DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-1-59-68

*Елистраткин М.Ю., кандидат технических наук,
ООО «Исследователь», Россия,
Кожухова М.И., кандидат технических наук, научный сотрудник,
Университет Висконсин-Милуоки, США*
*Ответственный автор E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Аннотация: неавтоклавный газобетон является единственной реальной альтернативой газосиликату при организации его выпуска на базе региональных производств малой и средней мощности. Это будет способствовать улучшению конкурентной обстановки на рынке строительных материалов и оптимизации стоимости строительства. Особый интерес представляет возможность расширения области применения данного материала за счёт существенного повышения прочностных показателей, при сохранении его средней плотности в приемлемых, с точки зрения теплоизоляционных качеств, пределах – не более 1000...1100 кг/м³. При уровне прочности 10 МПа и выше, в сочетании с дисперсным армированием или применением традиционных неметаллических арматурных элементов, подобный газобетон может быть использован как лёгкий конструкционный материал для создания силовых элементов малоэтажных зданий, в том числе и в перспективных технологиях строительной печати; устройства распределяющих нагрузки поясов; несъёмной опалубки; пористого силового элемента, придающего жёсткость, заполнения тонкостенных трубчатых конструкций. В работе представлена оценка эффективности традиционных способов повышения прочности неавтоклавного газобетона. Предложены и опробованы новые решения по целенаправленному формированию строения порового пространства за счёт создания и использования газообразователя с нормированным газовыделением, позволяющего создавать поры заданного объёма. Залогом экономической эффективности предлагаемых решений является переход от традиционного портландцемента на композиционные вяжущие на его основе. Обоснованный выбор количества и состава минеральной добавки позволяет оптимизировать свойства вяжущего под особенности решаемой задачи и добиться минимизации расхода цемента и химических модификаторов, повышения скорости набора прочности и итоговых показателей неавтоклавного газобетона.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, повышение прочности, тонкомолотая минеральная добавка, композиционное вяжущее, совместный помол, управление строением порового пространства, газообразователь с нормированным газовыделением, повышение конкурентоспособности

Введение

Повышение уровня прочности строительных материалов, в большинстве случаев, позволяет расширить круг и повысить эффективность решаемых с их помощью задач, снизить их энергоёмкость в пересчёте на единицу прочности, увеличить долговечность и некоторые другие эксплуатационные показатели. Классическими примерами могут служить обоснованное применение высокопрочных сталей взамен обычных, использование высокопрочных бетонов вместо традиционных металлических или железобетонных конструкций [1-3]. Дополнительные затраты, связанные в подобных случаях с необходимостью использования высококачественных сырьевых материалов и эффективных добавок, повышения технического уровня и культуры производства, необходимостью проведения комплекса исследований и проектных работ, обосновывающих возможность и целесообразность отхода от общепринятых подходов, как правило, с лихвой окупаются. И, если приведённые в качестве примеров решения, не смотря на все трудности пути из лабораторий на стройплощадки, не раз подтвердили свою эффективность, то целесообразность существенного повышения прочности ячеистых бетонов на первый взгляд не вполне очевидна.

Промышленно выпускаемые на данный момент ячеистые бетоны при средней плотности 400...700 кг/м³ имеют прочностные показатели от 1 до 3...4 МПа, причём нижняя граница прочностного диапазона скорее характерна для неавтоклавных пенобетонов, а верхняя – для газосиликата. Определённое повышение прочности подобных материалов в данном диапазоне плотностей возможно, но, по большому счёту, не требуется ввиду её достаточности для их ниши применения. Большинство разработок в данной области направлено на снижение себестоимости и повышение стабильности качества.

В связи с этим, говоря о ячеистых бетонах повышенной прочности, на наш взгляд, следует рассматривать диапазон более высоких плотностей – 800...1000 кг/м³ и в качестве целевого устанавливать уровень прочности 10...15 МПа и более в перспективе. Подтверждением принципиальной возможности получения

материалов гидратационного твердения с подобными характеристиками могут служить отдельные виды лёгких бетонов на пористых заполнителях [4-8].

