

¹Леденев А.А., канд. техн. наук, доц.,²Перцев В.Т., д-р техн. наук, проф.,¹Калач А.В., д-р хим. наук, проф.,¹Загоруйко Т.В., канд. техн. наук, ст. преподаватель,¹Донец С.А., канд. техн. наук, нач. каф.,¹Калач Е.В., канд. техн. наук, доц.¹Воронежский институт Государственной противопожарной службы
МЧС России²Воронежский Государственный архитектурно-строительный университет

УПРАВЛЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТЬЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВАРИАТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ

ledenoff@mail.ru

Проблема обеспечения огнестойкости железобетонных строительных конструкций, является актуальной задачей, направленной на выполнение требований пожарной безопасности зданий и сооружений. В статье представлены результаты исследований по разработке состава бетона повышенной термостойкости и технологии его использования в огнестойких железобетонных конструкциях вариатропной структуры. В данных конструкциях слой из бетона повышенной термостойкости выполняет огнезащитную функцию, что позволяет существенно повысить пределы огнестойкости несущих конструкций зданий до требуемых нормируемых значений.

Ключевые слова: бетон, огнестойкость, железобетонные конструкции, прочность, термостойкость.

Введение. Эффективным способом повышения предела огнестойкости железобетонных конструкций, является применение огнезащиты с использованием материалов повышенной термостойкости [1–3]. В этом направлении целесообразным и перспективным представляется разработка двухслойных железобетонных конструкций вариатропной структуры [4, 5]. Особенностью таких конструкций является наличие несущего основания – ядра и слоя огнезащитного покрытия – бетона повышенной термостойкости, отличающегося высокой прочностью, стойкостью к растрескиванию, отслоению и имеющего пониженные показатели деформативности.

Целью данных исследований является разработка бетонов повышенной термостойкости для огнестойких железобетонных конструкций вариатропной структуры.

Для реализации поставленной цели был осуществлен целенаправленный выбор компонентов бетона исходя из следующих положений: предотвращение растрескивания и взрывообразного «хрупкого» разрушения защитного слоя бетона в условиях пожара, являющихся основными причинами, приводящими к преждевременному наступлению предела огнестойкости конструкции, а также обеспечение совместимости компонентов термостойкого бетона с термодинамических позиций.

Методология. Для обеспечения вышеописанных характеристик бетона повышенной термостойкости использовали следующие материалы. Необходимая прочность и адгезия между

бетонами обеспечивалась применением портландцемента – ПЦ 500 Д0. Снижение усадочных деформаций при твердении и огневом воздействии предполагалось достигать за счет создания каркаса из гранулированного шлака Липецкого металлургического комбината, с модулем крупности $M_{кр} = 2,98$, насыпной плотностью 500 кг/м^3 . Повышение прочности на растяжение и увеличение термостойкости цементного камня и бетона достигалось микроармированием хризотил-асбестовым волокном группы 6К, марки А-6К-30. Важным составляющим элементом бетона повышенной термостойкости является компонент, который обеспечивает синхронное снижение плотности и теплопроводности за счет его вспучивания при нагреве. В исследованиях в качестве такого материала был выбран шунгит Зажогинского месторождения (Медвежьегорский район Республики Карелия), модуль крупности $M_{кр} = 1,43$ и насыпной плотностью 500 кг/м^3 .

Выбор шунгита обусловлен его структурой и составом. Шунгит является многокомпонентным материалом, содержащем до 30 % шунгитового углерода, равномерно распределенного по структуре, а также 70 % силикатных материалов в виде мелкодисперсного кварца размерами 1 – 10 мкм, слюды и других составляющих [6]. При этом отличительные свойства шунгита во многом определяются его углеродной составляющей. Анализ исследований показывает, что в шунгитовых породах присутствуют фуллереноподобные молекулы и системы [6]. Наличие фуллереноподобных систем и предопределяет

особые свойства шунгитового углерода (высокая активность в окислительно-восстановительных реакциях, совместимость с водными суспензиями цементов и др.).

