 71 percent d for d.f.) = 93.9314 p Est. = 59.0299 or = 35.5587 tistic = 0.975284 (P = pcorrelation = 0.22303	ercent = 0,0072) 53					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a linear model to describe the relationship between c_p and \sqrt{T} The equation of the fitted model is

$$c_p = 382,352 + 34,1068\sqrt{T}.$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between c_p and \sqrt{T} at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 94,4371 % of the variability in c_p . The correlation coefficient equals 0,971788, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 59,0299. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 35,5587 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen. Таблица А.12 – Результаты обработки экспериментальных данных по изменению коэффициента теплопроводности образцов из Б от температуры

	Depe	ndent varie	able: $\lambda =$	f(T)			
Parameter	Estimate	Standard Error T Statistic P-Ve					
Intercept	0,707753	0	,0291371	24,2904		0,0000	
Slope	32,9208		2,26263		14,5498	0,0000	
Analysis of Variance							
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square		F-Ratio	P-Value	
Model	1,65815	1	1,	65815	211,7	70 0,0000	
Residual	0,0861594	11	0,007	83267			
Total (Corr.)	1,74431	12					
Correlation Coeffic R-squared = 95,060 R-squared (adjuste Standard Error of Mean absolute erro Durbin-Watson sta Lag 1 residual auto	cient = 0,97499 06 percent d for d.f.) = 94,6115 p Est. = 0,0885024 or = 0,0715606 tistic = 0,257033 (P = pocorrelation = 0,7339	percent = 0,0000) 77					

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a reciprocal-Y logarithmic-X model to describe the relationship between λ and f(T). The equation of the fitted model is

$$\lambda = \sqrt{0,71 + 32,92} / (T - 273).$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between λ and f(T) at the 95,0 % confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 95,0606 % of the variability in λ . The correlation coefficient equals 0,97499, indicating a relatively strong relationship between the variables. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0885024. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,0715606 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0 % confidence level.

Приложение Б (обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОГРЕВА ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	НОМ	ер терм	опары в	образце	Nº 1	НОМ	ер термо	опары в	образце	<u>№</u> 2		
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,5	21,0	21,2	22,0	20,0	21,5	21,5	20,5	20,8	21,2		
3,0	36,5	38,0	37,0	37,0	37,0	36,0	38,5	36,5	37,2	36,5		
10,0	102,0	103,0	105,5	106,0	105,5	105,0	105,5	107,5	106,0	104,3		
20,0	197,0	203,0	200,0	201,3	202,5	203,6	198,0	199,0	197,5	201,0		
30,0	265,8	272,3	272,0	269,0	269,5	270,6	272,0	273,9	270,0	269,0		
40,0	337,0	338,5	342,0	343,0	342,5	338,0	341,0	341,5	342,0	338,0		
50,0	406,3	410,0	412,0	414,0	413,5	408,6	407,5	411,0	412,3	409,0		
60,0	473,6	475,0	474,0	474,5	479,0	478,0	477,0	470,0	475,0	478,0		
70,0	521,4	520,0	521,3	522,0	517,0	522,0	524,0	519,0	518,5	518,0		
80,0	577,0	579,6	580,0	585,2	584,0	579,1	577,0	580,2	580,6	581,0		
90,0	606,0	608,2	611,0	613,0	610,2	611,5	612,0	614,0	606,0	609,0		
100,0	640,2	642,0	644,2	644,0	638,0	639,5	637,8	639,1	641,0	638,0		
110,0	669,0	667,5	671,4	674,0	672,0	674,2	668,3	670,0	670,4	667,0		
120,0	687,5	692,0	691,6	687,5	690,0	692,0	694,1	689,0	688,0	690,0		
130,0	702,0	703,5	707,2	705,0	701,6	708,2	704,0	705,5	705,6	708,0		
140,0	720,9	725,0	724,0	729,0	726,3	727,4	726,0	722,0	724,6	725,0		
150,0	733,0	735,2	740,0	741,6	737,0	735,0	736,8	740,0	741,0	742,0		
160,0	756,0	762,3	761,0	763,6	760,4	757,0	758,6	760,0	761,0	764,0		

Таблица Б.1 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₁ образцов на основе Б

Таблица Б.2 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₂ образцов на основе Б

Время нагрева				Значе	ение тем	ператур	ы, °С			
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Ном	ер термо	опары в	образце	. № 2
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,5	21,0	21,5	21,0	21,5	20,5	21,0	21,0	21,0	21,2	21,5
3,0	21,5	21,5	21,5	21,5	21,0	21,5	21,5	21,3	21,4	21,5
10,0	21,6	21,7	21,6	21,5	21,1	21,6	21,8	21,4	21,5	21,6
20,0	26,0	25,0	25,0	25,3	25,6	25,0	24,5	25,0	24,5	24,3
30,0	34,2	34,6	35,0	34,0	35,0	35,0	35,0	36,0	36,0	35,2
40,0	42,5	42,6	42,9	43,4	43,0	43,0	43,0	44,0	43,5	42,5
50,0	57,0	58,0	57,5	58,0	60,0	61,0	60,0	61,0	58,0	59,6
60,0	75,0	76,0	76,5	77,5	79,0	78,0	77,0	77,4	77,0	77,0
70,0	85,0	86,0	86,0	88,0	86,0	88,0	87,0	87,6	88,0	88,5
80,0	99,5	99,0	97,0	98,0	97,0	97,8	97,0	100,0	97,5	98,0
90,0	104,0	104,5	102,8	102,5	103,0	103,5	101,6	101,6	102,5	104,0
100,0	111,0	111,6	110,0	112,8	113,5	112,0	111,0	112,6	113,1	112,5
110,0	126,3	127,4	125,2	125,0	123,0	123,4	125,0	125,5	126,3	123,2
120,0	140,5	141,2	143,2	140,5	138,0	138,4	140,0	140,2	139,0	140,0
130,0	158,5	159,2	159,6	160,2	161,8	161,0	162,0	161,0	159,0	158,0
140,0	177,5	177,9	181,3	182,4	180,3	180,0	183,0	182,0	179,0	178,0
150,0	183,6	186,0	185,7	185,0	183,6	182,9	186,5	188,2	184,6	184,0
160,0	193,2	191,0	188,5	189,0	190,5	191,0	192,4	189,6	187,0	188,0

