

Выбор рациональных технологических параметров жаростойкого бетона на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих

*К. т. н., доцент З.А. Мантуров**

ФГБОУ ВПО Дагестанский государственный технический университет

Ключевые слова: безводный силикат натрия; силикат-глыба; силикат-натриевое композиционное вяжущее; жаростойкий бетон

Одним из эффективных огнеупорных материалов, отвечающих возросшим требованиям индустриализации, является жаростойкий бетон, изделия и конструкции из него, которые находят в последние годы все большее применение в различных отраслях промышленности [1–18]. Преимущества их перед штучными огнеупорными изделиями заключаются в том, что использование жаростойких бетонов позволяет сократить срок строительства в 3–4 раза, уменьшить трудовые затраты при строительстве тепловых агрегатов в 2–3 раза, повысить срок службы теплового агрегата и, тем самым, уменьшить затраты на текущие и капитальные ремонты и др. [4].

Жаростойкие бетоны на основе жидкого стекла нашли широкое применение при эксплуатации не только в условиях высоких температур, но и в различных агрессивных средах. Эти бетоны по сравнению с жаростойкими бетонами на основе клинкерных вяжущих долговечны, экономичны и обладают лучшими физико-механическими свойствами [3, 4, 17]. Кроме того, в отличие от бетонов клинкерных вяжущих жаростойкий бетон на жидком стекле при нагревании почти не снижает прочности [4].

Однако жаростойкие бетоны на жидком стекле содержат большое количество жидкого стекла (300–500 кг на 1 м³ бетона), соответственно, и оксида натрия Na₂O, что сопряжено с достаточно высоким содержанием воды в бетонной смеси (300 и более литров) и необходимостью введения в шихту значительного количества тонкомолотых добавок-отвердителей и огнеупорных добавок (более 500 кг на 1 м³ бетона). Следует отметить, что оксид натрия Na₂O, являясь сильным плавнем, снижает огнеупорность, прочность в нагретом состоянии и другие свойства жаростойкого бетона.

Актуальными в этом плане являются научные исследования, направленные на разработку новых видов бесклинкерных жаростойких бетонов с высокими термомеханическими свойствами на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих [1–2, 6–7, 14, 16–17, 19–20]. В настоящее время уже накоплен достаточно большой опыт проектирования жаростойких бетонов на силикат-натриевых композициях с учетом различных технологических и эксплуатационных факторов. Такие бетоны рассчитаны на температуру до 1000–1600°C при использовании в качестве заполнителя различных огнеупорных материалов.

Использование вместо жидкого стекла в исследуемых нами жаростойких бетонах тонкоизмельченной силикат-натриевой композиции с последующим ее твердением при низкотемпературной тепловой обработке (90–180°C) позволяет значительно снизить концентрацию силиката натрия, исключить энергоемкую операцию получения из силикат-глыбы жидкого стекла, повысить однородность бетонной смеси, улучшить условия формирования, снизить количество воды затворения. Это обеспечивает также существенное повышение когезионной прочности вяжущего и, в конечном счете, приводит к повышению огнеупорности жаростойкого бетона на безводном силикате натрия и значительному улучшению его термомеханических свойств [1–2, 6–7, 16, 19–20].

Жаростойкие бетоны на силикатах натрия также отличаются от аналогичных по составу штучных огнеупоров [8–13, 21–25] меньшим значением модуля упругости и теплового расширения при высоких температурах и, как следствие, большей термостойкостью, меньшей примерно на 20% теплопроводностью, более высокой прочностью конструкций из них. Следует отметить, что уже накоплено много примеров, демонстрирующих более длительный срок службы и высокую эффективность исследуемых жаростойких бетонов по сравнению со штучными огнеупорами [1, 2, 14, 16].

Объектом исследования в данной статье является жаростойкий бетон на карборунд-шамот-силикат-натриевом композиционном вяжущем и низкоожженном шамотном заполнителе из местных сланцевых глин. Для разработки технологии и состава исследуемого нами в статье жаростойкого бетона с повышенными по сравнению с бетонами на жидком стекле термомеханическими свойствами требовалось решения нескольких частных задач: выявить возможность получения карборунд-шамот-силикат-натриевого композиционного вяжущего и жаростойкого бетона на его основе с высокими термомеханическими свойствами; изучить основные закономерности протекания физико-химических

Мантуров З.А. Выбор рациональных технологических параметров жаростойкого бетона на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих

процессов в композиционном вяжущем и жаростойком бетоне на его основе в период сушки, обжига и эксплуатации; выбрать сырьевые материалы для производства жаростойкого бетона, не уступающего по своим эксплуатационным характеристикам шамотным огнеупорам и подобрать рациональный состав бетонной смеси; исследовать основные термомеханические, теплофизические и другие свойства жаростойкого бетона; выявить и выбрать основные рациональные технологические параметры производства жаростойкого бетона; провести проверку результатов исследований в производственных условиях и оценить технико-экономическую эффективность применения разработанного жаростойкого бетона.

