



УДК 614.841.34  
ГРНТИ 67.09.33

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКИХ БЕТОНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*А.А. ЛЕДЕНЕВ, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.Н. ВНУКОВ, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Т.В. ЗАГОРУЙКО, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
В.Т. ПЕРЦЕВ, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет*

В статье представлены результаты исследований по разработке составов термостойкого бетона для строительных конструкций повышенной огнестойкости. Результаты исследований показали, что разработанные составы бетона обладают улучшенными термическими и теплофизическими свойствами. Применение разработанных составов и технологии их использования в огнестойких строительных конструкциях позволит обеспечить безопасность зданий и сооружений военного назначения.

*Ключевые слова:* огнестойкость конструкций; бетон повышенной термостойкости; огнестойкость зданий и сооружений военного назначения.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THERMAL-RESISTANT CONCRETE TO IMPROVE MILITARY FACILITIES BUILDING STRUCTURES

*A.A. LEDENEV, Candidate of Technacal Sciences  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
A.N. VNUKOV, Candidate of Technacal Sciences  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
T.V. ZAGORUJKO, Candidate of Technacal Sciences  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
V.T. PERTSEV, Doctor of Technacal Sciences, Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

The article presents the results of research on the development of heat-resistant concrete compositions for building structures of high fire resistance. The results of studies have shown that the developed concrete compositions have improved thermal and thermal-physical properties. Application of the developed compositions and technology of their use in fire-resistant building structures will ensure the safety of buildings and structures for military purposes.

*Keywords:* structures fire resistance; concrete of increased heat resistance; fire resistance of buildings and military facilities.

**Введение.** Обеспечение требуемого качества строительства и безопасности зданий и сооружений, в том числе военного назначения, достигается при соблюдении высокой технологической дисциплины, тщательном входном контроле поступающих на объект строительных материалов и конструкций, контроле выполняемых операций. Кроме этого, для повышения на-



дежности, долговечности и устойчивости зданий и сооружений военного назначения перспективным направлением является применение строительных материалов и конструкций, обладающих улучшенными физико-техническими характеристиками, а также повышенной термо- и огнестойкостью.

**Актуальность.** Одной из актуальных задач повышения безопасности, обеспечения постоянной исправности и готовности самолетов является укрытие авиационной и другой специальной техники. Для авиационной техники на аэродромах широко применяются защитные укрытия арочного типа. Защитные арочные укрытия для самолетов характеризуются следующими основными показателями: пролетом укрытия, конструкцией арочного свода, полезной площадью, степенью защищенности авиационной и специальной техники. Арочные укрытия для самолетов представляют собой сооружения с повышенной взрывопожарной опасностью. Для возведения укрытий используются большепролетные арочные железобетонные конструкции, армометаллические блочные конструкции, железобетонные арки сплошного сечения. При огневом воздействии, конструкции таких сооружений подвержены достаточно быстрому нагреву арматуры до критической температуры, что приводит к снижению несущей способности и устойчивости конструкций.

Повышение устойчивости защитных укрытий для авиационной техники при огневом и ударно-волновом воздействии может быть обеспечено путем применения для их возведения строительных конструкций из термостойких и высокопрочных бетонов. Для повышения огнестойкости строительных конструкций применяются различные виды конструктивной и тонкослойной огнезащиты [1]. Актуальным и перспективным направлением является использование строительных изделий и конструкций вариативной структуры. Данные конструкции характеризуются наличием двух слоев: несущего высокопрочного бетонного слоя и наружного огнезащитного слоя с применением термостойкого бетона. При этом эффективно применение термостойкого бетона с показателями плотности и теплопроводности, изменяющимися по мере роста величины температурного воздействия. Кроме этого, термостойкий бетон должен обладать повышенной прочностью и низкой деформативностью.

При разработке новых эффективных термостойких материалов теоретической основой должны являться современные подходы, основанные на фундаментальных положениях физической химии, коллоидной химии, статистической физики, математического моделирования, с применением современных методов исследований. На основании существующих достижений в области получения термостойких материалов, уже могут быть определены пути решения этих задач. Одним из ключевых направлений в совершенствовании свойств термостойких материалов является использование новых видов заполнителей и наполнителей. Среди них наиболее эффективными могут быть бетоны, в состав которых входит шунгит. Введение шунгитовых наполнителей взамен традиционных углеродных и минеральных позволяет создать новые конструкционные материалы функционального назначения.

