

Р. Ш. Еналеев, Р. Р. Димухаметов, О. А. Тучкова,  
О. Ю. Харитоновна

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ БЕТОНА ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

*Ключевые слова:* элемент конструкции, модели пожаров, критерии разрушения.

*Разработана математическая модель с объемным источником испарения влаги для расчета температурного поля элементов конструкций при воздействии пламени пожаров. Обоснован инвариантный к скорости высокоинтенсивного нагрева градиентный критерий разрушения бетонных конструкций. Предложен метод прогнозирования предела огнестойкости элементов конструкций при различных сценариях развития пожара в нефтегазовом комплексе.*

*Key words:* element of construction, models of fire, criterion of destruction.

*The mathematical model with a volumetric source of moisture evaporation is developed for calculation of a temperature field of construction elements under influence of fire flame. A gradient destruction criterion, invariant to speed of high-intensive heating of concrete constructions, has been proved. There was offered a method of forecasting of fire resistance limit at different scenarios of fire development in oil and gas complex.*

### Введение

Бетон и его композиты являются наиболее распространенным несгораемым материалом строительных конструкций. Предельные состояния бетонных конструкций могут возникнуть в аварийных ситуациях при горении энергоемких веществ и материалов в аэрокосмической технике, атомной энергетике, нефтехимической технологии, металлургии.

В соответствии с Федеральным законом [1] при оценке пожарного риска предел огнестойкости конструкций определяется временем от начала огневого испытания до наступления одного из нормируемых предельных состояний при стандартном температурном режиме, который аппроксимируется формулой подъема температуры окружающей среды до 1200 °С и плотности теплового потока до 25 кВт/м<sup>2</sup> в течение десятков минут.

Однако в реальных сценариях развития техногенных пожаров, например, на нефтехимических предприятиях, средняя температура горения углеводородов достигает 1700 °С, а тепловые потоки излучения – 450 кВт/м<sup>2</sup> при времени горения несколько десятков секунд [2].

Методы испытаний и расчетно-аналитические оценки огнестойкости при таких термодинамических параметрах пламени в нормативных документах отсутствуют.

В связи с изложенным, разработка и совершенствование методов оценки пределов огнестойкости строительных конструкций при пожарах в нефтегазовых и нефтехимических комплексах имеет важное теоретическое и прикладное значение.

В настоящее время актуальность данного направления исследований усиливается в связи с крупномасштабной добычей и транспортировкой нефти и газа из России в страны СНГ и Европу.

Кроме того, результаты исследований могут найти практическое применение при прогнозировании последствий террористических атак на стратегически важные объекты, служебные и

государственные здания. Прогрессирующее разрушение конструкций при комбинированных особых воздействиях типа удар – взрыв – пожар может привести к тяжелым человеческим жертвам и огромному материальному ущербу [3].

### Европейская система нормирования

Интеграция России в Европейское сообщество определяет необходимость гармонизации нормативных документов в различных сферах, в том числе и в области пожарной безопасности [4]. Система еврокодов представляет собой набор европейских стандартов (EN) для проектирования строительных объектов. Если EN не могут быть использованы, тогда для определения технических характеристик допускается применение оригинальных методов расчета проектирования.

При расчете воздействия «реального» пожара предел огнестойкости сравнивается со значением эквивалентной продолжительностью «стандартного» пожара, воздействие которого на конструкцию вызывает аналогичные последствия [5].

*Номинальные температурные режимы.* На основе многолетнего опыта огневых испытаний в международной практике для сравнительной оценки предела огнестойкости используются стандартные температурные режимы в соответствии с ISO-834 [6]

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

где  $t_g$  – температура среды вблизи конструкций, °С;

$\tau$  – время, мин;  $t_0$  – начальная температура.

Полагается, что температурный режим (1) соответствует пожарной нагрузке 50 кг/м<sup>2</sup> древесины и этот режим называют «целлюлозной кривой».

