

С. А. ШВЫРКОВ, д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: pbtp@mail.ru)

А. П. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: setyn@list.ru)

В. П. НАЗАРОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: npbtp@bk.ru)

Я. И. ЮРЬЕВ, инженер, преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: magistr-87@list.ru)

УДК 691.32:614.841.343

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА, ТОРКРЕТ-БЕТОНА И ТОРКРЕТ-ФИБРОБЕТОНА В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОЖАРА

Проведены исследования теплотехнических свойств образцов строительных конструкций на основе тяжелого бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного режима пожара. Показаны преимущества метода лазерной вспышки для определения коэффициентов температуропроводности исследуемых образцов бетонов. С использованием методов синхронного термического анализа и лазерной вспышки выявлены изменения плотности, удельной теплоемкости и температуропроводности в образцах бетонов, а также найдены соответствующие коэффициенты теплопроводности в интервале температур от 25 до 1100 °С. В результате обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены эмпирические зависимости для определения выше рассмотренных теплотехнических параметров в выбранном температурном диапазоне. Показано, что полученные результаты могут использоваться для установления пределов огнестойкости строительных конструкций, проектируемых на основе рассматриваемых видов бетонов, в том числе ограждений вертикальных стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: бетон; торкрет-бетон; торкрет-фибробетон; теплотехнические свойства; углеводородный пожар; метод синхронного термического анализа; метод лазерной вспышки.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12

В настоящее время при производстве работ, связанных с возведением, ремонтом или восстановлением несущих и ограждающих строительных конструкций зданий и сооружений, все большее применение находит торкретирование — способ нанесения под давлением сжатого воздуха на обрабатываемую поверхность одного или нескольких слоев раствора или бетона (из цемента, песка, щебня или гравия и воды), в том числе с применением традиционной арматуры или металлических (преимущественно стальных) или неметаллических фибр в качестве армирующих компонентов.

В результате нанесения раствора или бетона на поверхность под давлением образуется уплотненный слой торкрета, свойства которого отличаются от свойств обычного бетона или раствора. По сравнению с обычным бетоном торкрет-бетон (ТБ) обладает повышенной механической прочностью, морозостойкостью, водонепроницаемостью, лучшим

сцеплением с поверхностью обрабатываемой конструкции. К преимуществам этого способа относится полная механизация процессов, обычно требующих больших затрат труда, и соединение в одной технологической операции трех — транспортирования, укладки и уплотнения раствора или бетона [1–3].

Несомненно, ТБ и торкрет-фибробетон (ТФБ), обладая способностью на порядок успешнее работать на растяжение, изгиб и ударные нагрузки в отличие от обычных бетонов, в том числе тяжелых (Б), могут найти широкое применение и в строительстве ограждений вертикальных стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, особенно при необходимости обустройства ограждающих стен с волноотражающим козырьком, рассчитываемых на гидродинамические нагрузки от волны прорыва, образующейся при квазимгновенном разрушении резервуара (ГОСТ Р 53324–2009, [4]).

Однако, для того чтобы использовать Б, ТБ и/или ТФБ при строительстве ограждений резервуаров, необходимо знать их поведение в условиях углеводородного режима пожара, к основным особенностям которого относятся [6–10]:

- наличие пожарной нагрузки (нефть, нефтепродукты) с температурой горения выше 1000 °С;
- быстрый рост температуры до определенного уровня, который сохраняется до полного выгорания нефтепродукта;
- пожар пролива нефтепродукта в границах ограждения с постоянным и неограниченным доступом кислорода;
- непосредственное воздействие пламени пожара пролива нефтепродукта на ограждающую стену.

При этом важно отметить, что ограждения резервуаров должны иметь предел огнестойкости не менее Е 150 (ГОСТ Р 53324–2009).

Таким образом, для оценки огнестойкости ограждений резервуаров, конструктивно выполненных как классическим способом, так и с использованием технологии торкретирования, прежде всего необходимо знать теплотехнические параметры Б, ТБ и ТФБ в условиях углеводородного режима пожара, к которым относятся: плотность (объемная масса) ρ (кг/м³); коэффициент удельной теплоемкости c_p (Дж/(кг·К)); коэффициент температуропроводности a (мм²/с); коэффициент теплопроводности λ (Вт/(м·К)).