Время нагрева		Значение температуры, °С									
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	№ 1	Ном	ер термо	опары в	образце	№ 2	
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
0,5	20,7	21,5	20,8	21,4	20,4	21,0	20,8	21,0	21,1	21,4	
3,0	20,8	21,5	20,8	21,4	20,4	21,0	21,0	21,0	21,2	21,5	
10,0	20,9	21,5	20,9	21,5	20,5	21,0	21,0	21,0	21,3	21,5	
20,0	21,1	21,5	22,0	22,2	21,9	21,6	21,6	21,5	21,4	21,6	
30,0	21,5	21,6	22,0	22,3	22,1	21,8	21,7	22,1	22,3	22,9	
40,0	22,0	22,1	22,5	22,5	22,9	22,5	24,0	23,0	24,5	24,0	
50,0	25,0	25,6	25,4	22,8	23,0	23,0	24,0	23,1	24,0	24,2	
60,0	26,5	27,0	27,5	28,1	28,0	27,6	26,9	26,5	26,1	26,0	
70,0	27,8	28,0	28,5	30,0	29,0	30,5	31,0	29,0	29,0	28,0	
80,0	33,5	34,6	34,0	34,0	33,0	33,5	32,8	32,0	31,5	32,0	
90,0	36,2	38,0	37,5	37,6	37,0	35,6	35,8	36,4	38,2	38,0	
100,0	40,2	40,5	41,0	41,9	41,0	40,5	38,9	39,5	38,6	38,0	
110,0	44,6	43,5	41,2	43,0	43,0	43,0	45,0	44,0	41,0	42,0	
120,0	48,6	48,0	47,0	47,5	48,9	50,0	46,9	49,0	48,0	47,0	
130,0	51,0	51,9	53,0	54,2	52,0	52,6	55,0	54,0	53,0	53,6	
140,0	58,6	59,0	59,0	60,5	62,0	61,5	62,0	60,0	59,0	59,0	
150,0	65,2	67,0	64,2	63,0	64,0	63,9	66,0	66,8	67,0	63,0	
160,0	74,1	73,0	73,5	74,2	72,0	72,5	70,0	70,2	69,5	71,0	

Таблица Б.3 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₃ образцов на основе Б

Таблица Б.4 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₄ образцов на основе Б

Время нагрева				Значе	ение тем	ператур	ы, °С			
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Ном	ер термо	опары в	образце	. № 2
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,5	20,7	21,5	20,7	21,3	20,3	21,0	21,0	21,0	21,1	21,4
3,0	20,8	21,6	20,7	21,5	20,4	21,0	20,9	21,0	21,1	21,4
10,0	20,8	21,6	20,8	21,6	20,4	21,0	21,0	21,0	21,1	21,4
20,0	20,9	21,6	20,9	21,7	20,4	21,0	21,0	21,0	21,1	21,4
30,0	21,0	21,7	21,0	21,8	20,4	21,0	21,0	21,0	21,1	21,4
40,0	21,0	21,7	21,1	21,9	20,5	21,1	21,1	21,1	21,1	21,5
50,0	21,1	21,7	21,1	21,9	20,6	21,1	21,1	21,1	21,1	21,6
60,0	21,3	22,0	21,3	22,1	21,0	21,4	21,5	21,3	21,2	22,0
70,0	21,4	22,5	22,0	22,2	21,5	22,0	21,8	22,0	22,2	22,7
80,0	23,0	23,1	22,0	22,2	21,5	22,0	22,3	22,5	23,1	23,4
90,0	23,5	24,5	24,0	24,0	22,8	23,5	23,5	24,1	25,5	25,0
100,0	24,0	24,5	24,2	24,6	23,5	23,9	25,5	24,5	25,5	25,2
110,0	24,5	26,0	25,6	26,8	25,0	26,6	26,0	25,4	26,0	26,5
120,0	28,0	28,0	26,5	27,0	26,2	26,7	27,0	27,0	27,2	26,8
130,0	28,9	30,0	30,6	30,5	31,0	30,0	31,0	30,0	29,5	28,6
140,0	33,2	33,5	32,0	31,6	31,8	32,0	31,4	32,0	31,5	31,2
150,0	36,2	36,3	33,8	35,9	34,5	35,0	35,0	34,0	34,0	36,0
160,0	39,5	39,0	39,0	38,5	37,8	37,9	38,1	37,0	36,8	37,0