Горение углеводородов характеризуется резким подъемом температуры до 1100 °С. Температурный режим горения углеводородов определяется по формуле:

$$t_g = 1080(1 - 0,325 \cdot e^{-0,167\tau} - 0,675 \cdot e^{-2,5\tau}) + t_0 \quad (2)$$

Температурно-временная зависимость (1) в российских нормах регламентируется ГОСТ 3047.0-

94, который разработан на основе [6] и используется при расчетном определении предела огнестойкости.

При оценке огнестойкости в тоннелях применяется «тоннельная кривая», максимальное значение температуры которой достигает 1300 °С.

*Тепловые воздействия* в EN 1999 задаются результирующим удельным тепловым потоком на обогреваемую поверхность конвекцией и излучением по законам Ньютона и Стефана-Больцмана соответственно:

$$q_c = \alpha_c (t_g - t_m) \quad (3)$$

$$q_r = \phi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma [(t_f + 273)^4 - (t_m + 273)^4], \quad (4)$$

где  $\alpha_c$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $t_m$  - температура поверхности конструкции, °С;  $\phi$  - угловой коэффициент облученности;  $\varepsilon_f$  - степень черноты пламени (пожара);  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $t_f$  - эффективная температура излучения пожара.

Для полностью охваченной пламенем конструкции (пожар-вспышка) эффективная температура излучения пожара может быть принята равной температуре вблизи нее. Температура поверхности является результатом теплотехнического расчета.

*Расчет предела огнестойкости* в EN 1991-1-2 включает следующие этапы:

- выбор сценариев пожара;
- расчет повышения температуры в конструкциях (теплотехнический расчет);
- расчет прочностных характеристик (статический расчет).

### **Модели углеводородных пожаров**

В математической теории горения газовых смесей [7] рассматриваются два предельных случая – нормальное распространение пламени предварительно перемешанных газов и диффузионное горение не перемешанных объемов горючего и окислителя. Между предельными случаями существует область частичного смешения компонентов горючей смеси, где химические реакции и смешение происходят с соизмеримыми скоростями. Эта промежуточная область из-за её сложности остается малоизученной.

В литературе предлагаются экспериментальные, полуэмпирические и теоретические модели крупномасштабного горения углеводородных топлив. Одна из последних моделей выполнена международным коллективом под руководством Махвиладзе Г.М. [8]. Скорость турбулентного горения описывалась моделью дробления турбулентных вихрей, согласно которой скорость потребления горючего лимитируется процессами турбулентного смешения компонентов, а сама химическая реакция считается бесконечно быстрой.

В соответствии с теорией горения Зельдовича Я.Б. для турбулентного диффузионного горения газов основным параметром, влияющим на динамику процесса горения, является нормальная скорость распространения пламени. Этот параметр входит во все кинетические модели.

Влияние физико-химических факторов: начальной температуры, концентрации горючего и окислителя на стандартную скорость горения экспериментально исследовано в фундаментальных работах по горению газовых смесей. В этих работах установлено, что продукты реакции с одной стороны нагревают исходную смесь и увеличивают скорость реакции, с другой стороны – выступают как инертные примеси, уменьшающие концентрацию реагентов и скорость химического превращения. Так как скорость реакции зависит от температуры в геометрической прогрессии, то суммарный эффект может оказаться положительным, т.е. скорость реакции ускоряется [7]. Совместное влияние этих двух факторов очевидно необходимо учитывать в моделях турбулентного горения.

Кроме того, генерирование турбулентности может быть вызвано не только гидродинамической обстановкой. Если по каким-либо причинам, например, при увеличении концентрации окислителя (кислорода) или начального подогрева горючей смеси, стандартная скорость нормального распространения пламени увеличивается, то уже сам процесс горения генерирует турбулентность. Установлено экспериментально, что интенсивность турбулентности, генерируемой процессом горения, превышает интенсивность турбулентности, инициализируемой внешним источником.

В [9] предложена полуэмпирическая модель. Сравнение результатов расчета характеристик горения метано-воздушной смеси при аварийном выбросе топлива в диапазоне массы от 1 до 5 000 тонн с экспериментальными данными подтверждает адекватность динамической вычислительной модели горения углеводородов.