В связи с ограниченностью объема статьи нами из перечисленных задач рассмотрена лишь задача по выявлению и выбору основных технологических параметров, а другие задачи освещены в различных публикациях автора [19, 20 и др.].

Структура жаростойкого бетона, определяющая его важнейшие свойства, обусловлена не только составом его компонентов, но и технологическими факторами – качеством перемешивания бетонной смеси и эффективностью ее уплотнения при формовании [1–5].

Процесс смешивания бетонной смеси зависит от многих факторов. На эффективность и интенсивность смешивания влияет, в частности, конструкция смесителя, определяющая скорость и траекторию перемещения частиц, порядок загрузки компонентов и др.

С целью выявления влияния способов и режимов приготовления бетонной смеси на его однородность на основе результатов предварительных исследований был принят следующий состав жаростойкого бетона, % по массе: низкожженый шамотный заполнитель на основе местных сланцевых глин – 80; силикат-натриевое композиционное вяжущее – 20. Состав силикат-натриевого композиционного вяжущего удельной поверхностью 2900–3100 см²/г, % по массе: тонкоизмельченная смесь карборунда и шамота (1:1) – 85; безводный силикат натрия (силикат-глыба) – 15. При этом за косвенный показатель однородности бетонной смеси была принята прочность при сжатии образцов жаростойкого бетона после сушки.

Смешивание жаростойкой бетонной смеси оптимального состава производили в различных типах смесителей: лопастном, гравитационном и вибросмесителе. В каждом типе этих смесителей исследовались по четыре режима смешивания компонентов:

- режим 1 – загрузка всех компонентов и воды одновременно, смешивание в течение 8-10 мин;
- режим 2 – подача 30% воды, загрузка всех компонентов, смешивание в течение 2-3 мин, подача остального количества воды и смешивание 5-6 мин;
- режим 3 – загрузка всех компонентов одновременно – сухое перемешивание 3-4 мин, затворение водой и смешивание 5-6 мин;
- режим 4 – загрузка и смешивание мелкой фракции и вяжущего в течение 3 мин, загрузка остальной части заполнителя и смешивание 3-4 мин и, наконец, затворение водой и смешивание 5-6 мин.

Из бетонных смесей при различных режимах смешивания компонентов виброформованием изготавливались образцы размером 10×10×10 см и определялась прочность на сжатие после термообработки. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Наилучшее распределение вяжущего и равномерность структуры, по полученным данным, достигается при тщательном сухом перемешивании компонентов, последующем затворении их водой и продолжении смешивания (см. табл. 1., режим 4). При этом вначале достигается равномерное распределение вяжущего среди мелкой фракции, а затем полученная смесь перемешивается с крупной фракцией. Поэтому для приготовления бетонной смеси был принят режим 4, который является наиболее рациональным.

Таблица 1. Влияние типа смесителя и режимов смешивания на прочность при сжатии исследуемого жаростойкого бетона

Тип смесителя	Прочность на сжатие после сушки, МПа, в зависимости от режимов смешивания компонентов			
	режим 1	режим 2	режим 3	режим 4
Лопастной	9,4	10,2	13,5	20,7
Гравитационный	6,3	9,3	10,6	16,1
Вибросмеситель	9,0	12,4	18,2	23,4

Мантуров З.А. Выбор рациональных технологических параметров жаростойкого бетона на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в табл. 1., показывают, что определенное влияние на прочностные характеристики образцов из исследуемого жаростойкого бетона оказывают и способы смешивания, т.е. тип смесителя. При этом наилучшие результаты были получены при вибросмешивании, а наихудшие – при гравитационном смешивании компонентов бетонной смеси. Однако использование вибросмесительного оборудования приводит к более быстрому выходу ее из строя и несколько ухудшает условия труда (создается большой шум и вибрация). Поэтому в качестве смесительного оборудования был выбран лопастной бетоносмеситель принудительного действия.

