

0-789581

На правах рукописи



ТУЧКОВА ОКСАНА АНАТОЛЬЕВНА

ГРАДИЕНТНО - ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КРИТЕРИЙ ОГНЕСТОЙКОСТИ
БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЖАРАХ В ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(в химической отрасли промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Теляков Эдуард Шархиевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Абдуллин Ильнур Абдуллович;
кандидат технических наук, доцент
Никитин Георгий Петрович

Ведущая организация – ОАО «Нижнекамскнефтехим»,
г. Нижнекамск

Защита состоится «12» октября 2011 г. в 14 час. на заседании совета Д 212.080.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, КНИТУ, корпус А, ауд. 330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета.

Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского национального исследовательского технологического университета (www.kstu.ru).

Автореферат разослан «01» сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687185

А.С. Сироткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ***Актуальность работы.**

В строительных конструкциях на нефтехимических предприятиях применяются самые разнообразные материалы: дерево, полимерные покрытия, металлы, бетон. Огнестойкость горючих материалов оценивается по критериям воспламенения и загорания. Огнестойкость негорючих материалов нормируется по пределу огнестойкости, который равен времени от начала воздействия пожара до наступления одного из предельных состояний конструкции.

В соответствии с СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» (далее СТО) пределы огнестойкости устанавливаются в условиях стандартных огневых испытаний. При этом в огневых печах реализуются условия воздействия «стандартного» пожара на элементы строительных конструкций. По международному стандарту ISO-834 стандартный пожар аппроксимируется формулой подъема температуры окружающей среды до 1200 °С при плотности теплового потока до 25 кВт/м² в течение нескольких часов.

Однако в реальных пожарах, возникающих в аварийных ситуациях на нефтехимических предприятиях, интенсивность тепловых потоков в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047-98 достигает величин 100 ÷ 450 кВт/м², а время горения составляет 20 ÷ 150 с. Для таких характеристик пожара в нормативных документах по огневым испытаниям методы оценки огнестойкости отсутствуют. В связи с длительностью, сложностью и высокой стоимостью огневых испытаний согласно Федеральному закону № 123-ФЗ от 22.07.2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее Регламент) допускается для типовых элементов, прошедших огневые испытания, проводить оценку огнестойкости и расчетными методами. В расчетных методах, регламентируемых СТО, а также в научно-технической литературе в качестве термодинамического критерия достижения предельного состояния рекомендуется использовать критерий критической температуры. Градиент температуры по сечению образца материала при стандартном пожаре в расчетах не учитывается.

Однако известны методы оценки термонапряженного состояния элементов конструкций, учитывающих градиент температуры при высокоинтенсивном нагреве. Так, в теории динамической термоупругости (Карташов Э.М. Динамическая термоупругость и проблемы термического удара, М.: ВИНТИ, 1991) приводятся данные, что в упругих телах при распространении ударной волны градиент температуры и возникающие напряжения могут достигать предельных значений и приводить к разрушению материала

Одним из вероятных механизмов разрушения элементов железобетонных (далее ж/б) конструкций при высокоскоростном нагреве является градиент давления пара при его испарении и молярном переносе в капиллярнопористых телах, впервые теоретически и экспериментально обоснованный Лыковым (Лыков А.В. Теплообмен. М.: Энергия, 1972).

*В руководстве работой принимал участие канд. тех. наук, доцент Еналеев Р.Ш.

В исследованиях Жукова (Жуков В.В. Взрывообразное разрушение бетона // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1976) экспериментально установлено, что взрывообразное разрушение ж/б конструкций может происходить под воздействием капиллярного давления пара.

В последних монографиях по огнестойкости (например, Федоров А.С. и др. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М.: 2009) предлагаются новые принципы проектирования конструкций с требуемой огнестойкостью в условиях «реального» пожара.

Практическая невозможность крупномасштабного моделирования высокоинтенсивных тепловых потоков в лабораторных условиях мотивирует разработку расчетных методов оценки огнестойкости элементов строительных конструкций. В настоящее время теория разрушения бетона, учитывающая весь комплекс факторов теплового воздействия и механизмы высокотемпературных процессов разрушения, далека от своего завершения.

В связи с изложенным, совершенствование существующих расчетных методов, разработка более адекватных реальным ситуациям моделей и критериев разрушения имеют важное теоретическое и прикладное значение для оценки предельных состояний бетона при высокоинтенсивном нагреве.

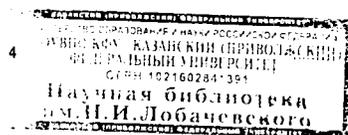
Актуальность и перспективность данного направления исследований усиливаются в связи с интенсивным строительством многочисленных продуктопроводов и крупнотоннажных танкеров для транспортировки сжатого и сжиженного природного газа, а также нефти в страны Ближнего и Дальнего зарубежья.

Целью работы является научное обоснование градиентно-температурного критерия для расчета огнестойкости элементов ж/б конструкций от воздействия высокоинтенсивных конвективно-радиационных потоков при крупномасштабном горении углеводородов в различных сценариях эволюции пожара на нефтехимических предприятиях: огненного шара, пожара разлития, факельного горения, пожара-вспышки.

В задачи исследования входило:

1. Анализ критериев разрушения бетона в широком диапазоне изменения плотности теплового потока.
2. Построение вычислительной модели процесса теплообмена в элементах бетонных конструкций при высокоинтенсивном нагреве.
3. Обоснование градиентно-температурного критерия разрушения бетона под воздействием нагрева от продуктов горения углеводородных топлив.
4. Экспериментальная проверка адекватности градиентно-температурного критерия разрушения бетона при локальном высокотемпературном нагреве;
5. Исследование влияния влажности бетона на оценку его огнестойкости по теплоизолирующей способности.
6. Разработка расчетного метода оценки огнестойкости элементов ж/б конструкций при пожарах разлития, огненных шарах, факельном горении на основании данных стандартных огневых испытаний.

Научная новизна проведенных исследований может быть сформулирована в виде следующих обобщенных положений:



1. Обоснован новый градиентно-температурный критерий потери несущей способности ж/б конструкций при различных сценариях развития пожара на химических и нефтехимических предприятиях.
2. С использованием специальной модели теплопередачи с объемным источником испарения влаги усовершенствован метод оценки огнестойкости по теплоизолирующей способности.
3. Предложен метод прогнозирования огнестойкости для различных сценариев протекания пожаров на химических и нефтехимических предприятиях по результатам огневых испытаний по сценарию «стандартного» пожара.

Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных по объемному испарению влаги в капиллярно-пористых телах и молярному переносу пара под действием общего градиента давления, взрывному разрушению бетона и оценки огнестойкости конструкций в условиях «реального» пожара, в сравнительном анализе критериев огнестойкости по несущей и теплоизолирующей способности, математической формулировке краевых условий уравнения Фурье в условиях горения углеводородов, проведении и обработке вычислительных экспериментов, обосновании вычислительного алгоритма оценки огнестойкости элементов ж/б конструкций при пожарах разлива, огненных шарах, факельном горении.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- Вычислительная модель для расчета температурного поля в элементе ж/б конструкции, учитывающая зависимость теплофизических свойств материала от температуры и наличие объемного источника испарения влаги при воздействии тепловых потоков от пламени пожаров при крупномасштабном горении углеводородов.
- Градиентно-температурный критерий потери несущей способности ж/б конструкций при высокоинтенсивном нагреве.
- Расчетный метод оценки огнестойкости элементов конструкций при пожарах разлива, огненных шарах, факельном горении по данным огневых испытаний в условиях «стандартного» пожара.

Практическая значимость полученных результатов заключается в:

- Совершенствовании существующих методов оценки предела огнестойкости по несущей способности от воздействия «стандартного» пожара с использованием градиентно-температурного критерия для прогнозирования огнестойкости элементов строительных конструкций при воздействии реальных пожаров на химических и нефтехимических предприятиях (пожарах разлива, огненных шарах, факельном горении).
- Совершенствовании существующих стандартных методов оценки предела огнестойкости по теплоизолирующей способности от воздействия «стандартного» пожара с привлечением компьютерной модели расчета нестационарного температурного поля в элементах конструкций с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры и объемного механизма испарения влаги.
- Повышении эффективности и обоснованности проектных работ в части разработки деклараций промышленной безопасности, планов локализации

аварийных ситуаций за счет использования достоверных критериев огнестойкости ж/б конструкций.

Реализация и внедрение результатов работы. Расчетный метод оценки огнестойкости элементов железобетонных конструкций при пожарах разлития (огненных шарах, факельном горении) на основании данных стандартных огневых испытаний, разработанный в диссертации, используется проектным институтом ООО «Инженерное бюро «АНКОР» и ООО «Эксперт Бюро» при оценке пределов огнестойкости железобетонных конструкций при горении углеводородов. Использованный подход повышает достоверность и информативность решений по оценке пожарных рисков в расчетной части специальных разделов: «Деклараций промышленной и пожарной безопасности опасных производственных объектов» и «Планов локализации аварийных ситуаций», а так же при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Современные проблемы химической и радиационной физики» (М.: Президиум РАН, 2009); на III и IV Всероссийских конференциях и XIII Школы молодых ученых «Безопасность критических инфраструктур и территорий» (Екатеринбург: УрО РАН, 2009, 2011); на II конференции по фильтрационному горению (Черноголовка, Институт проблем химической физики РАН, 2010), на ежегодной научной сессии ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» (Казань, 2010) и на 62-ой Республиканской научной конференции Казанского государственного архитектурно-строительного университета (Казань, 2010).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 15-и публикациях, в том числе в 7-и статьях, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобразования и науки РФ для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в 8-и тезисах материалов международных, всероссийских и региональных научных конференций. В названных публикациях полностью отражены основные положения диссертации.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, выводов, списка использованных источников, приложений. Общий объем диссертации 117 страниц машинописного текста, включая 29 рисунков, 3 таблицы, списка литературы из 76 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** выделена актуальность проблемы, сформулирована цель исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные результаты работы, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

Огнестойкость является международной пожарно-технической характеристикой. Для сравнительной оценки способности конструкций и зданий сопротивляться воздействию пожаров используются международный стандарт по лабораторному методу огневых испытаний и расчетные методы по воздействию стандартной температуры пламени на элементы конструкций. Нормативный

расчетный метод определения пределов огнестойкости проводится с использованием только критерия достижения критической температуры.

Однако в научно-технической литературе известны и другие подходы к оценке огнестойкости, основанные на учете градиентов температуры, возникающих при интенсивном нагреве, и воздействия давления водяного пара при объемном испарении влаги.

В связи с изложенным, разработка расчетных методов оценки огнестойкости на основе критериев критической температуры и градиента давления имеют важное теоретическое и прикладное значение для количественной оценки предельных состояний бетона при высокоинтенсивном нагреве.

ГЛАВА I. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1 Стандартные огневые испытания

При стандартных огневых испытаниях за предел огнестойкости ж/б конструкций принимают время в минутах, отсчитываемое от начала огневого воздействия до возникновения одного из предельных состояний по огнестойкости:

- по потере несущей способности (R) конструкций и узлов;
- по теплоизолирующей способности (I);
- по целостности (E).

Стандартный пожар описывается формулой подъема температуры:

$$t_f = 348 \lg(8\tau + 1) + t_0, \quad (1)$$

где t_f – температура среды, °C; τ – время, мин; t_0 – начальная температура.

Температурно-временной режим – стандартный пожар – является основным в испытаниях и расчетах огнестойкости строительных конструкций.

1.2 Расчетные методы

Огневые испытания требуют больших материальных и временных затрат на их проведение. Поэтому для однотипных элементов строительных конструкций наряду с лабораторными испытаниями на стадии предварительного проектирования по Регламенту допускается проведение расчетных оценок. В соответствии с СТО теплотехническим расчетом определяется время достижения предела огнестойкости, по истечении которого арматура нагревается до критической температуры или сечение бетонной конструкции сокращается до предельного значения при воздействии на нее стандартно-температурного режима.

1.2.1 Физико-химические процессы при высокоинтенсивном нагреве

При высокотемпературном нагреве в бетоне происходят сложные физико-химические процессы, закономерности которых необходимо учитывать при разработке расчетных методов.

Прочность бетона при действии высоких температур зависит от свойств вяжущих веществ, крупного и мелкого заполнителей. Большое значение на свойства бетона оказывает гашеная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$, которая в чистом виде в цементах отсутствует, но выделяется в процессе твердения бетонов.

При нагревании бетонов и растворов происходит дегидратация образовавшихся в процессе твердения гидросиликата и гидроалюмината кальция, а равно и гидрата окиси кальция. Распад гидратов приводит к нарушению механической прочности отвердевшей цементной массы. Решающее значение на этот эффект оказывает дегидратация гидрата окиси кальция.

Результатом физико-механических и химических процессов в нагретом бетоне может явиться отслаивание заполнителя от цементного камня вследствие появления трещин на поверхности контакта, что приводит иногда к растрескиванию всего элемента. На растрескивание бетона оказывает влияние и миграция химически несвязанной воды в порах бетона, механизм которой изучен явно недостаточно.

Взрывное послойное разрушение бетона может происходить вследствие растягивающих напряжений, возникающих из-за давления паров физической влаги в порах, а также, или в дополнение к этому, из-за разупрочнения бетона после потери им связанной воды. Разупрочнение бетона может способствовать его разрушению не только из-за давления паров в порах, но и под действием термических напряжений, а также из-за различия в коэффициентах температурного расширения различных наполнителей бетона.