В данной работе предложенная углеводородная модель используется для прогнозирования предела огнестойкости.

### **Разрушения в номинальном режиме**

При высокотемпературном нагреве в бетоне происходят сложные физико-химические и физико-механические 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 Са(ОН)<sub>2</sub>, 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 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 - кварца в -кварц в граните с увеличением объема заполнителя. При температуре свыше 750 °С структура бетона полностью разрушается.

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  $m_T$  [10]. Учитывая, что пределы прочности и пределы текучести материалов приравнены к нормативным сопротивлениям, имеем

$$m_T = R^T / R^H, \quad (5)$$

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, 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  $T_{кр}$ .

### Экспериментальная часть

В серии работ [11,12] изучалось явление взрывообразного разрушения бетона. Опасность этого явления заключается в сокращении предела огнестойкости бетонных конструкций во время пожара. Опыты проводились в огневых печах при воздействии пламени «стандартного пожара» на бетонные плиты размером 1200x1200x250 мм. Температура в поперечном сечении измерялась на десяти различных расстояниях от поверхности. Увеличение собственных сжимающих напряжений достигалось сварной металлической рамой, устанавливаемой по периметру некоторых плит при их бетонировании. Экспериментально установлено:

- фазовый переход влаги в структуре бетона происходит в температурном интервале 100 – 350 °С;
- лавинообразное образование микротрещин происходит при температуре 600 °С;
- на разрушение бетона на глубину до 75 мм существенное влияние оказывает собственные сжимающие напряжения;
- на рост капиллярного давления влияние оказывает уменьшение сечения пор за счет уноса частиц связующего испаряющейся влагой.

В [12] приводится таблица зависимости температуры кипения влаги от радиуса капилляра и капиллярного давления. Например, для радиуса капилляра  $r = 1$  мкм и капиллярного давления  $p_k = 1$  атм. температура кипения  $T_k = 120$  °С, а при  $r = 0,08$  мкм и  $p_k = 15$  атм.  $T_k = 200$  °С.

Результаты исследования взрывного разрушения бетона, выполненные зарубежными специалистами, опубликованы в трудах Национального института стандартов США (NIST) [13] по огнестойкости бетона. На рис. 1 показана температурное поле в бетоне, измеренное термопарами, расположенными на расстояниях 1,5; 3,5; 19; 76 мм от поверхности, а на рис. 2 – качественная картина разрушения бетона.

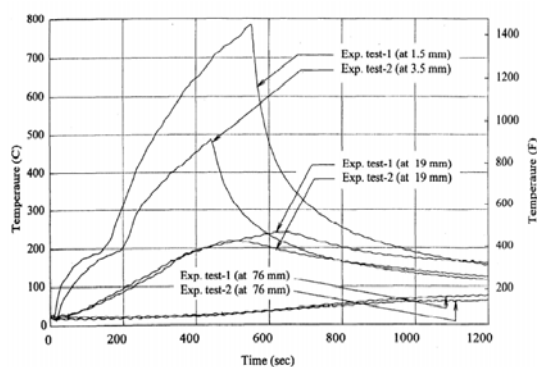


Рис. 1 - Температурное поле в бетоне

Давление в порах достигает 2-3 МПа и является одной из основных причин разрушения бетона.

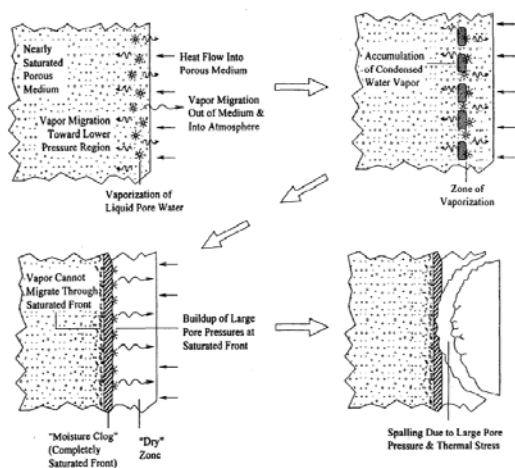


Рис. 2 - Качественная картина взрывного разрушения бетона при нагреве излучением

Экспериментальные данные получены в процессе одномерного нагрева образцов излучением от керамического блока при 925 0С\*.

