

Р. Ш. Еналеев, О. А. Тучкова, В. С. Гасилов,
С. В. Анаников

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Ключевые слова: элемент конструкции, модели теплообмена, критерий разрушения, метод прогнозирования.

Разработана математическая модель газодинамики и энергопереноса в пористых продуктах горения пиротехнических составов. Идентифицированы параметры теплопередачи в системе «тепловой источник – нагреваемый объект». Обоснован градиентно-температурный критерий разрушения бетонных конструкций. Предложен инженерный метод прогнозирования предела огнестойкости элементов конструкций при техногенных авариях.

Key words: construction element, heat transfer models, destruction criterion, prediction method.

The mathematical model of gas dynamics and energy transfer was developed for porous products of pyrotechnic compositions burning. The heat transfer parameters were identifying in the system "heat source - heated object." Gradient-temperature criterion was substantiated of concrete constructions destruction. Engineering method of the constructions elements fire resistance limit predicting was proposed in technogenic accidents.

Введение

В соответствии с СТО «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» пределы огнестойкости устанавливаются в условиях стандартных огневых испытаний. По международному стандарту ISO-834 [1] стандартный пожар аппроксимируется формулой подъема температуры окружающей среды до 1200⁰С в течение нескольких часов.

Однако в реальных сценариях развития техногенных пожаров средняя температура горения углеводородов достигает 1700⁰С, а тепловые потоки излучения – 450 кВт/м² при времени горения несколько десятков секунд.

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

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

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.

Экспериментальные исследования огнестойкости

Предел огнестойкости конструкций является условной величиной и не соответствует фактическому времени, в течение которого конструкция может потерять свою несущую способность в условиях «реальных» пожаров. Поэтому при проектировании возникает

необходимость обоснованного перехода от «реального» пожара к эквивалентной продолжительности «стандартного» испытания.

В [2] на основе испытаний на огнестойкость при горении углеводородов в реальных условиях предлагается устанавливать соответствие продолжительности «реального» пожара «стандартному» по эквивалентной степени повреждения конструкции.

В КНИТУ на кафедре ХТГС впервые предложен метод моделирования высокоинтенсивных тепловых потоков с помощью химической энергии тепловых пиротехнических составов [3]. На кафедре химической кибернетики спроектирован и изготовлен ряд сканирующих калориметров с автоматизированной обработкой данных на компьютере [4]. Построены математические модели процессов энергопереноса в системе «тепловой источник – нагреваемый объект» [5]. В [6] на основании измерения температурного поля в бетоне (рис.1) впервые экспериментально установлено, что при высокоинтенсивном нагреве критерий критической температуры разрушения бетона [1] должен быть сопряжен каким-либо образом с градиентом температуры в опасном сечении.

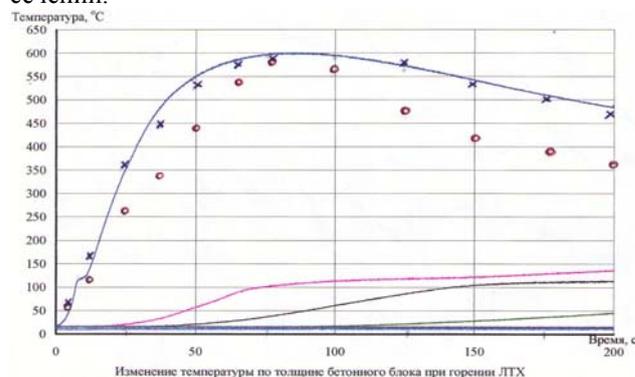


Рис. 1 - Температурное поле в бетоне при нагреве тепловым составом: — — эксперимент; x – модель теплообмена; o – тепловое излучение огненного шара

Для измерения температурного поля в бетонном блоке при заливке жидкого состава перпендикулярно его геометрической оси монтируются термопары на различных расстояниях от поверхности отверстия. Результаты вычислительных экспериментов по моделированию тепловых потоков в системе «тепловой состав – бетон» [7] и пламени от огненного шара [8], приведены на рис. 1 в виде точек.

Для измерения плотности теплового потока от шлаков к бетону использовался трубчатый калориметр. Температура измерялась термопарами, давление – электропневмопреобразователем с тензодатчиком. Показания датчиков в цифровом формате фиксируют динамику изменения давления и температуры. Результаты измерений представлены на рис. 2.