Известно, что значение коэффициента теплопроводности материала в зависимости от температуры T может быть определено по формуле [10]:

$$\lambda(T) = a(T) c_p(T) \rho(T). \quad (1)$$

Однако для реализации возможности использовать эту формулу с целью нахождения зависимости $\lambda = f(T)$, необходимо иметь зависимости вида $a = f(T)$, $c_p = f(T)$ и $\rho = f(T)$, в данном случае в диапазоне изменения температуры от 25 до 1100 °С. На нахождение этих зависимостей и были направлены экспериментальные исследования.

Для проведения экспериментов предварительно были изготовлены заготовки кубической формы со стороной грани 0,15 м, отлитые из бетонов соответственно по классической технологии, методом торкретирования и торкретирования с добавлением стальной фибры диаметром 0,4 мм и длиной 20 мм.

При подготовке бетонной смеси по ГОСТ 7473–2010 для всех заготовок применялся цемент марки М400 с заполнителем из гранитной крошки с размером фракции не более 5 мм. Далее с использованием полого сверла и низкоскоростного отрезного станка из заготовок были изготовлены цилиндрические образцы диаметром $(12,5 \pm 0,1)$ мм и высотой $(3,0 \pm 0,1)$ мм.

Начальная плотность образцов при температуре 25 °С, определяемая по методу ГОСТ 12730.1–78,

составляла для образцов из Б $(2080 \pm 0,04)$ кг/м³, ТБ — $(2116 \pm 0,04)$ кг/м³, ТФБ — $(2330 \pm 0,05)$ кг/м³.

Необходимость придания образцам цилиндрической формы с определенными размерами определялась возможностью их исследования на высокоточном современном приборном оборудовании для термического анализа и измерения теплофизических характеристик, разработанном компанией NETZSCH-Gerätebau GmbH (Германия), в лаборатории термического анализа химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова [11–13].

Так, для исследования калориметрических эффектов и изменения массы в образцах с высокой разрешающей способностью и точностью использовался синхронный термоаналитический комплекс STA 449 C Jupiter® [12], сочетающий методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) в одном измерении (рис. 1) [17–19].

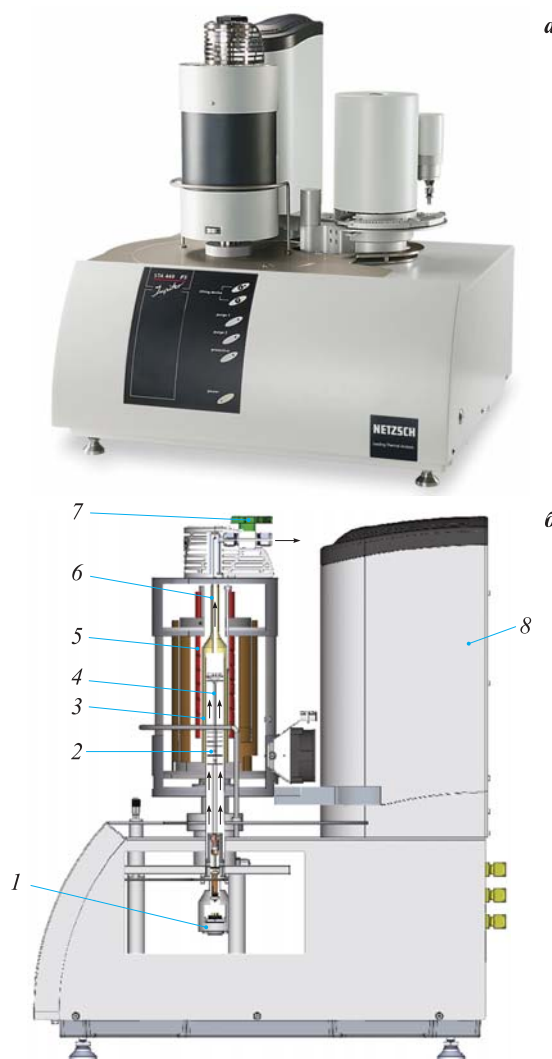


Рис. 1. Общий вид (а) и конструктивное исполнение (б) прибора STA 449 C Jupiter®: 1 — весовая система; 2 — защита от теплового излучения; 3 — защитная трубка; 4 — держатель образца; 5 — нагревательный элемент; 6 — термопара печи; 7 — клапан выхода газа; 8 — подъемное устройство