### Последствия специального нагрева

Имитация высокоинтенсивных тепловых потоков в лабораторных условиях на относительно большой равномерно облучаемой поверхности является сложной технической задачей. В зависимости от важности проблемы, связанной с социальной и экологической безопасностью, исследователи создают дорогостоящее лабораторное оборудование и проводят необходимые эксперименты с целью моделирования опасных аварийных ситуаций.

В настоящее время теория разрушения бетона, учитывающая весь комплекс факторов теплового воздействия и механизмы высокотемпературных процессов разрушения, далека от своего завершения.

В связи с этим, в различных областях техники и технологиях создаются физические модели различных реальных объектов.

**Атомная энергетика.** При гипотетической аварии на атомной электростанции (АЭС) с разрушением активной зоны реактора (АЗ) возможен

выход АЗ за пределы корпуса реактора в результате расплавления днища. Следующий этап развития аварии характеризуется взаимодействием осколков АЗ с бетонным основанием шахты реактора. Тепловое воздействие на бетон расплавленных материалов при температуре порядка 2000 0С приводит к термическому разложению бетона.

Специалистами из АТОМЭНЕРГОПРОЕКТА [14] представлены экспериментальные данные по скорости термической эрозии бетона марки М200, использующегося при строительстве реакторных шахт АЭС. Тепловое воздействие тяжелой аварии имитировалось расплавом с начальной температурой 1500 0С и индукционным нагревом мощностью 36,6 кВт. Расплав воздействовал на бетонный образец диаметром 300 мм и высотой 200 мм. Следовательно, удельная нагрузка составляла 520 кВт/м<sup>2</sup>. Температура измерялась по оси бетона с шагом 10 мм. По температурным измерениям скорость эрозии бетона по осевой линии составила 1,4 мм/мин.

### Теплотехнологии.

Применение пиротехнических составов (ПС) в качестве высокотемпературных тепловых источников для сварки, пайки металлических элементов и термической обработки сварных соединений впервые предложено в [15]. Для количественной оценки теплового воздействия ПС на сварные объекты измерялась температура в граничных точках системы «ПС – подложка». Моделирование процессов энергопереноса в системе не проводилось.

### Нефтехимия.

Использование энергоёмких термитных смесей для увеличения продуктивности нефтяных скважин является предметом многих исследований (например, [16,17]). В [17] отмечается, что эффективное управление процессом нагрева нефтяных скважин возможно только на основе детальной информации обо всем комплексе процессов, протекающих в элементах системы из источника нагрева и объекта. Но в работе рассматриваются только теплоотдача от горячей наружной стенки теплового источника в окружающую среду.

**Пожарная безопасность.** Для имитации реальных потоков теплового излучения от огненных шаров и пожаров разлития в авариях в нефтехимической промышленности в [18,19] предлагается специальный метод высокоинтенсивного нагрева элементов конструкций за счет химической энергии пиротехнических составов. Первая простейшая модель процесса взаимодействия ПС с бетоном представлена в [20].

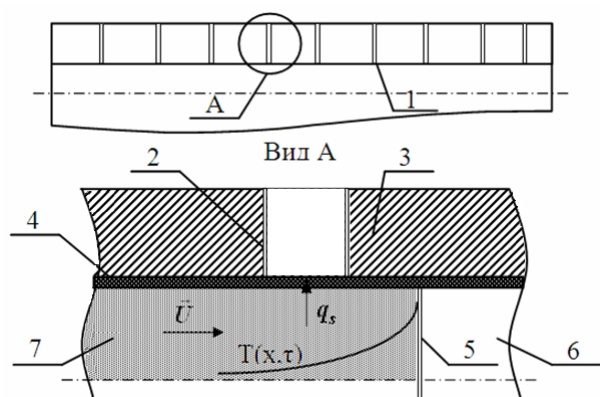
В данной работе критерии образования поверхностных трещин и анализ развития объемных трещин получили дальнейшее развитие на основании специального эксперимента, описание которого приводится ниже.

