УДК 614.841

ОГНЕСТОЙКОСТЬ БЕТОНА: КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Еналеев Р.Ш., Анаников С.В., Теляков Э.Ш., Гасилов В.С.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, e-mail: firepredict@yandex.ru

Проведен анализ литературных данных по критерию разрушения бетона в условиях «стандартного» пожара. Разработана математическая модель с объемным источником испарения влаги для расчета температурного поля элементов конструкций при воздействии пламени пожаров. Обоснованы инвариантные к скорости высокоинтенсивного нагрева универсальные критерии разрушения железобетонных конструкций. В комплексных критериях учитывается как критическая температура, так и градиент температуры. Предложен метод прогнозирования предела огнестойкости элементов конструкций при различных сценариях развития пожара на предприятиях в производстве, при транспортировке и переработке энергоемких веществ.

Ключевые слова: элемент конструкции, энергоемкие вещества, модели пожара, критерии разрушения

FIRE RESISTANCE OF CONCRETE: DESTRUCTION CRITERIA

Enaleev R.S., Ananikov S.V., Telyakov E.S., Gasilov V.S.

Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: firepredict@yandex.ru

Analysis of literary data by criterion of concrete destruction in conditions of «standard» fire is lead. 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. Universal criteria of destruction, invariant to speed of high-intensive heating of ferro-concrete constructions, are proved. In complex criteria it is considered both critical temperature and a gradient of temperature. Method of forecasting of fire resistance limit is offered at different fire propagation scenarios on enterprises of extraction, transportation and processing of power-intensive substances.

Keywords: constructive element, power-intensive substance, models of fire, criteria of destruction

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 °C.

Однако в других альтернативных подходах в оценке предельного состояния капиллярно-пористого материала при интенсивном нагреве учитывается градиент температуры.

Следовательно, критерий критической температуры, используемый в стандартном методе оценки предела огнестойкости при воздействии «стандартного» пожара, каким-то образом должен быть сопряжен с критерием градиента температуры. Это обстоятельство мотивировало дальнейшие исследования авторов в области количественной оценки пожарного риска в части последствий воздействия высокоинтенсивного теплового излучения на элементы строительных конструкций.

Температурный и градиентный критерии огнестойкости

Проблема теплового удара является одной из центральных в термомеханике [3]. 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. Применительно к одностороннему равномерному нагреву элементов конструкций можно записать известное уравнение Даниловской [1, 2]

$$V^2\frac{\partial^2 U(x,\tau)}{\partial x^2}-\frac{\partial^2 U(x,\tau)}{\partial \tau^2}=S\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2};\quad (1)$$

здесь V – скорость распространения упругой волны, которая определяется из соотношения

$$V=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}},\qquad (2)$$

где λ и μ – постоянные Ламе; ρ – плотность материала; S – постоянная, выражается через коэффициент линейного температурного расширения материала α в виде

$$S=\alpha(2\mu+3\lambda).\qquad (3)$$

Граничные условия

$$-\lambda\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x}=q(\tau).\qquad (4)$$

Возникающее вследствие неравномерного нагрева материала напряжение $U(x,\tau)$, входящее в уравнение (1), удовлетворяет начальному условию

$$U(x,\tau)\big|_{\tau=0}=\frac{\partial U(x,\tau)}{\partial \tau}\bigg|_{\tau=0}=0.\qquad (5)$$

граничному условию

$$U(x,\tau)\big|_{x=0}=0.\qquad (6)$$

Нахождение аналитических решений такого рода динамических задач (даже в линейной постановке) связано с большими техническими трудностями и является длительным процессом. Таким образом, как видно из уравнения (1), в критериях разрушения бетона должен учитываться градиент температуры.

Обоснование комплексного критерия разрушения

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

В реализации предлагаемого подхода анализируются две краевые задачи.

В первой – рассматривается решение классической задачи Стефана по промерзанию грунта [5]

$$T_0 = B \cdot erf\,\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}} = T_з, \qquad (7)$$

где T_0 – температура талой воды; ξ– координата подвижной границы при постоянной температуре замерзания; $T_з$, B – постоянный коэффициент;α– коэффициент температуропроводности; τ – время.

Применительно к расчету огнестойкости предлагается задачу Стефана предельно 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

$$T_h - B \cdot erf\,\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}} = T_{кр}. \qquad (8)$$

Далее закон Фурье для плотности теплового потока записывается в виде:

$$q_x = -\lambda_{бет} \cdot \left|gradT\right|_x, \qquad (9)$$

где $|\mathrm{grad}T|_x$ – модуль проекции градиента температуры на координатную ось Ox; $\lambda_{бет}$ – теплопроводность бетона.

