УДК 691.327.333

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-105-117

*А.И. КУДЯКОВ, А.Б. СТЕШЕНКО, Н.П. ДУШЕНИН, Н.Е. РЯБЦЕВА,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ЦЕМЕНТНЫЙ ПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ С ЗОЛОЙ ГИДРОУДАЛЕНИЯ

Представлены результаты исследований цементного пенобетона неавтоклавного твердения с золой из золошлаковых материалов (ЗШМ) Северской ТЭЦ Томской области. Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью разработки рецептурно-технологических решений по производству энергоэффективных стеновых материалов с применением местного природного и техногенного сырья.

По результатам исследований установлено, что при реализации принципов эмерджентности структуры первого порядка с использованием дисперсной минеральной добавки в виде золы ЗШМ Северской ТЭЦ Томской области и суперпластифицирующих органических добавок в технологии цементного пенобетона естественного твердения достигается требуемая пластичность на стадии транспортирования и формования изделий и ускорение структурообразования пенобетона в изделиях. Исследование пенобетонной смеси и пенобетона проводилось в аккредитованной лаборатории ТГАСУ в соответствии с требованиями национальных стандартов. При совместном введении добавок золы Северской ТЭЦ и пластификатора «Реламикс Т-2» у пенобетона с маркой по средней плотности D400 увеличивается прочность на сжатие в 28-суточном возрасте на 26–66 %, понижается водопоглощение по массе на 30 % при незначительном уменьшении теплопроводности.

Разработаны рецептурно-технологические решения производства пенобетона с золой ЗШМ для устройства стеновых изделий и конструкций при индивидуальном жилищном строительстве.

Ключевые слова: теплоизоляционный пенобетон; зола; средняя плотность; прочность на сжатие; пластификаторы; класс бетона по прочности; теплопроводность.

Для цитирования: Кудяков А.И., Стешенко А.Б., Душенин Н.П., Рябцева Н.Е. Теплоизоляционный цементный пенобетон неавтоклавного твердения с золой гидроудаления // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 105–117.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-105-117

*A.I. KUDYAKOV, A.B. STESHENKO, N.P. DUSHENIN, N.E. RYABTSEVA,
Tomsk State University of Architecture and Building*

HEAT-INSULATING NON-AUTOCLAVED LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH HYDRAULIC ASH REMOVAL

The paper presents research results of natural hardening of lightweight concrete with aluminosilicate ash generated by the Thermal Power Plant in Seversk (Tomsk, Russia). Today, it is necessary to develop effective building materials with improved operational properties by using local natural and technogenic raw materials. The acceleration of the structure formation and required plasticity for a transportation and molding of lightweight concrete products are achieved by using finely dispersed aluminosilicate minerals and plasticizers for natural hardening of lightweight concrete. The concrete mixture and lightweight concrete are studied in the TSUAB laboratory accredited in accordance with national standard requirements. The optimum content of hydraulic ash in lightweight concrete mixture is 10–15 wt.%. the compressive strength

lightweight concrete with D400 density increases by 26–66 % after 28-day curing, when adding the Relamix T-2 plasticizer and ash from the Thermal Power Plant. Its water absorption reduces by 30 wt.% with insignificant decrease in thermal conductivity. Technological solutions are developed for the production of lightweight concrete with ash ash and slag materials for wall structures in individual housing construction.

Keywords: heat insulating lightweight concrete; ash; average density; compressive strength; plasticizers; concrete strength quality, thermal conductivity.

For citation: Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Dushenin N.P., Ryabtseva N.E. Teploizolyatsionnyi tsementnyi penobeton neavtoklavnogo tverdeniya s zoloi gidroudaleniya [Heat-insulating non-autoclaved lightweight concrete with hydraulic ash removal]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 5. Pp. 105–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-105-117

Введение

При решении социально-экономической задачи по обеспечению населения России доступным и комфортным жильем перспективным является строительство индивидуальных жилых домов. По данным Росстата, в 2020 г. введено 34,0 млн кв. м жилья в индивидуальных домах. По сравнению с 2019 г. прирост индивидуального жилищного строительства (ИЖС) составил 4 %. Строительство собственного дома, особенно во время пандемии, с возможностью проживания в самоизоляции и осуществления производственной деятельности дистанционно становится актуальным. В соответствии с программой Минстроя России по развитию ИЖС годовой объем строительства индивидуальных домов в 2024 г. увеличится до 40 млн кв. м.