Более существенное повышение плотности так же не целесообразно, поскольку ощутимо падает эффект снижения собственного веса конструкций и возникает сильная конкуренция со стороны традиционных лёгких бетонов на пористых заполнителях. Выполнение же указанных требований, при сохранении стоимости сопоставимой с обычными, позволит применять высокопрочные ячеистые бетоны в качестве лёгких конструкционных материалов, существенно расширив область их применения:

- самонагруженные пролётные пространственные конструкции с улучшенными тепло- и шумоизоляционными характеристиками и огнестойкостью;
- внутреннее, воспринимающее нагрузки и придающее жесткость, заполнение трубчатых и коробчатых конструкций из высокопрочных сталей, пластмасс и других эффективных конструкционных материалов;
- несущие противопожарные перегородки;
- не создающие осколков ограждающие конструкции лёгких защитных сооружений против кинетических боеприпасов;
- интегрированные силовые элементы конструкций, создаваемых с помощью 3D аддитивных технологий (строительной печати) [9].

Эффективность практического применения материала в намеченных областях в значительной степени будет зависеть от уровня достигнутых показателей. В связи с этим возникает необходимость установления отправной точки и анализа путей повышения прочности ячеистых бетонов.

В качестве базовой системы, на наш взгляд, наибольший интерес представляет именно неавтоклавный газобетон. Технология газосиликата имеет большие ограничения со стороны автоклавной обработки на размер и форму изделий, полностью исключает их монолитное изготовление. Неавтоклавная пенотехнология за 10 лет бума в конце 90-х – начале-середине 2000-х, так и не вышла на высокие показатели физико-механических свойств, хотя в наибольшей степени пригодная для монолитного строительства.

Неавтоклавный газобетон, имея сопоставимые с газосиликатом показатели прочности, свободен от ограничений, связанных с условиями твердения. Основой материала является портландцемент, по вопросам применения которого для самых различных целей накоплена огромная база знаний.

Материалы и методы

Особенностью проведения исследований неавтоклавных газобетонов является необходимость решения двух равнозначных и равнотрудных задач: формирования качественной пористой структуры материала и обеспечения должного уровня прочности и долговечности. Причём их решение, как правило, производится в указанной последовательности, а факторы, положительно влияющие на решение первой задачи, могут любым образом (отрицательно, положительно или нейтрально), сказываться на второй. В этой связи на подготовительном этапе исследований была отработана лабораторная технология получения неавтоклавных газобетонов и разработана необходимая технологическая оснастка.

Так, в качестве минеральной основы материала хорошо показали себя композиционные вяжущие состоящие из 60% (масс) портландцемента и 40% минеральных добавок. Получение вяжущих производилось как совместным помолом, так и смешиванием товарного портландцемента с минеральным порошком с удельной поверхностью 500 м²/кг. Как показала практика, последний способ является более технологичным и гибким при проведении исследований [10-13].

В качестве компонентов минеральных порошков применялись в различных пропорциях кремнезём-содержащие материалы – отходы дробления кварцито-песчаников (Белгородская обл.) и диоритовых порфиритов, а также карбонатные материалы – известняки различных месторождений, мел (Белгородская обл.).

Сверх 100% в смесь вводились полуводный гипс, гидроксид натрия, газообразователь ПАП-1, суперпластификатор СП-1. Количество указанных добавок, по возможности, сохранялось постоянным для сопоставимости результатов. Выбор полуводного гипса обусловлен его большей доступностью при потенциальном внедрении результатов, чем гипсового камня, и высокой дисперсностью, исключающей необходимость его помола в составе вяжущего. Отказ от извести в пользу каустической соды, также обусловлен дополнительными сложностями введения первой в состав смеси, колебаниями свойств у разных производителей, плохой совместимостью с суперпластификаторами и, в некоторых случаях, негативным влиянием на структуру материала [14, 15].

