

На правах рукописи



Юрьев Ян Игоревич

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России на кафедре пожарной безопасности технологических процессов

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Швырков Сергей Александрович

Официальные оппоненты: Страхов Валерий Леонидович,
доктор технических наук, профессор,
АО «Центральный научно-исследовательский
институт специального машиностроения»,
начальник отдела расчетов
тепло- и огнезащиты

Гравит Марина Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»,
доцент кафедры строительства
уникальных зданий и сооружений

Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны» МЧС России

Защита состоится «09» октября 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<http://academygps.ru/upload/iblock/26c/26c3e9ff2001d882c1b300a03f163e3c.pdf>

Автореферат разослан «11» июля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С целью предупреждения каскадного и катастрофического развития аварий, обусловленных проливами нефти или нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных цилиндрических резервуаров (РВС), в соответствии с требованиями п. 5 ст. 70 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», 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». 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 под пределом огнестойкости строительной конструкции (СК) понимается промежуток времени от начала огневого испытания при стандартном температурном режиме пожара (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 стандартного метода испытаний, так как температурный режим пожара пролива нефти или нефтепродукта при авариях РВС имеет ряд существенных отличий от СТРП:

- 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, 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, 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.

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. 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.; *B. Bartneley, J. Kruppa, S. Thelandersson, T.Z. Harmathy, H.L. Malhotra, P.C. Tatnall, K. Kordina* и др.), вопросам определения фактического предела огнестойкости 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 РВС – *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 °С).

3. Получены экспериментальные данные по кубической и призмной 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 призмной 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 РВС, 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 призмной 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, посвященная 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, проанализирован объект и предмет исследования, показаны научная новизна работы и ее практическая значимость.

В первой главе «Обоснование углеводородного пожара для определения огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков» представлены анализ нормативных требований к огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, анализ температурных режимов пожаров, используемых в мировой практике для определения огнестойкости СК, особенности возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей при разрушениях РВС, температурно-временная зависимость для определения предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков.

Анализ нормативных требований к огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков показал, что такие преграды должны выполняться из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее $E 150$. В связи с чем, в работе поставлен 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 РВС имеет ряд существенных отличий от СТРП. Кроме этого отмечается, что все большее применение для обустройства, в том числе и противопожарных преград, находят ТБ и ФТБ, которые также могут применяться и для сооружений ограждающих стен РВС, однако вопросам огнестойкости СК выполненных на их основе в условиях воздействия высоких температур пожара до настоящего времени уделено недостаточно внимания.

Анализ температурных режимов пожаров отличных от СТРП и используемых в мировой практике для определения огнестойкости СК, применяемых, например, при строительстве объектов нефтехимического производства, туннелей, морских буровых платформ и других ответственных сооружений производственных объектов, показал, что они не могут быть применены для определения фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных

парков, так как не учитывают особенности пожара пролива нефти или нефтепродукта при разрушении РВС. То есть использование существующих режимов пожаров приведет либо к существенному завышению, либо к занижению фактических пределов огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, что, очевидно, является недопустимым.

С целью обоснования и введения температурно-временной кривой «реального» пожара пролива горючей жидкости при разрушении РВС в работе рассмотрены особенности его возникновения и развития, а также воздействия на ограждающие стены резервуарных парков. Следует отметить, что выявление особенностей углеводородного режима пожара произведено на основе анализа ранее выполненных научно-исследовательских работ по сбору и обработке статистических данных о разрушениях РВС с горючими жидкостями на объектах ТЭК, как в России, так и за рубежом, результатов экспериментальных исследований процесса образования и движения волны прорыва при разрушении РВС-700 м³ с водой и численного моделирования этого процесса при разрушении РВС номинальной вместимостью от 700 до 50000 м³, научных работ и специализированной справочной литературы, посвященных вопросам оценки температуры горения нефти и нефтепродуктов, а также опыта применения ограждающих стен в резервуарных парках производственных объектов. В результате выполненного анализа выявлены следующие особенности возникновения и развития пожаров проливов горючих жидкостей при разрушениях РВС:

- 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, по аналогии построения различных температурно-временных зависимостей, могут быть приняты следующие временные значения для получения 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).

На основе общего подхода к построению температурно-временных зависимостей для определения огнестойкости СК и с учетом выявленных особенностей пожаров при авариях РВС 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 существующими режимами пожаров представлены соответственно на рисунке 1 и в таблице 1.