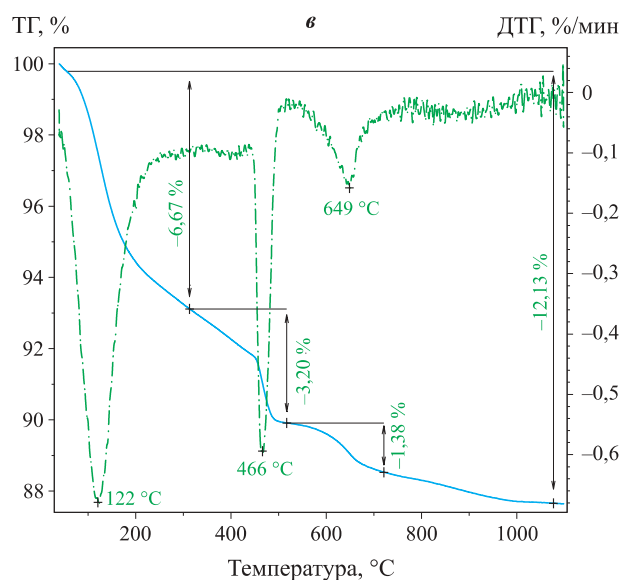
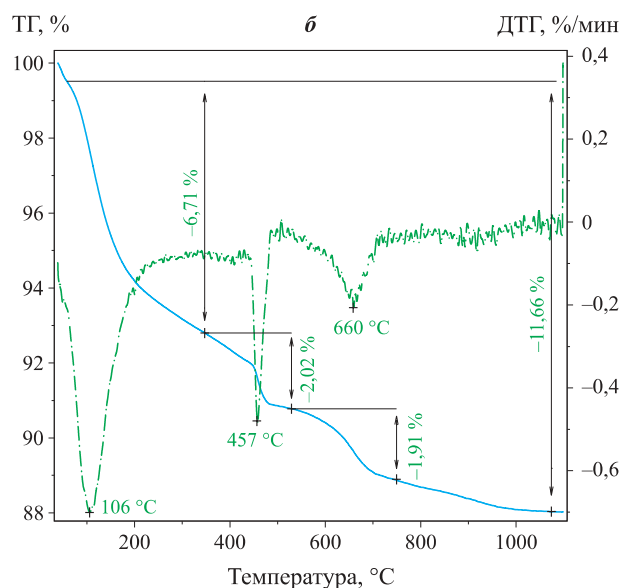
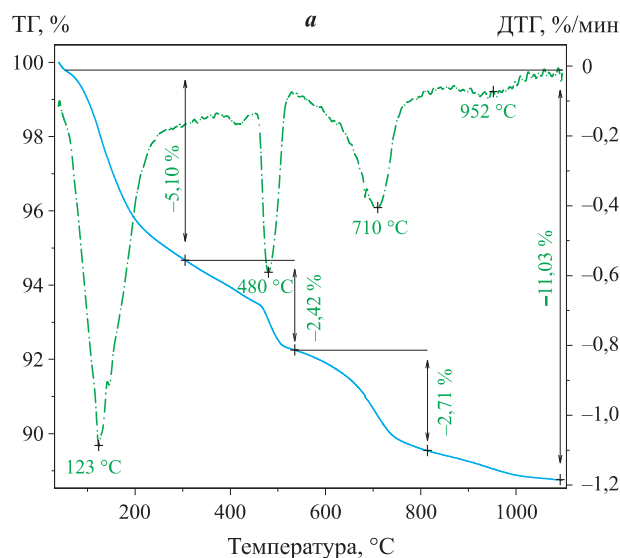


Рис. 2. ТГ- и ДТГ-кривые изменения массы образцов бетонов Б (а), ТБ (б) и ТФБ (в)