Затворение смесей производилось горячей водой для обеспечения температуры на момент заливки 38...40°C. В/Т исходных составов было принято на уровне 0,43. Следует учитывать, что порядок ввода

компонентов (не раскрывается умышленно) оказывает очень большое влияние на конечный результат. Разработанная лабораторная технология:

- обеспечивает стабильное получение материала с хорошей однородной структурой (рисунок 2а), плотностью 600...650 кг/м³ и прочностью (при твердении в воздушно-влажных условиях) 2...2,5 МПа (7 сут), 3...3,5 МПа (28 сут);
- отличается высокой гибкостью, при большом запасе стабильности по формированию требуемой пористой структуры, т.е. допускает варьирование большинства факторов без существенного влияния на среднюю плотность (дозировка количества газообразователя – одно из немногих исключений);
- имеет запас по экстенсивному повышению прочности за счёт повышения содержания клинкерной части;
- позволяет регулировать среднюю плотность в пределах 400...1200 кг/м³ за счёт изменения дозировки газообразователя;
- максимально учитывает требования переноса полученных лабораторных результатов в реальное производство.

Результаты и обсуждение

Опираясь на базовые положения строительного материаловедения и бетоноведения [16-18], с учётом специфики неавтоклавного газобетона был проведён анализ факторов повышения прочности материала (рис. 1).

Рис. 1. Основные пути повышения прочности газобетона

Fig. 1. Main ways of gas concrete strength increase

Переход на повышенную марку по плотности за счёт снижения расхода газообразователя с 0,1% до 0,067% (от массы композиционного вяжущего) и, как следствие, объёма выделившегося газа, при прочих равных условиях обеспечил прирост прочности в 1,45...1,5 раза. Обращает на себя внимание изменение характера строения порового пространства, заключающееся в утолщении межпоровых перегородок и насыщении их мелкими моноразмерными порами (рис. 2 б, в). Данные поры, вероятно, являются сохранившимися первичными (образованными единичной частицей газообразователя) и не претерпевшими слияния в конечные. Их наличие является нежелательным, поскольку они уменьшают рабочее сечение межпоровых перегородок.

Цена деления 1 мм (а, б); диаметр иглы 1,8 мм (в, г, д)

Рис. 2. Макроструктура: а) шлиф базовый состав №1; б) шлиф состав №2;

в) излом состав №2; г) излом состав №3; д) излом состав №4

Fig. 2. Macrostructure: а) slice base composition No.1; б) slice composition No.2;

в) fracture composition No.2; г) fracture composition No.3; д) fracture of composition No.4

Кратность слияния первичных пор, и как следствие их итоговый размер, зависит от ряда факторов, таких как дисперсность и зерновой состав твёрдой фазы, водосодержание смеси и её реологические характеристики, наличие добавок и условий вспучивания массы, что затрудняет целенаправленное получение требуемой структуры [19-23]. В качестве инструмента прямого регулирования характеристик порового пространства был разработан и опробован экспериментальный газообразователь, представляющий собой пористые гранулы, содержащие определённое количество алюминиевого порошка, рассчитанное на формирование одной поры. Объём формируемой поры, в данном случае, зависит от размеров частиц, т.е. фракции, применяемого гранулированного газообразователя (далее ГГО). Возможно также управление размером формируемых пор за счёт применения одинаковых фракций ГГО, содержащих различное количество металлического алюминия. Структура полученного материала представлена на рис. 2 (г, д).

Таблица 1

Зависимость показателей материала от различных факторов

Table 1

Dependence of material key figures on various factors

№	Описание состава	$\rho_{ср},$ кг/м ³	$R_{сж},$ МПа	$R_{сж},$ МПа	ККК ²⁸
1	Исходный состав (ПАП-1, 0,1% от массы композиционного вяжущего)	606	2,92	4,18	6,9
2	Кол-во газообразователя уменьшено в 1,5 раза (ПАП-1, 0,067% от массы КВ), В/Т=0,423	787	4,13	5,91	7,51
3	Гранулированный газообразователь фр. 0,16...0,315 мм, 2,5 % от массы КВ	806	4,43	6,33	7,85
4	Гранулированный газообразователь фр. 0,315...0,64 мм, 2,5 % от массы КВ	906	4,17	5,96	6,58
5	+30% песка (ПАП-1, 0,067% от массы КВ)	783	4,62	6,61	8,44
6	+50% песка (ПАП-1, 0,067% от массы КВ)	781	2,57	3,68	4,71
7	В/Т снижено до 0,386 (ПАП-1, 0,067% от массы КВ)	805	4,75	6,79	8,43
8	В/Т снижено до 0,345 (ПАП-1, 0,067% от массы КВ)	783	4,89	6,99	8,93