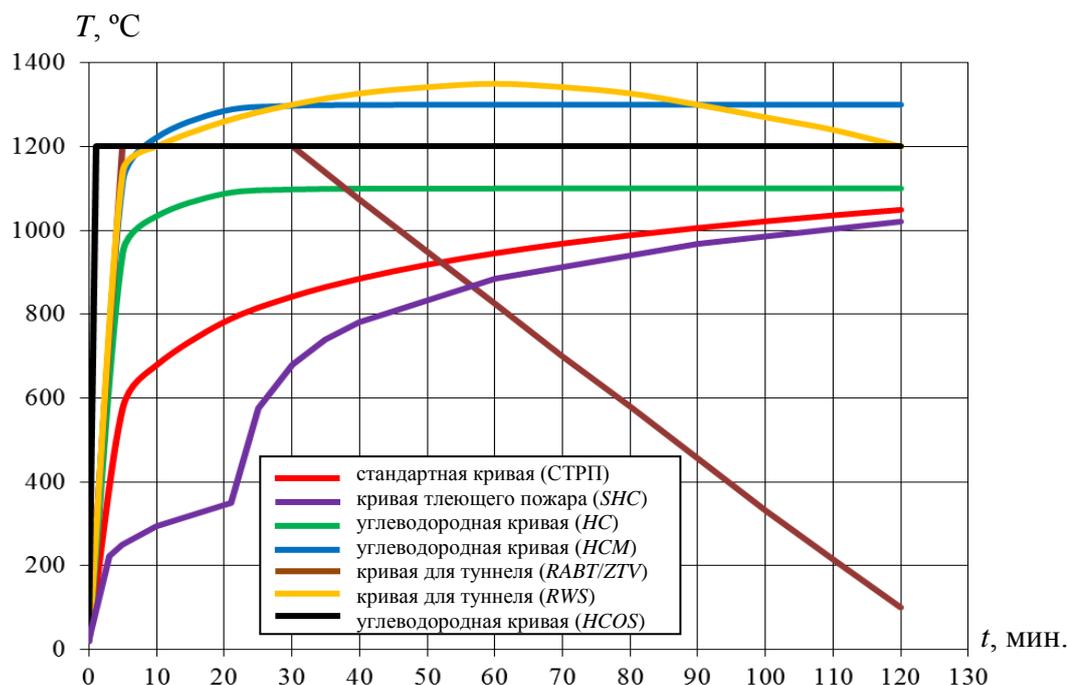


Рисунок 1 – Общий вид температурно-временных зависимостей

для проведения испытаний строительных конструкций на огнестойкость:

СТРП – по ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»; *SHC* по *EN 1363-2:1999 «Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures»* (Европа); *HC* – по *EN 1363-2:1999 «Fire resistance tests. Part 2. Alternative and additional procedures»* (Европа) и *UL 1709 «Rapid Rise Fire Test of Protection Materials for Structural Steel»* (США); *HCM* – по «*Inter-ministry circular № 2000-63*» (Франция); *RABT/ZTV* – по «Руководству по оснащению и эксплуатации дорожных туннелей» (*RABT*) и «Дополнительным техническим контрактным условиям» (*ZTV*) (Германия); *RWS* – по *TNO «Fire Research Centre»* (Нидерланды); *HCOS* – предлагаемый вид углеводородного режима пожара

Таблица 1 – Сравнительная характеристика температурных режимов пожаров для проведения испытаний строительных конструкций на огнестойкость

Параметр	Режим пожара						
	СТРП	<i>SHC</i>	<i>HC</i>	<i>HCM</i>	<i>RABT/ZTV</i>	<i>RWS</i>	<i>HCOS</i>
Модель пожара (имитация горения)	В помещении						На открытом пространстве
Вид температуры пожара	Среднеобъемная						Средне-поверхностная
Место замера температуры	0,1 м от поверхности конструкции						
Максимальная температура пожара, °C	968 ¹ 1214 ²	885 ¹ 1205 ²	1180	1300	1200	1350	1200
Минимальная продолжительность испытаний, мин.	360 ³	360 ³	180	180	140–170	180	150

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

Во второй главе «Экспериментальное определение теплотехнических и прочностных характеристик образцов бетонов в условиях углеводородного режима пожара» представлены результаты лабораторных исследований по определению теплотехнических и прочностных характеристик образцов различных видов бетонов, необходимые для оценки фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков расчетно-аналитическим методом.

Целью теплотехнической части расчета является определение температуры в сечении ограждающей стены, конструктивно выполненной из Б, ТБ или ФТБ в условиях одностороннего огневого воздействия *НСОС*. Однако для решения этой 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).

Известно, что значение коэффициента теплопроводности материала в зависимости от температуры (T) может быть определено по формуле:

$$\lambda(T) = a(T)c_p(T)\rho(T). \quad (1)$$

Однако, для возможности использования формулы (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 °С. На нахождение этих зависимостей и были направлены следующие экспериментальные исследования.

Предварительно были изготовлены заготовки кубической формы со стороны грани 0,15 м, отлитые из бетонов соответственно по классической технологии, методом торкретирования и торкретирования с добавлением стальной фибры диаметром 0,4 мм и длиной 20 мм. При подготовке бетонной смеси для всех заготовок применялся цемент марки М400 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±0,1 мм и высотой 3,0±0,1 мм. Начальная плотность образцов при температуре 20 °С 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 такой формы и размеров 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. Так, для исследования калориметрических эффектов и изменения массы в образцах использовался синхронный термоаналитический комплекс *STA 449 C Jupiter*, сочетающий методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) в одном измерении.

По результатам этих исследований сделан вывод о том, что процесс удаления адсорбционной воды наблюдается в интервале температур от 40 до 300 °С, а воды конституционной – от 400 до 500 °С независимо от вида бетона.

Измерения параметра температуропроводности образцов бетонов проводились методом лазерной вспышки с использованием универсального прибора высокой точности *LFA 457 MicroFlash*, обеспечивающего в диапазоне температур от минус 125 до 1100 °С измерение температуропроводности материалов от 0,01 до 1000 мм²/с с погрешностью не более 5 %.

На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных исследований по изменению плотности, удельной теплоемкости и температуропроводности в образцах бетонов при их нагреве от 20 до 1100 °С.