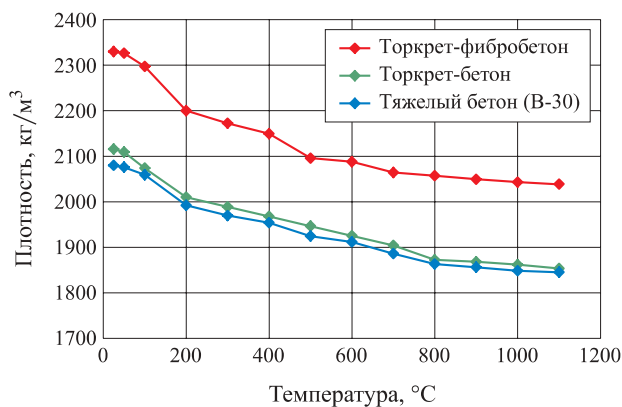


Рис. 3. Зависимость изменения плотности в образцах бетонов от температуры

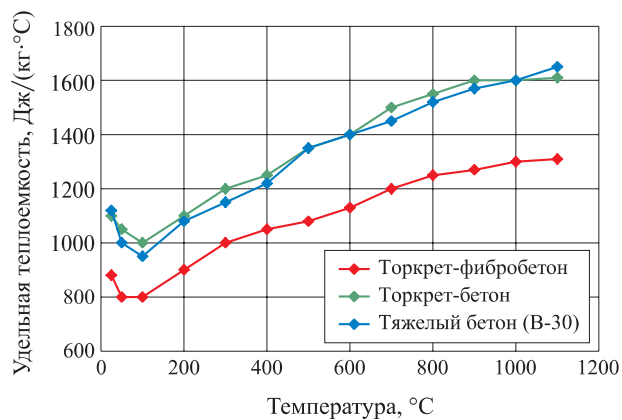


Рис. 4. Зависимость изменения удельной теплоемкости в образцах бетонов от температуры

Основные технические характеристики прибора STA 449 C Jupiter® приведены ниже:

Температурный диапазон, °C	25...1550
Точность измерения температуры, °C	1
Скорость нагрева и охлаждения, °C/мин	0,1...50
Разрешение весов (ТГ), мкг	0,1
Максимальная масса образца, г	5
Точность измерения энтальпии, %	±3
Линейность базовой линии (ДСК), мкВт	3
Точность измерения теплоемкости, %	±5
Сигнал шума (ДСК), мкВт	1

При синхронном термическом анализе (СТА) образцы исследовались в условиях программированного изменения температуры, при этом непосредственно определялись изменение массы, абсолютная температура образцов и разница температур, возникающая между образцами и эталоном. Прибором измерялись такие калориметрические эффекты, как энтальпия, температура фазовых переходов и удельная теплоемкость образцов. На рис. 2 представлены характерные ТГ- и ДТГ-кривые, характеризующие процесс термализа в образцах бетонов Б, ТБ и ТФБ в интервале температур от 25 до 1100 °C.