Рис. 3. Влияние на прочность газобетона: а) содержания песка; б) В/Т
Fig. 3. Impact on concrete strength: a) sand content; b) V/T

Следующим технологическим приёмом повышения плотности и прочности газобетона является насыщение его мелким заполнителем [24-27], в качестве которого на данном этапе исследований был использован мелкий мытый кварцевый песок с $M_{кр}=1,4 \dots 1,5$, типичный для Белгородских месторождений (составы №5 и 6, таблица 1). Влияние количества вводимого песка (приводится в процентах от массы композиционного вяжущего) носит ярко выраженный экстремальный характер с пиком в районе 25% (рис. 3), что соответствует повышению прочности по сравнению с равноплотным составом №2 (табл. 1) до 6,7 МПа (+15%) с выходом на $KKK^{28}=8,5$, при одновременном снижении себестоимости продукции ввиду сокращения расхода композиционного вяжущего, величины усадочных деформаций и др. Количество вводимого песка незначительно сказывается на вязкости формовочной смеси.

Обращает на себя внимание более лёгкая распиловка составов по мере повышения содержания песка, что, вероятно, связано с достаточно лёгким вырыванием из цементной матрицы отдельных песчинок зубьями пилы. В этой связи дальнейший прирост эффективности введения заполнителя может быть обеспечен мерами по увеличению сцепления с его поверхностью цементного камня (выбором оптимального сырья, повышением шероховатости частиц и др) и расширением функциональной нагрузки, например, дополнительное снижение плотности за счёт использования высокопрочных микросфер и др.

Рис. 4. Строение порового пространства материала с В/Т 0,39 (слева) и 0,35 (справа)
Fig. 4. Structure of pore space of material with V/T 0.39 (left) and 0.35 (right)

Одним из важнейших факторов, определяющих прочность цементных бетонов является водоцементное отношение, понижение которого в первую очередь возможно за счёт применения суперпластификаторов. Было проведено ступенчатое снижение В/Т отношения с одновременным повышением дозировки суперпластификатора для поддержания приемлемой вязкости смеси при перемешивании (рис. 4, составы 7 и 8 табл. 1).

Как видно из таблицы 1, уменьшение дозировки газообразователя ожидаемо привело к повышению плотности и прочности материала. Однако, в случае с составами №2 и 3 плотность материала оказалась ниже заданной, рассчитанной исходя из фактической газообразующей способности ПАП-1 [22] и ГГО фр. 0,16...0,315 мм. На наш взгляд это является следствием более благоприятного строения порового пространства материала, что нашло отражение на 10...15% более высоких коэффициентах конструктивного качества этих составов.

Более крупная фракция гранулированного газообразователя (0,315...0,64 мм) предназначенная для создания более крупных пор, штатно сработала в этой роли, но не привела к улучшению относительных прочностных показателей материала. На рисунке 3 г видны поризованные межпоровые перегородки, в то время как основной задачей использования ГГО является исключение этого явления. Вероятной причиной явилась недостаточная прочность пористых гранул ГГО, повлекшая их частичное разрушение в процессе интенсивного механизированного перемешивания смеси и образования мелких частиц, формирующих мелкие газовые пузыри в межпоровых перегородках материала. Доработка ГГО, с повышением механической прочности гранул, позволит снизить вероятность подобных явлений и добиться более высоких прочностных показателей материала. В тоже время, возможность целенаправленного формирования в газобетоне заданного количества пор требуемых размеров подтверждается.