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 2		
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	21,0	21,4	21,5	21,0	21,2	20,9	21,0	20,8	20,6	20,7		
3,0	21,0	21,5	21,5	21,1	21,2	20,9	21,0	20,8	20,7	20,7		
10,0	21,0	21,5	21,5	21,1	21,2	21,0	21,0	20,8	20,7	20,7		
20,0	21,0	21,5	21,5	21,1	21,2	21,1	21,1	21,0	21,0	20,8		
30,0	21,0	21,5	21,5	21,1	21,2	21,1	21,1	21,0	21,0	20,9		
40,0	21,1	21,5	21,5	21,1	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,0		
50,0	21,2	21,5	21,5	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,3	21,2		
60,0	21,2	21,5	21,6	21,3	21,3	21,5	21,4	21,4	21,4	21,5		
70,0	21,5	21,9	22,1	22,4	21,9	21,5	22,3	22,1	22,5	22,6		
80,0	23,0	22,2	22,4	22,5	22,0	22,4	22,6	22,8	22,8	22,6		
90,0	23,1	23,5	23,4	22,9	22,9	23,1	23,5	23,4	23,4	23,2		
100,0	23,4	23,9	24,1	23,5	23,2	23,1	23,5	23,0	23,5	24,0		
110,0	25,0	25,0	24,8	25,6	25,0	25,6	24,6	24,5	25,0	25,0		
120,0	25,1	25,2	25,2	26,2	26,0	26,5	25,8	26,9	26,5	27,0		
130,0	29,0	28,5	28,0	28,0	27,5	28,0	27,4	27,9	28,1	28,0		
140,0	29,5	29,8	30,5	31,0	31,1	29,0	29,5	30,0	30,2	30,0		
150,0	30,0	29,8	30,6	31,5	32,0	31,5	31,5	31,4	30,5	31,5		
160,0	34,8	34,0	33,5	33,2	33,6	34,0	34,1	34,5	35,0	34,0		

Таблица Б.5 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₅ образцов на основе Б

Таблица Б.6 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₆ образцов на основе Б

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 2		
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	21,0	21,1	20,7	20,8	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
3,0	21,0	21,1	20,8	20,8	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
10,0	21,0	21,1	20,9	20,8	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
20,0	21,0	21,1	21,0	20,8	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
30,0	21,0	21,1	21,0	20,9	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
40,0	21,0	21,1	21,0	20,9	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
50,0	21,0	21,1	21,0	20,9	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
60,0	21,0	21,1	21,0	20,9	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,2		
70,0	21,1	21,1	21,1	21,0	21,0	21,1	21,0	21,0	21,1	21,3		
80,0	21,2	21,2	21,3	21,1	21,1	21,3	21,3	21,1	21,2	21,5		
90,0	21,5	21,4	21,3	21,4	21,1	21,4	21,3	21,2	21,3	21,5		
100,0	21,5	21,5	21,4	21,5	21,2	21,5	21,5	21,2	21,3	21,5		
110,0	21,6	21,5	21,5	21,6	21,3	21,6	21,6	21,3	21,6	21,7		
120,0	22,0	22,1	21,5	21,6	21,3	22,0	22,0	22,5	22,6	22,8		
130,0	22,5	23,4	23,0	22,4	22,5	22,5	23,6	23,9	23,5	23,0		
140,0	22,6	23,8	24,5	24,6	24,0	24,0	23,6	24,0	24,6	24,5		
150,0	23,0	24,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,1	26,5	25,6	26,1		
160,0	25,0	25,6	26,5	28,0	27,5	27,0	27,4	28,0	28,1	27,2		

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	№ 1	Ном	ер термо	опары в	образце	№ 2		
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,0	20,2	20,4	20,6	21,0	20,5	21,0	20,5	20,0	20,2		
3,0	35,2	37,1	36,5	36,0	38,2	35,0	36,0	35,1	36,0	35,2		
10,0	97,0	102,5	98,6	100,5	98,3	101,2	102,5	100,4	103,5	99,8		
20,0	154,6	162,5	160,5	158,0	160,2	161,5	158,7	164,2	158,6	157,6		
30,0	256,9	254,6	260,2	258,6	255,0	257,4	254,3	252,3	251,1	258,9		
40,0	328,6	330,2	335,0	327,1	334,6	335,4	329,4	330,1	335,4	331,6		
50,0	391,5	388,5	400,2	401,5	402,9	393,2	394,6	401,2	391,2	390,4		
60,0	441,6	447,5	453,6	452,1	449,8	443,6	448,6	454,6	452,6	455,1		
70,0	495,8	492,6	504,2	502,3	502,3	498,6	489,5	489,2	496,3	498,5		
80,0	540,1	537,5	543,0	551,2	545,6	540,3	550,4	538,6	535,4	542,0		
90,0	574,6	580,2	576,4	587,2	590,1	592,6	585,6	581,2	584,6	585,9		
100,0	617,8	620,5	624,5	627,5	618,5	616,4	621,5	623,5	626,0	623,1		
110,0	652,5	655,6	660,2	661,8	658,9	664,2	666,1	663,1	659,6	664,1		
120,0	670,2	675,8	674,5	680,5	681,5	677,1	679,8	673,5	680,4	683,1		
130,0	692,5	695,4	693,9	690,8	689,3	701,5	692,8	691,5	694,8	700,5		
140,0	714,8	715,2	720,6	727,9	725,6	722,0	721,4	718,6	719,6	718,4		
150,0	735,6	738,9	742,6	746,0	750,9	742,6	738,9	741,0	745,8	738,9		
160,0	751,4	758,6	761,5	770,4	768,9	760,0	759,3	761,2	756,1	756,0		