Эксперимент организован следующим образом. Смесь цемента, заполнителя и воды заливается в разборный кубический контейнер с ребром 200 мм и с центральным сквозным отверстием (шпуром) диаметром 26 мм. Для измерения температуры в бетонном блоке при

\*Для адекватной интерпретации данных [13] рис. 1, 2 сканированы с оригинала статьи.

изготовлении образцов в процессе заливки размещается 12 термопар с заданным шагом. Ближайшая к поверхности ПС термопара расположена на расстоянии 2 мм от обогреваемой поверхности. Распределение удельных тепловых потоков на поверхности бетона измерялось сканирующими калориметрами.

Схема эксперимента представлена на рис. 3. Распределения температуры по толщине блока и тепловых потоков на обогреваемой поверхности фиксируются на персональном компьютере аналого-цифровым преобразователем [21].



**Рис. 3 - Схема сканирующего калориметра: 1 – набор медных калориметров; 2 – теплоизолятор (слюда); 3 – стальная пластина (объект); 4 – негоревший слой ПС; 5 – фронт горения; 6 – исходный состав; 7 – твердые продукты горения (шлаки);  $\vec{U}$  – скорость движения фронта горения;  $T(x, \tau)$  – распределение температуры в шлаке;  $q_s$  – плотность теплового потока теплопередачи**

Фронт горения разделяет образец ПС на две зоны: исходный состав и продукты горения, в виде пористого остатка (шлаков). Во фронте горения происходит превращение химической энергии горючего в энтальпию продуктов горения. Из-за гидравлического сопротивления шлаков в процессе образования газообразных продуктов возникает избыточное давление порядка 2 - 3 атмосфер, которое релаксирует при фильтрационном переносе газа через пористый слой.

Таким образом, при моделировании номинальных температурных режимов пожара последствиями нагрева бетона являются образование микротрещин и отколов. Основная причина этого явления объясняется увеличением капиллярного давления пара, образующегося при нагреве.

При высокоинтенсивном нагреве, имитирующем реальные сценарии пожара в нефтегазовом комплексе, в бетоне кроме микротрещин могут возникнуть сквозные (магистральные) разрушения. Понимание механизма возникновения и развития магистральных трещин и обоснование теоретических подходов количественного описания этого явления возможно только методом математического моделирования.

## Математические модели нагрева

**Модель нагрева бетона.** Для расчета поля температур в бетоне строится математическая модель теплообмена в системе «ПС – бетон». По термопарным измерениям в обеих фазах для продуктов горения ПС принимается однотемпературная 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.

Между элементами системы в связи с интенсивным теплоотводом образуется контактный слой толщиной 1 – 2 мм из недогоревшего ПС и воздушного зазора, через которые осуществляется теплопередача различными механизмами теплообмена. Расчет контактного теплового сопротивления является трудноразрешимой задачей. Поэтому интенсивность теплообмена между элементами системы «ПС – бетон» рассчитывается по разности температур между ядром ПС и поверхностью бетона:

$$q_s = a_s (T_u - T_b) \quad (6)$$

где  $T_u$ ,  $T_b$  – температура шлаков и бетона;  $a_s$  – коэффициент теплопередачи в месте контакта ПС и бетона определяется экспериментально с помощью сканирующего калориметра;  $a_v = a_s \frac{2}{R_0} = a_s \cdot S$ ,  $S$  – площадь поверхности контакта между шлаком и бетоном.

При допущении незначительного перепада температур по оси бетона уравнение энергии для бетона записывается в виде:

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

где  $c(T)$ ,  $\rho$ ,  $\lambda(T)$  – теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности материала конструкции соответственно;  $\omega_0$  – начальное влагосодержание;  $L$  – теплота испарения влаги.