Основная часть. Исследования свойств компонентов бетона повышенной термостойкости с термодинамических позиций, проведенные методом Ван-Осс-Гуда (VOG) с применением тестовых жидкостей с известными энергетическими характеристиками [7, 8], показали правомерность предположения об эффективном совмещении выбранных материалов – шунгита, цемента, граншлака и асбеста, что обеспечивает стабильность бетона и его требуемые свойства для огнестойких железобетонных изделий. В результате исследований был подобран рациональный состав бетона повышенной термостойкости (с расходом материалов на 1 м³): портландцемент – 390 кг; молотый шунгит – 44 кг; асбест – 13 кг; гранулированный шлак – 950 кг; вода – 295 л. Результаты проведенных физико-

механических испытаний подтвердили теоретические предпосылки выбора компонентов. Установлено, что разработанный бетон имеет улучшенные показатели: прочность на сжатие 12 МПа, прочность при изгибе 2,5 МПа, средняя плотность 1480 кг/м³ [9, 10].

Снизить возникающие напряжения при огневом воздействии за счет его вспучивания. Эта задача нами была решена путем оптимизации размера зерен шунгита. Установлено, что при использовании в составе бетона частиц шунгита с размером 5 мм и более при температурных воздействиях наблюдается существенное снижение прочности бетона (рис. 1), за счет появления значительных напряжений и деформаций в бетоне. Причиной такого механизма вспучивания, является то, что крупные частицы шунгита обладают более высоким коэффициентом вспучивания, чем мелкие. В дальнейших исследованиях применяли частиц шунгита размером от 2,5 до 0,16 мм и менее.

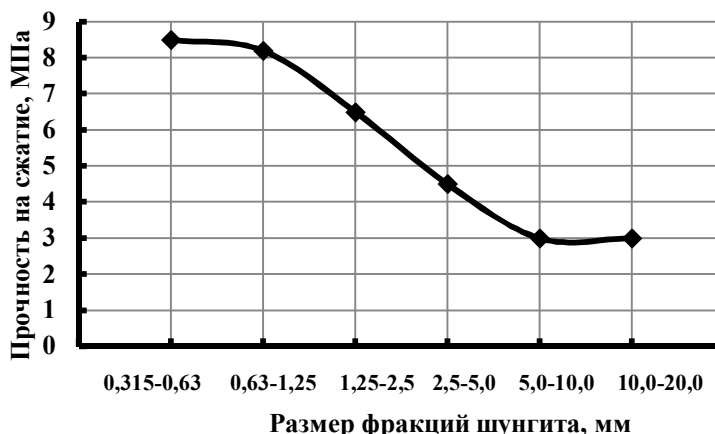


Рис. 1. Влияние дисперсности зерен шунгита на прочность бетона после одного цикла испытания на термостойкость при температуре 1000 °C

Основопологающим этапом являлись исследования влияния температурных воздействий на свойства и структуру бетона на различных масштабных уровнях. Установлено, что при повышении температуры от 900 °C до 1100 °C происходит изменение элементного состава цементного камня в зоне его контакта с частицами шунгита (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что при повышении температуры от 900 °C до 1100 °C увеличивается процент содержания углеродосодержащих соединений в контактной зоне более чем в 15 раз, содержание кислорода и оксидов алюминия изменяется несущественно, но содержание оксидов кремния снижается в 2 раза, а оксидов кальция – в 3 раза. Одной из причин такого поведения исследуемого материала может быть изменение фазового состава вяжущего в контактной зоне. Отмеченное явление, вероятно, приводит к

изменению свойств цементного камня и в частности к повышению его стойкости к трещинообразованию.