Нарушение структуры бетона после высокотемпературного огневого воздействия происходит в следующих диапазонах температур. В начале пожара при температуре до 200 °С прочность бетона на сжатие практически не изменяется. Если влажность бетона превышает 3,5 %, то при огневом воздействии и температуре 250 °С возможно хрупкое разрушение бетона. От 250 до 350 °С в бетоне образуются в основном трещины от температурной усадки бетона. До 450 °С в бетоне образуются трещины преимущественно от разности температурных деформаций цементного камня и заполнителей. Свыше 450 °С происходит нарушение структуры бетона из-за дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$, когда свободная известь в цементном камне гасится влагой воздуха с увеличением объема. При температуре свыше 573 °С наблюдается нарушение структуры бетона из-за модифицированного превращения α -кварца в β -кварц в граните с увеличением объема заполнителя. При температуре свыше 750 °С структура бетона полностью разрушается.

1.2.2 Физико-механические характеристики материалов при высоких температурах

Для анализируемых ситуаций, связанных с пожаром, механические характеристики материалов определяются при температурах, достигаемых в строительных конструкциях при пожаре.

Отношение предела прочности или предела текучести материала при данной температуре к пределу прочности или пределу текучести в нормальных условиях принято называть коэффициентом изменения прочности и обозначают как m_T . Учитывая, что пределы прочности и пределы текучести материалов приравнены к нормативным сопротивлениям, имеем

$$m_T = R^T / R^H, \quad (2)$$

где R^T и R^H – предел прочности или предел текучести материала в нагретом состоянии и в нормальных условиях соответственно.

В ряде случаев для определения пределов огнестойкости достаточно знать критическую температуру материала на определенной глубине конструкции. Имея кривую изменения прочности материала в зависимости от температуры и значение $m_{T_{кр}}$, определяют критическую температуру. Эта критическая температура может относиться к части сечения при наличии температурного перепада или ко всему сечению, когда перепадом температур можно пренебречь.

Во всех случаях высокотемпературного воздействия на бетон по характеру распределения температурных полей можно судить о распределении прочности бетона по слоям и о толщине разрушенного слоя, который устанавливают по границе критической температуры $T_{кр}$.

ГЛАВА II. ТЕПЛОМАССОБМЕН В ЭЛЕМЕНТАХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

2.1 Приближенные модели теплообмена между пламенем пожара и поверхностью элемента конструкции

Экспериментальное исследование температурных полей в элементах строительных конструкций для различных сценариев развития пожаров, конечно, невозможно. Поэтому в настоящей работе для расчета температурных полей разработана математическая модель радиационно-конвективного нагрева поверхности строительной конструкций при воздействии на неё пламени, возникающего при горении углеводородных топлив. Характерные особенности огневого воздействия учитываются при этом граничными условиями.

Для определения пределов огнестойкости элементов строительных конструкций необходимо последовательно решать две сопряженные задачи, которые условно можно назвать внешней и внутренней.

Целью решения внешней задачи является определение плотности теплового потока, складывающегося из потоков излучения и конвекции и воздействующего на поверхность элемента конструкции. При решении внутренней задачи рассчитывается температурное поле по пространственным координатам при задании температуры на обогреваемых поверхностях элемента конструкции или плотности теплового потока, получаемого из решения внешней задачи.

В СТО расчет плотности облучения объекта проводится по формуле:

$$q = \alpha_f (T_f - T_n) + \varepsilon_{np} \sigma \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где α_f – коэффициент теплоотдачи от пламени к поверхности;

$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{1}{\varepsilon_n} - 1}$ – приведенный коэффициент поглощения излучения; ε_n – степень черноты облучаемого материала; T_f и ε_f – температура и степень черноты пламени.

Для тяжелого бетона рекомендованы значения $\alpha_f = 29$ и $\varepsilon_n = 0,56$.

Для расчета плотности теплового потока излучения при горении углеводородов необходимо знание температуры и степени черноты пламени, значения которых по литературным данным для различных горящих веществ и материалов находятся в пределах 1300 – 1600 °С и 0,1 – 0,8 соответственно.

При аварийном горении углеводородов в нефтегазохимическом комплексе рассматриваются в основном четыре сценария развития аварий, сопровождающиеся воздействием высокоинтенсивных тепловых потоков пламени пожара на окружающие объекты: пожар-вспышка, огненный шар, горение пролива, факельное горение. В данной работе для моделирования возможных сценариев горения предлагается использовать две интегральные характеристики – эффективную температуру пламени T_f и излучательную способность продуктов горения (углекислого газа и паров воды).

В основе практических расчетов лучеиспускания газов положен закон Стефана-Больцмана. Несмотря на условность такого подхода, он широко используется в расчетах топочных устройств, используемых для сжигания углеводородов. Опытные данные по излучательной способности газов задаются в виде зависимостей:

$$\varepsilon_f = f(t_f, P, l), \quad (4)$$

где ε_f – степень черноты газов при горении, P – парциальное давление продуктов горения CO_2 и H_2O , l – толщина слоя горящего газа.

Точное воспроизведение динамики изменения плотности тепловых потоков излучения от пламени пожаров в реальных аварийных ситуациях является трудновыполнимой задачей и не входило в задачи исследования. Поэтому выбор интегральных значений температуры и степени черноты пламени основывается на экспериментальных данных, приводимых в литературе и нормативных методиках.

Табл. 1.

Сценарий аварии	Вероятность	Температура пламени T_f , °С	Приведенная степень черноты, $\varepsilon_{пр}$	Плотность потока облучения объекта q , кВт/м ²
Стандартный пожар	–	изменяется по формуле (1)	0,23	0 – 25
Горение пролива	0,0287	1200	0,17	70
Факел	0,0574	1400	0,17	100
Огненный шар	0,7039	1500	0,4	450
Сгорание облака (пожар-вспышка)	0,1689	1600	0,83	350

Результаты расчета плотности потока облучения объекта для различных аварийных сценариев представлены в таблице 1, в которую дополнительно внесены данные ГОСТ Р 12.3.047-98 по статистической вероятности различных сценариев развития аварий с выбросом сжиженных газов (СУГ).

2.2 Физико-математическая постановка задачи высокоинтенсивного нагрева ж/б конструкций

В соответствии с рекомендациями СТО для плит и стен пренебрегают теплообменом на торцах конструкции и решается одномерная задача. Балки, ригели и прогоны в большинстве случаев подвергаются трехстороннему нагреву. Отдельно стоящие колонны подвергаются четырехстороннему нагреву. Для одно- и многостороннего нагрева в СТО для расчета толщины слоя бетона, прогреваемого до критической температуры, приводятся рабочие формулы, получаемые из решения линейного уравнения Фурье.

В данной работе при обосновании градиентно-температурного критерия огнестойкости для одностороннего нагрева численно решается нелинейное уравнение нестационарной теплопроводности. Для многостороннего нагрева выражения для критерия не изменяются.