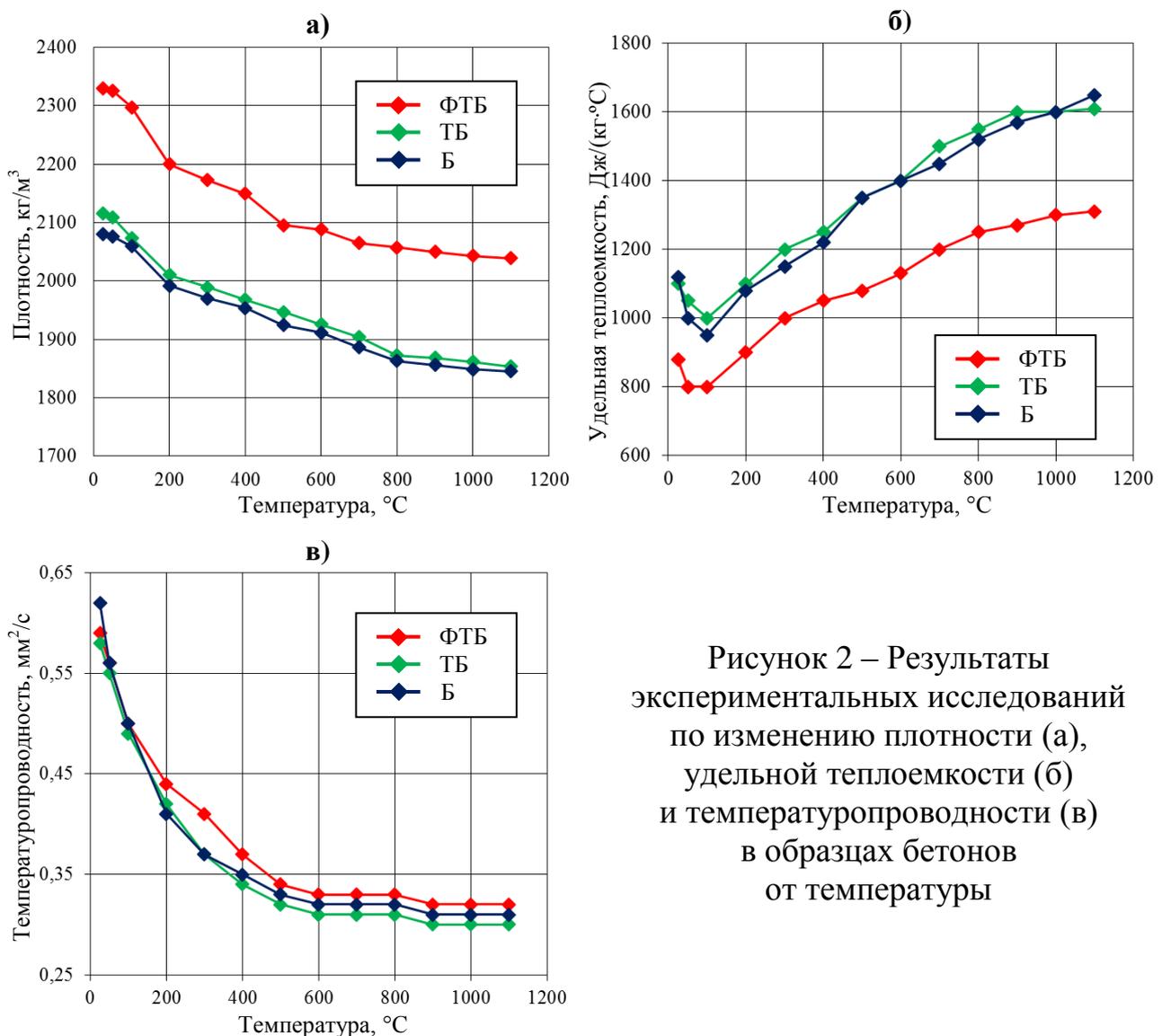


Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований по изменению плотности (а), удельной теплоемкости (б) и температуропроводности (в) в образцах бетонов от температуры

Далее по формуле (1) определяли значения коэффициентов теплопроводности образцов бетонов в исследуемом диапазоне температур.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались методом регрессионного анализа с использованием программы *STATGRAPHICS*, в результате чего были найдены искомые эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров рассматриваемых видов бетонов, общий вид которых представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в температурном диапазоне от 20 до 1100 °С

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	$a = 1/(0,11 + 0,44 \ln(T - 273))$; $c_p = 339,727 + 26,9526\sqrt{T}$; $\rho = 2345,8 - 0,65(T - 273) + 0,00035(T - 273)^2$; $\lambda = \sqrt{0,66 + 20,3/(T - 273)}$

Целью решения статической задачи является определение несущей способности нагреваемой конструкции в условиях одностороннего огневого воздействия *HCOS*. Для решения поставленной задачи были проведены две серии экспериментов. Первая серия экспериментов выполнялась при температуре окружающей среды 20 °С для нахождения начальной прочности в образцах из исследуемых видов бетонов, имеющих как кубическую (150×150×150 мм), так и призмную (150×150×600 мм) форму, а также для нахождения между этими формами образцов переводных коэффициентов. Всего было изготовлено и испытано 18 образцов (по 3 образца на каждый вид бетона для кубической и призмной форм, соответственно). Эксперименты по определению прочности образцов бетонов производились в лаборатории ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко с использованием гидравлического пресса модели ИП 6013-2000-1 с электрическим силоизмерением, предназначенного для статических испытаний на сжатие и проверки стандартных образцов бетонов по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

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

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 °С соответственно. Затем образцы остывали до температуры окружающей среды внутри печи в течение суток. 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 призматической формы использовался переводной коэффициент, найденный при ранее выполненных экспериментах.

Следует отметить, что 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 результатами ранее выполненных исследований, в частности, Н.И. Зенковым, Н.А. Ильиным, А.Ф. Миловановым, В.В. Соломоновым, З.М. Ларионовым и др. Так, например, на рисунке 3 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), полученные в результате исследований А.Ф. Милованова, В.В. Соломонова и З.М. Ларионова.