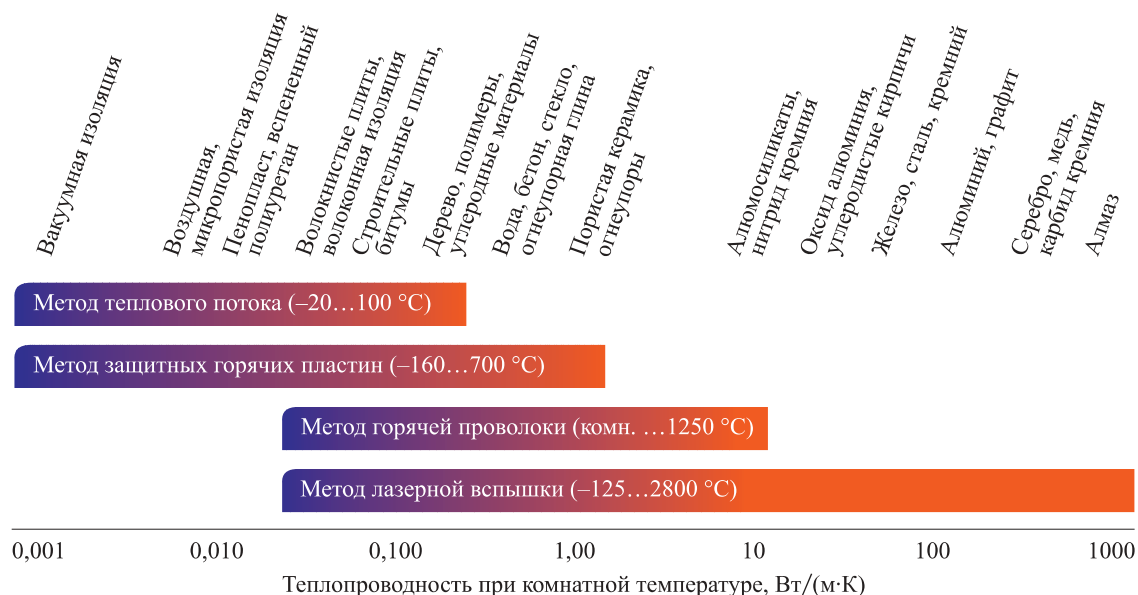
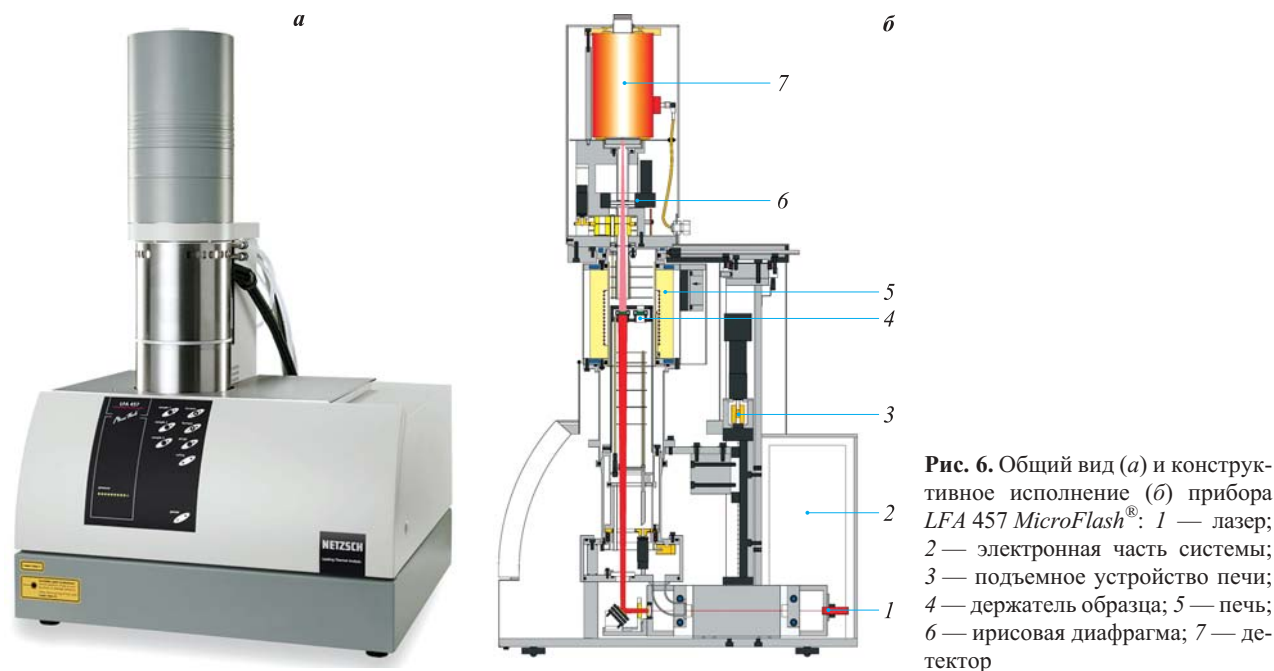


Рис. 5. Основные методы определения коэффициента теплопроводности материалов



Из рис. 2 видно, что процесс удаления адсорбционной воды наблюдается в интервале температур от 40 до 300 °С, а воды конституционной — от 400 до 500 °С независимо от вида бетона.

На рис. 3 и 4 представлены результаты экспериментальных исследований изменений плотности и удельной теплоемкости в образцах бетонов при их нагреве от 25 до 1100 °С.

Для определения коэффициентов температуропроводности образцов были проанализированы различные методы его экспериментального измерения (рис. 5 [11]), которые показали, что для решения поставленной задачи наиболее приемлемым являются методы горячей проволоки и лазерной вспышки.

При этом следует отметить, что метод лазерной вспышки имеет ряд существенных преимуществ перед методом горячей проволоки:

- это абсолютный метод измерения температуропроводности, не требующий калибровки прибора;
- высокая точность измерений и возможность испытывать небольшие размеры образцов;
- метод бесконтактный, т. е. он не разрушает образец, который после измерений может быть проанализирован другими методами.

Таким образом, исходя из вышеперечисленных преимуществ для определения коэффициентов температуропроводности исследуемых образцов бетонов был выбран метод лазерной вспышки.

Измерения параметра температуропроводности образцов бетонов в диапазоне температур от 25 до 1100 °С проводились с использованием универсального прибора высокой точности *LFA 457 MicroFlash*® [11], общий вид и конструктивное исполнение которого представлены на рис. 6.

В общем виде прибор представляет собой высокотемпературную печь с воздушным охлаждением. Он обеспечивает в диапазоне температур от минус 125 до 1100 °С (в зависимости от модели печи) измерение температуропроводности материалов от 0,01 до 1000 мм²/с с погрешностью не более 5 %.

