

УДК 614.841

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ БЕТОНА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО УДАРА****Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Анаников С.В., Гасилов В.С.***Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
Казань, e-mail: firepredict@yandex.ru*

Рассмотрены теоретические модели крупномасштабного горения углеводородных топлив. Предложена полуэмпирическая модель горения огненного шара. Проведен анализ литературных данных по моделированию высокоинтенсивных тепловых потоков в различных областях техники и технологиях. Впервые предложено использование химической энергии пиротехнических составов для моделирования теплового потока реальных пожаров в нефтегазохимическом комплексе. Разработана техника эксперимента по импульсному нагреву образцов бетона в лабораторных условиях. Проведено математическое моделирование процессов тепломассообмена в системе «пиротехнический состав-образец бетона». Установлена адекватность модели экспериментальным данным.

**Ключевые слова:** углеводородное топливо, крупномасштабное горение, импульсный нагрев, математическое моделирование

**FIRE RESISTANCE OF CONCRETE: MODELLING OF HEAT PUSH****Enaleev R.S., Telyakov E.S., Ananikov S.V., Gasilov V.S.***Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: firepredict@yandex.ru*

Theoretical models of large-scale combustion of hydrocarbon fuels are considered. Semi-empirical model of burning fireball is offered. The analysis of the literature on modeling of high-intensity heat flow in the various fields of engineering and technology is lead. For the first time the use of chemical energy of pyrotechnic composition is offered for real fires heat flow modeling in oil and gas industry. The technique of pulse heating experiment on concrete samples in the laboratory conditions is developed. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes is lead in the system «pyrotechnic composition – concrete sample». Adequacy of the model to experimental data is established.

**Keywords:** hydrocarbon fuels, large-scale burning, pulse heating, mathematical modeling

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.

**Модели углеводородных пожаров**

В литературе предлагаются экспериментальные, полуэмпирические и теоретические модели крупномасштабного горения углеводородных топлив. Одна из последних моделей выполнена международным коллективом под руководством Махвиладзе Г.М. [7]. 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. [3] для турбулентного диффузионного горения газов основным параметром, влияющим на динамику процесса горения, является нормальная скорость распространения пламени. Этот параметр входит во все кинетические модели. 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 [8] предложена полуэмпирическая модель. Сравнение результатов расчета характеристик горения метано-воздушной смеси при аварийном выбросе топлива в диапазоне массы от 1 до 5 000 т с экспериментальными данными подтверждает адекватность динамической вычислительной модели горения углеводородов.

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

**Физическое моделирование импульсного нагрева**

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

ция высокоинтенсивных тепловых потоков в лабораторных условиях на относительно большой равномерно облучаемой поверхности является сложной технической задачей. 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. Тепловое воздействие на бетон расплавленных материалов при температуре порядка 2000 °С приводит к термическому разложению бетона.

В [1] тепловое воздействие тяжелой аварии имитировалось расплавом с начальной температурой 1500 °С и индукционным нагревом мощностью 36,6 кВт. Расплав воздействовал на бетонный образец диаметром 300 мм и высотой 200 мм. Температура измерялась по оси бетона с шагом 10 мм.

*Теплотехнологии.* Применение пиротехнических составов (ПС) в качестве высокотемпературных тепловых источников для сварки, пайки металлических элементов и термической обработки сварных соединений впервые предложено в [10]. 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 энергоемких термитных смесей для увеличения продуктивности нефтяных скважин является предметом многих исследований, например, [5, 6]. В [6] 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 разлива в авариях в нефтехимической промышленности в [9, 11] предлагается специальный метод высокоинтенсивного нагрева элементов конструкции за счет химической энергии пиротехнических составов. Первая простейшая модель процесса взаимодействия ПС с бетоном представлена в [2].

В данной работе критерии образования поверхностных трещин и анализ развития объемных трещин получили дальнейшее развитие на основании специального экс-

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

Схема эксперимента представлена на рисунке. Распределения температуры по толщине блока и тепловых потоков на обогреваемой поверхности фиксируются на персональном компьютере аналого-цифровым преобразователем [10]. Во фронте горения происходит превращение химической энергии горючего в энтальпию продуктов горения. Из-за гидравлического сопротивления шлаков в процессе образования газобразных 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». 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 меж-

ду элементами системы «ПС-бетон» рассчитывается по разности температур между ядром ПС и поверхностью бетона:

$$q_s = \alpha_s (T_{ш} - T_б), \quad (1)$$

где  $T_{ш}$ ,  $T_б$  – температура шлаков и бетона;  $q_s$  – коэффициент теплопередачи в месте

контакта ПС и бетона определяется экспериментально с помощью сканирующего ка-

лориметра;  $\alpha_v = \alpha_s \frac{2}{R_0} = \alpha_s \cdot S$ , где  $S$  – площадь поверхности контакта.