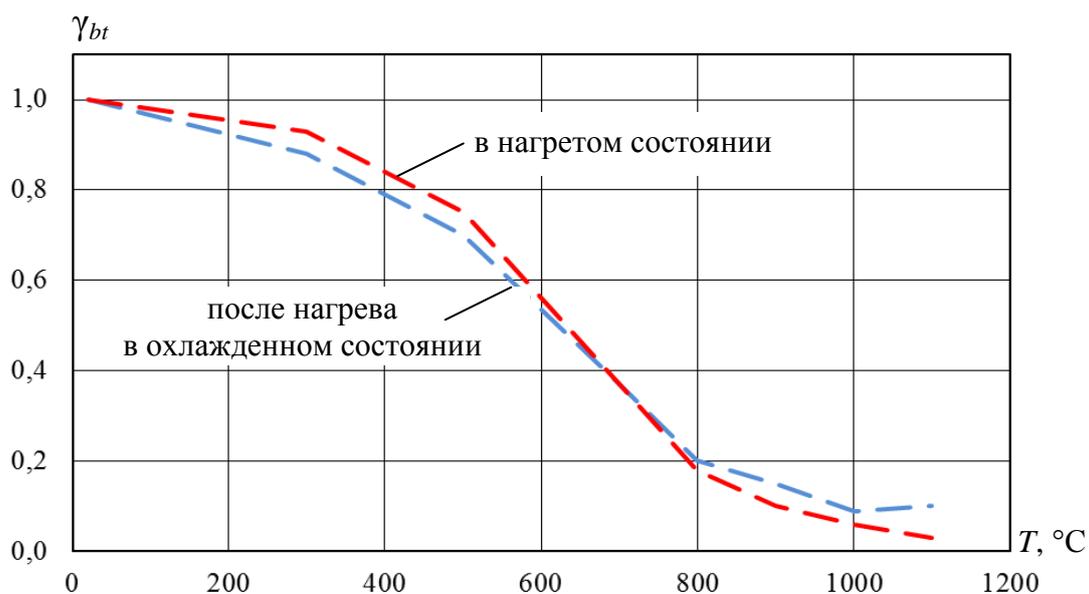


Рисунок 3 – Влияние высоких температур на изменение прочности при сжатии тяжелого бетона на гранитном заполнителе

Из представленных на рисунке 3 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 °С).

На рисунке 4 представлены результаты выполненных в настоящей работе исследований по изменению призмочной прочности ($R_{пр}$) образцов из рассматриваемых видов бетонов при их нагреве в диапазоне от 20 до 1100 °С.

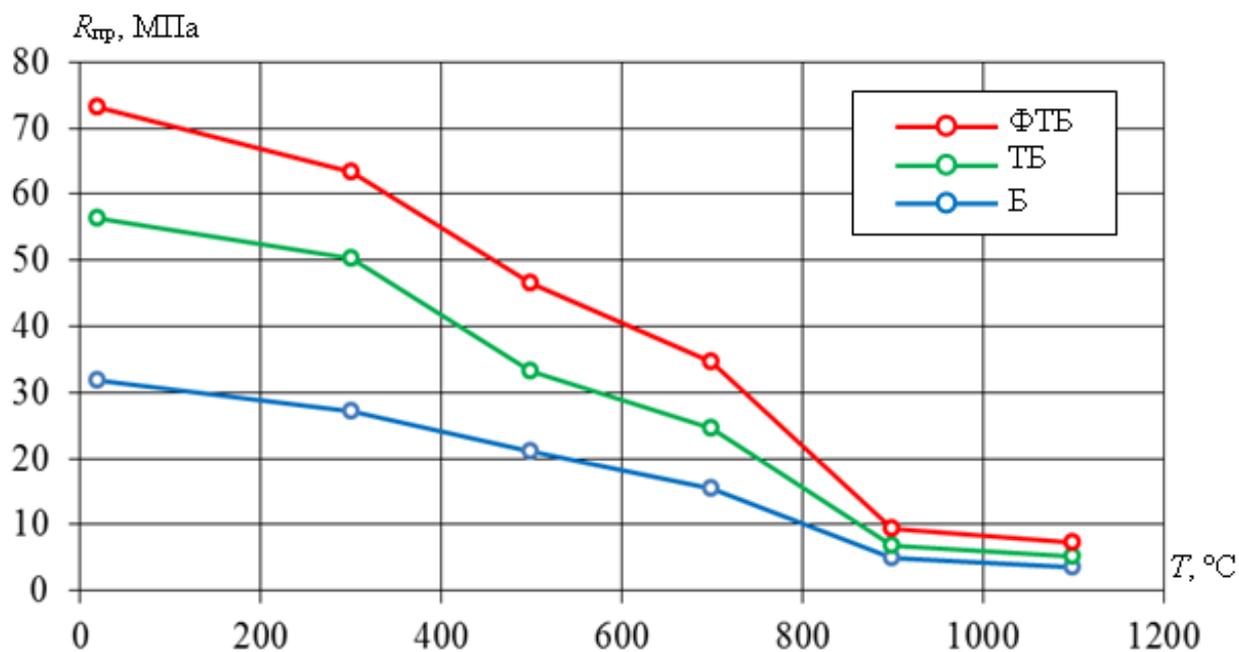


Рисунок 4 – Графическое отображение экспериментальных данных по изменению призмочной прочности в образцах бетонов от температуры

Анализ полученных данных показал, что образцы из ФТБ обладают 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 °С, 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 РВС, особенно, при необходимости обустройства ограждающих стен с волноотражающим козырьком, расчет которых должен производиться на гидродинамические нагрузки от волны прорыва.