Принцип работы прибора состоит в следующем. Импульс лазера направляется зеркалом к держателю образца в печи. Инфракрасный детектор направлен сверху вниз на обратную сторону образца. Передняя сторона плоскопараллельного образца твердого тела нагревается коротким лазерным импульсом. Тепло распространяется через образец и вызывает повышение температуры на его задней поверхности. Это изменение температуры в зависимости от времени фиксируется с помощью инфракрасного детектора, по измеренному сигналу которого и определяется температуропроводность образца.

Основные технические характеристики прибора *LFA 457 MicroFlash*® приведены ниже:

Температурный диапазон, °С	25...1100
Лазер Nd-YAG:	
энергия, Дж	0...18,5
ширина импульса, мс	0,5
Держатель образцов	Графит
Диапазон температуропроводности, мм ² /с	0,01...1000
Воспроизводимость температуропроводности, %	±3
Погрешность измерения температуропроводности, %	±5
Атмосфера измерения	Инертная, окислительная или вакуум (> 10 ⁻² мбар)

На рис. 7 представлены результаты экспериментальных исследований изменений температуропроводности образцов исследуемых бетонов при их нагреве от 25 до 1100 °С.

Далее по формуле (1) определяли значения коэффициентов теплоемкости образцов бетонов в исследуемом диапазоне температур.

Для нахождения эмпирических зависимостей вида $a = f(T)$, $c_p = f(T)$, $\rho = f(T)$ и $\lambda = f(T)$ полученные экспериментальные данные обрабатывались ме-

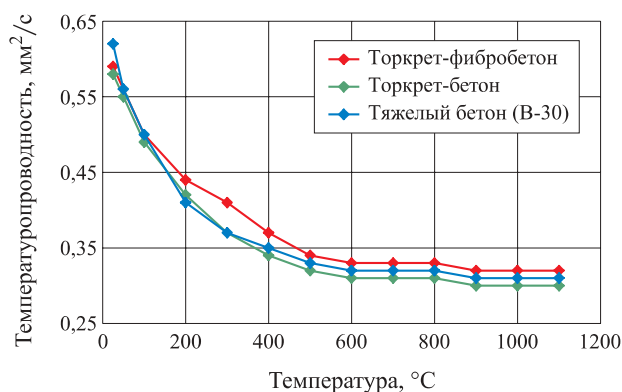


Рис. 7. Зависимость изменения температуропроводности в образцах бетонов от температуры

Эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в температурном диапазоне от 25 до 1100 °С

Вид бетона	Эмпирическая зависимость
Б (В30)	$\rho = 2090,64 - 0,43(T - 273) + 0,00019(T - 273)^2$; $\lambda = \sqrt{0,71 + 32,92/(T - 273)}$; $a = 1/(-0,037 + 0,48 \ln(T - 273))$; $c_p = \sqrt{918742 + 1667,92(T - 273)}$
ТБ	$\rho = 2119,91 - 0,46(T - 273) + 0,0002(T - 273)^2$; $\lambda = \sqrt{0,73 + 29,28/(T - 273)}$; $a = 1/(-0,056 + 0,49 \ln(T - 273))$; $c_p = \sqrt{995628 + 1607,33(T - 273)}$
ТФБ	$\rho = 2345,8 - 0,65(T - 273) + 0,00035(T - 273)^2$; $\lambda = \sqrt{0,66 + 20,3/(T - 273)}$; $a = 1/(0,11 + 0,44 \ln(T - 273))$; $c_p = \sqrt{643563 + 1058,48(T - 273)}$

тодом регрессионного анализа с использованием программы *STATGRAPHICS* [17] (см. таблицу).

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований и обработки полученных данных найдены теплотехнические свойства тяжелого бетона на гранитном заполнителе, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного режима пожара (25...1100 °С), которые могут применяться для определения огнестойкости строительных конструкций, выполненных с использованием рассматриваемых видов бетонов, в том числе при строительстве ограждений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по применению торкрет-бетона при возведении, ремонте и восстановлении строительных конструкций зданий и сооружений. — М. : ОАО «ЦНИИПромзданий», 2007.

