

УДК 614.841

ОГНЕСТОЙКОСТЬ БЕТОНА: ЕВРОПЕЙСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

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

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

Рассмотрены международные методы сравнительной оценки огнестойкости элементов строительных конструкций при воздействии «стандартного» пожара в огневых печах. Проведен анализ физико-химических процессов при разрушении бетона. Установлены непреодолимые трудности в математическом описании процессов разрушения бетона при высокоинтенсивном нагреве. Выделены современные подходы в расчете предельных состояний в условиях реального пожара. Показана перспективность подхода в моделировании последствий воздействия реального пожара путем получения зависимости эквивалентной продолжительности стандартных испытаний. Приводятся результаты авторских разработок по моделированию высокоинтенсивного нагрева реальных пожаров при горении энергоемких веществ. Акцентируется внимание на необходимости разработки расчетных методов прогнозирования последствий террористических актов на важных строительных объектах при комбинированном воздействии типа удар – взрыв – пожар.

Ключевые слова: элемент конструкции, противопожарное нормирование, стандартный пожар, моделирование реальных пожаров, критерии разрушения

FIRE RESISTANCE OF CONCRETE: EUROPEAN STANDARDIZATION IN CONSTRUCTING

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

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

International methods of comparative estimation of building constructive elements fire resistance are considered under influence «standard» fire in furnaces. Analysis of physical and chemical processes is lead at destruction of concrete. Insuperable difficulties in the mathematical description of concrete destruction processes under high-intensity heating are established. Modern approaches in calculation of extreme conditions in real fire are allocated. Perspectivity of the approach in modeling of influence consequences of real fire by obtaining of mathematical dependences of equivalent duration of standard tests is shown. Results of author's development on high-intensity heating real fires modelling are established at burning of energy-intensive materials. Attention is focused to necessities of development for settlement methods of consequences of acts of terrorism forecasting to the important constructive objects at the combined influence of push, explosion, fire.

Keywords: constructive element, fire regulation, standard fire, modelling of real fires, criteria of destruction

В соответствии с Федеральным законом [9] 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°C и плотности теплового потока до 25 кВт/м² в течение десятков минут. Однако в реальных сценариях развития техногенных пожаров, например, на нефтехимических предприятиях, средняя температура горения углеводородов достигает 1700°C, а тепловые потоки излучения – 450 кВт/м² при времени горения в несколько десятков секунд [3]. Методы испытаний и расчетно-аналитические оценки огнестойкости при таких термодинамических параметрах пламени пожара 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 теорети-

ческое 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.

Европейская система нормирования

Интеграция России в Европейское общество определяет необходимость гармонизации нормативных документов в различных сферах, в том числе и в области пожарной безопасности [2]. Система европейских стандартов (EN) для проектирования строительных объектов. Если EN не могут быть использованы, тогда для определения технических характеристик допускается применение оригинальных методов расчетного проектирования.

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 [12].

Температурная зависимость «стандартно-го» пожара представляется формулой:

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

где t_g – температура среды вблизи конструкции, °C; τ – время, мин; t_0 – начальная температура.

Полагается, что температурный режим (1) соответствует пожарной нагрузке 50 кг/м² древесины, поэтому этот режим называют «целлюлозной кривой».

Температурно-временная зависимость (1) в российских нормах регламентируется ГОСТ 3047.0–94, который разработан на основе [12] и используется при расчетном определении предела огнестойкости.

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

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

$$q_c = \alpha_c (t_g - t_m), \quad (2)$$

$$q_r = \varphi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \left[(t_r + 273)^4 - (t_m + 273)^4 \right], \quad (3)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи конвекцией; t_m – температура поверхности конструкции, °C; φ – угловой коэффициент облученности; ε_f – степень черноты пламени (пожара); σ – постоянная Стефана-Больцмана; t_r – 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).