В третьей главе «Численное моделирование и экспериментальное определение прогрева образцов бетонов в условиях углеводородного режима пожара» представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования процесса прогрева крупномасштабных образцов исследуемых видов бетонов, а также оценка погрешностей измерений температуры в контрольных точках образцах 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, было выполнено численное моделирование процесса прогрева аналогичных образцов в условиях углеводородного режима пожара, но имеющих крупногабаритные размеры. Важно 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. 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 передать 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*. Предварительно, используя средства сеточного построителя *ANSYS ICEM CFD*, была построена геометрическая модель исследуемых образцов, имеющая разбивку 10×10×20 ячеек (рисунок 5).

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

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (2)$$

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

Для решения этого уравнения необходимо определить граничные и начальные условия. В данном случае это тепловая изоляция вдоль боковых граней блока (рисунок 6), а для горячей и холодной граней фиксировался коэффициент теплоотдачи (h_c) и температура внешнего воздуха (T_{nw}):

$$q_w = h_c(T_w - T_{nw}), \quad (3)$$

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

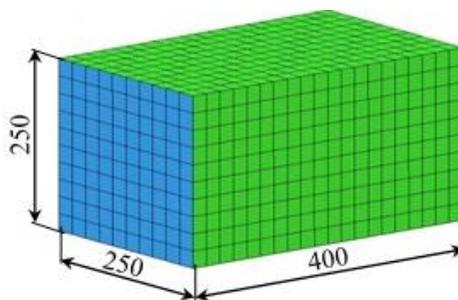


Рисунок 5 – Геометрические размеры и сеточная модель образца

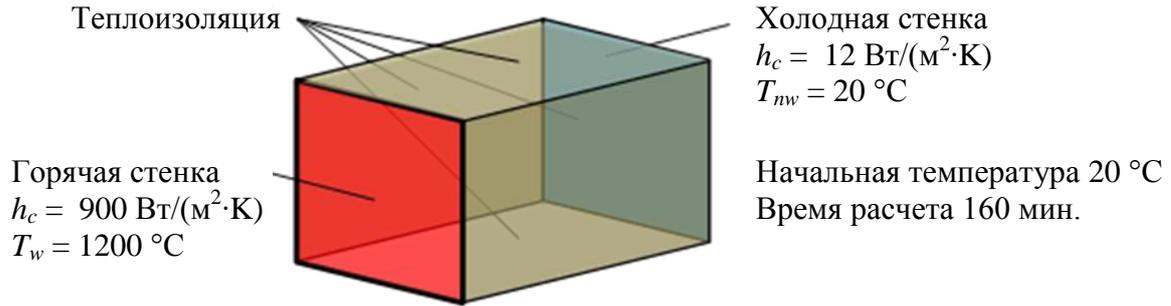


Рисунок 6 – Краевые условия задачи

В рамках рассматриваемой модели теплофизические свойства бетонов принимались зависящими от температуры по таблице 2. Значения параметров теплопроводности и плотности рассматриваемых видов бетонов входили явным образом в уравнения распространения тепла, а параметры теплоемкости неявно учитывались в значении энтальпии. 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. 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 точек) на соответствующих расстояниях от горячей к холодной стенке: $X_1 = 0,035 \text{ м}$; $X_2 = 0,120 \text{ м}$; $X_3 = 0,200 \text{ м}$; $X_4 = 0,280 \text{ м}$; $X_5 = 0,360 \text{ м}$; $X_6 = 0,400 \text{ м}$ (холодная стенка). Полученные временные развертки с отражением X -координат датчиков в названии контрольных точек приведены на рисунке 7.

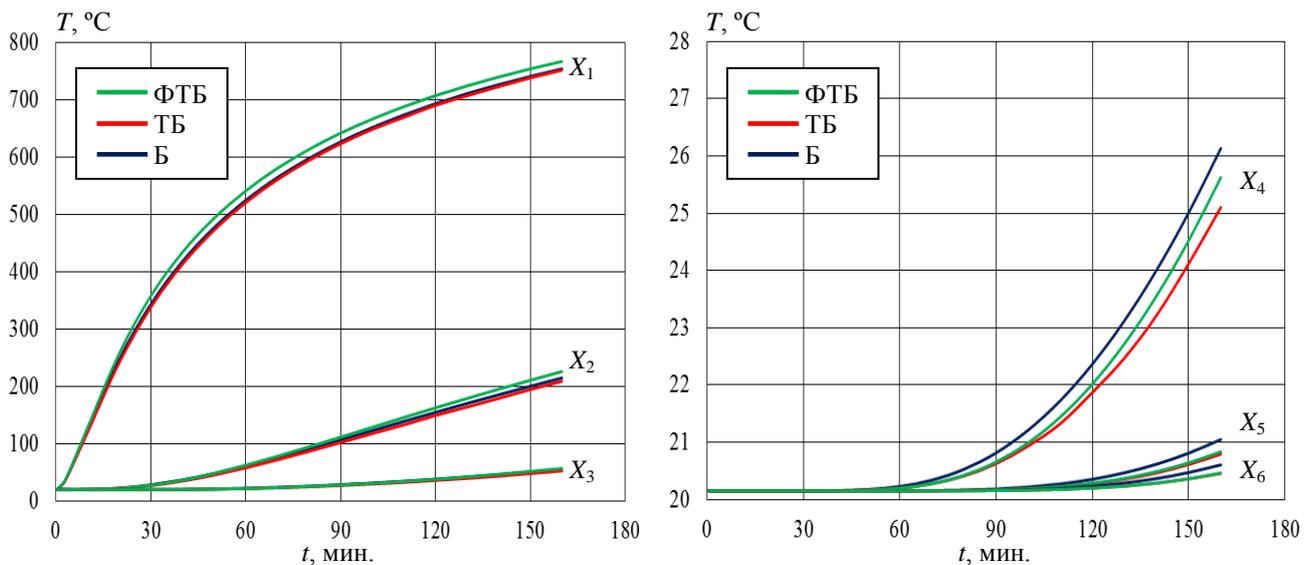


Рисунок 7 – Временные развертки показаний датчиков температуры в контрольных точках соответствующих образцов бетонов при проведении численного моделирования