Были проведены также исследования по выявлению влияния продолжительности смешивания бетонной смеси после загрузки всех компонентов для выбранного способа (лопастной смеситель принудительного действия) и режима смешивания (см. табл. 1., режим 4) на прочность при сжатии и среднюю плотность жаростойкого бетона, результаты которых приведены на рис. 1.

Анализ кривых на рис. 1 свидетельствует о том, что лучшие результаты достигаются при смешивании в течение 5-7 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности смешивания не улучшает физико-механические свойства бетона, по всей вероятности, из-за расслоения смеси. Результаты этих исследований еще раз подтверждают правильность выбранного режима 4 для смешивания исследуемой жаростойкой бетонной смеси на силикат-натриевом композиционном вяжущем.

Другим важным переделом в технологии жаростойких бетонов является формование изделий из них. Из известных приемов формования жаростойких бетонов наиболее распространены прессование, трамбование и виброформование.

Исходя из вышеизложенного, нами была проведена также серия опытов для выявления рациональных методов и режимов формования из жаростойкого бетона, результаты которых приведены в табл. 2.

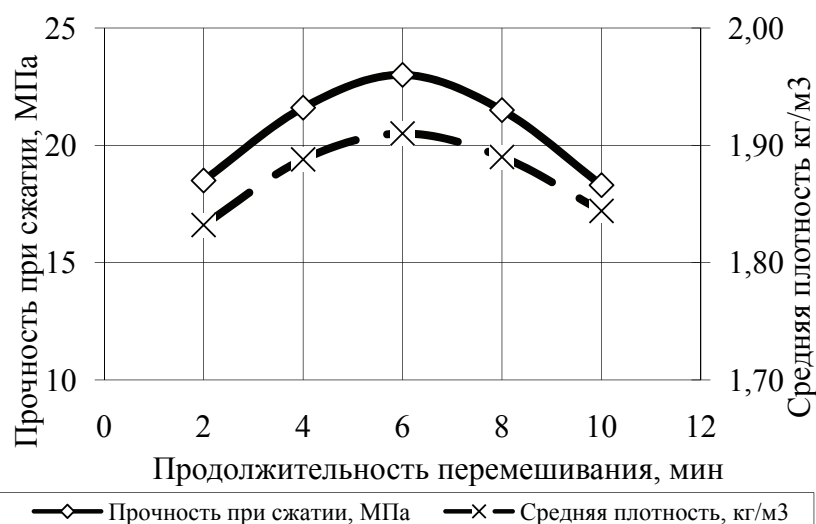


Рисунок 1. Зависимость прочности при сжатии и средней плотности жаростойкого бетона от продолжительности перемешивания после загрузки всех компонентов

Таблица 2. Влияние различных режимов формования на прочность жаростойкого бетона

Режим формования	Метод формования	Параметры режима формования	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа
Режим 1	Виброформование	$f = 50 \text{ Гц}$ $A = 0,6 \text{ мм}$ $t = 90 \text{ с}$	3,6	19,8
Режим 2	Виброформование с пригрузом	$f = 50 \text{ Гц}$ $A = 0,6 \text{ мм}$ $t = 90 \text{ с}$ $P = 0,0015 \text{ МПа}$	6,3	24,3
Режим 3	Прессование одноступенчатое в прессформе	$P = 5 \text{ МПа}$	9,0	36,0
Режим 4	Прессование двухступенчатое в прессформе	$P_1 = 2 \text{ МПа}$ $P_2 = 5 \text{ МПа}$	9,9	39,6

Мантуров З.А. Выбор рациональных технологических параметров жаростойкого бетона на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих

Результаты этих опытов показывают эффективность уплотнения формовочных смесей методом прессования. Повышение степени уплотнения способствует сближению частиц вяжущего и заполнителя, а также увеличению числа связей за счет большой площади контакта. Эти контакты во время тепловой обработки увеличиваются и после обезвоживания закрепляются. Однако уплотнение бетонной смеси методом прессования применяют редко, хотя по технологическим показателям этот способ высокоэффективен и позволяет получать бетон высокой плотности и прочности при минимальном расходе вяжущего. Прессование широко применяется только при формировании мелкоштучных фасонных изделий.

Наиболее распространенным является способ уплотнения бетонной смеси вибрированием. Вибрируемый бетон, как известно, характеризуется коэффициентом пластической вязкости, который является функцией состава бетона (гранулометрии, природы заполнителя, водосодержания и др.) и параметров вибрации (частоты f , Гц; амплитуды колебаний A , мм; интенсивности уплотнения $I = A^2 8\pi^3 f^3$, $\text{см}^2/\text{с}^3$, и времени вибрирования t , мин).