При принятии решения о строительстве собственного жилья большое значение имеет вид и стоимость стенового материала. Стеновые материалы, предназначенные для индивидуального жилищного строительства, должны обладать низким коэффициентом теплопроводности, высокой долговечностью, а также иметь технологические возможности для организации строительства стен из блоков или из смесей, приготовленных на строительной площадке (вариант монолитного строительства), в местах возведения зданий.

Наиболее перспективным в ИЖС по возможностям использования местного сырья в производстве стеновых материалов и технико-экономическим показателям является пенобетон неавтоклавного (естественного) твердения [1–3]. По прогнозным данным, производство неавтоклавного пенобетона в 2021 г. достигнет 8,1 млн м³ [4].

При изготовлении пенобетона повышенного качества необходимо учитывать большое количество различных факторов и обеспечивать регламентированные условия структурообразования на всех этапах жизненного цикла продукции. Основным процессом при управлении качеством пенобетона является формирование однородной пористой структуры при приготовлении смеси и ее твердении [5].

Первичная пористая структура пенобетонной смеси формируется в короткий промежуток времени в условиях интенсивных динамических воздействий при перемешивании компонентов поризованной цементной композиции

в бетоносмесителе. На устойчивость дисперсных частиц твердой и газовой фаз в структуре пенобетонных смесей влияют процессы расслоения. Расслоение пенобетонной смеси происходит в результате: ударных колебаний на элементы структуры в смесителе; превышения толщины водных прослоек на поверхности твердых частиц; истечения жидкости из пенных пленок (синерезиса); большой средней плотности цементной матрицы межпоровых перегородок. При этом происходит коалесценция пенных пленок, вода перемещается в верхнюю часть форм, изменяется дисперсность газовой фазы, и наблюдается частичное разрушение воздушных пор [6]. Коалесценция пенных пленок происходит в период начального схватывания цементного теста по причине химического взаимодействия воды с частицами цемента, повышения концентрации ПАВ в межчастичной водной среде и мицеллообразования.

Снижение эффекта расслоения пенобетонной смеси возможно путем создания пены с размерами пор, обеспечивающими плотную упаковку, т. е. насыщение цементно-песчаных перегородок микропорами при одновременном повышении прочности цементного камня в них, особенно в ранние сроки. Данную задачу можно решить путем применения модифицирующих добавок: ускорителей твердения цементной матрицы [7, 13–15], активных минеральных [1, 8–10], водоредуцирующих [5, 11, 12]. Для уменьшения теплопроводности пенобетона путем увеличения содержания микропор в цементной матрице при сохранении прочности межпоровых перегородок вводят пористые активные минеральные добавки: золу-унос [2, 16], микрокремнезем [2, 11], термомодифицированный торф [17] или микроармирующие волокна [18–20].

Эффективным способом управления пористой структурой и прочностью межпоровых перегородок пенобетонов является совместное введение в смесь комбинированных добавок, формирующих микропористость и повышающих прочность (активные минеральные добавки) с сохранением необходимой подвижности (водоредуцирующие добавки) [5]. При разработке состава пенобетона необходимо учитывать, что одна часть воды расходуется на образование пены, а другая – на гидратацию цемента. Изменяя количество воды в пенобетоне, можно управлять его физико-механическими параметрами.

При обосновании выбора активных минеральных и пластифицирующих добавок необходимо обеспечивать синергетический эффект или возможность реализации эмерджентной структуры первого порядка, что положительно повлияет на оптимизацию структуры и эксплуатационные свойства пенобетона.

В качестве тонкодисперсных минеральных добавок для изготовления пенобетона требуемого уровня и стабильности качества рекомендуется использовать вместо природного песка дисперсные пористые минеральные побочные продукты промышленного производства – золы золошлаковых материалов (ЗШМ). В бетонной смеси зола выполняет роль не только активной минеральной добавки, влияющей на процессы структурообразования и повышения прочности пенобетона, но и наполнителя с микропорами, повышающего теплосопротивление стенового материала.