При теплотехническом расчете в стандартах и научно-технической литературе приняты следующие допущения:

- для расчета выбирается отдельно взятый конструктивный элемент без учета его связи с другими элементами;
- конструктивные элементы в условиях пожара или испытаниях нагреваются однородным равномерным тепловым потоком;
- температурные напряжения в конструкциях, появляющиеся в результате неравномерного прогрева при действии высоких температур, не учитываются.

При принятых допущениях решается уравнение Фурье и определяется время достижения критической температуры в опасном сечении. Эти допущения обусловлены условиями огневых испытаний, при которых элементы конструкций подвергаются равномерному одно- и двустороннему нагреву в течение нескольких часов.

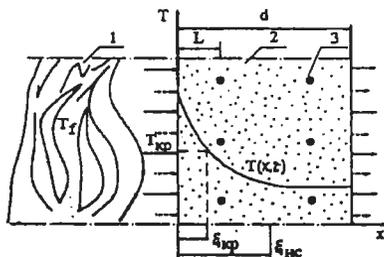


Рис. 1. Типовая теплотехническая схема элемента ж/б конструкции:
 1 – пламя пожара; 2 – бетон;
 3 – арматура; d – ширина элемента;
 L – толщина защитного слоя бетона;
 $\xi_{кр}$ – координата подвижной границы для постоянной критической температуры $T_{кр}$; $\xi_{ис}$ – координата подвижной границы волны испарения влаги; $T(x, \tau)$ – профиль температуры

В статическом расчете в многоэлементных конструкциях учитываются механические связи между элементами.

При решении теплофизической задачи учитываются нелинейные граничные условия нестационарного теплообмена между нагреваемыми и не нагреваемыми (тальными) поверхностями конструкции и окружающей средой, зависимость теплофизических свойств бетона от температуры, а также затраты энергии на испарение воды, находящейся в порах бетона.

Для расчета огнестойкости элементов конструкций используются типовые теплотехнические схемы в виде плоских элементов стен и

покрытий строительных конструкций при одно- и двухстороннем нагреве или цилиндрических элементов колонн при четырехстороннем нагреве. На рис. 1 схематично представлен плоский элемент ж/б конструкции при одностороннем нагреве.

В стандартных методах расчета влияние влажности бетона при его нагреве и фазовом превращении влаги учитывается введением приведенного коэффициента температуропроводности. В данной работе в отличие от стандартного метода в расчетную схему добавлено воздействие теплового излучения от пламени пожаров для различных аварийных сценариев горения выбросов углеводородного топлива. Кроме того, в математической постановке задачи высокоинтенсивного нагрева бетона учитывается объемное испарение влаги, описываемое формально-кинетическим уравнением:

$$\frac{d\eta}{dt} = k(1 - \eta)^n \exp\left(-\frac{L_0}{RT_s}\right), \quad (5)$$

где η – глубина (степень) фазового превращения влаги при объемном испарении; k – предэкспонент; $L_0 = L\mu$ – эффективная энергия активации испарения; L – теплота испарения влаги со свободной поверхности; μ – молярная масса воды; n – эффективный порядок реакции; T_s – температура материала; R – универсальная газовая постоянная.

С учетом стока тепла и зависимости теплофизических свойств от температуры для одномерного одностороннего нагрева элемента конструкции уравнение энергии записывается в виде:

$$c(T)\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) - L\rho\omega_0 \frac{d\eta}{dt}, \quad (6)$$

где $c(T)$, ρ , $\lambda(T)$ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала конструкции соответственно; ω_0 – начальное влагосодержание.

Начальные условия:

$$T(x, 0) = T_0; \quad 0 \leq x < d \quad (7)$$

Граничные условия на обогреваемой поверхности:

$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} - \alpha_k (T(0, \tau) - T_f) - \varepsilon_{np} \sigma \left[\left(\frac{T(0, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f + 273}{100} \right)^4 \right] = 0, \quad (8)$$

на необогреваемой поверхности:

$$\frac{\partial T(d, \tau)}{\partial x} - H_k (T(d, \tau) - T_0) - H_{из} \left[\left(\frac{T(d, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = 0, \quad (9)$$

где $H_k = \frac{\alpha'_k}{\lambda(T)}$; $H_{из} = \frac{\sigma \varepsilon}{\lambda(T)}$; α'_k – коэффициент теплоотдачи на необогреваемой поверхности.

Условие достижения критической температуры на подвижной границе:

$$\frac{\partial T(\xi_{кр}, \tau)}{\partial \tau} = u_{кр} \left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\xi_{кр}}, \quad (10)$$

где $u_{кр}$ - скорость движения границы критической температуры.

Условие на подвижной границе испарения:

$$u_{ис} = \int_{\xi_{ис}}^d w(x, \tau) dx, \quad (11)$$

где $u_{ис}$ - скорость движения волны испарения влаги.

Нелинейное дифференциальное уравнение (6) с нелинейными граничными условиями (8, 9) решаются численными методами по неявной разностной схеме.

2.3 Результаты вычислительного эксперимента и их обсуждение

Результаты вычислительного эксперимента, имитирующего воздействие стандартного пожара, представлены на рис. 2. Как видно из представленных данных, в течение 2/3 времени воздействия стандартного пожара наблюдается заметное различие в изменении температуры по сравниваемым моделям (учитывающей и не учитывающей эффект объемного испарения влаги), которое можно объяснить «сдерживанием» процесса теплопроводности при движении волны испарения от поверхности конструкции в глубь материала. Поэтому температурные кривые по разработанной модели (сплошные кривые) при одинаковых временах воздействия пожара лежат ниже в сравнении с результатами расчета по стандартной методике (пунктирные кривые).

Этот факт слабо влияет на оценку предела огнестойкости по критерию достижения критической температуры на глубине расположения арматуры (20 - 30 мм от поверхности), но на оценку предела огнестойкости по теплоизолирующей способности это влияние оказывается значимым. Например, температура 160 °С (принятый предел огнестойкости по теплоизолирующей способности) достигается на тыльной стороне элемента по стандартной методике примерно через 90 минут, а по модели с объемным испарением влаги – через 110 минут (рис. 2 б).

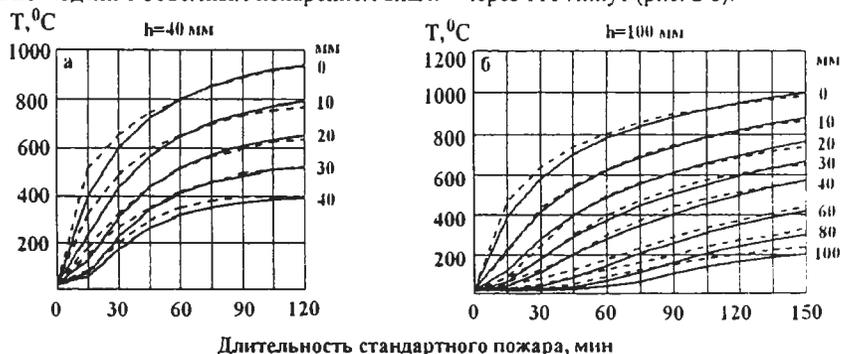


Рис. 2. Сравнительные данные по расчету температурного поля по стандартной методике (---) и модели с объемным испарением влаги (—): а – $d=40$ мм; б – $d=100$ мм

Следует отметить, что кинетическое уравнение (5) применяется не только в процессах с фазовыми превращениями, но и в других физико-химических

процессах, например, в теории горения. Изменение степени превращения влаги в волне испарения представлено на рис. 3.