Сравнение результатов, полученных на «срезах бетонов» методом атомно-силовой микроскопии, позволило отметить следующее (рис. 2). Сформировавшаяся наноструктура поверхности цементного камня эталонных образцов бетона (в качестве сравнения в работе использовался эталонный состав бетона, широко применяемый для изготовления бетона повышенной термостойкости, но с отсутствием шунгита в составе), подвергнутых однократному воздействию высоких температур равной 700 °C, характеризуется относительной их сглаженностью (рис. 2, а). Это является причиной относительно небольшого сцепления между слоями бетона и, соответственно, приводит к уменьшению его прочности. Наноструктура поверхности цемент-

ного камня в зоне его контакта с зернами шунгита в бетоне повышенной термостойкости отличается большей шероховатостью и, соответственно, более развитой удельной поверхностью (рис. 2, б), что, вероятно, и обеспечивает получение материала с более высокими показателями термостойкости. При температурных воздей-

ствиях от 900 °С до 1100 °С в бетоне повышенной термостойкости наблюдаются незначительные изменения структуры (рис. 2, в), что косвенно подтверждается результатами механических испытаний прочностных показателей бетона.

Таблица 1

Элементный состав цементного камня в зоне его контакта с зернами шунгита после термических воздействий

Химические элементы и оксиды	Содержание, масс. %	
	после термических воздействий при 900 °С	после термических воздействий при 1100 °С
C	2,07	32,48
O ₂	47,64	45,14
Na ₂ O	–	1,31
MgO	3,92	1,84
Al ₂ O ₃	2,09	1,39
SiO ₂	13,92	6,72
S	0,48	0,25
Cl	–	0,78
CaO	29,76	9,87
Fe ₂ O ₃	0,11	0,23
Итого	100	100

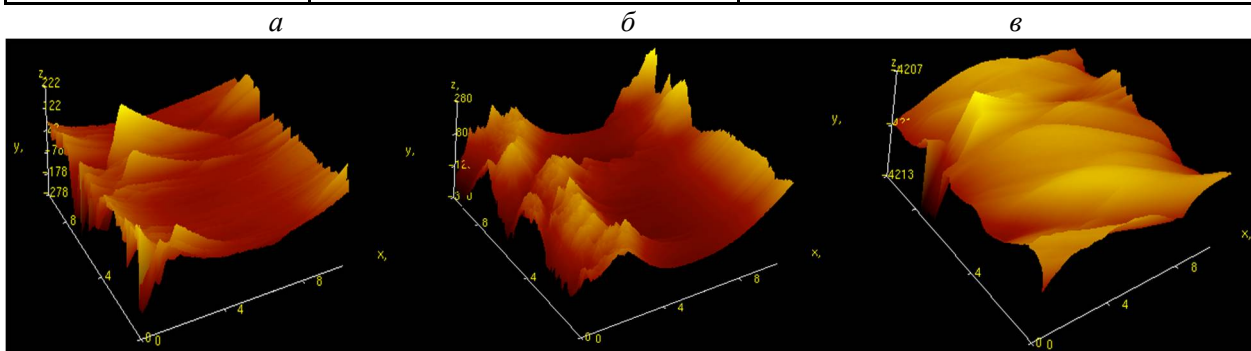


Рис. 2. Наноструктура поверхности бетона после температурного воздействия: а – бетон эталонного состава после 700 °С; б – бетон повышенной термостойкости после 900 °С; в – бетон повышенной термостойкости после 1100 °С

Исследования микроструктуры показали, что при температуре 700 °С в бетоне эталонного состава наблюдается формирование агрегированной структуры с частичным трещинообразованием (рис. 3, а). Подобная агрегация структуры при температурном воздействии 700 °С наблюдается и в бетоне повышенной термостойкости. С увеличением температуры до 900 °С (рис. 3, б) в бетоне повышенной термостойкости степень агрегирования возрастает, что, вероятно, связано с началом вспучивания шунгита. При температурах выше 1100 °С происходит интенсивное вспучивание шунгита, структура цементного камня из гранулированной переходит в частично оплавленную с четко выраженными локальными плотными зонами (рис. 3, в).