Целью работы является разработка составов и исследование свойств термостойких бетонов, обеспечивающих повышение показателей огнестойкости строительных конструкций для зданий и сооружений военного назначения.

**Результаты исследований.** Теоретическое построение исследований, направленных на разработку составов термостойких бетонов предусматривает выбор следующих сырьевых материалов [2]. В качестве вяжущего вещества применялся портландцемент высокого класса. Задачи повышения показателей прочности и снижения трещиностойкости бетона решались за счет его микроармирования хризотил-асбестом, представляющим собой тонкодисперсные волокна. С целью снижения показателей усадки от воздействия высоких температур применяли гранулированный шлак. Для получения поризованных термостойких бетонов применяли воздухововлекающую добавку «Пионер 118 МЗ». Особое внимание при выборе компонентов уделено шунгиту, характерным свойством которого является способность вспучиваться в процессе высокотемпературного воздействия, снижать плотность и теплопроводность термостойкого материала.



Кроме того, выбор шунгита обусловлен его уникальными свойствами, определяющимися структурой и составом образующих его элементов. Шунгит является многокомпонентным материалом, содержащим углерод, силикатные и другие составляющие [3]. Анализ ранее выполненных исследований показывает, что в углеродистом веществе шунгитовых пород выявлены фуллереноподобные молекулы и системы, проявляющие повышенную активность в окислительно-восстановительных реакциях, высокую адгезию и совместимость с различными видами вяжущих. Такие особенности строения и свойств шунгита позволяют создавать эффективные термостойкие материалы на его основе. Результаты определения химического, минералогического и зернового состава шунгита представлены в таблицах 1 – 3.

Таблица 1 – Химический состав шунгита

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	S	C	H <sub>2</sub> Oкрис.
57,0	0,2	4,0	2,5	1,2	0,3	0,2	1,5	1,2	30,0	1,7

Таблица 2 – Минералогический состав шунгита

Наименование материала	Основные минералы, входящие в состав шунгита, %			
	углерод	кварц	сложные силикаты	сульфиты
шунгит	30	45	20	5

Таблица 3 – Зерновой состав шунгита

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах					Проход через сито № 016, % по массе
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
частный	6,2	5,3	6,8	12,7	45,4	23,6
полный	6,2	11,5	18,3	31,0	76,4	-

Дисперсионный анализ, проведенный с использованием метода лазерной дифракции показал, что тонкодисперсные частицы шунгита характеризуются полидисперсным распределением. Размер тонкодисперсных частиц шунгита изменяется в диапазоне от 0,5 до 100 мкм (рисунок 1), то есть тонкомолотые частицы шунгита соизмерены с частицами портландцемента, применяемого в качестве вяжущего для термостойкого бетона.