Кроме того, в математической постановке задачи высокоинтенсивного нагрева бетона учитывается объемное испарение влаги, описываемое формально-кинетическим уравнением [22]:

$$\frac{\partial \eta(x, \tau)}{\partial \tau} = k(1 - \eta(x, \tau)) \exp\left(\frac{-L_0}{RT}\right) \quad (7)$$

где  $\eta(x, \tau)$  – глубина (степень) фазового превращения влаги при объемном испарении;  $k$  – предэкспонент;  $L_0$  – эффективная энергия активации испарения.

В стандартных методах расчета влияние влажности бетона при нагреве и фазовом превращении учитывается введением эффективного коэффициента температуропроводности. Зависимость теплофизических свойств бетона от температуры учитывалась в модели (6).

Модель (6,7) численно решалась при граничных условиях (3,4). В данной работе в отличие от стандартного метода расчета предела огнестойкости в качестве граничных условий (кроме стандартного пожара) предусмотрено воздействие теплового излучения пламени пожаров при различных аварийных сценариях выброса углеводородного топлива – огненных шаров, пожара разлития, факельного горения, пожара-вспышки.

Моделирование характеристик реального пожара «огненный шар» в лабораторных условиях осуществлялось методом специального нагрева, а расчет граничных удельных тепловых потоков для всех возможных аварийных сценариев проводится по математической модели, представленной в следующем параграфе.

*Модель источника нагрева.* При умеренных скоростях течения газа, когда работа внешних сил и кинетическая энергия газового потока малы по сравнению с энтальпией твердых и газообразных продуктов, дифференциальное уравнение конвективного теплообмена между продуктами горения и поверхностью бетона можно записать в виде [23]:

$$\frac{\partial(H+h)}{\partial\tau} = \text{div}(\lambda_{np} \cdot \text{grad}T_{np}) + c_g \rho_g \vec{U}_g \cdot \text{grad}T_g + q_v \quad (8)$$

где  $H$ ,  $h$  – энтальпия твердых и газообразных продуктов соответственно;  $q_v$  – интенсивность внутреннего источника;  $\lambda_{np}, T_{np}$  – коэффициент теплопроводности и температура продуктов соответственно;  $c_g \rho_g$  – теплоемкость и плотность газообразных продуктов горения  $T_g$  – температура газообразных продуктов;  $\vec{U}_g$  – вектор скорости газов;

В связи с распределенным по координате объемным источником за счет теплоотвода от высокотемпературных продуктов горения к относительно холодной подложке физическое поле потенциала переноса температуры будет нестационарным и неоднородным [24].

Тогда для неподвижных шлаков механизмом энергопереноса будет молекулярная теплопроводность (первое слагаемое в уравнении (8)), а для газов – молекулярная теплопроводность и молярный (конвективный) массо- и энергоперенос (скалярное произведение векторов в уравнении (8)).

$T_g = T_{np}$ , но для выделения механизма переноса энергии обозначаются разными индексами.

Для одномерной постановки задачи уравнение (8) в эйлеровой координате запишется в виде:

$$c_{np} \rho_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial \tau} = \lambda_{np} \nabla^2 T_{np} - c_g \rho_g U_g \nabla T_g - \alpha_v (T_{np} - T_b) \quad (9)$$

где  $c_{np}, \rho_{np}$  – теплоемкость и плотность продуктов горения;

Знак минус перед вторым слагаемым в правой части (9) связан с противоположной ориентацией векторов  $\vec{U}_g$  и  $\text{grad}T_g$ .

Для численного решения (9) 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 теплоотвод в подложку и конвективный перенос газообразными продуктами горения.

При этом шаг интегрирования по времени делится на два дробных шага. На первом скорость газа принимается равной нулю и решается уравнение (10) и рассчитывается уменьшение температуры за счет теплоотвода, на втором шаге по уравнению (11) рассчитывается приращение температуры за счет конвективного переноса газообразными продуктами.