Для выявления влияния указанных выше факторов на прочностные показатели исследуемого жаростойкого бетона нами были проведены соответствующие экспериментальные исследования, результаты которых приведены на рис. 2. Анализ этих графических зависимостей показывает, что при постоянных значениях интенсивности виброуплотнения с увеличением частоты возрастают прочностные показатели жаростойкого бетона. Следовательно, для эффективного уплотнения исследуемых жаростойких бетонов способом вибрирования рационально применять высокие частоты вибрационного воздействия. Однако в промышленности, за редким исключением, такие частоты вибрирования бетона не применяются, поэтому нами для вибрирования жаростойкого бетона выбрана промышленная частота 50 Гц.

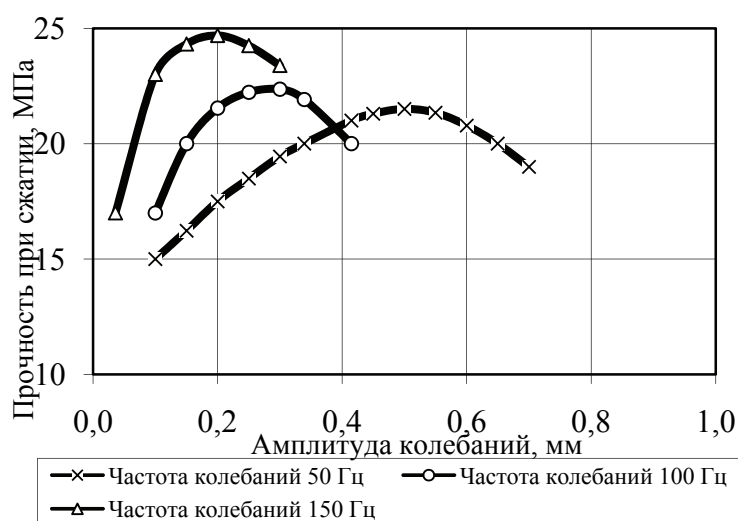


Рисунок 2. Зависимость прочности жаростойкого бетона после сушки от амплитуды колебаний

Кроме того, возрастание прочности при сжатии образцов исследуемого жаростойкого бетона после сушки отмечалось также с увеличением интенсивности вибрационного воздействия I до значений 260–320 $\text{см}^2/\text{с}^3$. Дальнейшее увеличение интенсивности виброуплотнения приводит к небольшому ухудшению свойств исследуемого бетона за счет снижения однородности смеси в результате некоторого ее расслоения.

Как показывают результаты экспериментов (см. рис. 2.), вибрирование исследуемых жестких бетонных смесей вызывает разрыхление смеси и, тем самым, ухудшает прочностные показатели бетона при амплитудах колебаний более 0,5 мм. В этом случае эффективность виброуплотнения жестких бетонных смесей существенно повышается при применении пригруза в процессе вибрации. Под действием давления, вызываемого пригрузом (величина пригруза нами принята равным 0,0015 МПа), исключается разрыхление верхней части бетонной смеси и быстрее уплотняется вся смесь, становится компактнее ее структура и, следовательно, повышаются прочностные показатели бетона.

Следует также учитывать, что для каждого вида бетонной смеси при принятых параметрах колебаний есть своя оптимальная продолжительность вибрирования. При недостаточной продолжительности вибрирования наблюдается недоуплотнение бетона и снижение его прочности, а слишком длительное вибрирование не приводит к заметному повышению плотности и прочности бетона [1–3, 5]. Оптимальная продолжительность вибрирования нами принята равным 1,5 мин (90 сек) на основании данных предварительных экспериментальных исследований. При более длительном вибрировании затраты энергии возрастают в значительно большей степени, чем повышается плотность смеси и, как следствие, прочность образцов жаростойкого бетона.

На основе проведенных нами в данной работе экспериментальных исследований формирование изделий из рассматриваемого жаростойкого бетона рекомендуется производить по режиму 2, параметры которого приведены в табл. 2.

Мантуров З.А. Выбор рациональных технологических параметров жаростойкого бетона на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих

При изучении влияния режима тепловой обработки на физико-механические свойства карборунд-силикат-натриевого композиционного вяжущего было выявлено, что наиболее интенсивное растворение силикат-глыбы происходит при температуре 90–95°C. При подъеме температуры до 180–200°C достигается практически полное обезвоживание системы, в результате которого клеящие контакты упрочняются вследствие повышения их когезионной прочности.