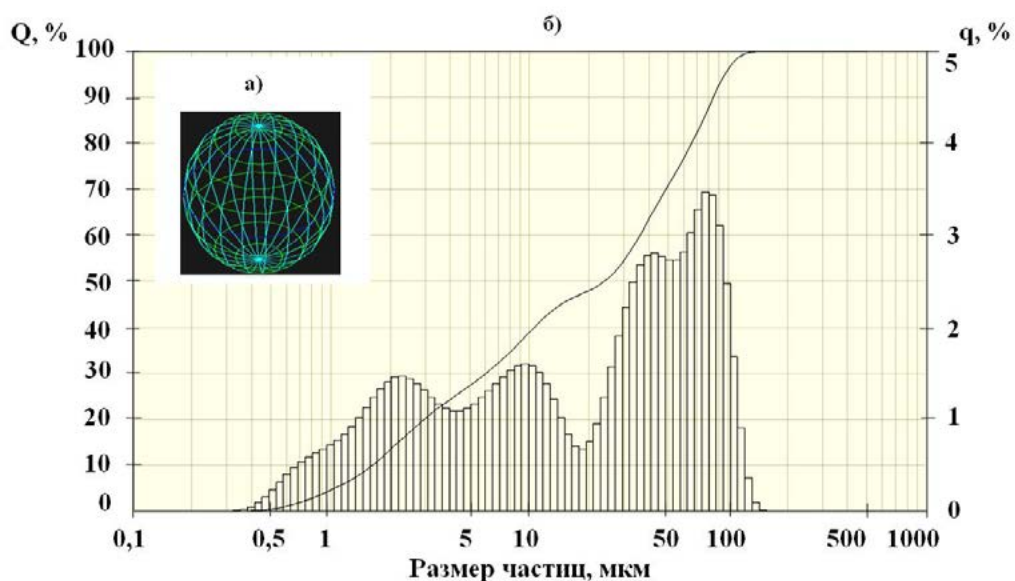


Рисунок 1 – Данные дисперсионного анализа частиц шунгита, проведенные методом лазерной дифракции: а) модель формы частицы шунгита; б) интегральные и дифференциальные кривые дисперсного состава частиц шунгита



При использовании шунгита стоит задача снижения напряжений, проявляющихся в цементном камне термостойкого бетона при высокотемпературном воздействии в результате его вспучивания. Принимая во внимание данные особенности поведения при нагреве, важным является установление необходимой и достаточной дозировки шунгита в цементном камне, обеспечивающей формирование пористой и одновременно целостной структуры бетона с сохранением требуемых теплозащитных и прочностных характеристик. Исследование процессов структурообразования композиционных материалов с дисперсными наполнителями и оптимизация их состава была решена с привлечением основных положений теории протекания (перколяции) [4]. Согласно положениям данной теории процесс формирования структуры дисперсно-наполненных цементных систем, состоящих из неупорядоченных самоорганизующихся элементов, может быть представлен в виде модели протекания по касающимся сферам – моделям частиц шунгита (рисунок 2).

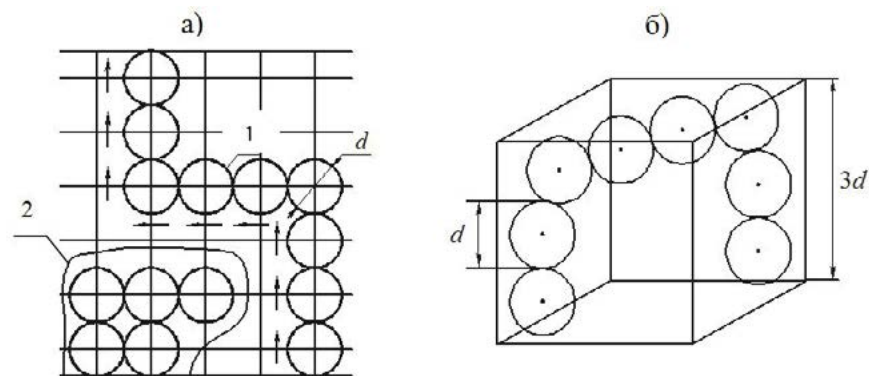


Рисунок 2 – Плоская модель (а) и 3d модель (б) протекания по касающимся сферам:  
1 – элемент «бесконечного» кластера в структуре цементного композита; 2 – изолированный кластер

Методами математического моделирования установлено условие протекания по касающимся сферам, которое можно выразить следующим образом [4]:

$$v_c = N_c \pi d^3 / 6 = 0,16 \pm 0,01, \quad (1)$$

где  $v_c$  – критическая доля объема сфер от общего объема системы, обеспечивающая протекание;  $N_c$  – критическое число сфер в единице объема;  $d$  – диаметр сферы (модели частицы шунгита).

В реальной структуре композиционного материала на уровне цементного камня формируются как отдельные агрегированные системы из частиц шунгита, так и смешанные кластеры с частицами цемента. Вместе с тем, проведенные исследования, направленные на оптимизацию состава термостойкого бетона с учетом основных положений теории протекания показали правильность гипотезы о выборе состава. Основываясь на представленное условие (1), исходя из того, что частицы наполнителя (шунгита) вступают в прямой контакт между собой при объемной его доле, равной  $v_c = 0,16$ , в цементном композите при данной концентрации возникает бесконечный кластер из контактирующих частиц шунгита. Рациональная дозировка частиц шунгита в составе цементного камня, обеспечивающая формирование взаимосвязанных кластеров и способствующая получению целостной структуры термостойкого бетона составила около 16 % от объема цементного вяжущего.