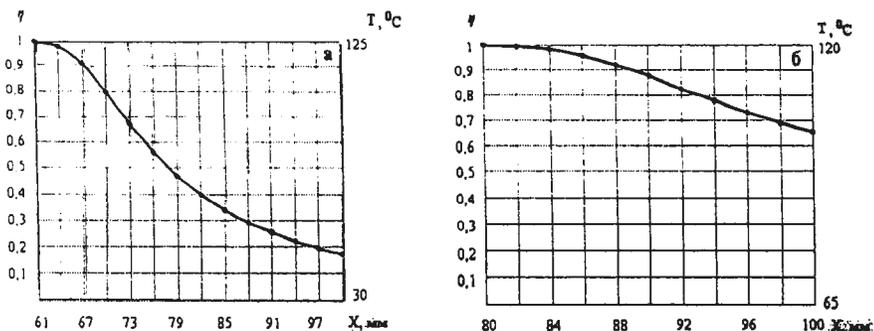


Рис. 3. Изменение степени испарения влаги в бетоне в зависимости от расстояния от обогреваемой поверхности и времени воздействия стандартного пожара: а – 55 минут; б – 75 минут

Как видно из рис. 3, окончание процесса испарения влаги в порах бетона достигается при температуре 120 °С, что соответствует парциальному давлению паров воды примерно 0,3 МПа. Под действием давления паров воды происходит молярный перенос пара через капиллярно-пористую структуру бетона. После полного испарения пара темп прироста температуры должен возрастать в связи с прекращением действия эффекта «сдерживания» процесса теплопроводности за счет испарения внутренней влаги.

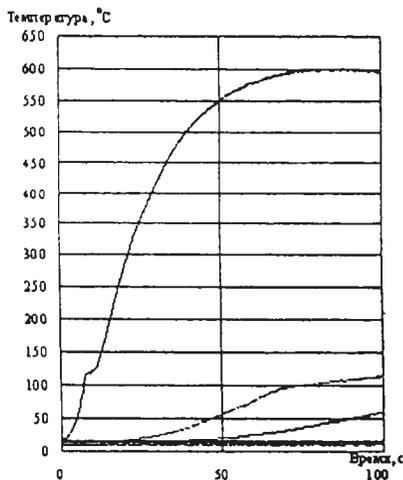


Рис. 4. Изменение температуры по ширине бетонного блока при горении ПС

Результаты экспериментального измерения температуры на различных расстояниях от обогреваемой поверхности (техника эксперимента описывается ниже), представленные на рис. 4, подтверждают численный расчет по модели.

Как видно из рис. 4, «ступенька» при 120 °С наблюдается на глубине 2 мм от обогреваемой поверхности.

Через 90 минут передний фронт испарения достигает тыльной поверхности бетона и «сдерживание» процесса теплопроводности прекращается.

Следовательно, учет объемного испарения влаги в бетоне позволяет более достоверно проводить оценку огнестойкости по теплоизолирующей способности.

ГЛАВА III. КОМПЛЕКСНЫЙ ГРАДИЕНТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КРИТЕРИЙ ПРЕДПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ

3.1 Температурный и градиентный критерии огнестойкости

В третьей главе обосновывается новый градиентно-температурный критерий огнестойкости ж/б конструкций при горении углеводородных топлив. Предлагается метод прогнозирования огнестойкости для различных сценариев пожаров на химических и нефтехимических предприятиях.

В отечественных нормативных документах основным критерием оценки предела огнестойкости по потере несущей способности является критическая температура бетона и арматуры, значение которой для тяжелых бетонов лежит в пределах 500 – 600 °С.

Однако в других альтернативных подходах в оценке предельного состояния капиллярнопористого материала при интенсивном нагреве учитывается градиент температуры, объемное влагосодержание и общий перепад давления пара. Весь комплекс механизмов разрушения предлагается устанавливать определением эквивалентной продолжительности «реального» пожара в сравнении со временем стандартного пожара при одинаковой степени разрушения конструкции.

Таким образом, критерий критической температуры, используемый в стандартном методе оценки предела огнестойкости при воздействии стандартного пожара, каким-то образом должен быть сопряжен с критерием градиента температуры. В этом случае комплексный критерий может быть применен не только для стандартного пожара, но и для пожаров при аварийном выбросе углеводородных топлив. Это обстоятельство мотивировало дальнейшие исследования авторов в области количественной оценки пожарного риска в части последствий воздействия высокоинтенсивного теплового излучения на элементы строительных конструкций.

3.2 Обоснование комплексного критерия разрушения

При обосновании комплексного критерия огнестойкости, учитывающего влияние критической температуры, градиента температуры и теплофизические свойства бетона, авторами проанализированы постановка и решение различных краевых задач нестационарной теплопроводности.

Впервые подход к решению нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности при нагреве бетона был предложен Ройтманом М.Я. (Противопожарное нормирование в строительстве. М.: Стройиздат, 1985) с использованием предельного упрощения граничных условий краевой задачи. Упрощение заключается в замене граничного условия II рода (нагрев элемента строительных конструкций нестационарным тепловым потоком от пламени пожара) граничным условием I рода путем задания средней постоянной температуры нагреваемой поверхности.

Тогда решение дифференциального уравнения Фурье применительно к названным условиям нагрева приобретает вид:

$$T(x, \tau) = T(0, \tau) - (T(0, \tau) - T_0) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right). \quad (12)$$

где τ – время; $T(x, \tau)$ – температура материала на глубине x от поверхности; $T(0, \tau)$ – температура поверхности; T_0 – начальная температура; $\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right)$ – функция ошибок Гаусса (функция Крампа).

Из (12) находится значение erf и по специальным таблицам определяется значение аргумента:

$$A = \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}. \quad (13)$$

Из (13) рассчитывается предел огнестойкости.

Полученные решения не могут быть использованы для расчета пределов огнестойкости конструкций от воздействия переменных тепловых потоков от пламени крупномасштабного пожара при горении углеводородных топлив по двум причинам. Во-первых, решения получены для линейного уравнения Фурье при воздействии стандартного пожара. Во-вторых, в качестве критерия огнестойкости принимается только критическая температура на заданной глубине от поверхности нагреваемого материала.