Начало интегрирования начинается с момента времени, когда фронт горения доходит до фиксируемой точки в середине бетонного блока.

$$\left( \frac{\partial T_{np}}{\partial \tau} \right)_n = - \frac{\alpha_v}{c_{np} \rho_{np}} (T_{np} - T_b) \quad (10)$$

$$\left( \frac{\partial T_{np}}{\partial \tau} \right)_k = - \frac{c_g \rho_g U_g}{c_{np} \rho_{np}} \cdot \frac{\partial T_g}{\partial x} \quad (11)$$

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

Значение  $\alpha_v$  идентифицируется по данным автоматизированного эксперимента с сканирующим калориметром.

Для решения уравнения (11) необходимо знание распределения гидродинамической скорости газа. Чтобы получить указанное распределение скорости газообразных продуктов горения предполагается, что в пористом слое шлаков выполняется закон Дарси:

$$\vec{U}_g = - \frac{\kappa}{\mu} \text{grad } p \quad , \quad (12)$$

где  $\mu$  – вязкость газообразных продуктов;  $\kappa$  – константа, зависящая только от структуры пористого шлака;  $p$  – давление газов.

Если известны распределение давления и свойства шлаков, то из (12) определяется скорость газов, а из (11) – конвективная составляющая приращения температуры в фиксированной точке пространства.

### Критерии разрушения

В предыдущих работах авторов методами физического и математического моделирования процессов взаимодействия высокоинтенсивных тепловых потоков с бетонными элементами установлено, что при критических градиентах температуры в опасном сечении после достижения критической температуры (для тяжелого бетона 600 °С) возникают сквозные трещины и объемное

разрушение элемента конструкции. Для количественной характеристики явления возникновения и развития трещин предложен температурно-градиентный критерий:

$$\frac{|\text{grad}T|}{T_{кр}} = K \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}} \quad (13)$$

где  $|\text{grad}T|$  – градиент температуры на подвижной границе  $\xi$ , на которой достигается значение критической температуры  $T_{кр}$ ;  $K$  – константа;  $a$  – температуропроводность бетона;  $\tau$  – огнестойкость.

С помощью критерия (13) расчетно-экспериментальным методом обоснована инженерная методика определения огнестойкости бетона при одностороннем высокоинтенсивном нагреве

В настоящее время теория разрушения бетона, учитывающая весь комплекс физико-химических факторов теплового воздействия и механизмы высокотемпературных процессов разрушения, далека от своего завершения. Проблема теплового удара – одна из центральных в термомеханике. Проводимые исследования для решения данной проблемы с использованием моделей динамической термоупругости получили широкое развитие при изучении закономерностей термонапряженного состояния в изотропных и анизотропных упругих телах.

Очевидно, можно выделить два подхода в теоретическом описании развития трещин. Один из них для однородных изотропных тел без учета физико-химических превращений впервые обоснован Даниловской В.И. [25]. Применительно к одностороннему равномерному нагреву элементов конструкций можно записать:

$$\sqrt{2} \frac{\partial^2 U(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 U(x, \tau)}{\partial \tau^2} = S \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (14)$$

Здесь  $V$  – скорость распространения упругой волны,  $U(x, \tau)$  – напряжение,  $T(x, \tau)$  – температура. В динамической задаче описывается термоупругая волна со скачком напряжения на фронте волны:

$$\sigma = E\alpha T_0 / (1 - 2\nu), \quad (15)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения;  $T_0$  – начальная температура;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Другой подход основывается на первом начале термодинамики [26]:

$$dE + dU_m = dA^{(e)} + dQ^{(e)} + dQ^{**} \quad (16)$$

где  $dU_m$  – изменение внутренней энергии рассматриваемого тела;  $dE$  – изменение его кинетической энергии;  $dA^{(e)}$  – элементарная работа внешних макроскопических сил;  $dQ^{(e)}$  – элементарный приток тепла к телу извне;  $dQ^{**}$  – элементарный приток к телу извне других, нетепловых видов энергии.

На основании обобщения различных подходов в теории развития макроскопических трещин авторами предлагается новые аспекты в дальнейшем

развитие исследований в прогнозировании возникновения разрушительных сквозных трещин в бетоне.

## 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, пожара-вспышки.

3. Адекватность модели реальным аварийным ситуациям, возникающим при горении углеводородов, подтверждена методом специального локального нагрева образцов бетона.