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, от дисперсного состава заполнителей. Большое значение на свойства

бетона оказывает гашеная известь Ca(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 связанной 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 °C прочность бетона на сжатие практически не изменяется. Если влажность бетона превышает 3,5%, то при огневом воздействии и температуре 250 °C возможно хрупкое разрушение бетона. От 250 до 350 °C в бетоне образуются в основном трещины от температурной усадки бетона. До 450 °C в бетоне образуются трещины преимущественно от разности температурных деформаций цементного камня и заполнителей. Свыше 450 °C происходит нарушение структуры бетона из-за дегидратации Ca(OH)₂, когда свободная известь в цементном камне гасится влагой воздуха с увеличением объема. При температуре свыше 573 °C наблюдается нарушение структуры бетона из-за модифицированного превращения α -кварца в β -кварц в граните с увеличением объема заполнителя. При температуре свыше 750 °C 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 [7]. Учитывая, что пределы прочности и пределы текучести материалов приравнены к нормативным сопротивлениям, имеем:

$$m_T = R^T/R^H, \quad (4)$$

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, 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 $T_{кр}$.

Экспериментальные результаты. В серии работ [1, 8] изучалось явление взрывообразного разрушения бетона. Опасность этого явления заключается в уменьшении

предела огнестойкости бетонных конструкций во время пожара. Опыты проводились в огневых печах при воздействии пламени «стандартного» пожара на бетонные плиты размером 1200×1200×250 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°C;
- лавинообразное образование микротрещин происходит при температуре 600°C;
- на разрушение бетона на глубину до 75 мм существенное влияние оказывают собственные сжимающие напряжения;
- на рост капиллярного давления влияние оказывает уменьшение сечения пор за счет уноса частиц связующего испаряющейся влагой.

В [1] 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 $T_k = 120^\circ\text{C}$, а при $r = 0,08$ мкм и $p_k = 15$ атм. $T_k = 200^\circ\text{C}$.

Результаты исследования взрывного разрушения бетона, выполненные зарубежными специалистами, опубликованы в трудах Национального института стандартов США (NIST) [11] по огнестойкости бетона. На рис. 1 показана температурное поле в бетоне, измеренное термометрами, расположенными на расстояниях 1,5; 3,5; 19; 76 мм от поверхности, а на рис. 2 – качественная картина разрушения бетона.