Поэтому авторами предлагается дальнейшее развитие решения нелинейного уравнения Фурье путем учета в решении не только критической температуры, но и градиента температуры в любом сечении элемента конструкции в процессе нагрева пламенем пожара.

В реализации предлагаемого подхода анализируются две крайние задачи.

В первой – рассматривается решение классической задачи Стефана по промерзанию грунта:

$$T_0 - B \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}} = T_3, \quad (14)$$

где T_0 – температура талой воды; ξ – подвижная граница при раздела при постоянной температуре замерзания T_3 ; B – постоянный коэффициент; α – коэффициент температуропроводности; τ – время.

В математической постановке задачи о промерзании грунта и расчете огнестойкости имеется подвижная граница с постоянным значением температуры. В одной – это движение границы с постоянной температурой замерзания, в другой – с постоянной критической температурой разрушения бетона.

Применительно к расчету огнестойкости предлагается задачу Стефана упростить за счет исключения теплоты фазового перехода. При этом градиент температуры с обеих сторон подвижной границы становится одинаковым и за ξ принимается граница распространения критической температуры $T_{кр}$, за T_0 – температура бетона T_b на расстоянии шага численного интегрирования по координате – h_x . Кроме того, в диапазоне изменения параметров ξ, α, τ зависимость функции Крампа от аргумента близка к линейной. Тогда, после замены T_3 на $T_{кр}$ выражение (14) можно представить в виде:

$$\frac{|\operatorname{grad} T|}{T_{кр}} = K_I \frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}}, \quad K_I = \frac{B}{T_{кр} h_x}, \quad (15)$$

где $|\text{grad}T| = \frac{|T_{кр} - T_h|}{h_x}$ – модуль проекции градиента температуры на координатную

ось O_x , $\frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}}$ – приведенный градиент температуры.

Во второй задаче в начальный момент времени $\tau = 0$ все точки полуограниченного твердого тела имеют одинаковую начальную температуру T_0 и задан произвольный закон изменения теплового потока от времени на границе тела. В этой задаче имеется частный случай, когда изменение теплового потока обеспечивает постоянство температуры на поверхности:

$$q(\tau) = -\frac{T_0}{\sqrt{\lambda\alpha\tau}} \quad (16)$$

Принимая за T_0 критическую температуру $T_{кр}$ и применяя закон Фурье $\bar{q} = -\lambda\text{grad}T$, уравнение (17) записывается в виде:

$$\frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}} = K_2 \frac{l}{\sqrt{\alpha\tau}}, \quad K_2 = \frac{l}{\lambda_{дем}\sqrt{\pi}} \quad (17)$$

С использованием критериев (15) и (17) обработаны данные вычислительного эксперимента по модели (5 - 9) для всех видов пожаров, включая стандартный пожар и горение термита. Результаты представлены на рис. 5 и 6.

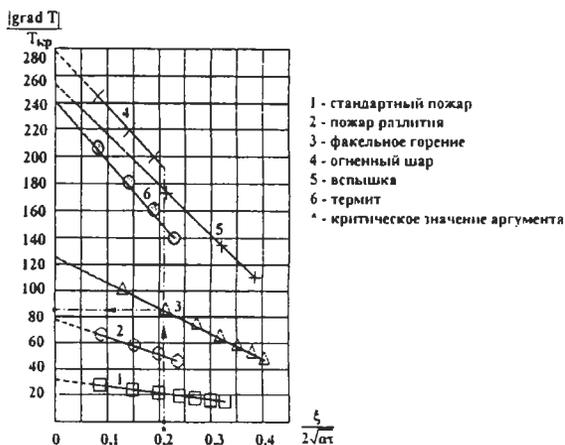


Рис. 5. Зависимость приведенного градиента температуры от безразмерной подвижной границы

Как видно из рис. 5, приведенный градиент температуры линейно зависит от безразмерного комплекса $\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}}$ для каждого вида пожара, но с различными угловыми коэффициентами, а из рис. 6 следует, что линейная зависимость приведенного коэффициента от комплекса $\frac{l}{\sqrt{\alpha\tau}}$ является единой для всех видов пожаров с угловым коэффициентом $K_2 = 0,75$.

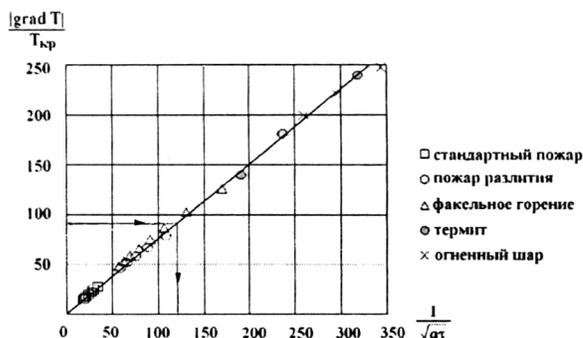


Рис. 6. Зависимость приведенного градиента температуры от обратной координаты подвижной границы

Линейные аналитические зависимости на рис. 5 можно представить в виде:

$$\left. \frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}} \right|_{\xi=\bar{\xi}} - K_I(i) \frac{\bar{\xi}}{2\sqrt{\alpha t}}, \quad (18)$$

где $\left. \frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}} \right|_{\xi=0}$ – приведенное значение градиента температуры на подвижной границе $\bar{\xi}$; $\left. \frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}} \right|_{\xi=\bar{\xi}}$ – значение приведенного градиента на фронтальной поверхности бетона в момент времени начала движения подвижной границы $\bar{\xi}$; $K_I(i)$ – угловой коэффициент i -го вида пожара ($i = \overline{1,6}$).

Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования предела огнестойкости элементов ж/б конструкций. Однако результаты расчетов экспериментально могут быть подтверждены только для стандартного пожара.

Обоснование предлагаемых критериев для пожаров с высокоинтенсивным тепловым потоком излучения требует дополнительных экспериментальных данных с имитацией пожаров в форме огненного шара и пожара-вспышки.

3.3 Экспериментальное исследование огнестойкости методом специального нагрева

Для проверки адекватности математических моделей авторами предлагается специальный метод высокоинтенсивного нагрева элементов конструкций за счет химической энергии пиротехнических составов (ПС), при горении которых плотность тепловых потоков с приемлемым приближением имитирует реальные потоки теплового излучения от огненных шаров и пожаров разлития.

Эксперимент, схема которого представлена на рис. 7, проводился следующим образом*.

*Эксперименты по горению ПС в бетонных блоках, обработка и анализ экспериментальных данных проведены Харитоновой О.Ю.

Бетонная смесь заливается в разборный кубический контейнер с размером ребра 200 мм и с центральным сквозным отверстием (шпуром) диаметром 26 мм. Для измерения температуры в бетонном блоке при изготовлении образцов в процессе заливки размещались 12 термопар с заданным шагом. Ближайшая к поверхности ПС термопара позиционирована на расстоянии 2 мм.