Опыты по выявлению оптимальных технологических параметров проводились на образцах размером 10×10×10 см из разрабатываемого жаростойкого бетона. Однако на практике при изготовлении крупноразмерных изделий режим тепловой обработки следует выбрать с учетом масштабного фактора изделий, т.е. толщины изготавливаемых изделий. Для этого предварительно определялось время достижения температур 90–95°C и 180–200°C в массе бетона в зависимости от толщины изделий.

С целью выявления режима тепловой обработки с учетом толщины изготавливаемых изделий были изготовлены блоки размером 100×100×50 см из исследуемого жаростойкого бетона. При бетонировании этих блоков в них были установлены хромель-алюмелевые термодатчики на поверхности и по сечению блока на расстояниях 5, 10, 15, 20, 25 см. Сушка блоков производилась всесторонне в опытно-промышленной сушильной камере. Температуру в соответствующих точках блока фиксировали потенциометром ПП-63. При этом выдержка осуществлялась поэтапно при температурах 90–95°C и 180–200°C до выравнивания температур в сечении блока. Отсчет времени достижения указанных температур в сечении бетонного блока в зависимости от толщины производился после установления этих температур на поверхности изделий.

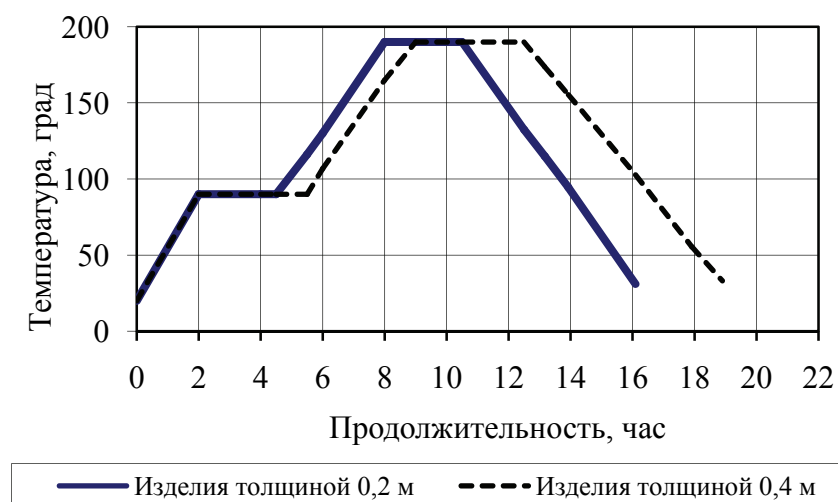


Рисунок 3. Рекомендуемые режимы сушки изделий из жаростойкого бетона

Анализ результатов экспериментальных исследований по тепловой обработке (сушке) блоков из жаростойкого бетона позволил установить рациональные режимы сушки в зависимости от толщины изготавливаемых изделий, приведенные на рис. 3. в виде графических зависимостей.

Таким образом, в результате проведенных комплексных исследований нами были разработаны технологические режимы приготовления, формирования и тепловой обработки жаростойкого бетона на силикат-натриевом композиционном вяжущем.

1. Выбран способ приготовления бетонной смеси: перемешивание в лопастном смесителе мелкой фракции заполнителя и композиционного вяжущего в течение 2-3 мин.; загрузка остальных компонентов и перемешивание 3-4 мин.; подача воды затворения и 5-6 минутное перемешивание. Такой порядок приготовления бетонной смеси обеспечивает наиболее равномерное распределение вяжущего в нем.

2. Установлен способ и режим формирования изделий – виброформование с пригрузом 0.0015 МПа со следующими параметрами: частота вибрации – 50 Гц; амплитуда колебаний – 0,4...0,5 мм; продолжительность вибрации – 90 с.

3. Определен режим тепловой обработки (сушки) – подъем температуры до 90...95°C с последующей изотермической выдержкой в течение 2,5 ч (толщина изделий $\delta=0,2$ м) и 3,5 ч ($\delta=0,4$ м), затем подъем температуры до 180...200°C с последующей выдержкой – 3,5 ч ($\delta=0,2$ м) и 4,0 ч ($\delta=0,4$ м).

Следует также отметить, что результаты проведенных нами комплексных научных исследований прошли опытно-промышленную апробацию в условиях действующего цеха ЗАО «Опытное научно-производственное предприятие», по результатам которой была выявлена технико-экономическая эффективность разработанного жаростойкого бетона на силикат-натриевом композиционном вяжущем.