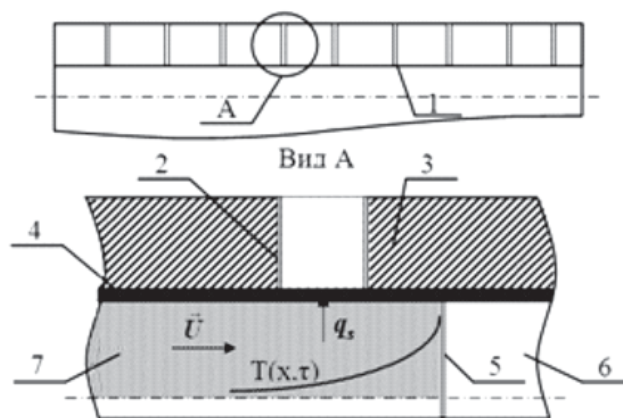


Схема сканирующего калориметра:

1 – набор медных калориметров; 2 – теплоизолятор (слюда); 3 – стальная пластина (объект); 4 – недогоревший 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

При допущении незначительного пепрепада температур по оси бетона урав-

нение энергии для бетона записывается в виде:

$$c(T)\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} - L\rho\omega_0 \frac{d\eta}{d\tau}, \quad (2)$$

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

В математической постановке задачи высокоинтенсивного нагрева бетона учитывается объемное испарение влаги, описываемое формально-кинетическим уравнением [9]:

$$\frac{d\eta(x, \tau)}{d\tau} = k(1 - \eta(x, \tau)) \exp\left(\frac{-L_0}{RT}\right), \quad (3)$$

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

В данной работе в отличие от стандартного метода расчета предела огнестойкости в качестве граничных условий предусмотрено воздействие теплового излучения

$$\frac{\partial(H+h)}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_{пр} \cdot \text{grad } T_{пр}) + c_g \rho_g \vec{U}_g \cdot \text{grad } T_g + q_v, \quad (4)$$

где  $H$ ,  $h$  – энтальпия твердых и газообразных продуктов соответственно;  $q_v$  – интен-

сивность внутреннего источника;  $\lambda_{пр}$ ,  $T_{пр}$  – коэффициент теплопроводности и темпе-

рамени 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 проводился 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 [13]:

ратура 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.

$$c_{np}\rho_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial \tau} = \lambda_{np} \nabla^2 T_{np} - c_g \rho_g U_g \nabla T_g - \alpha_v (T_{np} - T_6), \quad (5)$$

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

Знак минус перед вторым слагаемым в правой части (5) связан с противоположной ориентацией векторов  $\vec{U}_g$  и  $grad T_g$ .

Для численного решения (5) предлагается использовать принцип расщепления решения по физическим процессам. Учитывая малое значение коэффициента теплопроводности продуктов горения ПС (1–2 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, решается уравнение (6) и рассчитывается уменьшение температуры за счет теплоотвода, на втором шаге по уравнению (7) 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.

$$\left( \frac{\partial T_{np}}{\partial \tau} \right)_л = - \frac{\alpha_v}{c_{np}\rho_{np}} (T_{np} - T_6), \quad (6)$$

$$\left( \frac{\partial T_{np}}{\partial \tau} \right)_к = - \frac{c_g \rho_g U_g}{c_{np}\rho_{np}} \cdot \frac{\partial T_g}{\partial x}. \quad (7)$$

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 (7) необходимо знание распределения гидродинамической скорости газа. Чтобы получить указанное

Тогда для неподвижных шлаков механизмом энергопереноса будет молекулярная теплопроводность (первое слагаемое в уравнении (4), а для газов – молекулярная теплопроводность и молярный (конвективный) массо- и энергоперенос (скалярное произведение векторов в уравнении (4).

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

Для одномерной постановки задачи уравнение (4) в эйлеровых координатах запишется в виде:

распределение скорости газообразных продуктов горения предполагается, что в пористом слое шлаков выполняется закон Дарси:

$$\vec{U}_g = - \frac{k}{\mu} grad \rho, \quad (8)$$

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

Если известны распределение давления и свойства шлаков, то из (8) определяется скорость газов, а из (7) – конвективная составляющая приращения температуры в фиксированной точке пространства.