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

С целью проведения сравнительного анализа с результатами численного моделирования изучаемого процесса были выполнены экспериментальные исследования на образцах бетонов с теми же геометрическими размерами. Для испытаний были изготовлены по два одинаковых образца из каждого вида рассматриваемого бетона, в которые на стадии заливки внедрялись по 25 термопар, а также непосредственно перед проведением испытаний на необогреваемой поверхности образцов дополнительно закреплялись по 5 термопар (рисунок 8).

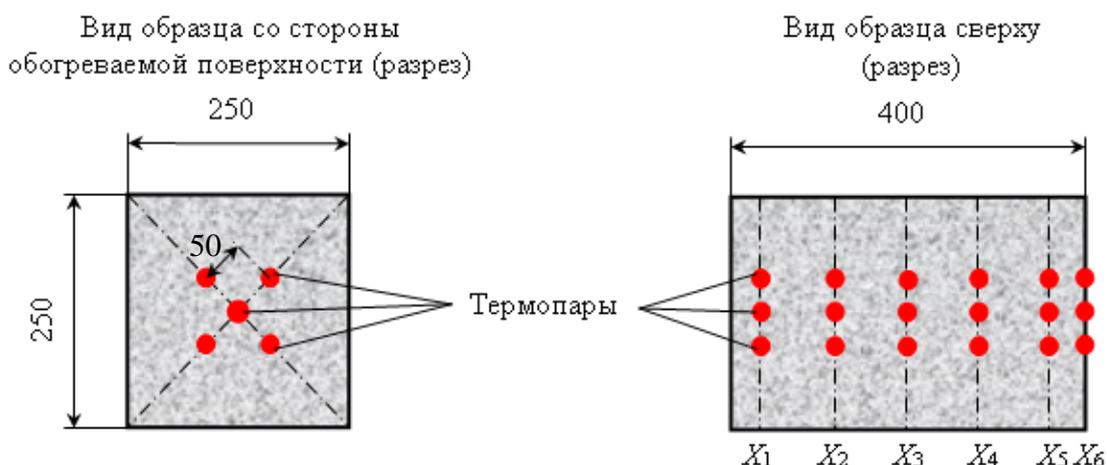


Рисунок 8 – Принципиальная схема расстановки термопар в образцах

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 низкой теплопроводностью, широко применяются в теплоогнезащите конструкций и являются практически идеальными теплоизоляторами.

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. Заданная температура в камере нагрева создавалась и поддерживалась с помощью дизельной горелки модели *ECO-20 Lamborghini* максимальной мощностью 249 кВт при среднем расходе топлива 15 л/ч. Температура пламени внутри камеры измерялась печной термомпарой на расстоянии 0,1 м от обогреваемой поверхности образца и составляла 1200 ± 50 °С. Непрерывный мониторинг за изменением температуры в контрольных точках исследуемых образцов бетонов при их нагреве производился с использованием универсальной многоканальной системы «Терем».

В процессе испытаний визуально регистрировалась возможность появления в образцах трещин, отверстий, отслоений. На рисунке 9 приведена принципиальная схема размещения приборного оборудования и регистрирующей аппаратуры, используемых при проведении испытаний.

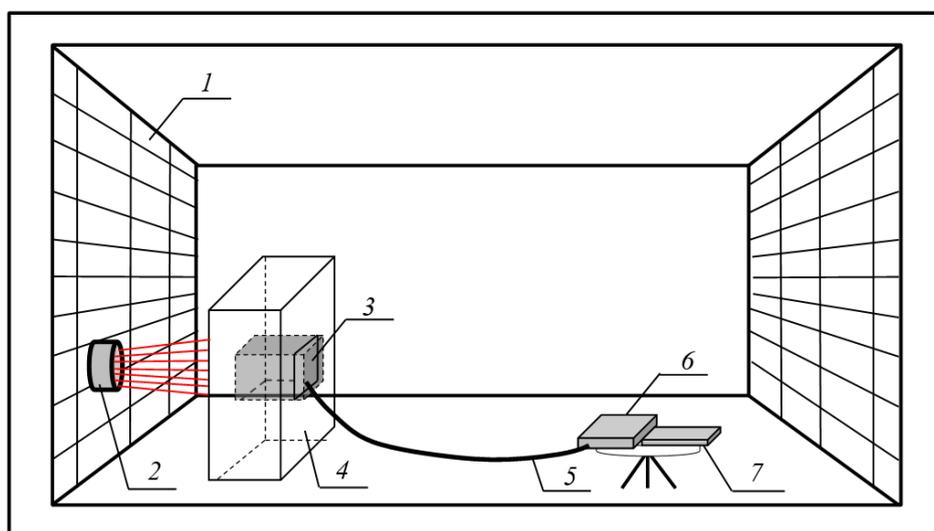


Рисунок 9 – Принципиальная схема размещения оборудования и аппаратуры при проведении испытаний по прогреву образцов бетонов:

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

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. На рисунке 10 представлен общий вид образцов на основе исследуемых видов бетонов после проведения огневых испытаний при *HCOS*.