Таблица Б.7 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₁ образцов на основе ТБ

Таблица Б.8 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₂ образцов на основе ТБ

Время нагрева				Значе	ение тем	ператур	ы, °C			
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Ном	ер термо	опары в	образце	. № 2
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,5	20,0	20,1	20,3	20,4	20,8	20,5	20,5	20,2	20,0	20,1
3,0	20,2	20,2	20,3	20,5	20,8	20,6	20,6	20,3	20,2	20,4
10,0	20,4	20,3	20,4	20,6	20,9	20,8	20,8	20,5	20,3	20,4
20,0	26,1	25,4	24,1	25,0	25,6	26,5	25,8	24,9	24,0	26,0
30,0	29,0	28,6	30,5	33,1	32,0	31,5	33,2	30,6	29,8	32,0
40,0	40,5	42,6	41,4	45,2	46,1	43,6	43,1	45,2	42,3	40,6
50,0	55,6	58,6	59,1	61,3	59,6	58,4	56,3	57,2	56,4	57,6
60,0	79,2	82,4	77,5	78,6	81,3	82,4	79,5	83,4	78,6	77,6
70,0	92,6	94,5	98,6	98,5	96,2	95,0	94,6	96,6	95,1	98,6
80,0	98,0	100,5	98,2	99,6	97,7	98,6	101,6	97,4	99,2	99,9
90,0	102,3	101,0	99,5	98,4	104,5	100,2	103,6	101,4	99,2	100,6
100,0	105,0	108,9	109,0	114,6	108,6	112,9	114,6	113,0	106,5	107,0
110,0	114,6	120,5	121,6	123,0	119,6	118,7	122,5	124,6	118,0	117,0
120,0	128,6	131,5	125,9	129,6	130,2	134,9	129,8	128,7	132,0	129,0
130,0	141,5	149,6	138,9	150,1	145,6	149,8	141,2	139,6	150,3	144,0
140,0	159,6	159,5	165,3	166,8	168,0	171,0	168,0	166,6	161,0	165,0
150,0	180,5	171,0	174,6	169,0	178,6	180,4	178,0	176,5	172,0	170,0
160,0	179,8	190,6	184,5	181,2	189,4	191,4	180,1	186,0	183,2	184,0

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	: № 1	Ном	ер термо	опары в	образце	<u>№</u> 2		
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,0	20,2	20,5	20,0	20,0	20,1	20,2	20,0	20,0	20,0		
3,0	20,1	20,2	20,5	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,1	20,2		
10,0	20,2	20,3	20,6	20,4	20,4	20,5	20,2	20,2	20,2	20,3		
20,0	20,6	20,5	20,6	20,5	20,5	20,5	20,4	20,2	20,3	20,3		
30,0	20,7	20,5	20,6	20,6	20,5	20,5	20,6	20,5	20,4	20,4		
40,0	21,3	21,2	22,0	21,9	21,5	21,8	21,4	21,6	21,9	21,8		
50,0	23,5	23,8	23,6	24,0	24,1	23,5	23,4	23,1	23,5	24,5		
60,0	24,1	25,5	25,8	24,9	26,1	24,6	24,6	25,1	24,1	25,3		
70,0	28,2	27,5	27,8	28,3	28,2	29,1	27,4	27,5	28,2	28,0		
80,0	31,0	31,2	32,5	33,4	32,8	31,9	31,5	32,0	32,0	32,1		
90,0	35,2	34,2	34,2	35,0	35,1	36,4	34,2	35,8	35,0	35,0		
100,0	38,5	39,1	39,5	41,1	41,5	40,0	40,5	39,6	38,9	41,6		
110,0	42,2	42,0	42,3	42,5	43,1	43,0	40,8	40,0	42,0	42,2		
120,0	45,6	46,2	45,5	43,8	44,1	44,5	45,0	45,0	45,8	44,7		
130,0	50,1	51,2	52,0	52,6	53,1	54,0	53,9	51,0	50,5	51,8		
140,0	54,2	53,9	53,0	54,0	55,1	55,8	56,2	54,2	57,0	56,7		
150,0	62,3	61,5	59,8	57,6	61,5	62,0	57,5	58,4	59,0	61,0		
160,0	71,4	68,9	69,5	72,5	71,0	70,0	69,5	68,8	71,0	68,2		

Таблица Б.9 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₃ образцов на основе ТБ

Таблица Б.10 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₄ образцов на основе ТБ