Наиболее активное повышение прочности (рис. 3 б) имеет место при снижении В/Т до $\approx 0,37$, при этом расход суперпластификатора по сравнению с контрольным составом №2 повышен в 2 раза. Данный фактор следует принимать во внимание, поскольку стоимость химической добавки составляет ощутимую долю в себестоимости материала. Прирост прочности материала по сравнению с контрольным составом №2 составляет 15...20%, а в сравнении с исходным составом №1 – более 60%. Повышение дозировки суперпластификатора не оказывает существенного влияния на протекание реакции газообразования, однако требует приложения более интенсивных ударных воздействий на смесь в процессе вспучивания. Структура получаемого материала отличается более мелкими порами, размер которых несколько падает при снижении В/Т (рис. 4).

Выводы

Результирующим, по проанализированным факторам, можно принять состав с В/Т=0,36...0,37 (с соответствующим количеством суперпластификатора), 25% песка и гранулированным газообразователем (ГГО) фр. 0,16...0,315 мм, что должно обеспечить выход на установленный уровень функциональных показателей неавтоклавного газобетона.

При этом, в качестве резерва повышения прочности в рамках рассмотренных факторов остаются: дальнейшее повышение плотности материала, с нижней установленной границы материала (800 кг/м^3) до верхней (1000 кг/м^3); повышение эффективности использования мелкого заполнителя; совершенствование предложенной технологии гранулированного газообразователя в целях оптимизации строения порового пространства высокопрочного газобетона.

Всё это позволяет верить в успешность решения намеченной задачи, и существенному расширению границ применения ячеистых бетонов в целом

Литература

1. Yakovlev G., Pudov I., Bazhenov Y., Buryanov A. Increased durability concrete for generation of pillars power lines // MATEC Web of Conferences 5. Сер. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016" 2016. С. 04013.
2. Lessowik W.S. Geonik. Geomimetik als grundlage für die synthese von intelligent bauverbundwerkstoffen / 19 Internationale baustofftagung IBAUSIL. 2015. С. 183 – 189.
3. Bazhenov Y., Murtazaev S.-A., Salamanova M., Saidumov M. High-performance SCC-concrete at earthquake resistant construction // International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Т. 11. №18. С. 12779 – 12786.
4. Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Елистраткин М.Ю. Новое поколение строительных композиций на основе пеностекла // Строительство и реконструкция. 2015. №3 (59). С. 146 – 154.

5. Сапелин А.Н., Бессонов И.В., Елистраткин М.Ю. Конструкционно-теплоизоляционные материалы на основе алюмосиликатных микросфер // В сборнике: Научные технологии и инновации Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). 2014. С. 325 – 330.
6. Кудяков А.И., Петров Г.Г., Абакумов А.Е., Сергеева А.В. Высокопрочный керамзитобетон для строительства энергосберегающих жилых зданий // В сборнике: Перспективные материалы в технике и строительстве (ПМТС-2013) Материалы Первой Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. 2013. С. 399 – 401.
7. Perrot A., Rangeard D. and Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques // Materials and Structures. Matériaux et Constructions. 49 (4). 2016. P. 1213 – 1220.
8. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Савин А.В., Шадский Е.Е. Перспективы применения композиционных вяжущих при производстве железобетонных изделий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №5 (88). С. 95 – 99.
9. Bazhenov Y.M., Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Yerofeyeva I.V., Chernysheva N.V., Sumskey D.A. Concerning the role of mineral additives in composite binder content // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Т. 8. №4. P. 22649 – 22661.
10. Куприна А.А., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Гинзбург А.В. Композиционные вяжущие для эффективных строительных растворов [Электронный ресурс] // Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук, Баженова Юрия Михайловича. Белгород. 2015.
11. Alfimova N.I., Sheychenko M.S., Karatsupa S.V., Yakovlev E.A., Kolomatskiy A.S., Shapovalov N.N. Features of application of high-mg technogenic raw materials as a component of composite binders // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. №11. P. 779 – 783.
12. Лесовик В.С., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. №3. С. 10 – 20.
13. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Реологические свойства газобетонной смеси на основе нетрадиционного сырья // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2012. №3. С. 45 – 48.
14. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Кондрашев К.Р., Сулейманов К.А., Пириев Ю.С. Энергосберегающие газобетоны на композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №4. С. 73 – 83.
15. Лесовик В.С., Гридчин А.М., Елистраткин М.Ю. Целенаправленное формирование свойств материалов за счёт управления параметрами порового пространства // В сборнике: Современные строительные материалы, технологии и конструкции Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова". Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВПО «ГГНТУ»). г. Грозный, 2015. С. 234 – 242.
16. Pospelova E.A., Elistratkin M.Y., Netsvet D.D. Statistical analysis as an instrument for improving the quality of products from cellular concrete // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 670-671. С. 1624 – 1628.
17. Явруян Х.С., Холодник М.Г., Шуйский А.И., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Влияние некоторых рецептурно-технологических факторов на свойства неавтоклавного газобетона // Инженерный вестник Дона. 2015. Т. 38. №4 (38). С. 93.
18. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №2. С. 69 – 76.
19. Страхов А.В., Калужный С.О. Формирование замкнутой пористости в неавтоклавном газобетоне // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. №2 (16). С. 1 – 4.
20. Сулейманова Л.А., Сулейманов К.А., Погорелова И.А. Топология пор в газобетоне // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №5. С. 100 – 105.
21. Нгуен Т.Т., Орешкин Д.В. Исследование структуры газобетона для жилищного строительства Вьетнама // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №3. С. 169 – 172.
22. Бухало А.Б., Нелюбова В.В., Строкова В.В., Сумин А.В. Сравнительная оценка газообразователей для производства ячеистого бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №2. С. 42 – 45.