Помимо оптимизации микроструктуры цементного камня наполненного шунгитом была проведена последовательная оптимизация состава термостойкого бетона по средней плотности и прочности. В ходе оптимизации содержание компонентов бетона изменялось в следующем диапазоне (на  $1 \text{ м}^3$ ): портландцемент 250 – 600 кг; шунгит 35 – 180 кг; асбест 10 – 40 кг; гранулированный шлак 800 – 1420 кг; расход воздухововлекающей добавки для поризованного бетона составлял 1,2 кг (0,3 % от массы цемента); расход воды подбирался, исходя из требуемой



реологической характеристики по осадке конуса равной 8 – 10 см. В результате оптимизации состава бетона по критериям плотности и прочности был разработан состав термостойкого бетона (таблица 4). Оптимальное содержание шунгита составило 45 кг/м<sup>3</sup> (около 16 % от объема цемента), что соответствует значению, полученному на модельной системе.

Таблица 4 – Разработанные составы мелкозернистого и поризованного бетона

№ п/п	Вид бетона	Сырьевые материалы, кг/м <sup>3</sup>						Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа
		цемент	гран-шлак	шунгит	асбест	добавка «Пионер 118М3»	вода		
1	Мелкозернистый бетон с шунгитом	400	900	45	13	-	295	1480	12,5
2	Поризованный бетон с шунгитом	400	900	45	13	1,2	295	950	7,2

В ходе экспериментальных исследований в соответствии со стандартными методиками [5, 6] была проведена оценка термических и теплофизических свойств мелкозернистых и поризованных термостойких бетонов разработанных составов. Результаты испытаний на термостойкость представлены в таблице 5. Установлено, что, несмотря на некоторое снижение прочностных показателей как мелкозернистого, так и поризованного бетона с шунгитом образцы не потеряли целостность и не имели поверхностных трещин (рисунок 3 а, в). В то время, как образцы контрольного состава бетона без шунгита не сохранили целостность и практически полностью разрушились (рисунок 3 б, г). Полученные данные результатов испытаний бетонов на термостойкость положительно характеризует добавку шунгит, как в мелкозернистых, так и в поризованных бетонах.

Таблица 5 – Результаты испытаний мелкозернистого и поризованного бетона с шунгитом на термостойкость

№ п/п	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура испытаний, °С	Прочность при сжатии, Мпа
мелкозернистый бетон с шунгитом			
1	1425	700	11,2
2	1370	900	10,6
3	1310	1100	5,1
поризованный бетон с шунгитом			
4	870	700	5,4
5	750	900	3,5
6	630	1100	2,1