2. Емельянова Т. А., Денисова А. П. Тенденции развития и перспективы применения метода торкретирования // Промышленное и гражданское строительство. — 2007. — № 12. — С. 48–50.
3. Дидевич А. Фибробетоны: новый взгляд на традиционный композит // Технологии бетонов. — 2011. — № 11-12. — С. 72–74.
4. Швырков С. А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара : монография. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. — 289 с.
5. Швырков С. А., Юрьев Я. И. Температурный режим пожара для определения предела огнестойкости ограждающих стен нефтяных резервуаров // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. — 2016. — Вып. 4(68). — 7 с. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/2016-4/2016-4.html> (дата обращения: 15.09.2016).
6. Еналеев Р. Ш., Димуhamетов Р. Р., Тучкова О. А., Харитонова О. Ю. Моделирование огнестойкости бетона при высокоинтенсивном нагреве // Вестник Казанского технологического университета. — 2012. — Т. 15, № 10. — С. 88–95.
7. Гравит М. В. Огнестойкость строительных конструкций в европейских и российских стандартах // Стандарты и качество. — 2014. — № 2(919). — С. 36–37.
8. Raj P. K. Large hydrocarbon fuel pool fires: Physical characteristics and thermal emission variations with height // Journal of Hazardous Materials. — 2007. — Vol. 140, Issue 1-2. — P. 280–292. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.057.
9. Muñoz M., Planas E., Ferrero F., Casal J. Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires // Journal of Hazardous Materials. — 2007. — Vol. 144, Issue 3. — P. 725–729. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.121.
10. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учебное пособие. — М. : Высшая школа, 1967. — 600 с.
11. NETZSCH — Анализ и тестирование. URL: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/> (дата обращения: 10.09.2016).
12. Shanath Amarasiri A. Jayaweera, Erich Robens. Some aspects on the history of thermal analysis // Annales UMCS Chemia. — 2012. — Vol. 67, Issue 1-2. — P. 1–29. DOI: 10.2478/v10063-012-0001-x.
13. Шаталова Т. Б., Шляхтин О. А., Веряева Е. А. Термические методы анализа. — М. : МГУ, 2011. — 72 с.
14. Ключников В. Ю., Дашко Л. В., Довбня А. В., Плотникова Г. В. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 7. — С. 47–51.
15. Дашко Л. В., Синюк В. Д., Плотникова Г. В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 12. — С. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32.
16. Lua J., O'Brien J., Key C. T., Wu Y., Lattimer B. Y. A temperature and mass dependent thermal model for fire response prediction of marine composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2006. — Vol. 37, No. 7. — P. 1024–1039. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.01.034.
17. Рубан А. И., Кузнецов А. В. Методы обработки экспериментальных данных : учебное пособие. — Красноярск, 2008. — 80 с. URL: <http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/17/lab/lab.pdf> (дата обращения: 01.09.2016).

Материал поступил в редакцию 20 сентября 2016 г.

Для цитирования: Швырков С. А., Петров А. П., Назаров В. П., Юрьев Я. И. Теплотехнические свойства бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 12. — С. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12.

English

THERMOPHYSICAL CHARACTERISTIC OF CONCRETE, SHOTCRETE AND FIBER-REINFORCED SHOTCRETE IN CONDITIONS OF HYDROCARBON FIRE

SHVYRKOV S. A., Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, Head of Fire Safety of Technological Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: pbtp@mail.ru)

PETROV A. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Fire Safety of Technological Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: setyn@list.ru)

NAZAROV V. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Fire Safety of Technological Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: npbtp@bk.ru)

YURYEV Ya. I., Engineer, Lecturer of Fire Safety of Technological Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: magistr-87@list.ru)

ABSTRACT

Currently, the production of works associated with the construction, repair or restoration of the supporting and enclosing structures of buildings and structures, increasing use is the method of shotcrete. Compared to traditional concrete shotcrete has a high mechanical strength, frost resistance, water resistance, better adhesion to the surface of the structure. Having the ability to successfully work in tension, bending and shock loads in comparison from the traditional concrete, including heavy, shotcrete can be widely used in the construction of a fence of vertical steel tanks for storage of oil and oil products, especially when it is necessary for arrangement of enclosing walls with a visor reflecting the wave, calculated on hydrodynamic loads from the fluid flow, resulting in possible total destruction of the tank.

However, to be able to use of shotcrete or fiber-reinforced shotcrete in the construction of fences for tanks, it's needed to know their behavior in the conditions of a hydrocarbon fire regime, so it is necessary data on thermophysical characteristics such concretes in the temperature range from 25 to 1100 °C.