23. Абдыраймов Ж.А., Мелибаев С.Ж. Влияния различных добавок на технические свойства неавтоклавнога газобетона // Вестник КГУСТА. 2016. №1 (51). С. 156 – 161.
24. Дерябин П.П., Герина О.П. Рецелтурные и техноложические особенности производства газобетона // В сборнике: Развитие дорожно-транспорного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования VII Всероссийская научно-практическая конференция ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием): материалы конференции. 2012. С. 419 – 423.
25. Кара К.А. К вопросу о технико-экономической эффективности неавтоклавнога ячеистого бетона // Региональная архитектура и строительство. 2016. №4 (29). С. 20 – 27.
26. Сердюк В.Р. Ячеистый бетон как важная составляющая строительства энергосберегающего жилья в странах СНГ // В сборнике: Инновационное развитие территорий Материалы III Международной научно-практической конференции / Отв. за вып. З.М. Магруппова. Череповецкий государственный университет, 2015. С. 21 – 23.

References

1. Yakovlev G., Pudov I., Bazhenov Y., Buryanov A. Increased durability concrete for generation of pillars power lines. MATEC Web of Conferences 5. Ser. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016" 2016. P. 04013.
2. Lessowik W.S. Geonik. Geomimetik als grundlage für die synthese von intelligent bauverbundwerkstoffen / 19 Internationale baustofftagung IBAUSIL. 2015. P. 183 – 189.
3. Bazhenov Y., Murtazaev S.-A., Salamanova M., Saidumov M. High-performance SCC-concrete at earthquake resistant construction. International Journal of Environmental and Science Education. 2016. 11 (18). P. 12779 – 12786.
4. Lesovik V.S., Puchka O.V., Vajsera S.S., Elistratkin M.Ju. Novoe pokolenie stroitel'nyh kompozitov na osnove penostekla Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2015. 3 (59). P. 146 – 154. (rus)
5. Sapelin A.N., Bessonov I.V., Elistratkin M.Ju. Konstrukcionno-teploizoljacionnye mate-rialy na osnove aljunosilikatnyh mikrosfer. V sbornike: Naukoemkie tehnologii i innovacii Jubilejnaja Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija, posvjashhennaja 60-letiju BGTU im. V.G. Shuhova (XXI nauchnye chtenija). 2014. P. 325 – 330. (rus)
6. Kudjakov A.I., Petrov G.G., Abakumov A.E., Sergeeva A.V. Vysokoprochnyj keramzitobeton dlja stroitel'stva jenergosberegajushhih zhilyh zdaniy. V sbornike: Perspektivnye materialy v tehnike i stroitel'stve (PMTS-2013) Materialy Pervoj Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem. 2013. P. 399 – 401. (rus)
7. Perrot A., Rangeard D. and Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures. Matériaux et Constructions. 49 (4). 2016. P. 1213 – 1220.
8. Alfimova N.I., Lesovik V.S., Savin A.V., Shadskij E.E. Perspektivy primenenija kompozicionnyh vjazhushhih pri proizvodstve zhelezobetonnyh izdelij. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2014. 5 (88). P. 95 – 99. (rus)
9. Bazhenov Y.M., Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Yerofeyeva I.V., Chernysheva N.V., Sumskey D.A. Soncerning the role of mineral additives in composite binder content International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. 8 (4). P. 22649 – 22661.
10. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Elistratkin M.Ju., Ginzburg A.V. Kompozicionnye vjazhushhie dlja jeffektivnyh stroitel'nyh rastvorov [Elektronnyj resurs]. Nauchno-prakticheskaja konferencija k 85-letiju zaslužennogo dejatelja nauki RF, akademika RAASN, doktora tehničeskikh nauk, Bazhenova Jurija Mihajlovicha. Belgorod. 2015. (rus)
11. Alfimova N.I., Sheychenko M.S., Karatsupa S.V., Yakovlev E.A., Kolomatskiy A.S., Shapovalov N.N. Features of application of high-mg technogenic raw materials as a component of composite binders. Research Journal of Applied Sciences. 2014. 9 (11). P. 779 – 783.