Литература

1. Горлов Ю. П., Меркин А. П., Зейфман М. И., Тотурбиев Б. Д. Жаростойкий бетон на основе композиций из природных и техногенных стекол. М.: Стройиздат, 1986. 144с.
2. Тотурбиев Б. Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М.: Стройиздат, 1988. 208 с.
3. Тарасова А. П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. М.: Стройиздат, 1982. 133 с.
4. Некрасов К. Д. Новое в технологии жаростойких бетонов. М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1981. 110 с.
5. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2007. 528 с.
6. Тотурбиев Б. Д., Порсуков А. А. Корундовый жаростойкий бетон с повышенными эксплуатационными свойствами // Бетон и железобетон. 2006. №4. С. 13–15.
7. Тотурбиев Б. Д., Порсуков А. А. Жаростойкое композиционное вяжущее // Бетон и железобетон. 2006. №3. С. 12–16.
8. Ruelle I., Richez G. Refractory Supplier plays a key roll in furnace construction // 7 Glass. 2000. V. 77. No. 5. Pp. 144-145.
9. Nishikawa A. Technology of monolithic refractories. Plibrico Japan Comp. Ltd. Tokyo, 1996. 598 p.
10. Jshikawa M., Taoka K. Energy and Resource Saving and Dusty Environment in Monolithic Refractories // Taikabutsu– Refractories. 2000. V.52. No. 4. Pp. 234–239.
11. Petzold A., Ulbricht J. Feuerbeton und betonartige feuerfeste Masse und Materialien. Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie. Leipzig–Stuttgart: 1994. 322 p.
12. Banerjee S. Monolithic refractories. Singapore–New Jersey–London–Hong-Kong: World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 1998. 311 p.
13. Nahashi H., Tsuno M., Hayaishi M. Used refractories recycle technology in melting shop // Taikabutsu–Refractories. 2000. V. 52. No. 4. Pp. 178–184.
14. Хлыстов А. И., Коренькова С. Ф., Шеина Т. В. Применение жаростойкого бетона на основе силикатно-натриевого композиционного вяжущего // Бетон и железобетон. 1992. № 9. С.17-19.
15. Хлыстов А. И., Божко А. В., Соколова С. В., Рязов Р. Т. Повышение эффективности и улучшение качества футеровочных конструкций из жаростойкого бетона // Огнеупоры и техническая керамика. 2004. № 3. С. 26-31.
16. Буров В. Ю. Жаростойкие бетоны для футеровки зоны спекания цементных вращающихся печей: Автореф. дис. д-ра техн. наук. М., 1994. 31 с.
17. Комиссаренко Б. С., Мизюряев С. А., Жигулина А. Ю. Модифицированные жидкостекольные системы как основа для жаростойкого заполнителя // Строительные материалы. 2001. №10. С. 27-28.
18. Хежев Т. А., Хежев Х. А. Эффективные огнезащитные составы на пористых заполнителях // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2010. Вып. 17 (36). С. 70–73.
19. Мантуров З. А. Подбор состава и исследование влияния технологических факторов на свойства безобжигового жаростойкого перлитового теплоизоляционного материала // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2010. №18. С. 129–136.
20. Мантуров З. А. Исследования дилатометрических и основных теплофизических свойств безобжигового жаростойкого теплоизоляционного материала на силикат-натриевых композициях // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2010. №19. С. 50–58.
21. Кащеев И. Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топков: Справочное издание: В двух книгах. Кн. 1. Производство огнеупоров. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 663 с.
22. Кащеев И. Д., Гришенкова Е. Е. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топков: Справочное издание: В двух книгах. Кн. 2. Служба огнеупоров. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 656 с.
23. Кащеев И. Д. Огнеупоры: материалы, изделия, свойства и применение: Каталог-справочник. В 2-х книгах. Книга 1. М: Теплоэнергетик, 2003. 336 с.
24. Кащеев И. Д. Огнеупоры: материалы, изделия, свойства и применение: Каталог-справочник: В 2-х книгах. Книга 2. М.: Теплоэнергетик, 2003. 320 с.
25. Пивинский Ю. Е. Неформованные огнеупоры: Справочное издание в 2-х томах. Т. 1 Книга 1. Общие вопросы технологии. М.: Теплотехник, 2004. 448 с.

**Загир Абдулнасирович Мантуров, г. Махачкала, Россия
Тел. моб.: +7(928)594-64-09; эл. почта: Zagir9@mail.ru*

Мантуров З.А. Выбор рациональных технологических параметров жаростойкого бетона на основе силикат-натриевых композиционных вяжущих