В результате выполненных экспериментов установлено, что в образцах из Б на 3–5 минуте их прогрева наблюдалось интенсивное откалывание фрагментов. Данный факт подтверждает возможность взрывного отталкивания бетонов с высокой влажностью при резком высокотемпературном воздействии. У образцов из ФТБ обогреваемая сторона оплавилась и стала похожей на вспененную субстанцию.



Рисунок 10 – Общий вид образцов на основе Б (а), ТБ (б) и ФТБ (в) после огневых испытаний при *HCOS*

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 при испытаниях откалывание фрагментов, как и образование оплавленного слоя, не наблюдалось. На рисунке 11 в качестве примера представлены результаты испытаний по прогреву образцов из Б, а также аналогичные данные, полученные при численном моделировании.

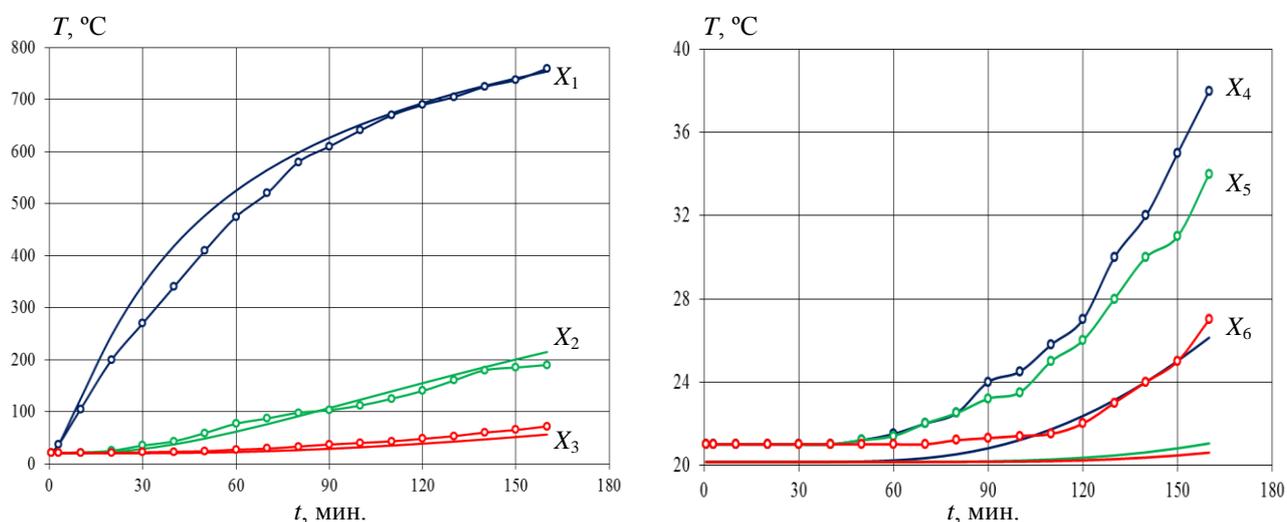


Рисунок 11 – Временные развертки средних показаний датчиков температуры в контрольных точках образцах из Б при численном моделировании (сплошная линия) и при проведении испытаний

В результате выполненной оценки погрешностей измерений температуры в контрольных точках образцов бетонов получено, что максимальное расхождение данных при проведении серий экспериментов, от данных полученных в результате численного моделирования изучаемого процесса, не превышало 20,5 %.

Таким образом, на основе удовлетворительной сходимости результатов численных и экспериментальных исследований прогрева образцов на основе Б, ТБ и ФТБ в условиях углеводородного режима пожара показано, что полученные ранее эмпирические зависимости для определения теплофизических свойств этих видов бетонов (см. таблицу 2) могут использоваться для выполнения расчетов по оценке пределов огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков, проектируемых на основе рассматриваемых видов бетонов.

В четвертой главе представлены «Рекомендации по определению тепло-технических и прочностных характеристик тяжелого, торкрет и фиброторкрет бетона для оценки огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков», включающие в себя:

- углеводородный режим пожара пролива горючей жидкости при разрушении РВС – *hydrocarbon curve oil spill (HCOS)*;
- эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*;
- экспериментальные зависимости изменения призмочной прочности Б, ТБ и ФТБ в условиях воздействия *HCOS*;
- номограммы для определения температуры прогрева Б, ТБ и ФТБ в ограждениях РВС при одностороннем воздействии *HCOS* до 600 мин.
- пример определения фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком.

На рисунке 12 в качестве примера представлен общий вид разработанных номограмм для определения температуры прогрева Б в ограждающих стенах РВС толщиной 400 мм при одностороннем воздействии *HCOS*.