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Ном	ер термо	опары в	образце	. № 2		
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,1	20,2	20,0	20,0	20,3	20,1	20,1	20,2	20,1	20,0		
3,0	20,1	20,3	20,1	20,0	20,3	20,1	20,1	20,2	20,2	20,0		
10,0	20,1	20,4	20,1	20,1	20,4	20,2	20,2	20,3	20,2	20,2		
20,0	20,4	20,5	20,4	20,3	20,5	20,4	20,3	20,5	20,4	20,5		
30,0	20,5	20,5	20,4	20,3	20,5	20,4	20,4	20,5	20,4	20,5		
40,0	20,6	20,5	20,5	20,4	20,5	20,5	20,5	20,6	20,5	20,6		
50,0	20,7	20,6	20,6	20,5	20,6	20,6	20,6	20,7	20,6	20,6		
60,0	20,9	21,0	21,0	20,8	21,2	21,1	21,5	20,9	20,8	20,9		
70,0	22,3	21,5	22,2	21,4	22,5	22,8	21,9	21,6	22,4	22,5		
80,0	22,4	21,5	22,3	21,5	22,6	22,9	22,1	21,7	22,6	22,6		
90,0	23,5	24,1	24,0	24,0	23,1	23,6	24,2	24,5	24,8	24,6		
100,0	24,5	24,8	24,3	24,1	23,9	24,7	24,3	24,6	24,9	25,0		
110,0	24,9	25,1	25,2	25,6	25,0	26,1	25,5	26,2	26,8	25,8		
120,0	26,1	27,0	27,5	28,1	27,0	26,5	26,5	27,1	27,0	27,4		
130,0	31,1	29,5	29,0	29,0	30,2	30,0	31,2	29,5	31,2	29,5		
140,0	31,3	32,0	31,5	30,9	31,1	32,4	33,4	33,0	32,8	31,7		
150,0	33,8	34,5	32,9	35,1	33,8	34,6	35,4	33,5	33,9	33,2		
160,0	37,1	36,8	36,5	36,5	34,9	35,1	37,2	35,5	36,0	35,0		
Время нагрева		Значение температуры, °С										
---------------	------	--------------------------	---------	---------	-------------------------------	------	------	------	------	------	--	--
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Номер термопары в образце № 2							
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,0	20,2	20,2	20,2	20,1	20,1	20,2	20,0	20,0	20,0		
3,0	20,1	20,2	20,2	20,2	20,1	20,2	20,2	20,0	20,1	20,0		
10,0	20,1	20,2	20,2	20,2	20,1	20,2	20,2	20,1	20,1	20,0		
20,0	20,1	20,3	20,3	20,3	20,2	20,3	20,3	20,2	20,2	20,2		
30,0	20,2	20,4	20,4	20,4	20,3	20,4	20,4	20,2	20,3	20,3		
40,0	20,3	20,5	20,5	20,6	20,3	20,4	20,4	20,3	20,4	20,4		
50,0	20,5	20,6	20,6	20,7	20,5	20,6	20,4	20,4	20,5	20,5		
60,0	21,0	20,8	21,5	21,1	20,6	20,9	21,3	21,0	20,7	21,2		
70,0	21,5	22,0	22,5	22,0	21,7	21,8	22,0	22,6	21,5	22,4		
80,0	21,5	22,5	22,8	22,4	22,0	22,1	22,3	22,7	21,6	22,5		
90,0	22,2	23,1	23,5	22,5	22,4	22,6	23,6	23,4	23,5	23,6		
100,0	23,5	23,2	23,8	24,0	24,2	24,0	24,6	24,8	24,1	24,5		
110,0	25,0	25,2	24,4	24,6	25,2	25,6	25,1	25,2	24,8	25,2		
120,0	26,3	25,8	25,2	25,1	26,0	26,2	25,8	26,5	26,4	26,9		
130,0	27,5	27,4	28,2	28,6	28,0	28,1	28,5	28,7	27,2	28,1		
140,0	27,8	28,2	29,3	29,5	29,4	28,8	29,0	29,2	29,8	29,4		
150,0	30,5	31,0	29,5	31,5	30,6	30,9	30,0	31,8	32,0	32,3		
160,0	31,7	32,5	32,9	33,5	32,8	34,0	32,5	32,6	34,1	34,2		

Таблица Б.11 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₅ образцов на основе ТБ

Таблица Б.12 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₆ образцов на основе ТБ

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Номер термопары в образце № 2							
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
3,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
10,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
30,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
40,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
50,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
60,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
70,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
90,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0		
100,0	20,1	20,1	20,1	20,2	20,0	20,0	20,1	20,0	20,2	20,2		
110,0	20,2	20,0	20,2	20,0	20,0	20,1	20,2	20,1	20,1	20,2		
120,0	20,3	20,1	20,3	20,3	20,1	20,2	20,2	20,2	20,3	20,4		
130,0	20,5	20,9	21,5	21,6	21,1	20,5	20,6	20,8	21,6	21,4		
140,0	21,2	21,6	22,4	22,9	22,3	21,8	21,6	21,4	22,5	22,8		
150,0	22,0	22,4	23,1	23,0	24,2	24,0	23,8	22,2	22,8	23,1		
160,0	26,1	25,5	24,9	24,5	25,2	24,8	25,1	24,7	25,4	24,2		