Готовые шашки ПС помещались в шпур с зазором 0.5 мм. После зажигания, ПС горит в полужамкнутом объеме со скоростью $3 \div 5$ мм/с. Распределение температуры по толщине блока фиксировалось на персональном компьютере с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Для расчета поля температур в бетоне строится математическая модель теплообмена в системе «ПС – бетон». Для бетона используется модель тепломассопереноса, записанная в цилиндрической системе координат.

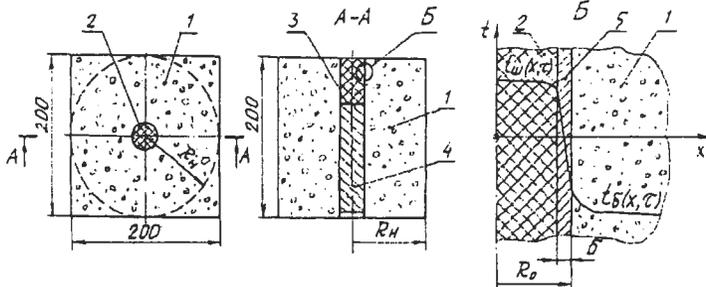


Рис. 7. Схема горения пиротехнического состава (ПС) в контакте с бетоном: 1 – бетон; 2 – продукты горения ПС (шлаки); 3 – фронт горения; 4 – исходный ПС; 5 – недогоревший подслой толщиной δ на поверхности контакта

Уравнение тепломассопереноса в шлаках записывается в виде:

$$c_w \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \lambda_w \nabla^2 T_w - c_g \rho_g U_g \nabla T_g - \alpha_v (T_w - T_b), \quad (19)$$

где α_v – объемный коэффициент теплопередачи, индекс «w» относится к шлаку, «g» – к газообразным продуктам горения.

Первый член правой части уравнения (19) учитывает перенос энергии теплопроводностью, второй – молярным движением газа, третий – через контактное тепловое сопротивление.

Для продуктов горения ПС принимается одотемпературная модель (температура шлаков равна температуре газов) с равномерным распределением температуры по сечению ПС в связи с интенсивным турбулентным теплообменом между газообразными продуктами горения и пористой структурой твердой фазы шлаков.

Для численного решения предлагается использовать принцип расщепления решения по физическим процессам. Учитывая малое значение коэффициента теплопроводности продуктов горения ПС ($1 \div 2$ Вт/м·К), переносом энергии за счет молекулярного механизма можно пренебречь и учитывать только конвективный перенос газообразными продуктами горения. Тогда уравнение (19) можно представить в виде системы двух уравнений, которые записываются в следующем виде:

$$\left(\frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau}\right)_a = -\frac{\alpha_v}{c_{np}\rho_{np}}(T_{ш} - T_б), \quad (20)$$

$$\left(\frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau}\right)_k = \frac{c_g \rho_g U_g}{c_{ш}\rho_{ш}} \cdot \frac{\partial T_g}{\partial x}. \quad (21)$$

Индексы «л» и «к» относятся к локальному и конвективному теплообмену соответственно.

Значение α_v идентифицируется по данным автоматизированного эксперимента с медным сканирующим калориметром с равномерным распределением температуры.

Теплоёмкости газа и шлаков, а также плотность шлака практически не зависят от температуры. При стационарном режиме горения уравнение неразрывности для одномерного течения газа имеет вид:

$$\rho_g U_g = (\rho_g U_g)_0 = const, \quad (22)$$

Тогда можно ввести постоянный коэффициент

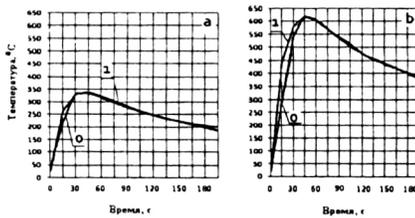
$$k = \frac{c_g \rho_g U_g}{c_{ш}\rho_{ш}}. \quad (23)$$

Уравнение (19) можно записывается в виде модифицированного уравнения движения:

$$\frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau} = -k \frac{\partial T_{ш}}{\partial x}. \quad (24)$$

Коэффициент k определяется одним из методов оптимизации и приравняется нулю, когда фронт горения достигает дна бетонного образца и процесс горения прекращается.

Алгоритм численного решения состоит из последовательности двух дробных шагов по времени. На первом шаге решается уравнение (20), на втором – (21). Начало интегрирования начинается с момента времени, когда фронт горения доходит до фиксируемой точки в середине бетонного блока.



Температура горения ПС: а - 2000 °С; б - 2500 °С

Рис. 8. Результаты моделирования высокоинтенсивного нагрева бетона: 0 – эксперимент, 1 – модель нагрева ПС

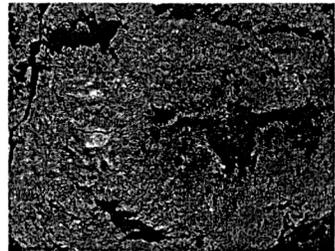


Рис. 9. Глубокое разрушение бетона при горении ПС

На рис. 8 представлены результаты моделирования по расчету температуры бетона на расстоянии 2 мм от обогреваемой поверхности. Для ПС с температурой горения 2500 °С температура бетона достигает критического значения через 45 сек.

После прекращения горения через 5 минут происходит образование сквозной трещины в бетонном блоке, как это показано на фотографии на рис. 9.

3.4 Предпроектная оценка пределов огнестойкости железобетонных конструкций при факельном горении углеводородов

При проектировании и создании средств защиты конструкций в нефтегазовом комплексе важное прикладное значение приобретает предпроектная оценка огнестойкости множества вариантов строительных конструкций.

Пределы огнестойкости и расстояния до сечений, в которых температура тяжелого бетона достигает критического значения 600 °С, полученные в огневых испытаниях и в специальном эксперименте по нагреву бетона за счет горения термита, приведены в таблице 2.

Табл. 2

Предел огнестойкости $\tau_{кр}$, мин	Критическое значение границы $\xi_{кр}$, мм	Критические значения аргумента $\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau_{кр}}}$	
		Стандартный пожар	Специальный нагрев
60	17	0,212	–
90	20	0,204	–
132	30	0,250	–
1	2	–	0,203

Как видно из данных таблицы 2, для условий специального нагрева элемента бетона и условий нагрева с различными расстояниями расположения арматуры от поверхности бетона для стандартного пожара критические значения аргумента остаются практически постоянными. Поэтому их среднее значение можно рассматривать в качестве эквивалентного критерия для прогнозирования предела огнестойкости. Исключение составляет нагрев при расположении арматуры на расстоянии 30 мм. Это можно объяснить тем, что значения критерия обосновываются для полуограниченного тела. Для элемента шириной 100 мм при этом времени нагрева температура тыльной стороны элемента повышается, предел огнестойкости уменьшается – значение критического критерия увеличивается.