#### Список литературы

1. Домбровский Л.А., Зайчик Л.И., Зейгарник Ю.А. Расчетное моделирование теплового состояния корпуса ядерного реактора при тяжелой аварии с образованием расплава активной зоны // Теплообмен в современной технике: сборник работ отдела теплообмена ИВТ РАН. – М., 1998. – С. 75–92.
2. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Харитонов О.Ю., Тучкова О.А. Разрушение элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве. В кн.: Космический вызов XXI века. Т.4, Химическая и радиационная физика. – 2011. – С. 579–583.
3. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
4. Исаков Г.Н. Некоторые вопросы методологии кинетического эксперимента при термическом анализе полимерных материалов и композитов на их основе // ТГУ. Деп. ВИНТИ. – 1980. – № 4207–80. – 20 с.
5. Белов Е.Г., Субханкулов И.Р., Коробков А.М., Михайлов С.В. Исследование процесса горения металлосодержащих составов в жидких средах для обработки нефтяных скважин // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – № 6. – С. 237–246.
6. Кобяков В.П., Новиков И.В., Сичинава М.А. Теплоотдача в окружающую среду от импульсного теплового источника типа «бегущей тепловой волны» // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49, № 2. – С. 243–250.
7. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж.П., Якуш С.Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива. II. Тепловое излучение // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35, № 4. – С. 12–23.
8. Моделирование крупномасштабного горения углеводородных газов / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 11–12. – С. 26–31.

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

10. Моделирование энергопереноса при горении малогазовых тепловых составов в системе с интенсивным теплоотводом / Р.Ш. Еналеев, Н.А. Абдуллин, Р.Р. Димухаметов, В.А. Качалкин // Тепломассообмен-ММФ-2004: IV Минский международный форум. – 2004. – С. 96–98.

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

12. Сериков С.В., Мадякин Ф.П., Идиатуллин Р.Ш. Разработка пиротехнических составов для термообработки сварных соединений // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27, № 4. – С. 73–78.

13. Теория тепломассообмена / [под ред. акад. РАН А.И. Леонтьева]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 682 с.

### References

1. Dombrowski L.A., Bunny, L.I., Zeigarnik Y.A. *TeplООbmen v sovremennoitekhnike: sbornikrabortdelateploobmena IVT RAN* [Heat transfer in modern technique: collection of heat transfer department works, Institute of Computational Technologies, Russian Academy of Sciences]. Moscow, 1998, pp. 75–92.

2. Enalejev R.Sh., Telyakov E.Sh., Kharitonova O.Y., Tuchkova O.A. *Space Challenges in XXI Century: Volume 4, Chemical and Radiation Physics*. Moscow, TorusPress, 2011. pp. 579–583.

3. Zel'dovich Y.B. *Matematicheskayateoriyagoreniya I vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow, Nauka, 1980. 478 p.

4. Isakov G.N. *TGU. Dep. VINITI* [Tomsk State University. Dep. Russian Institute of Scientific and Technical Information]. 1980, no. 4207–80. 20 p.

5. Belov E.G., Subkhankulov I.R., Korobkov A.M., Mikhailov S.V. *Vestnik Kazanskogot echnologicheskogo Universiteta Bulletin of Kazan Technological University*. 2008, no. 6, pp. 237–246.

6. Kobyakov V.P., Novikov, I.V., Sichinava M.A. *Teplofizikavysokich temperature-Thermal Physics of High Temperatures*, 2011. Vol. 49, no. 2, pp. 243–250.

7. Makhviladze G.M., Roberts J.P., Yakush S.E. *Combustion and explosion*, 1999. Vol. 35, no.4, pp. 12–23.

8. Enalejev R.Sh., Telyakov E.Sh. Khairullin I.R., Kachalkin V.A. *Novosti Vuzov. Problemy energetiki News of the universities. Problem so energetic*, 2008, no. 11–12, pp. 26–31.

9. Enalejev R.Sh., Telyakov E.Sh., Tuchkova O.A., Zakirov M.A. *Vestnik Kazanskogo technologicheskogo Universiteta Bulletin of Kazan Technological University*, 2010, no. 8, pp. 41–50.

10. Enalejev R.Sh., Abdullin N.A., Dimuhametov R.R., Kachalkin V.A. *Teplomassоobmen-MMF-2004* [IV Minskimezhdunarodniy forum-Heat and Mass Transfer-MMF-2004. IV Minsk International Heat and Mass Forum], 2004, pp. 96–98.

11. Enalejev R.Sh., Telyakov E.Sh., Tuchkova O.A., Kharitonova O.Y. *Pozarovzryvobezопасnost Fire and explosion safety*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 48–53.

12. Serikov S.V., Madyakin F.P., Idiatullin R.Sh. *Fizikagoreniya I vzryva-Physics of Combustion and explosion*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 73–78.

13. *Theoriya teplomassоobmena* [The theory of heat and mass transfer] (ed. by Acad. RAS Leontiev A.I.). Moscow, Publishing of Bauman Moscow State Technical University, 1997, 682 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.