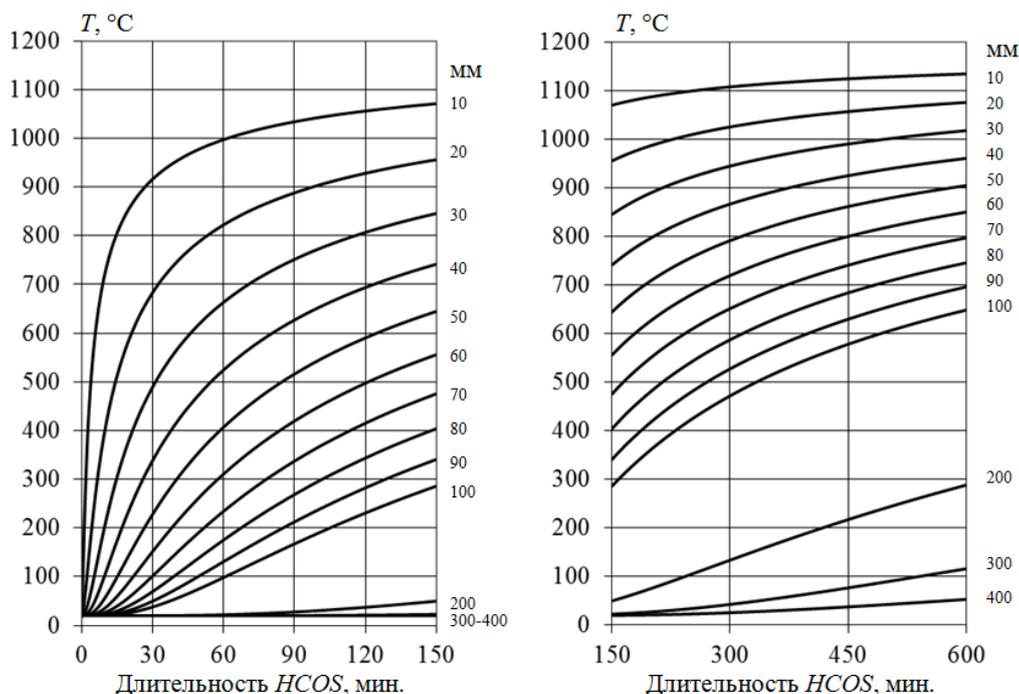


Рисунок 12 – Температура прогрева Б в ограждающих стенах РВС толщиной 400 мм при одностороннем огневом воздействии (10–400 – глубина прогрева бетона от нагреваемой поверхности, мм)

Предел огнестойкости по потере несущей способности устанавливается по точке пересечения горизонтальной прямой на уровне критической температуры (500 °С) с кривой прогрева слоя бетона толщиной a , от обогреваемой поверхности до оси растянутой арматуры (см. рисунок 12).

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы. В приложениях представлены результаты обработки экспериментальных данных по изменению плотности, температуропроводности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности образцов различных видов бетонов от температуры, экспериментального исследования прогрева образцов различных видов бетонов в условиях углеводородного режима пожара, а также акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа применяемых в мировой практике температурно-временных зависимостей для проведения испытаний СК на огнестойкость, результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров волны прорыва, образующейся при полном разрушении РВС, 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 °С) 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 бетонов, 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 бетонов, 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 бетонов 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 вспененную 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.

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Сучков, В.П. Огнестойкость технологических систем [Текст] / В.П. Сучков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – № 4. – С. 38–40.

2. Швырков, С.А. Температурный режим пожара для определения предела огнестойкости ограждающих стен нефтяных резервуаров [Электронный ресурс] / С.А. Швырков, Я.И. Юрьев // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4. – 7 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf>.

3. Швырков, С.А. Теплотехнические свойства бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара [Текст] / С.А. Швырков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25. – № 12. – С. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5–12.

4. Швырков, С.А. Результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик различных типов бетона в условиях углеводородного пожара [Электронный ресурс] / С.А. Швырков, Я.И. Юрьев, Д.Н. Приступок // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 1. – 6 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/16-01-17.ttb.pdf>.

5. Швырков, С.А. Результаты исследований прогрева образцов бетона в условиях углеводородного режима пожара [Электронный ресурс] / С.А. Швырков, Я.И. Юрьев // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 1. – 10 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/02-01-17.ttb.pdf>.

Остальные публикации по теме диссертации:

6. Швырков, С.А. Современные технологии предупреждения ЧС при авариях нефтяных резервуаров [Текст] / С.А. Швырков, Н.А. Литаш, Я.И. Юрьев // Материалы VI Международной научн.-практ. конф.: Пожарная и аварийная безопасность. – Иваново: ИВИ ГПС МЧС России, 2011. – Ч. 1. – С. 228–230.

7. Швырков, С.А. Применение сталефибробетона в конструкциях ограждений резервуаров на слабых грунтах [Текст] / С.А. Швырков, Я.И. Юрьев, Н.А. Литаш // Материалы VI Международной научн.-практ. конф.: Пожарная и аварийная безопасность. – Иваново: ИВИ ГПС МЧС России, 2011. – Ч. 1. – С. 371–373.

8. Швырков, С.А. Проблема устойчивости ограждений резервуаров к воздействию пожара разлива нефтепродуктов [Текст] / С.А. Швырков, Я.И. Юрьев // Материалы научн.-практ. конф.: Совершенствование противопожарной защиты производственных объектов с повышенной пожарной опасностью. – Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России, 2012. – С. 170–172.

9. Юрьев, Я.И. Актуальные вопросы обеспечения устойчивости ограждений резервуаров к воздействию пламени пожара разлива нефтепродуктов [Текст] / Я.И. Юрьев, Н.А. Литаш // Материалы научн.-практ. конф. молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2012. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – С. 111–113.

10. Юрьев, Я.И. Обоснование температурного режима пожара для оценки огнестойкости ограждений резервуаров [Текст] / Я.И. Юрьев // Материалы 25-й Международной научн.-технич. конф.: Системы безопасности – 2016. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 210–214.

11. Юрьев, Я.И. Экспериментальное исследование теплофизических свойств бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного режима пожара [Текст] / Я.И. Юрьев, С.А. Швырков, В.И. Юрьев // Материалы 25-й Международной научн.-технич. конф.: Системы безопасности – 2016. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 207–210.

12. Юрьев, Я.И. Исследование прочностных характеристик образцов тяжелого бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара [Текст] / Я.И. Юрьев // Материалы IV Всероссийской научн.-практ. конф.: Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. – Иваново: ИВИ ГПС МЧС России, 2017. – С. 285–290.

Подписано в печать 28.06.2018. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 126.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4