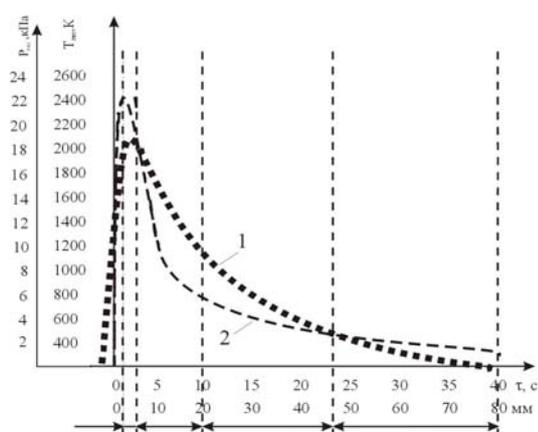


Рис. 2 - Поле температуры и давления в продуктах горения тепловых составов: 1 – давление; 2 – температура

Интенсивность теплообмена между элементами системы рассчитывается по разности температур между ядром шлаков и поверхностью бетона:

$$q_s = a_s(T_u - T_b) \quad (1)$$

где T_u , T_b – температура шлаков и бетона; a_s – коэффициент теплоотдачи в месте контакта шлака и бетона определяется экспериментально с помощью сканирующего калориметра.

Коэффициент теплоотдачи a_s идентифицировался в вычислительном эксперименте. Его значение рассчитывалось из условия пропорциональности плотности теплового потока от шлаков к бетону скорости роста температуры шлаков.

В данной работе предлагается дальнейшее развитие постановки задачи моделирования между элементами системами с учетом рассмотрения газодинамических и энергетических процессов в продуктах горения.

Практический аспект такой постановки задачи расширяет возможности управления процессом горения с целью регулирования динамики нагрева объектов, контактируемых с тепловым источником.

Модели газодинамики и энергии

Уравнение неразрывности для фильтрующих газообразных продуктов горения через пористую структуру шлаков имеет вид:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div} \rho \bar{u} = 0, \quad (2)$$

где m , ρ – пористость и плотность шлаков соответственно; \bar{u} – скорость газов.

При определенных допущениях можно записать для газообразных продуктов уравнение состояния:

$$\rho = \rho(P, T), \quad (3)$$

где P, T – давление и температура газа соответственно.

Для получения замкнутой системы уравнений предполагается, что в пористом слое выполняется закон Дарси, который справедлив для многих явлений:

$$\bar{u} = -\frac{k}{\mu} \text{grad} P, \quad (4)$$

где μ – вязкость газа; k – коэффициент проницаемости по Дарси, принимается не зависящим от свойств газа.

Если систему координат связать с фронтом горения (эйлерова координата), то (2) можно записать в виде:

$$\text{div} \rho \bar{u} = 0. \quad (5)$$

Или

$$\frac{\partial (\rho \bar{u} / T)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\rho \bar{u}}{T} = \text{const} \quad (7)$$

Уравнение теплопередачи для пористого слоя имеет вид:

$$c_{us} \rho_{us} \frac{\partial T_u}{\partial \tau} = \lambda_{us} \nabla^2 T_u - c_g \rho_g U_g \nabla T_g - \alpha_v (T_u - T_b), \quad (8)$$

где $(c\rho)_{us}$, λ_{us} – произведение теплоемкости на плотность, теплопроводность шлаков соответственно; $c_g \rho_g$ – теплоемкость и плотность газов.

В эйлеровой координате (8) запишется, как

$$\lambda_{us} \nabla^2 T_u - c_g \rho_g U_g \nabla T_g = \alpha_v (T_u - T_b). \quad (9)$$

Для однотемпературной модели $T_u = T_g$.

Скорость газов можно найти из (4) и (7). Но предпочтительнее из (7), т.к. не нужно определять коэффициент проницаемости шлаков. Тогда из (9) можно найти эффективный коэффициент теплопроводности λ_{us} , значение которого обусловлено теплопроводным и конвективным механизмами теплообмена. После расчета вышеупомянутых величин можно по экспериментальным данным на рис. 2 количественно дифференцировать вклад механизмов излучения, конвекции и теплопроводности в кинетику теплопередачи от шлаков к бетону. Знание этих закономерностей

позволяет управлять процессом нагрева подложки тепловым составом.