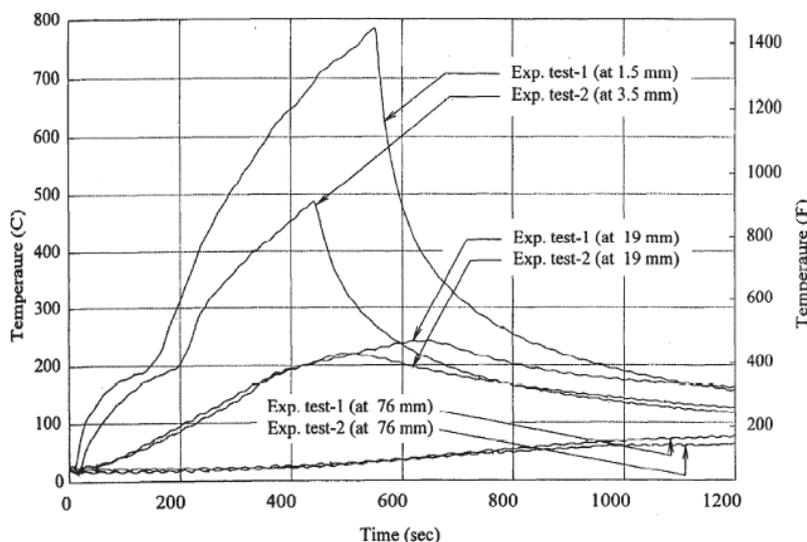


Рис. 1. Температурное поле в бетоне

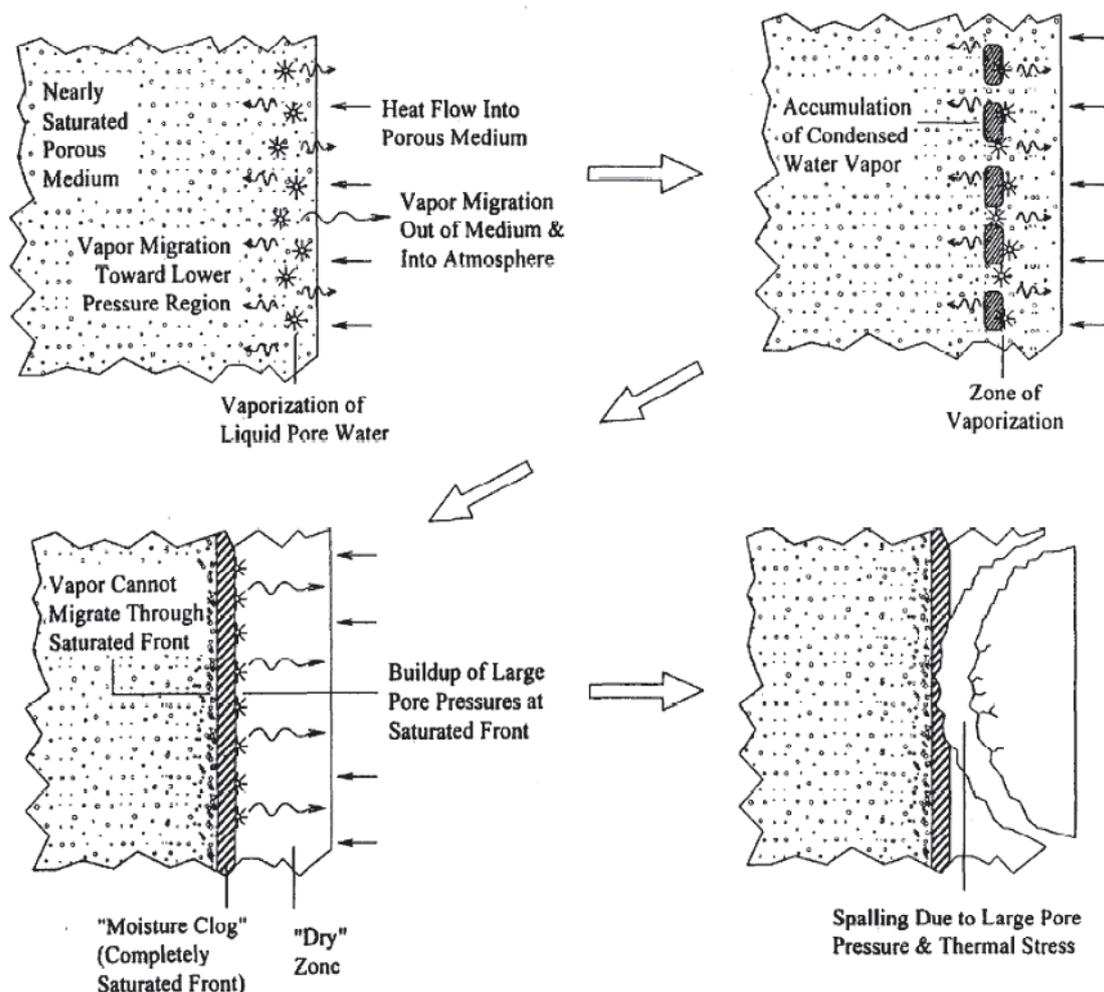


Рис. 2. Качественная картина взрывного разрушения бетона при нагреве излучением

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

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

Расчётные методы нормирования

Совершенствование существующих расчетных методов, разработка адекватных реальным ситуациям моделей и критериев разрушения имеют важное теоретическое и прикладное значение для оценки предельных состояний бетона при высокоинтенсивном нагреве.

При расчете воздействия «реального» пожара предел огнестойкости сравнивается со значением эквивалентной продолжительности «стандартного» пожара, воздействие которого на конструкцию вызывает аналогичные последствия. Так, в [10] в реальных условиях получены зависимости эквивалентной продолжительности стандартных испытаний для горения ЛВЖ и ГЖ.

В [4] предлагается математическая модель взаимодействия радиационно-конвективных потоков с поверхностью бетона и градиентно-температурный критерий разрушения бетона. Теория высокотемпературного разрушения бетона еще далека от своего завершения. Поэтому адекватность моделей и методов оценки огнестойкости должна подтверждаться экспериментально. Достоверность результатов проведенных исследований подтверждена в специальном эксперименте нагрева бетона пиротехническими составами с максимальной плотностью теплового потока при горении углеводородов в режиме огненного шара [5], а также в результате анализа данных по разрушению бетона при пожарах в атомной энергетике (разрушение бетонного корпуса реактора в авариях на АЭС) и строительстве (пожар на Останкинской башне).

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

объекты (например, разрушение зданий Всемирного торгового центра и Пентагона в Нью-Йорке 11 сентября 2011 г.). Прогрессирующее разрушение конструкций при комбинированных особых воздействиях типа удар – взрыв – пожар может привести к тяжелым человеческим жертвам и огромному материальному ущербу [6].