Подобный подход описывается в монографии В.С. Федорова при установлении зависимости эквивалентной продолжительности стандартного испытания от времени пожара для ж/б конструкций при горении ЛВЖ.

Алгоритм предпроектной оценки состоит из следующих этапов:

- По результатам огневых испытаний типового элемента конструкции в условиях стандартного пожара определяется предел огнестойкости по несущей способности $\tau_{кр}$ и расстояние до сечения ξ , в котором достигается критическая температура.

- Рассчитывается безразмерная подвижная граница $\frac{\xi}{2\sqrt{a\tau_{кр}}}$ и по (18) определяется критические значения градиентно-температурного критерия для конкретного сценария пожара.

- Далее по известному критерию из (17) находится предел огнестойкости.

Для примера, при «факельном горении», которое является наиболее распространенным сценарием развития пожара при авариях на газопроводах со сжатым природным газом, находится значение $\frac{[gradT]}{T_{кр}} = 89,3$. Далее по критерию

(15) находится значение $\frac{l}{\sqrt{a\tau_{кр}}} = 119$ и при известном коэффициенте

температуропроводности материала бетона a , достигается конечная цель – определение предела огнестойкости $\tau_{кр} = 158$ секунд. Схематично алгоритм определения предела огнестойкости показан на рис. 5 и 6 пунктирными линиями со стрелками.

Результаты проделанной работы могут найти применение при разработке нормативных документов в области пожарной безопасности строительных конструкций в нефтегазохимическом комплексе. Одновременно эти результаты могут быть использованы при проведении проектных работ в части разработки деклараций промышленной безопасности, планов локализации аварийных ситуаций, за счет чего может быть повышена эффективность и обоснованность результатов проектирования.

ВЫВОДЫ

1. Обоснован новый градиентно-температурный критерий разрушения бетона при высокоинтенсивном нагреве строительных конструкций от продуктов горения углеводородов на химических и нефтехимических предприятиях.
2. Разработана вычислительная модель теплопередачи в бетоне с объемным источником испарения влаги при радиационно-конвективном нагреве от пламени пожаров разлива, огненных шаров, факельного горения.
3. Адекватность модели реальным аварийным ситуациям, возникающим при горении углеводородов, подтверждена методом специального локального нагрева образцов бетона.
4. С использованием вычислительной модели предложен метод прогнозирования огнестойкости по теплоизолирующей способности элементов ж/б конструкций.
5. Предложен новый метод расчета огнестойкости элементов конструкций при пожарах в химической и нефтехимической отраслях промышленности по результатам стандартных огневых испытаний с использованием градиентно-температурного критерия разрушения бетона.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих материалах:

В научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Еналеев, Р.Ш. Огнестойкость элементов строительных конструкций при пожарах в нефтегазовом комплексе / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, А.В. Качалкин, Л.Э. Осипова // Бутлеровские сообщения. – 2010. – Т. 19. – № 3. – С. 66 – 75.

2. Еналеев, Р.Ш. Огнестойкость элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, О.Ю. Харитонова, А.В. Качалкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – № 5. – С. 48 – 53.

3. Еналеев, Р.Ш. Критерии огнестойкости строительных конструкций при крупномасштабном горении энергоемких веществ / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, А.В. Качалкин, О.Ю. Харитонова // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 90 – 108.

4. Еналеев, Р.Ш. Моделирование предельных состояний элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, М.А. Закиров, О.Ю. Харитонова // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 8. – С. 41 – 50.

5. Еналеев, Р.Ш. Пределы огнестойкости элементов конструкций при пожарах в нефтегазовом комплексе / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, А.В. Качалкин, Л.Э. Осипова // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 11. – С. 44 – 50.

6. Еналеев, Р.Ш. Огнестойкость элементов конструкций при пожарах на предприятиях нефтегазового комплекса / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, Л.Э. Осипова // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11-12. – С. 23 – 34.

7. Еналеев, Р.Ш. Критерии огнестойкости элементов строительных конструкций на пожаровзрывоопасных объектах / Р.Ш. Еналеев, Н.М. Барбин, Э.Ш. Теляков, **О.А. Тучкова**, А.В. Качалкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20. – № 1. – С. 33 – 41.

В материалах конференций:

8. Еналеев, Р.Ш. Разрушение элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.Ю. Харитонова, **О.А. Тучкова** // Сборник статей Международной конференции «Современные проблемы химической и радиационной физики». – Москва, Президиум РАН, 25-29 августа 2009 г. – С. 377 – 380.

9. Еналеев, Р.Ш. Предельные состояния элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, В.С. Гасилов, **О.А. Тучкова** // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Материалы III Всероссийской конференции и XIII Школы молодых ученых. – Екатеринбург: УрО РАН, ноябрь 2009. – С. 180 – 181.

10. Еналеев, Р.Ш. Математическая модель крупномасштабного горения газовых смесей. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.В. Демин, **О.А. Тучкова** // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Материалы III

102
Всероссийской конференции и XIII Школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН, ноябрь 2009. – С. 182.

11. Тучкова, О.А. Предельная работоспособность железобетонных конструкций при высокоинтенсивном нагреве. / **О.А. Тучкова**, Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков // ФГУ ВПО «Казанский государственный технологический университет»: Аннотация сообщений Научной сессии. – Казань, 2-5 февраля 2010 г. – С. 94.

12. Тучкова, О.А. Огнестойкость элементов строительных конструкций при пожарах в нефтегазовом комплексе. / **О.А. Тучкова**, Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков // Казанский государственный архитектурно-строительный университет: Программа. Тезисы докладов 62-ой Республиканской научной конференции. – Казань, 24 марта 2010 г. – С. 246.

13. Тучкова, О.А. Моделирование воздействия крупномасштабных пожаров локальным нагревом объектов пиротехническими составами. / **О.А. Тучкова**, Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.В. Качалкин, О.Ю. Харитоновна // Сборник докладов II Конференции по фильтрационному горению. – Черноголовка, Институт проблем химической физики РАН, октябрь 2010 г. – С. 56 – 59.

14. Тучкова, О.А. Критерии огнестойкости железобетонных конструкций на предприятиях нефтегазового комплекса. / **О.А. Тучкова**, Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.В. Качалкин // Сборник докладов II Конференции по фильтрационному горению. – Черноголовка, Институт проблем химической физики РАН, октябрь 2010 г. – С. 60 – 63.

15. Еналеев, Р.Ш. Предельные состояния элементов конструкций при тепловом ударе. / Р.Ш. Еналеев, **О.А. Тучкова**, Э.Ш. Теляков, А.О. Чернявский // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Материалы IV Всероссийской конференции и XIV Школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН, май 2011 г. – С. 135.

Соискатель



О.А.Тучкова

Заказ 224

Тираж 100 экз.

Цфсетная лаборатория Казанского национального
исследовательского технологического университета

420015, Казань, К.Маркса, 68