Градиентно-температурный критерий разрушения

Обоснование градиентно-температурного критерия заключается в численном решении нелинейного уравнения Фурье и автоматизированной фиксации критической температуры и градиента температуры в любом сечении элемента конструкции в процессе нагрева пламенем пожара. В реализации предлагаемого подхода анализируются две крайние задачи.

В первой постановке 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_h – температура бетона на расстоянии шага численного интегрирования уравнения энергии h_x от подвижной границы. Тогда:

$$T_h - B \cdot \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}} = T_{кр}, \quad (10)$$

Далее, закон Фурье для плотности теплового потока записывается в виде:

$$q_x = -\lambda_{бет} \cdot \left| \operatorname{grad} T \right|_x, \quad (11)$$

где $\left| \operatorname{grad} T \right|_x$ – модуль проекции градиента температуры на координатную ось Oх; $\lambda_{бет}$ – теплопроводность бетона.

Разностный аналог модуля градиента температуры на подвижной границе можно записать в виде:

$$\left| \operatorname{grad} T \right| = \frac{|T_h - T_{кр}|}{h_x}. \quad (12)$$

После умножения обеих частей уравнения (12) на $\frac{1}{h_x}$ и несложных преобразований получено:

$$\frac{|T_h - T_{кр}|}{h_x} = B \cdot \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}} \cdot \frac{1}{h_x}. \quad (13)$$

Деление (13) на $T_{кр}$ дает

$$\frac{\left| \operatorname{grad} T \right|}{T_{кр}} = B \cdot \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}} \cdot \frac{1}{T_{кр} \cdot h_x}. \quad (14)$$

Перегруппировка переменных в (14) позволяет записать:

$$\frac{\left| \operatorname{grad} T \right|}{T_{кр}} = \frac{B}{h_x T_{кр}} \cdot \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (15)$$

Замена $K_1 = \frac{B}{h_x T_{кр}}$ в (15) приводит к выражению

$$\frac{\left| \operatorname{grad} T \right|}{T_{кр}} = K_1 \cdot \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (16)$$

Учитывая, что в диапазоне изменения параметров ξ , a , τ зависимость функции Крампта от аргумента близка к линейной можно записать

$$\frac{\left| \operatorname{grad} T \right|}{T_{кр}} = K_1 \cdot \frac{\xi}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (17)$$

Во второй краевой задаче в начальный момент времени 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:

$$q(\tau) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi a \tau}}. \quad (18)$$

Замена в (18) T_0 на $T_{кр}$, и запись $q(\tau)$ в общепринятом виде приводит к выражению

$$\lambda_{бет} \left| \operatorname{grad} T \right| = \frac{T_{кр}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{a\tau}}. \quad (19)$$

Или

$$\frac{\left| \operatorname{grad} T \right|}{T_{кр}} = \frac{1}{\lambda_{бет} \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{a\tau}}. \quad (20)$$

Обозначение

$$K_2 = \frac{1}{\lambda_{бет} \sqrt{\pi}} \quad (21)$$

позволяет из (20) получить

$$\frac{\left| \operatorname{grad} T \right|}{T_{кр}} = K_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{a\tau}}. \quad (22)$$

С использованием комплексов (критериев) (17) и (22) были обработаны данные вычислительного эксперимента для различных сценариев пожаров, включая «стандартный», горение углеводородов и термита. Результаты представлены на рис. 3.

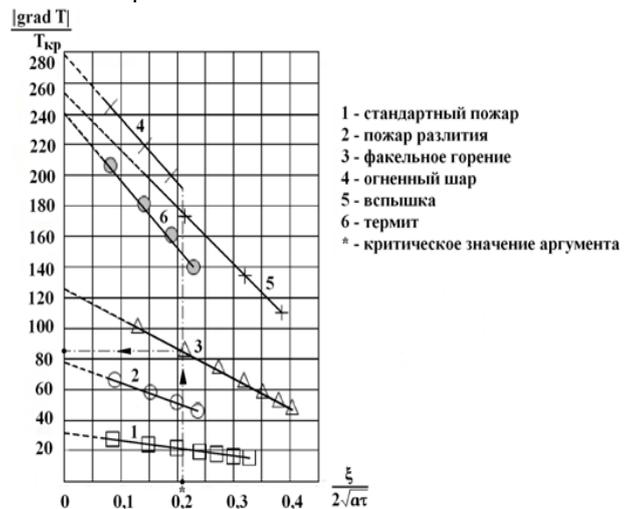


Рис. 3 - Зависимость приведенного градиента температуры от безразмерной координаты подвижной границы

Как видно из рис. 3, приведенный градиент температуры линейно зависит от безразмерного

комплекса $\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha t}}$ для каждого вида пожара с различными угловыми коэффициентами.