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

$$\left|gradT\;\right| = \frac{\left|T_h - T_{кр}\right|}{h_x}. \qquad (10)$$

После умножения обеих частей уравнения (10) на $\frac{1}{h_x}$ и несложных преобразований получено

$$\frac{\left|T_h - T_{кр}\right|}{h_x} = B \cdot erf\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}} \cdot \frac{1}{h_x}. \qquad (11)$$

Деление (11) на $T_{кр}$ позволяет получить

$$\frac{\left|gradT\;\right|}{T_{кр}} = B \cdot erf\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}} \cdot \frac{1}{T_{кр} \cdot h_x}. \qquad (12)$$

Перегруппировка переменных в (12) позволяет получить

$$\frac{\left|gradT\;\right|}{T_{кр}} = \frac{B}{h_x T_{кр}} \cdot erf\,\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (13)$$

Принимается $K_1 = \frac{B}{h_x T_{кр}}$. Тогда

$$\frac{\left|gradT\;\right|}{T_{кр}} = K_1 \cdot erf\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (14)$$

Кроме того, в диапазоне изменения параметровξ, α, τ зависимость функции Крампа от аргумента близка к линейной. Тогда

$$\frac{\left|gradT\;\right|}{T_{кр}} = K_1 \cdot \frac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (15)$$

Во второй краевой [4] 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

$$q(\tau) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi\alpha\tau}}. \qquad (16)$$

В нашем случае за T_0 принимается критическая температура $T_{кр}$

$$\lambda_{бет}\left|gradT\right| = T\frac{T_{кр}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (17)$$

Из (17) следует

$$\frac{\left|gradT\right|}{T_{кр}} = \frac{1}{\lambda_{бет}\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (18)$$

Принимается также, что

$$K_2 = \frac{1}{\lambda_{бет}\sqrt{\pi}}; \qquad (19)$$

получается

$$\frac{\left|gradT\;\right|}{T_{кр}} = K_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (20)$$

С использованием критериев (15) и (20) были обработаны данные вычислительного эксперимента для различных сценариев пожаров, включая стандартный, горение углеводородов и термита. Результаты представлены на рис. 1 и 2.

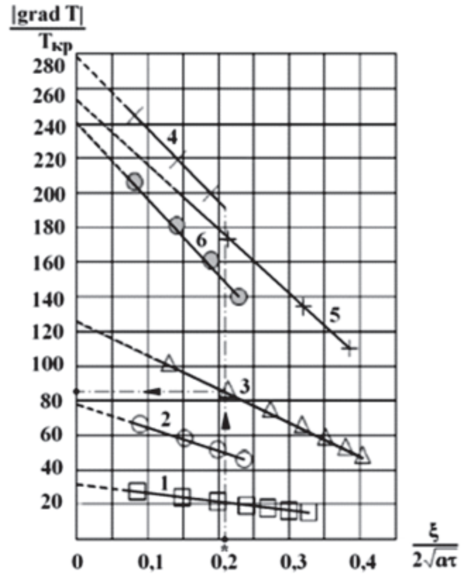

Рис. 1. Зависимость приведенного градиента температуры от безразмерной координаты подвижной границы:
*1 – стандартный пожар; 2 – пожар разлития; 3 – факельное горение; 4 – огненный шар; 5 – вспышка; 6 – термит; * – критическое значение аргумента*

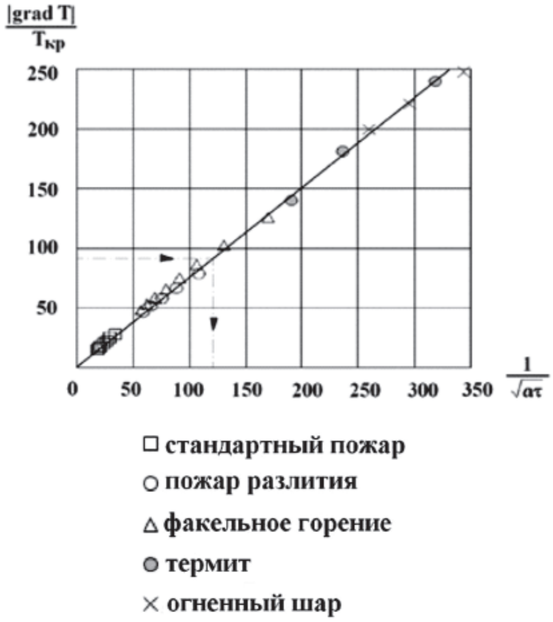

Рис. 2. Зависимость приведенного градиента температуры от комплекса $\dfrac{1}{2\sqrt{\alpha\tau}}$

Как видно из рис. 1, приведенный градиент температуры линейно зависит от безразмерного комплекса $\dfrac{\xi}{2\sqrt{\alpha\tau}}$ *для каждого вида пожара с различными угловыми коэффициентами, а из рис. 2 – линейная зависимость приведенного коэффициента от* $\dfrac{1}{2\sqrt{\alpha\tau}}$ *является единой для всех видов пожаров с угловым коэффициентом* $K_2 = 0{,}75$.

Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования предела огнестойкости элементов ж/б конструкций.

Как видно из результатов математического моделирования, время достижения максимальной температуры в приповерхностном слое бетона зависит от скорости горения ПС. На рис. 3 а скорость горения составляет 3,6 мм/с, на рис. 3 b – 2 мм/с.

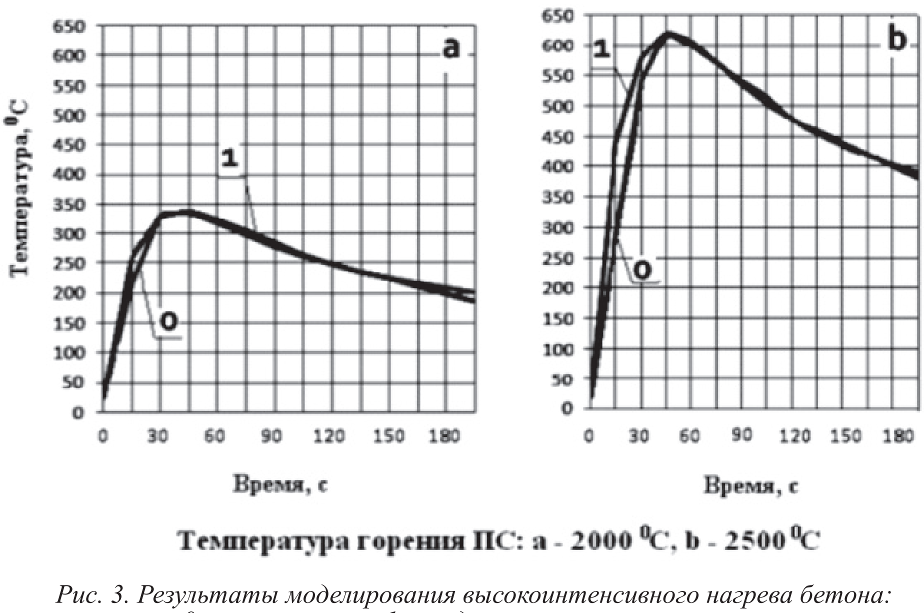

Рис. 3. Результаты моделирования высокоинтенсивного нагрева бетона: 0 – эксперимент, 1 – модель нагрева пиросоставом

Анализ результатов эксперимента нагрева бетона с использованием ПС показывает, что после сгорания ПС образование магистральных трещин на поверхности бетонных блоков и, как следствие снижение прочности наступает через 3–8 минут у образцов, критическая температура которых достигает значения 600 °C на глубине 2 мм от поверхности высокоинтенсивного нагрева и выше. При этом у образцов базового состава, у которого максимальная температура сохраняется более длительное время, протяженность трещин и ширина раскрытия являются максимальными, как это видно на рис. 4 и 5.

Рис. 4

Рис. 5

Выводы

1. Обоснован градиентно-температурный критерий разрушения бетона при высокоинтенсивном нагреве от продуктов горения углеводородного топлива.

2. Предложен вычислительный алгоритм предпроектной оценки огнестойкости элементов железобетонных конструкций при высокоинтенсивном нагреве.

Список литературы

1. Даниловская В.И. Об одной задаче термоупругости // Прикладная математика и механика. – 1952. – т. 16. – С. 341–344.

2. Даниловская В.И. Температурное поле и температурные напряжения, возникающие в упругом полупространстве вследствие потока лучистой энергии, падающей на границу полупространства // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1959. – № 3. – С. 129–132.

3. Карташов Э.М., Партон В.З. Динамическая термоупругость и проблемы термического удара // Итоги науки и техники. Серия «Механика деформируемого тела. – М.: ВИНИТИ, 1991. – Т. 22. – С. 55–127.

4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

References

1. Danilovskaya V.I. *Prikladnaya matematika i mechanika-Applied Mathematics and Mechanics, 1952,vol .16, pp. 341–344.*

2. Danilovskaya V.I. *Izvestiya AN SSSR. Mechanika i mashinostroenie-Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics and Mechanical Engineering, 1959, no. 3, pp. 129–132.*

3. Kartashov E.M., Parton V.Z. *Itogi nauki i techniki. seria «Mechanika deformiruemogo tela» – Results of science and technology. A series of «Mechanics of deformable bodies». Moscow, Russian Institute of Scientific and Technical Information, 1991, vol. 22, pp. 55–127.*

4. Carslaw G., Jaeger D. *Teploprovodnost tveordych tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow, Nauka, 1964, 488 p.

5. Lykov A.V. *Teoria teploprovodnosti* [The theory of heat conduction]. Moscow, HighSchool, 1967, 599 p.

Рецензенты:

Лашков В.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Машиноведение», КНИТУ, г. Казань;

Николаев А.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Оборудование пищевых производств», КНИТУ, г. Казань.

Работа поступила в редакцию 07.09.2012.