12. Lesovik V.S., Sulejmanova L.A., Kara K.A. Jenergojeffektivnye gazobetony na kompozicionnyh vjazhushhih dlja monolitnogo stroitel'stva. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2012. 3. P. 10 – 20. (rus)
13. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. Reologicheskie svojstva gazobetonnoj smesi na osnove netradicionnogo syr'ja. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta im. V.G.Shuhova. 2012. 3. P. 45 – 48. (rus)
14. Sulejmanova L.A., Pogorelova I.A., Kondrashev K.R., Sulejmanov K.A., Piriev Ju.S. Jenergosberegajushhie gazobetony na kompozicionnyh vjazhushhih. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta im. V.G. Shuhova. 2016. 4. P. 73 – 83. (rus)
15. Lesovik V.S., Gridchin A.M., Elistratkin M.Ju. Celenapravlennoe formirovanie svojstv materialov za schjot upravljenija parametrami porovogo prostranstva. V sbornike: Sovremennye stroitel'nye materialy, tehnologi i konstrukcii Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj 95-letiju FGBOU VPO "GGNTU im. akad. M.D. Millionshnikova". Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego

- professional'nogo obrazovanija «Groznerskij gosudarstvennyj neftjanij tehničeskij universitet imeni akademika M.D. Millionshnikova» (FGBOU VPO «GGNTU»). g. Groznyj, 2015. P. 234 – 242. (rus)
16. Pospelova E.A., Elistratkin M.Y., Netsvet D.D. Statistical analysis as an instrument for improving the quality of products from cellular concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 670-671. P. 1624 – 1628.
17. Javrujan H.S., Holodnjak M.G., Shujskij A.I., Stel'mah S.A., Shherban' E.M. Vlijanie nekotoryh recepturno-tehnologičeskikh faktorov na svojstva neavtoklavnogo gazobetona. *Inženernyj vestnik Dona*. 2015. 38 (4) (38). P. 93. (rus)
18. Sulejmanova L.A. Upravlenie processom formirovanija poristoj struktury jacheistyh betonov. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2016. 2. P. 69 – 76. (rus)
19. Strahov A.V., Kaljuzhnyj S.O. Formirovanie zamknutoj poristosti v neavtoklavnom gazobetone. *Tehničeskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2016. 2 (16). P. 1 – 4. (rus)
20. Sulejmanova L.A., Sulejmanov K.A., Pogorelova I.A. Topologija por v gazobetone. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2016. 5. P. 100 – 105. (rus)
21. Nguen T.T., Oreshkin D.V. Issledovanie struktury gazobetona dlja zhlisshnogo stroitel'stva V'etnama. *Nauchno-tehničeskij vestnik Povolzh'ja*. 2014. 3. P. 169 – 172. (rus)
22. Buhalo A.B., Neljubova V.V., Stokova V.V., Sumin A.V. Sravnitel'naja ocenka gazoobrazovatelej dlja proizvodstva jacheistogo betona. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2013. 2. P. 42 – 45. (rus)
23. Abdyrajmov Zh.A., Melibaev S.Zh. Vlijanija razlichnyh dobavok na tehničeskije svojstva neavtoklavnogo gazobetona. *Vestnik KGUSTA*. 2016. 1 (51). P. 156 – 161. (rus)
24. Derjabin P.P., Gerina O.P. Receturnye i tehnologičeskije osobennosti proizvodstva gazobetona. V sbornike: *Razvitie dorozhno-transportnogo kompleksa i stroitel'noj infrastruktury na osnove racional'nogo prirodopol'zovanija VII Vserossijskaja nauchno-praktičeskaja konferencija FGBOU VPO «SibADI» (s mezhdunarodnym uchastiem): materialy konferencii*. 2012. P. 419 – 423. (rus)
25. Kara K.A. K voprosu o tehniko-jekonomičeskoj jeffektivnosti neavtoklavnogo jacheistogo betona. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2016. 4 (29). P. 20 – 27. (rus)
26. Serdjuk V.R. Jacheistyj beton kak vazhnaja sostavljajushhaja stroitel'stva jenergosberegajushhego zhl'ja v stranah SNG. V sbornike: *Innovacionnoe razvitie territorij Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Otv. za vyp. Z.M. Magrupova. Cherepoveckij gosudarstvennyj universitet*, 2015. P. 21 – 23.