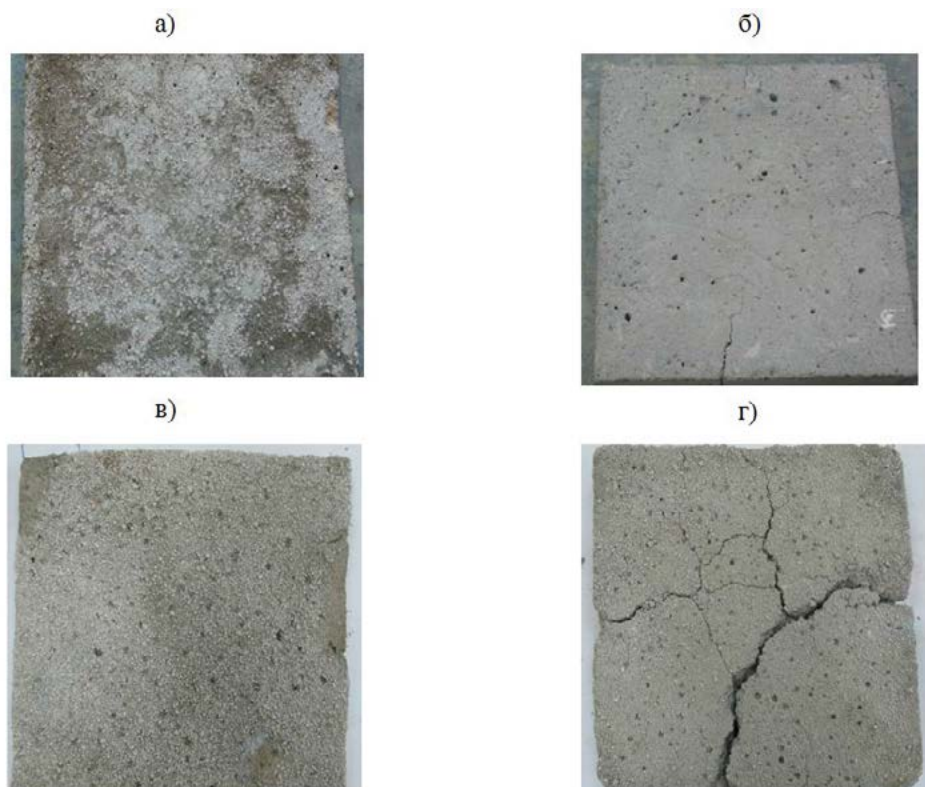


Рисунок 3 – Образцы мелкозернистого и поризованного бетона после высокотемпературного воздействия при 1100 °С: а) мелкозернистый бетон с шунгитом; б) мелкозернистый бетон без шунгита; в) поризованный без с шунгитом; г) поризованный бетон без шунгита

Образцы мелкозернистого и поризованного бетона с добавкой шунгит, прошедшие термические воздействия подвергались испытанию на теплопроводность. Обобщенные результаты испытаний представлены в таблице 6. Установлено, что при температурном воздействии происходит снижение коэффициента теплопроводности за счет изменения структуры и поризации бетона за счет вспучивания шунгита. При огневом воздействии это будет способствовать замедлению скорости прогрева строительных конструкций.

Таблица 6 – Результаты испытаний на теплопроводность мелкозернистого и поризованного бетона с шунгитом

№ п/п	Температура испытаний, °С	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·°С)
мелкозернистый бетон с шунгитом			
1	900	1370	0,295
2	1100	1310	0,243
поризованный бетон с шунгитом			
3	900	750	0,164
4	1100	630	0,113

Исследования структуры бетона с использованием оптического микроскопа показали, что наиболее значительные изменения, связанные с появлением четких формирований в виде агрегатов происходят при температуре около 900 °С (рисунок 4, а). Более четко зерна вспученного шунгита просматриваются в цементном камне при температуре около 1100 °С (рисунок 4, б). При этом наличие трещин и локальных разрушений не наблюдается, что вероятно обусловлено протеканием химических реакций взаимодействия зерен шунгита с составляющими цементного камня. Полученные результаты подтверждают ранее выполненные исследования, в которых показано существенное изменение состава и структуры шунгита при воздействии на него высоких температур [7].

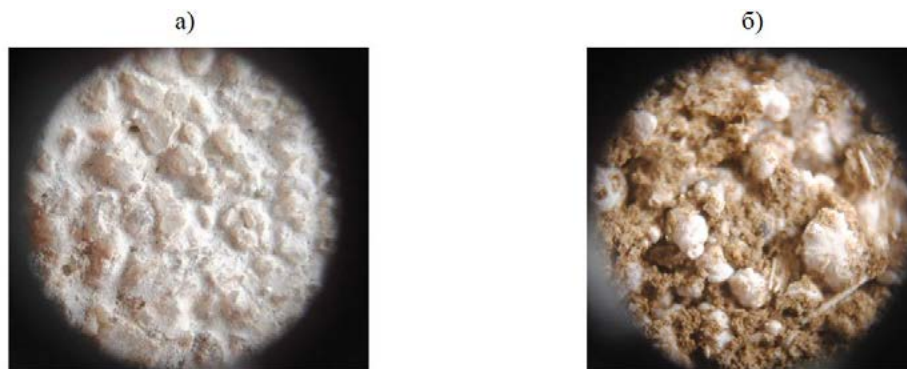


Рисунок 4 – Исследование структуры бетона повышенной термостойкости на оптическом микроскопе  
 а) структура после 900 °С; б) структура после 1100 °С (увеличение в 50 раза)

На основании проведенных исследований предложена технология получения двухслойных железобетонных конструкций вариатропной структуры, заключающаяся в нанесении огнезащитного покрытия в процессе послойного формирования конструкций, состоящих из несущего слоя из высокопрочного бетона и огнезащитного покрытия – слоя из бетона повышенной термостойкости (рисунок 5).