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Номер термопары в образце № 2							
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,9	21,0	21,0	21,8	20,9	21,0	21,0	21,4	21,2	21,7		
3,0	37,7	39,1	37,5	37,4	41,1	36,5	38,4	37,2	37,5	37,6		
10,0	101,1	111,7	102,7	110,8	119,7	105,1	112,6	118,7	102,7	114,8		
20,0	220,7	215,9	222,8	228,6	229,9	226,9	208,8	210,6	215,8	220,2		
30,0	279,1	261,3	277,8	265,3	279,6	288,3	279,6	285,3	289,1	294,3		
40,0	370,2	365,3	355,1	366,7	348,6	352,3	365,3	370,1	350,7	355,7		
50,0	433,9	395,7	440,2	444,3	433,9	428,3	440,8	448,8	440,9	423,3		
60,0	497,6	490,2	510,2	515,3	497,6	498,2	491,6	516,3	497,6	485,3		
70,0	555,6	515,8	565,6	543,5	555,6	567,2	562,3	550,3	543,4	540,6		
80,0	608,6	597,6	608,2	610,6	608,6	620,6	614,6	608,6	602,6	600,1		
90,0	620,7	617,6	630,3	623,4	640,7	640,7	619,2	625,7	642,8	638,9		
100,0	680,4	668,9	666,1	665,2	665,1	672,2	681,3	666,5	665,2	669,1		
110,0	684,5	690,9	681,1	695,2	665,1	680,4	690,3	672,2	663,2	677,1		
120,0	698,3	705,2	701,5	715,3	690,2	698,2	693,2	706,5	701,4	690,2		
130,0	725,5	730,6	720,6	726,6	708,2	725,5	725,6	720,6	726,6	710,2		
140,0	745,2	754,7	740,8	745,7	736,0	745,2	754,7	740,8	745,7	741,2		
150,0	764,5	774,4	777,9	764,4	767,3	774,5	780,4	777,9	760,4	758,3		
160,0	773,0	780,4	787,5	775,4	776,3	784,0	790,4	787,5	771,4	774,1		

Таблица Б.13 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₁ образцов на основе ФТБ

Таблица Б.14 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₂ образцов на основе ФТБ

Время нагрева				Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Номер термопары в образце № 2								
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5				
0,5	20,9	20,9	21,0	21,0	20,1	21,0	21,0	21,2	21,3	21,5				
3,0	20,9	20,9	21,0	21,0	20,2	21,0	21,2	21,2	21,4	21,5				
10,0	21,5	21,1	21,2	21,9	21,1	21,2	21,5	21,6	22,0	21,7				
20,0	24,5	24,0	25,0	25,5	25,1	25,2	25,3	24,6	25,7	25,1				
30,0	38,9	37,9	39,2	38,3	37,9	36,7	37,8	39,1	37,0	37,2				
40,0	44,0	46,0	43,3	43,0	43,0	43,9	43,0	45,0	42,8	46,0				
50,0	61,05	59,1	58,3	58,2	61,3	59,9	61,4	64,5	58,1	58,1				
60,0	76,2	74,3	72,5	75,0	74,2	75,3	75,0	73,0	78,3	76,2				
70,0	94,0	91,4	86,1	93,7	94,0	98,3	94,0	90,1	96,0	92,4				
80,0	98,0	96,0	94,1	98,2	99,1	97,2	98,0	100,1	100,2	99,1				
90,0	106,1	103,7	101,1	108,4	104,9	103,1	103,2	102,0	104,3	103,2				
100,0	115,0	113,0	118,0	121,2	114,1	112,1	114,0	115,0	112,0	115,6				
110,0	134,0	127,0	133,0	135,2	131,2	126,1	131,0	130,0	126,9	125,6				
120,0	155,0	152,0	153,2	157,2	149,2	148,0	154,0	150,0	148,2	154,1				
130,0	173,0	169,2	175,1	180,2	173,2	168,1	173,0	170,0	169,1	169,1				
140,0	187,0	186,2	196,2	198,3	191,2	188,7	191,0	190,0	187,3	190,0				
150,0	198,0	196,0	206,1	206,2	201,3	197,1	201,0	200,0	197,1	197,2				
160,0	223,0	218,0	224,2	225,1	223,2	217,1	218,0	220,0	215,2	216,2				

Время нагрева	Значение температуры, °С											
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Номер термопары в образце № 2							
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,9	20,9	21,0	21,1	20,1	21,0	21,1	21,2	21,2	21,5		
3,0	20,9	20,9	21,0	21,2	20,1	21,3	21,3	21,2	21,5	21,5		
10,0	21,2	21,1	21,2	21,4	21,1	21,3	21,4	21,6	21,6	21,5		
20,0	21,4	21,3	21,5	21,6	21,6	21,5	21,7	21,9	21,9	21,7		
30,0	22,4	23,1	23,5	23,6	22,5	23,5	23,3	22,9	22,9	22,7		
40,0	23,5	25,1	24,5	24,6	23,3	24,1	24,1	23,1	24,1	23,2		
50,0	24,3	26,1	25,5	25,0	24,3	24,8	24,9	24,8	24,6	25,2		
60,0	27,3	28,6	28,1	27,9	28,6	27,1	28,1	28,4	28,1	27,9		
70,0	29,5	31,5	30,1	30,5	30,3	29,3	30,1	29,8	30,1	28,9		
80,0	32,5	35,0	34,1	34,5	33,8	33,4	34,2	33,7	34,5	33,9		
90,0	39,2	38,5	37,1	37,3	37,5	37,1	38,0	38,1	38,7	38,0		
100,0	41,4	40,1	39,2	38,9	39,2	38,7	39,5	40,5	41,2	40,9		
110,0	46,3	44,6	43,2	44,3	45,9	45,8	46,3	45,3	44,0	44,1		
120,0	52,7	51,7	51,1	51,3	53,9	52,7	52,7	51,5	51,3	51,2		
130,0	55,3	55,5	54,8	55,3	56,2	55,7	55,3	54,2	54,1	53,8		
140,0	65,2	65,1	64,3	65,1	65,3	63,3	63,1	63,2	62,7	62,8		
150,0	69,3	69,4	67,2	69,1	68,0	67,3	67,1	67,2	68,3	67,4		
160,0	76,2	75,5	74,3	76,5	76,1	74,6	74,3	74,1	74,2	74,3		