Таким образом, анализ литературных данных в области противопожарного нормирования в строительстве показывает, что «стандартные» огневые испытания позволяют проводить только сравнительную оценку элементов строительных конструкций.

Для оценки пределов огнестойкости в условиях реального пожара необходимо разрабатывать и совершенствовать существующие расчетные методы. Авторами в следующих публикациях приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований по моделированию теплового удара при высокоинтенсивном нагреве бетона в аварийных ситуациях, а также обоснованию градиентно-температурных критериев разрушения бетона и его композитов.

Список литературы

1. Гельмиза В.И. Оценка взрывоопасного разрушения бетона // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1980. – Вып. 8. – С. 85–89.
2. Гилетич А.Н., Хасанов И.Р., Зотов С.В. // Пожарная безопасность. – 2012. – № 1. – С. 95–108.
3. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М.: Госстандарт России, 1998. – 84 с.
4. Огнестойкость элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.А. Тучкова, О.Ю. Харитонова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 5. – С. 48–53.
5. Критерии огнестойкости элементов строительных конструкций на пожаровзрывоопасных объектах / Р.Ш. Еналеев, Н.М. Барбин, Э.Ш. Теляков и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 1. – С. 33–41.
6. Ройтман В.М. Нормирование защиты высотных зданий от прогрессирующего разрушения при комбинированных особых воздействиях // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 7. – С. 6–11.
7. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
8. Руссо В.А., Морозов В.Н., Павлова Л.В. Взрывообразное разрушение мелкозернистого силикатобетона при нагреве // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1978. – Вып. 6. – С. 75–83.
9. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон РФ от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ. Принят ГД ФС РФ от 04.07.2008 г. – 96 с.
10. Федоров А.С., Леватский В.Е., Молгадский И.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. – М.: Изд-во «Ассоциации строительных вузов», 2009. – 408 с.
11. Consolazio G.R., McVay M.C., Rish J.W. International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, MD. – 1997. – P. 125.
12. ISO-834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. – 1990. – 30 p.

References

1. Gelmiza V.I. Moscow, Vniipomvdsssr-All-Union Research Institute for Fire Prevention of Soviet Interior Ministry, 1980. Issue 8, pp. 85–89.
2. Giletich A.N., Hasanov I.R., Zotov S.V. *Pozarnaya bezopasnost-Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 95–108.
3. GOST 12.3.047-98. Fire safety processes. General requirements. Methods of control. Moscow, State Standard of Russia, 1998, 84 p.
4. Enalejev R.Sh., Telyakov E.Sh. Tuchkova O.A., Kharitonova, O. Y. *Pozharovzryvbezopasnost- Fire and explosion safety*, 2010. Vol. 19, no. 5, pp. 48–53.
5. Enalejev R.Sh., Barbin N.M., Telyakov E.Sh. and others. *Pozharovzryvbezopasnost- Fire and explosion safety*, 2011. Vol. 20, no. 1, pp. 33–41.
6. Roitman V.M. *Pozharovzryvbezopasnost- Fire and explosion safety*, 2007. Vol. 16, no. 7, pp. 6–11.
7. Roitman M.Y. *Protivopozarnoe regulirovanie v stroitelstve* [Fire protection regulation in construction.] Moscow, Stroiizdat, 1985, 590 p.
8. Rousseau V.A., Morozov V.N., Pavlova L.V. Moscow, Vniipomvdsssr-All-Union Research Institute for Fire Prevention of Soviet Interior Ministry, 1978. Issue 6, pp. 75–83.
9. Federal Law of 22.07.2008 № 123-FZ «Technical Regulations of Fire Safety». Adopted by the State Duma on 04.07.2008, 96 p.
10. Fedorov A.S., Levatsky V.E., Molgadsky I.S. *Ognestoikost I pozarnaya opasnost stroitelnyh konstruktсий* [Fire-resistance and fire-danger of building structures]. Moscow, Publishing Association of Building universities, 2009, 408 p.
11. Consolazio G.R., McVay M.C., Rish J.W. *International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete*, NIST, Gaithersburg, MD. 1997. pp. 125.
12. ISO-834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements, 1990, 30 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 06.09.2012.