Рисунок 5 – Образец вариатропной двухслойной конструкции с огнезащитным слоем

С целью количественной оценки эффективности разработанного состава бетона проводили расчет показателей огнестойкости вариатропной двухслойной конструкции. Расчет проводили по стандартным методикам на примере конструкции перекрытия [8, 9]. В ходе расчетов определяли показатели огнестойкости конструкции по потере несущей способности, при этом варьировалась толщина огнезащитного слоя термостойкого бетона разработанного состава от 10 до 40 мм. Установлено, что варьируя толщиной слоя защитного термостойкого бетона возможно получать конструкции с повышенной огнестойкостью до 342 минут (рисунок 6).



Рисунок 6 – Зависимость огнестойкости конструкции от толщины огнезащитного слоя

**Заключение.** Таким образом, 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 показатели огнестойкости несущих конструкций зданий и сооружений военного назначения. Использование разработанных бетонов и строительных конструкций на их основе может быть рекомендовано для обеспечения огнестойкости и безопасности защитных укрытий для авиационной техники, а также других объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
2. Управление огнестойкостью железобетонных конструкций вариатропной структуры / А.А. Леденев и др. // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». 2016. № 4. С. 16 – 22.
3. Мосин О.В. Новый природный минеральный сорбент – шунгит // Сантехника. 2011. № 3. С. 34 – 36.
4. Структурно-реологические свойства дисперсно-зернистых систем: Монография / Е.В. Алексеева и др.; под общ. ред В.Т. Перцева. Воронеж: ВГАСУ, 2010. 196 с.
5. ГОСТ 20910-90. Бетоны жаростойкие. Технические условия.
6. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.
7. Резников Ю.К., Шубенкин П.Ф., Ершов К.В. Шунгизит и шунгизитобетон. М.: Стройиздат, 1974. 118 с.
8. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 143 с.
9. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.

#### REFERENCES

1. Romanenkov I.G., Levites F.A. Ogneshhita stroitel'nykh konstruksij. M.: Strojizdat, 1991. 320 s.
2. Upravlenie ognestojkost'yu zhelezobetonnykh konstruksij variatropnoj struktury / A.A. Ledenev i dr. // Nauchno-teoreticheskij zhurnal «Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova». 2016. № 4. S. 16 – 22.





3. Mosin O.V. Novyj prirodnyj mineral'nyj sorbent – shungit // Santekhnika. 2011. № 3. S. 34 – 36.
4. Strukturno-reologicheskie svoystva dispersno-zernistykh sistem: Monografiya / E.V. Alekseeva i dr.; pod obshh. red V.T. Pertseva. Voronezh: VGASU, 2010. 196 s.
5. GOST 20910-90. Betony zharostojkie. Tekhnicheskie usloviya.
6. GOST 7076-99. Materialy i izdeliya stroitel'nye. Metod opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya pri stacionarnom teplovom rezhime.
7. Reznikov YU.K., SHubenkin P.F., Ershov K.V. SHungizit i shungizitobeton. M.: Strojizdat, 1974. 118 s.
8. YAkovlev A.I. Raschet ognestojkosti stroitel'nykh konstruksij. M.:Strojizdat, 1988. 143 s.
9. Rojzman V.M. Inzhenernye resheniya po otsenke ognestojkosti proektiruemykh i rekonstrui-ruemykh zdaniy. M.: Assotsiatsiya «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 s.

© Леденев А.А., Внуков А.Н., Загоруйко Т.В., Перцев В.Т., 2018

Леденев Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ledenoff@mil.ru

Внуков Алексей Николаевич, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Загоруйко Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, преподаватель кафедры изыскания и проектирования аэродромов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Перцев Виктор Тихонович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Россия, г. Воронеж, 394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14, учебный корпус № 1, 394006 г. Воронеж, ул. 20-лет Октября, д. 84, учебный корпус № 1, rector@vorstu.ru, rector@vgasu.vrn.ru