Таблица Б.15 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₃ образцов на основе ФТБ

Таблица Б.16 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке X₄ образцов на основе ФТБ

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Nº 1	Номер термопары в образце № 2						
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,9	21,0	21,0	21,1	20,1	21,0	21,1	21,2	21,2	21,4		
3,0	21,0	21,0	21,1	21,1	20,1	21,0	21,1	21,2	21,2	21,5		
10,0	21,0	21,0	21,1	21,1	20,2	21,1	21,2	21,3	21,4	21,6		
20,0	21,0	21,0	21,2	21,2	20,5	21,3	21,4	21,6	21,6	21,6		
30,0	21,1	21,0	21,2	21,2	20,6	21,3	21,4	21,6	21,6	21,6		
40,0	21,5	21,6	21,2	21,4	20,8	21,4	21,4	21,6	21,6	21,6		
50,0	21,7	21,8	21,5	21,6	21,2	21,6	21,8	21,8	22,0	22,0		
60,0	21,9	22,0	22,0	22,2	21,8	22,0	22,0	21,8	22,1	22,2		
70,0	22,0	22,0	22,1	22,2	22,5	22,0	22,4	21,8	22,4	22,6		
80,0	22,4	23,1	23,5	23,6	22,5	23,5	23,3	22,9	22,8	22,6		
90,0	23,5	25,2	25,0	24,6	24,0	24,1	23,8	23,1	23,5	23,2		
100,0	24,5	26,2	25,5	25,5	24,3	24,8	25,0	24,8	24,6	25,2		
110,0	25,8	27,0	27,0	26,0	25,0	25,4	25,5	24,8	26,3	27,3		
120,0	26,5	28,1	28,0	27,0	26,5	26,3	26,9	27,0	26,5	27,5		
130,0	29,0	31,0	30,0	30,0	31,0	29,3	30,1	31,5	30,1	28,0		
140,0	30,0	31,5	32,0	32,1	33,2	32,0	31,6	33,2	32,5	32,2		
150,0	38,0	36,0	36,2	37,5	37,5	35,0	35,2	35,0	35,0	34,6		
160,0	39,0	38,0	39,0	38,5	41,0	41,2	40,8	39,8	41,5	41,6		

Время нагрева		Значение температуры, °С									
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Номер термопары в образце № 2						
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
0,5	20,9	21,0	21,0	21,0	20,1	21,0	21,1	21,2	21,2	21,3	
3,0	21,0	21,0	21,1	21,1	20,1	21,0	21,1	21,2	21,2	21,4	
10,0	21,2	21,0	21,1	21,2	20,1	21,1	21,2	21,3	21,3	21,5	
20,0	21,2	21,0	21,1	21,1	20,2	21,1	21,2	21,4	21,4	21,5	
30,0	21,2	21,1	21,3	21,2	20,8	21,1	21,2	21,4	21,5	21,5	
40,0	21,2	21,3	21,3	21,4	21,2	21,2	21,2	21,4	21,5	21,5	
50,0	21,2	21,3	21,3	21,4	21,3	21,4	21,4	21,5	21,6	21,6	
60,0	21,3	21,5	21,5	21,5	21,6	21,5	21,5	21,8	22,0	22,0	
70,0	21,6	22,0	22,3	22,1	21,8	21,9	21,6	22,0	22,3	22,6	
80,0	23,0	22,6	22,3	23,0	22,5	23,2	23,0	22,0	23,1	23,5	
90,0	23,5	23,0	23,1	23,0	23,6	23,2	23,5	24,0	24,2	24,1	
100,0	24,0	23,5	23,6	23,1	24,0	24,0	24,5	23,9	24,6	24,9	
110,0	25,6	26,0	24,2	25,0	24,5	24,6	24,5	24,5	25,0	26,2	
120,0	25,9	26,3	25,0	25,5	26,0	26,0	25,5	27,0	26,5	26,5	
130,0	27,0	27,2	26,9	29,0	28,5	29,1	28,6	27,8	27,5	29,0	
140,0	29,8	30,5	28,9	32,0	32,6	31,9	31,0	29,6	32,0	32,5	
150,0	30,5	31,2	31,4	32,3	32,8	32,0	31,5	32,6	33,1	33,5	
160,0	33,9	35,0	35,4	35,4	34,8	34,9	34,2	36,0	36,1	34,5	

Таблица Б.17 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₅ образцов на основе ФТБ

Таблица Б.18 – Результаты экспериментального определения температуры в контрольной точке *X*₆ образцов на основе ФТБ