To find thermophysical characteristics of samples of heavy concrete, shotcrete and fiber-reinforced shotcrete in conditions the impact of high temperatures methods of simultaneous thermal analysis and laser flash were used. As result by research there were obtained experimental data on changes of density, specific heat capacity and thermal diffusivity in the samples from the temperature and corresponding calculated dependence of change of coefficient of thermal conductivity. As a result of processing of experimental data by regression analysis, is the empirical dependence for determination of these thermophysical characteristics. By results of processing of experimental data by regression analysis there are obtained the empirical dependences for determination of the above thermophysical characteristics.

The research results can be used to determine the fire-resistance of building structures, which are made using the considered types of concrete, including the construction of fences, tanks for storage of oil and oil products.

Keywords: concrete; shotcrete; fiber-reinforced shotcrete; thermophysical characteristics; hydrocarbon fire; simultaneous thermal analysis method; laser flash technique.

REFERENCES

1. *The guidelines for the application of shotcrete in the construction, repair and restoration of building structures and buildings construction*. Moscow, Central Scientific-Research and Experimental Design Institute of Industrial Buildings and Structures Publ., 2007 (in Russian).
2. Emelyanova T. A., Denisova A. P. Development trends and perspectives for using the guniting method. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo (Industrial and Civil Engineering)*, 2007, no. 12, pp. 48–50 (in Russian).
3. Didevich A. Fiber-concretes: a new look at traditional composite. *Tekhnologii betona (Concrete Technologies)*, 2011, no. 11-12, pp. 72–74 (in Russian).
4. Shvyrkov S. A. *Fire risk when quasimundo the destruction of the oil tank. Monograph*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2015. 289 p. (in Russian).

5. Shvyrkov S. A., Yuryev Ya. I. The temperature of the fire to determine the limit of fire resistance of enclosing walls of oil tanks. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal (Technology of Technosphere Safety. Internet-Journal)*, 2016, issue 4(68). 7 p. (in Russian). Available at: <http://ipb.mos.ru/ttb/2016-4/2016-4.html> (Accessed 15 September 2016).
6. Enaleev R. Sh., Dimukhametov R. R., Tuchkova O. A., Kharitonova O. Yu. Modeling of fire resistance of concrete at high heat. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta (Vestnik of Kazan Technological University)*, 2012, vol. 15, no. 10, pp. 88–95 (in Russian).
7. Gravit M. V. Fire resistance of structural members in the European and Russian standards. *Standarty i kachestvo (Standards and Quality)*, 2014, no. 2(919), pp. 36–37 (in Russian).
8. Raj P. K. Large hydrocarbon fuel pool fires: Physical characteristics and thermal emission variations with height. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 140, issue 1-2, pp. 280–292. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.057.
9. Muñoz M., Planas E., Ferrero F., Casal J. Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 144, issue 3, pp. 725–729. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.121.
10. Lykov A. V. *Theory of thermal conductivity. Study Guide*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
11. NETZSCH — *Analysis and Testing*. Available at: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/> (Accessed 10 September 2016).
12. Shanath Amarasiri A. Jayaweera, Erich Robens. Some aspects on the history of thermal analysis. *Annales UMCS Chemia*, 2012, vol. 67, issue 1-2, pp. 1–29. DOI: 10.2478/v10063-012-0001-x.
13. Shatalova T. B., Shlyakhtin O. A., Veryaeva E. A. *Thermal methods of analysis*. Moscow, Moscow State University Publ., 2011. 72 p. (in Russian).
14. Klyuchnikov V. Yu, Dashko L. V., Dovbnya A. V., Plotnikova G. V. Application of methods of the thermal analysis in production of fire investigations. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 47–51 (in Russian).
15. Dashko L. V., Sinyuk V. D., Plotnikova G. V. Expert study of cement paste after exposure to high temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 12, pp. 22–32 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32.
16. Lua J., O'Brien J., Key C. T., Wu Y., Lattimer B. Y. A temperature and mass dependent thermal model for fire response prediction of marine composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 7, pp. 1024–1039. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.01.034.
17. Ruban A. I., Kuznetsov A. V. *Methods of experimental data processing. Study Guide*. Krasnoyarsk, 2008. 80 p. (in Russian). Available at: <http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/17/lab/lab.pdf> (Accessed 1 September 2016).

For citation: Shvyrkov S. A., Petrov A. P., Nazarov V. P., Yuryev Ya. I. Thermophysical characteristic of concrete, shotcrete and fiber-reinforced shotcrete in conditions of hydrocarbon fire. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 12, pp. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12.