Микроскопические исследования подтверждают результаты оптических исследований макроструктуры (рис. 4).

Установлено, что существенные изменения в структуре бетона происходят при температуре порядка 900 °С. Они связаны с появлением образований в виде агрегатов в структуре бетона (рис. 4, б). На образцах отсутствуют микроповреждения в виде трещин и каверн. При температурном воздействии 1100 °С на поверхности четко просматриваются зерна вспученного шунгита в цементном камне (рис. 4, в). Наличие трещин и локальных разрушений не наблюдается (рис. 4, в).

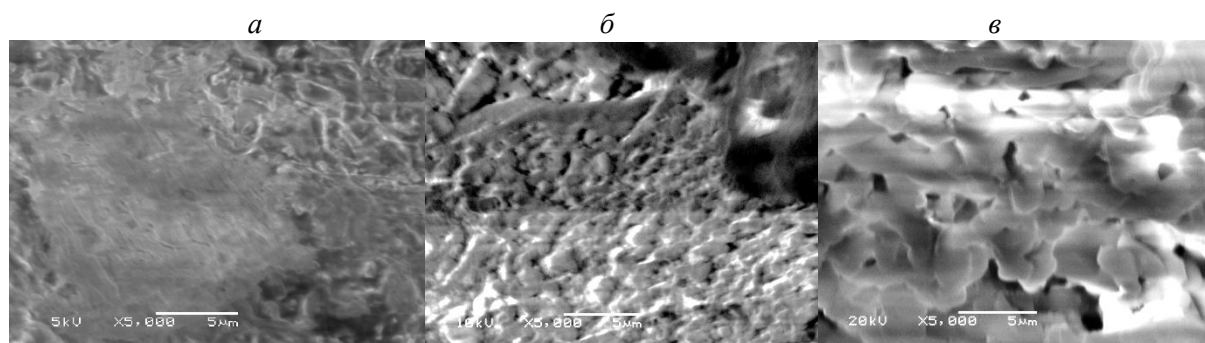


Рис. 3. Микроструктура поверхности бетона после температурного воздействия (увеличение $\times 5000$):
 а – бетон эталонного состава после 700 °С; б– бетон повышенной термостойкости после 900 °С;
 в – бетон повышенной термостойкости после 1100 °С