## Литература

1. Федеральный закон РФ от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Принят ГД ФС РФ от 04.07.2008 г.
2. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М.: Госстандарт России, 1998. 84 с.
3. В.М. Ройтман, Пожаровзрывобезопасность, 16,7, 6 – 11 (2007);
4. А.Н. Гилетич, И.Р. Хасанов, С.В. Зотов, Пожарная безопасность, 1, 95 – 108, (2012);
5. А.С. Федоров, В.Е. Леватский, И.С. Молгадский, Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций, Издательство Ассоциации строительных Вузов, Москва, 2009, 408 с.;
6. ISO-834-1:1999. Fire-resistance tests –Elements of building construction – Part 1: General requirements.
7. Я.Б. Зельдович, Математическая теория горения и взрыва, Наука, Москва, 1980, 478 с.;
8. Г.М. Махвиладзе, Дж.П. Робертс, С.Е. Якуш, Физика горения и взрыва, 35, 4, 12-23 (1999);
9. Р.Ш.Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин, А.М. Закиров, Г.М. Закиров, Известия ВУЗов. Проблемы энергетики, 11-12, 26-31 (2008);
10. М.Я. Ройтман Противопожарное нормирование в строительстве, Стройиздат, Москва, 1985, 590 с.;
11. В.А. Руссо, В.Н. Морозов, Л.В. Павлова, Огнестойкость строительных конструкций, 6, 75-83(1978);
12. В.И. Гельмиза, Огнестойкость строительных конструкций, 8, 85-89 (1980);
13. G.R. Consolazio, M.C. McVay, J.W. Rish, International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, 125, February 13-14 (1997);
14. Л.А. Домбровский, Л.И. Зайчик, Ю.А. Зейгарник, Теплообмен в современной технике, 75-92 (1998);
15. С.В. Сериков, Ф.П. Мадякин, Р.Ш. Идиатуллин, Физика горения и взрыва, 27, 4, 73-78 (1991);
16. Е.Г. Белов, И.Р. Субханкулов, А.М.Коробков, С.В. Михайлов, Вестник КГТУ, 6, 235-237 (2008);
17. В.П. Кобяков, И.В. Новиков, М.А. Теплофизика высоких температур, 49, 2, 243-250 (2011);
18. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.А. Тучкова, М.А. Закиров, О.Ю. Харитонов, Вестник Казанского технологического университета, 8, 41-50 (2010);
19. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.А. Тучкова, О.Ю. Харитонов, А.В. Качалкин, Пожаровзрывобезопасность, 19,5, 48-53 (2010);

20. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.Ю.Харитонов, О.А.Тучкова, Химическая и радиационная физика, 4, 579-583 (2011);
21. Р.Ш. Еналеев, Н.А. Абдуллин, Р.Р. Димухаметов, В.А. Качалкин, Тепломассообмен-ММФ-2004, (2004)
22. Г.Н. Исаков, Некоторые вопросы методологии кинетического эксперимента при термическом анализе полимерных материалов и композитов на их основе, Деп. ВИНТИ, 1980, 4207, 20 с.;
23. А.И. Леонтьев, Теория тепломассообмена, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1997, 682 с.;
24. Л.Г. Лойцянский, Механика жидкости и газа, Наука, Москва, 1950, 676 с.;
25. В.И. Даниловская, Прикладная математика и механика, 14,3, 341 (1952);
26. Л.И. Седов, Механика сплошной среды. М.: Изд-во «Наука», 1970, 492 с.

---

© **Р. Ш. Еналеев** – канд. техн. наук, доц. КНИТУ, firepredict@yandex.ru; **Р. Р. Димухаметов** – канд. техн. наук, доц. каф. ХТГС КНИТУ, dim\_rus2000@mail.ru; **О. А. Тучкова** - специалист ООО «Эксперт бюро», touchkova-o-a@mail.ru; **О. Ю. Харитонова** – инж. ЦУП КНИТУ, haritonova\_ola@mail.ru.