Инженерный метод оценки огнестойкости

В работах авторов [9, 10] методами физического и математического моделирования процессов взаимодействия высокоинтенсивных тепловых потоков с бетонными элементами установлено, что при критических градиентах температуры в опасном сечении по достижении критической температуры (для тяжелого бетона 600⁰С) возникают сквозные трещины и объемное разрушение элемента конструкции.

С помощью критерия (17) расчетно-экспериментальным методом обоснована инженерная методика определения огнестойкости бетона при одностороннем высокоинтенсивном нагреве

Для прогнозирования предела огнестойкости элемента конструкции из тяжелого бетона на силикатном заполнителе выбран вид пожара «факельное горение», который является наиболее распространенным сценарием развития пожара при авариях на газопроводах со сжатым природным газом.

Пределы огнестойкости и расстояния до сечений, в которых температура тяжелого бетона достигает критического значения (600⁰С), полученные в огневых испытаниях и при специальном нагреве при горении термита, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Критическое значение безразмерной координаты для различных условий нагрева

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

Эти данные можно также установить по графику рис. 3. и рассчитать критическое значение аргумента $\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha t_{кр}}}$ (отмечено звездочкой на рис. 3.).

Как видно из данных таблицы 1, 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 универсального критерия для прогнозирования предела огнестойкости.

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.

Таким образом, проблема теплового удара – одна из центральных в термомеханике. Ни один из известных теоретических подходов не дает количественного описания всего комплекса сложных физико-химических процессов при высокоинтенсивном нагревании бетона. Для оценки огнестойкости бетона в чрезвычайных ситуациях, связанных с углеводородными пожарами, необходимо разрабатывать экспериментально-расчетные методы огнестойкости бетона от воздействия высокоинтенсивных конвективно-радиационных потоков при крупномасштабном горении углеводородов в различных сценариях эволюции пожара: огненного шара, пожара разлития, факельного горения, пожара-вспышки.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.2099.

Литература

1. ISO-834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements.
2. А.С. Федоров, В.Е. Леватский, И.С. Молгадский, А.В. Александров. *Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций*. Издательство Ассоциации строительных Вузов, Москва, 2009. 408 с.
3. С.В. Сериков, Ф.П. Мадякин, Р.Ш. Идиатуллин. *Физика горения и взрыва*, 27, 4, 73 – 78 (1991).
4. И.А. Абдуллин, Р.Ш. Еналеев, Р.Р. Димухаметов. *Тепломассообмен-ММФ-2000, IV Минский международный форум* (Минск, 2000). Минск, 2000. Т. 4.
5. Р.Ш. Еналеев, И.А. Абдуллин, Р.Р. Димухаметов, В.А. Качалкин. *Тепломассообмен-ММФ-2004. V Минский международный форум* (Минск, 2004). Минск, 2004.
6. О.Ю. Харитонова, И.А. Абдуллин, К.В. Микрюков, Р.Р. Димухаметов. *Материалы докладов Современные проблемы специальной технической химии* (Казань, КГТУ, 2007). Казань, 2007. С. 354 – 356.
7. Р.Ш. Еналеев, Р.Р. Димухаметов, О.А. Тучкова, О.Ю. Харитонова. *Вестник Казанского технологического университета*, 10, 48 – 95 (2012).
8. 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).
9. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.А. Тучкова, М.А. Закиров, О.Ю. Харитонова. *Вестник Казанского технологического университета*, 8, 41 – 50 (2010).
10. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, С.В. Анаников. *LAP LAMBERT Academic Publishing*. Germany, 2012. 113 p.

© Р. Ш. Еналеев – канд. техн. наук, доц. каф. химической кибернетики КНИТУ, firepredict@yandex.ru; О. А. Тучкова – канд. техн. наук, ст. препод. каф. промышленной безопасности КНИТУ, touchkova-o-a@mail.ru; В. С. Гасилов – канд. техн. наук, доц. той же кафедры; С. В. Анаников – д-р техн. наук, проф. каф. химической кибернетики КНИТУ.