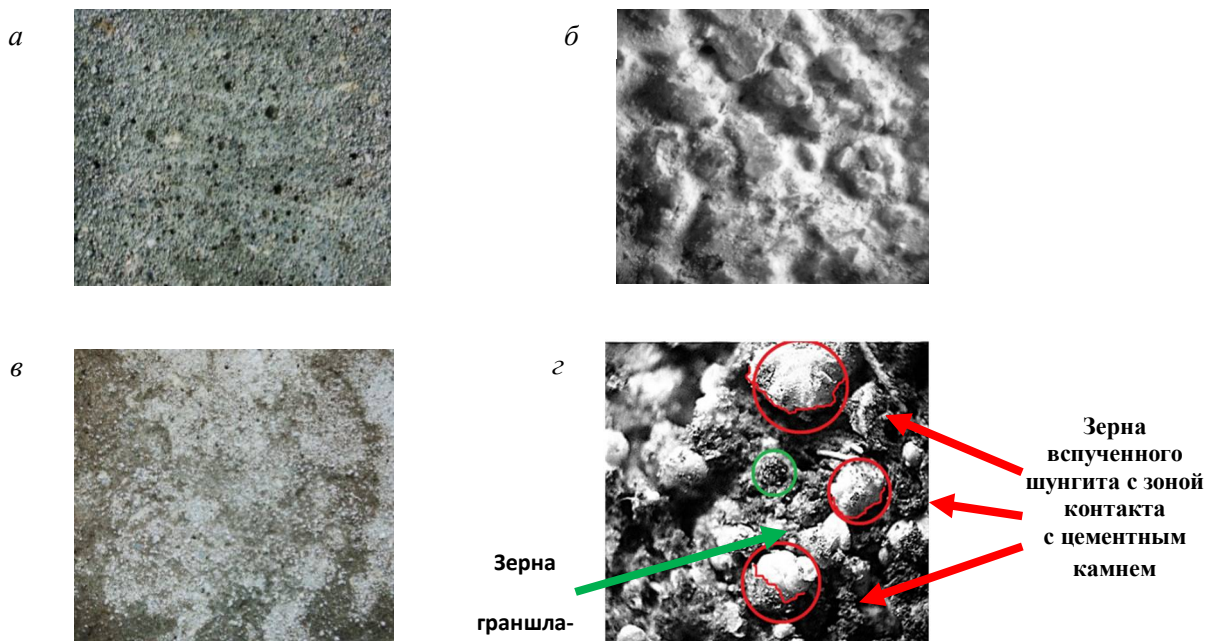


Рис. 4. Макро- и микроструктуры бетона повышенной термостойкости после температурного воздействия:
 а, в – макроструктура бетона после температурного воздействия 900, 1100 °С; б, г – микроструктура бетона
 после температурного воздействия 900, 1100 °С (увеличение в 54 раза)

Полученные данные подтверждаются результатами прочностных испытаний после температурного воздействия. Установлено, что в образцах бетона повышенной термостойкости с шунгитом, подвергнутых однократному воздействию высоких температур, прослеживается незначительное снижение прочности при сжатии (рис. 5). Прочность бетона повышенной термо-

стойкости при температурном воздействии 700 °С на 30 %, а при 900 °С на 50 % выше по сравнению с образцами эталонного бетона. После температурного воздействия при 1100 °С образцы бетона повышенной термостойкости сохранили 64 % от первоначальной прочности в отличие от образцов бетона эталонного состава, которые разрушились полностью.

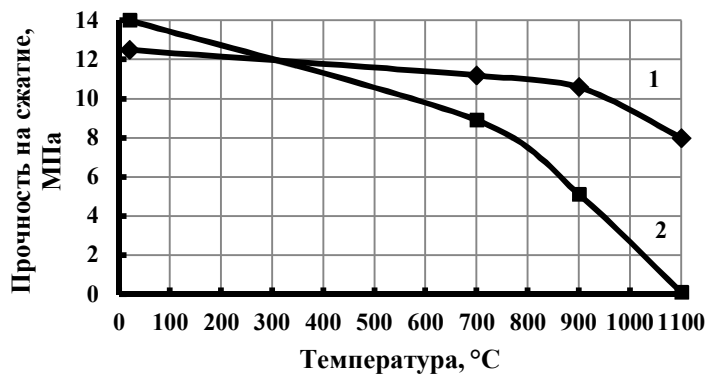


Рис. 5. Зависимость прочности бетона от температурных воздействий от 700 °С до 1100 °С:
 1 – бетон с шунгитом, 2 – эталонный бетон

Проведенные испытания показали (рис. 6), что у разработанного бетона по сравнению с эталонным бетоном термостойкость при 700 °С повышается более чем в 5 раз, при 900 °С – в 6 раз, а при 1100 °С – в 8 раз. Это, на наш взгляд, объясняется формированием особой структуры бетона при участии шунгита. Образцы бетона повышенной термостойкости, подвергшиеся температурному воздействию 1100 °С, после 8 циклов испытания сохранили целостность.

Проведенные испытания образцов бетона на теплопроводность после одного цикла терми-

ческих воздействий показали, что при температурном воздействии от 20 °С до 1100 °С теплопроводность бетона снижается с 0,26 до 0,19 Вт/м·К. Это объясняется вспучиванием шунгита, изменением элементного состава цементного камня в зоне контакта с зернами шунгита и изменениями нано-и микроструктуры бетона. Это способствует замедлению прогрева железобетонных конструкций в условиях пожара.