Время нагрева		Значение температуры, °С										
образца,	Ном	ер термо	опары в	образце	Номер термопары в образце № 2							
МИН.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0,5	20,9	21,0	21,0	20,0	20,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,2		
3,0	20,9	21,0	21,0	20,0	21,0	21,0	21,1	21,1	21,1	21,2		
10,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,1	21,1	21,1	21,2		
20,0	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,2		
30,0	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,2		
40,0	21,2	21,2	21,2	21,3	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,3		
50,0	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,4		
60,0	21,5	21,4	21,6	21,5	21,4	21,5	21,5	21,6	21,6	21,5		
70,0	22,0	22,1	21,6	21,5	22,3	22,0	21,7	22,0	22,0	21,9		
80,0	22,8	22,7	22,0	22,6	22,4	22,2	22,5	22,6	22,4	22,9		
90,0	23,0	22,8	22,5	23,2	23,3	23,0	23,4	22,7	22,9	23,4		
100,0	23,6	23,4	23,9	24,0	23,8	23,6	23,5	23,0	23,0	23,6		
110,0	23,8	24,1	24,2	24,3	24,5	24,0	23,8	23,6	24,0	24,2		
120,0	24,6	25,0	25,2	24,8	24,6	24,1	24,5	24,0	24,1	24,3		
130,0	25,0	25,5	26,3	26,6	27,0	26,8	25,5	25,4	25,2	27,1		
140,0	28,2	27,5	27,6	28,5	28,6	28,2	28,1	28,9	27,5	27,3		
150,0	28,5	28,6	29,1	29,5	29,5	29,2	29,0	29,0	28,4	29,3		
160,0	29,6	30,2	30,5	30,7	31,0	29,5	29,8	29,4	29,0	30,7		

Приложение В (обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Юрьева Яна Игоревича на тему: «Огнестойкость монолитных железобетонных ограждающих стен резервуарных парков» в проектную документацию на строительство ограждающей стены с волноотражающим козырьком для резервуарного парка мазутного хозяйства ТЭЦ-11 в г. Москве

Комиссия в составе: первого заместителя генерального директора – главного инженера С.В. Маныча (председатель), главного инженера комплексных проектов Е.А. Герасимовой, главного специалиста института канд. техн. наук А.С. Чирко, подтверждает, что при разработке проектных материалов на строительство ограждающей стены с волноотражающим козырьком для резервуарного парка мазутного хозяйства ТЭЦ-11 в г. Москве использовались результаты диссертационной работы Я.И. Юрьева, а именно:

 углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости при рарзушении резервуара, необходимый для определения огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков;

 – эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров бетонов в условиях воздействия углеводородного режима пожара;

 – экспериментальные данные по изменению призменной прочности бетонов в условиях воздействия углеводородного режима пожара;

 номограммы для определения температуры в слое конструкции монолитной железобетонной ограждающей стены при длительном одностороннем воздействии углеводородного режима пожара.

Председатель комиссии

Члены комиссии

С.В. Маныч

Е.А. ГерасимоваА.С. Чирко

«УТВЕРЖДАЮ» Генеральный директор ЗАО ПСФ «ГрантСтрой», The OFPH Заслуженный строитель РФ 3AO Г.Г. Аракелян 1111 НППС 02 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационных исследований Юрьева Яна Игоревича на тему: «Огнестойкость монолитных железобетонных ограждающих стен резервуарных парков» в проектную документацию

Комиссия в составе: главного инженера Г. П. Кохно (председатель), главного инженера комплексных проектов В. Г. Захарова, ведущего инженера В.А. Волнухина, подтверждает, что при разработке проектной капитального строительства объекты документации на с использованием торкрет и фиброторкрет бетона по технологии «ГрантСтрой», в частности, ограждающих стен резервуарных парков нефтепродуктов «Антипинском» НΠЗ, нефти на хранения И использовались результаты диссертационных исследований Юрьева Я.И. (зависимости для определения теплотехнических параметров тяжелого, торкрет и фиброторкрет бетона, а также данные по изменению их призменной прочности в условиях высокотемпературного воздействия режима пожара), необходимые ДЛЯ определения углеводородного фактического огнестойкости указанных строительных предела конструкций.

Председатель комиссии Члены комиссии

Г. П. Кохно

В.Г Захаров

В.А. Волнухин

УТВЕРЖДАЮ



внедрения результатов диссертационной работы преподавателя кафедры пожарной безопасности технологических процессов, майора вн. службы Юрьева Яна Игоревича на тему: «Огнестойкость монолитных железобетонных ограждающих стен резервуарных парков» в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе:

заведующего учебно-научным центром проблем пожарной безопасности в строительстве (УНЦ ППБС), д.т.н., профессора Серкова Бориса Борисовича;

- профессора кафедры пожарной безопасности в строительстве (ПБС) в составе УНЦ ППБС, д.т.н., профессора Есина Владимира Михайловича;

- профессора кафедры ПБС в составе УНЦ ППБС, к.т.н., доцента Казиева Махача Магомедовича

подтверждает, что результаты диссертационной работы Юрьева Яна Игоревича внедрены в учебный процесс по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре», а именно, использованы при разработке фондовой лекции на тему «Огнестойкость ограждений резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов», а также используются при чтении лекций и проведении практических занятий со слушателями бакалавриата, специалитета, магистратуры и адъюнктуры Академии ГПС МЧС России.

Заведующий УНЦ ППБС д.т.н., профессор

Профессор кафедры ПБС УНЦ ППБС, д.т.н., профессор

Профессор кафедры ПБС УНЦ ППБС, к.т.н., доцент

Б.Б. Серков В Есем В.М. Есин Шин М.М. Казиев