*Elistratkin M.Yu. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
LLC «Issledovatel», Russia,
Kozhukhova M.I., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Research Officer,
University of Wisconsin-Milwaukee, the USA*
*Corresponding author E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

ANALYSIS OF THE FACTORS OF INCREASING THE STRENGTH OF THE NON-AUTOCCLAVE AERATED CONCRETE

Abstract: non-autoclaved aerated concrete is the only real alternative to gas silicate in the organization of its release on the basis of regional production of small and medium capacity. This will help improve the competitive environment in the building materials market and optimize the cost of construction. Of particular interest is the possibility of expanding the field of application of this material due to a significant increase in strength characteristics, while maintaining its average density in acceptable, in terms of thermal insulation properties, limits - not more than 1000 ... 1100 kg/m³. At a strength level of 10 MPa and above, in combination with dispersed reinforcement or the use of traditional non-metallic reinforcing elements, such aerated concrete can be used as a lightweight structural material for creating power elements of low-rise buildings, including in promising construction printing technologies; devices distributing the load belts; non-removable formwork; porous, stiffening, filling thin-walled tubular structures. The paper presents an assessment of the effectiveness of traditional ways to increase the strength of non-autoclaved aerated concrete. New solutions for the purposeful formation of the pore space structure are proposed and tested due to the creation and use of a gas generator with normalized gas evolution, which allows the creation of pores of a given volume. The key to the economic effectiveness of the proposed solutions is the transition from traditional portland cement to composite binders based on it. The substantiated choice of the amount and composition of the mineral additive makes it possible to optimize the properties of the binder under the particularity of the problem being solved, and to minimize the consumption of cement and chemical modifiers, increase the speed of durability and the final indices of non-autoclaved aerated concrete.

Keywords: non-autoclaved aerated concrete, strength increase, fine-milled mineral additive, composite binder, joint grinding, pore space structure control, gas generator with normalized gas evolution, increase of competitiveness

Для цитирования: Елистраткин М.Ю., Кожухова М.И. Анализ факторов повышения прочности неавтоклавного газобетона // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №1. С. 59 – 68. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-1-59-68

For citation: Elistratkin M.Yu., Kozhukhova M.I. Analysis of the factors of increasing the strength of the non-autoclave aerated concrete. Construction Materials and Products. 2018. 1 (1). P. 59 – 68. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-1-59-68

Поступила в редакцию 2 января 2018 г.
Принята в доработанном виде 10 февраля 2018 г.
Одобрена для публикации 16 марта 2018 г.

Received: January 2, 2018.
Revised: February 10, 2018.
Accepted: March 16, 2018.