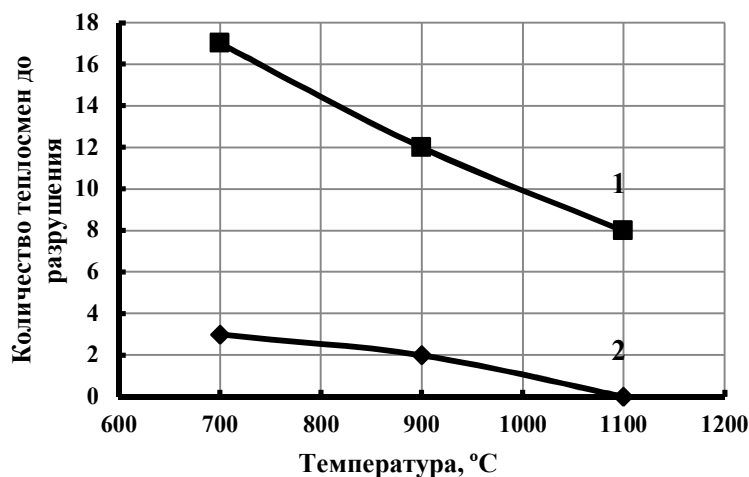


Рис. 6. Изменение термостойкости образцов в зависимости от температуры:
1 – бетон повышенной термостойкости, 2 – эталонный бетон

Одним из важнейших факторов, обуславливающих надежность работы двухслойных вариатропных конструкций, является сцепление термостойкого слоя с конструктивным высокопрочным бетоном. Установлено, что разрыв двухслойных образцов со слоем бетона повышенной термостойкости и конструктивным сло-

ем из высокопрочного бетона происходит по бетону повышенной термостойкости (рис. 7). Прочность сцепления бетона составила от 0,7 – 0,8 МПа при пределе прочности при сжатии бетона повышенной термостойкости 6,7 МПа, что обеспечивает надежность сцепления наносимого покрытия.



Рис. 7. Состояние контактной зоны двухслойных образцов до (а) и после (б) испытания на отрыв

Установлено, что при температурных воздействиях от 500 °С до 1100 °С контактная зона двухслойных образцов отличалась сплошностью, отсутствием трещин, разрывов и зон разрушения (рис. 8).

Полученные расчетным методом результаты оценки предела огнестойкости вариатропной железобетонной плиты приведены в табл. 2.

Установлено, что применение бетона повышенной термостойкости позволяет существенно повысить предел огнестойкости вариатропной железобетонной плиты перекрытия.

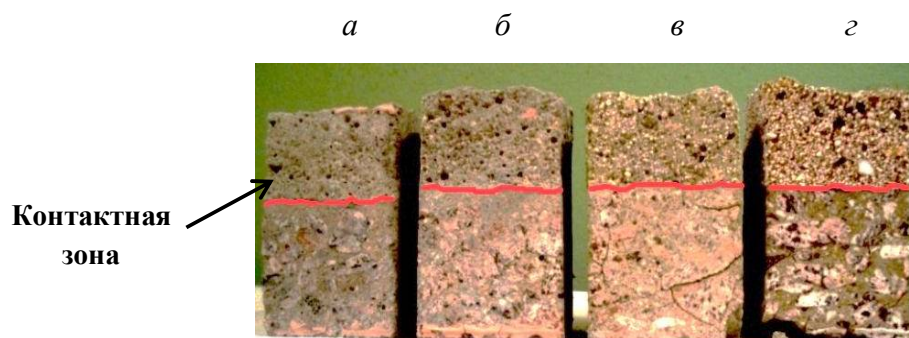


Рис. 8. Характер контактной зоны двухслойных образцов после температурных испытаний:
а) 500 °С; б) 700 °С; в) 900 °С; г) 1100 °С

Таблица 2

Влияние толщины слоя бетона повышенной термостойкости на предел огнестойкости вариатропной железобетонной плиты перекрытия

Вид конструкции	Толщина слоя бетона повышенной термостойкости, м	Предел огнестойкости плиты перекрытия по потере несущей способности (R), мин
Плита перекрытия (6000 × 1200 × 240 мм)	–	64
	0,01	145
	0,015	170
	0,02	194
	0,04	342

Выводы. Применение разработанного состава бетона и технологии его использования в огнестойких железобетонных конструкциях вариатропной структуры, в которых слой из бетона повышенной термостойкости выполняет огнезащитную функцию, позволяет существенно повысить пределы огнестойкости несущих конструкций зданий до требуемых нормируемых значений. В случае возникновения пожара это существенно повышает безопасность эвакуации людей и работы пожарных расчетов под воздействием открытого пламени и высоких температур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Милованов А. Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 152 с.
2. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
3. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / Под ред. Ю.А. Кошмарова. М.: ТИМР, 2000. 433 с.
4. Чернов А.Н. Вариатропия как форма совершенствования конструкций и ограждающих элементов // Строительные материалы на основе промышленных отходов: Сб. статей. Челябинск: УралНИИСтромпроект, 1982. С. 199–203.
5. Чернов А.Н. Перспективы вариатропного строения элементов // Материалы и конструкции

для сборного строительства тепловых агрегатов: Сб. статей. Челябинск: УралНИИСтромпроект, 1982. С. 119–124.

6. Мосин О.В. Новый природный минеральный сорбент – шунгит // Сантехника. 2011. № 3. С. 34–36.

7. Глазков С.С. Модель термодинамической совместимости наполнителя и полимерной матрицы в композите // Журн. прикладной химии. 2007. Т. 80. Вып. 9. С.1562–1565.

8. Глазков С.С., Козлов В.А, Пожидаева А.Е., Рудаков О.Б. Поверхностные энергетические характеристики композитов на основе природных полимеров // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т.9. Вып.1. С. 58–66.

9. Загоруйко Т.В., Перцев В.Т., Власов В.В. Разработка композиционных термостойких материалов для повышения огнестойкости железобетонных конструкций // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2012. № 2. С. 62–68.

10. Леденев А.А., Загоруйко Т.В., Перцев В.Т., Бондарь А.А. Разработка составов термостойких бетонов для получения огнезащитных покрытий строительных конструкций // сборник статей по материалам всероссийской научно-практической конференции «Проблемы безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» / ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России. Воронеж, 2012. С. 42 – 44.

Ledenev A.A., Pertsev V.T., Kalach A.V., Zagoruiko T.V., Donets S.A., Kalach E.V.
MANAGEMENT OF FIRE RESISTANCE OF FERRO-CONCRETE DESIGNS VARIATIONAL OF STRUCTURE

The problem of maintenance of fire resistance of ferro-concrete building designs, is the actual problem directed on performance of requirements of fire safety of buildings and constructions. In article results of researches on working out of structure of concrete of the raised thermal stability and technology of its use in fire-resistant ferro-concrete designs variational structures are presented. In the given designs the layer from concrete of the raised thermal stability carries out fireproof function that allows to raise essentially limits of fire resistance of bearing designs of buildings to demanded normalised values.

Key words: concrete, fire resistance, reinforced concrete structures, durability, heat resistance.

Леденев Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве.

Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России.

Адрес: Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

E-mail: ledenoff@mail.ru.

Перцев Виктор Тихонович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций.

Воронежский ГАСУ.

Адрес: Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

E-mail: peres_v@mail.ru.

Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, профессор, заместитель начальника института по научной работе.

Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России.

Адрес: Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

E-mail: AVKalach@gmail.com.

Загоруйко Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и инженерной графики.

Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России.

Адрес: Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

E-mail: tzagoruiko@mail.ru.

Донец Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, начальник кафедры прикладной математики и инженерной графики.

Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России.

Адрес: Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

Калач Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики.

Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России.

Адрес: Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

E-mail: EVKalach@gmail.com.