Для повышения однородности продуктов переработки ЗШМ в 2016 г. сотрудниками ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» кафедры ОХХТ под руководством В.В. Тихонова по за-

данию Росатома разработана технология разделения золошлаковых отходов на отдельные продукты исходя из требований рынка и востребованности по применимости в производстве строительных материалов. В установке УИК-20 разделение компонентов (шлакового щебня, песка, алюмосиликатной микросферы и золы) осуществляется по крупности, истинной и средней плотности, а также форме зерен. С участием авторов настоящей статьи при выполнении проекта проведены стандартные испытания продуктов переработки ЗШМ, оценка качества, стандартизация, сертификация и разработка технических предложений по их использованию в производстве строительных материалов. Актуальность данной работы заключается в необходимости создания энергоэффективных строительных материалов с высоким уровнем эксплуатационных свойств, с максимальным использованием местного природного и техногенного сырья. Это позволит обеспечить устойчивое и экономически целесообразное развитие сырьевой базы материалоемкой промышленности строительных материалов, значительное снижение экологической напряженности в регионе.

Целью исследований является установление закономерностей влияния зол ЗШМ и пластификаторов на процессы структурообразования, а также разработка научно обоснованных рецептурно-технологических решений производства цементных теплоизоляционных пенобетонов естественного твердения с комбинированной добавкой для индивидуального жилищного строительства.

Данная цель достигается путем введения в пенобетонную смесь в процессе изготовления тонкодисперсной алюмосиликатной минеральной добавки в виде золы ЗШМ Северской ТЭЦ Томской области и пластифицирующих добавок. В качестве пластифицирующей добавки применяются современные суперпластификаторы, позволяющие достичь требуемой пластичности на стадии транспортирования и формования изделий, а также ускорить структурообразование пенобетона.

Материалы и методы исследования

При проведении экспериментальных исследований использовались:

- портландцемент Топкинского цементного завода ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 30515–2013);
- кварцевый песок Кудровского месторождения Томской области с модулем крупности 1,8 (ГОСТ 8736–2014);
- пенообразователь «ПБ-Люкс» с кратностью пены рабочего раствора с объемной долей продукта 4 % не менее 7;
- водопроводная вода (ГОСТ 23732–2011);
- пластифицирующие добавки: «Реламикс-Т2» (ТУ 5870-002-14153664-04), Gros-63MC (ТУ 20.59.59-001-45419370-2018), MasterGlenium 115 (ТУ 5743-048-02495332-96), СП-1 (ТУ 5870-005-58042865-05);
- зола золошлаковых материалов Северской ТЭЦ Томской области. Зола отобрана с технологической линии комплексной переработки золошлаковых отходов гидроудаления Северской ТЭЦ Томской области. Зола сертифицирована ОС «Томскстройсертификация» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» под руководством А.И. Кудякова.

Насыпная плотность золы – 770 ± 15 кг/см³. Зерновой и химический состав золы приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Зерновой состав золы

Частные/полные остатки, % по массе, на ситах размером, мм				
0,31	0,16	0,08	0,04	Менее 0,04
1,1	9,8	31,7	20,2	37,2

Таблица 2

Химический состав золы

Содержание оксидов, %									
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
47,06	1,17	22,67	12,44	4,34	1,49	0,3	0,94	0,61	1,25

Удельная эффективная активность радионуклидов золы равна 131–266 Бк/кг, что позволяет использовать ее при строительстве жилых и общественных зданий.

Физико-механические свойства сырьевых материалов и пенобетона определялись в аккредитованной лаборатории «Стромтест» ТГАСУ в соответствии с требованиями следующих национальных стандартов:

- предел прочности на сжатие и изгиб – ГОСТ 10180–2012;
- средняя плотность – ГОСТ 12730.1–78;
- водопоглощение – ГОСТ 12730.3–78;
- коэффициент теплопроводности – ГОСТ 7076–99.

Подвижность пенобетонных смесей определялась прибором Суттарда.

Проектирование состава пенобетонной смеси проводилось с учетом требований СП 277–80 и рекомендаций [14].

Отформованные образцы пенобетона выдерживались до испытаний при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не менее 90–100 %. Оценка качества пенобетона проводилась по ГОСТ 25485–2014 и ГОСТ 27005–2014 в высушенном состоянии.

Результаты исследований

По результатам ранее проведенных исследований была выбрана одностадийная технология приготовления пенобетонной смеси с применением турбулентного смесителя [14]. По данной технологии заранее смешиваются в сухом состоянии цемент, песок и зола. Далее в бетоносмеситель вводится необходимое количество воды, пластифицирующая добавка, готовая смесь сухих компонентов, и все компоненты перемешиваются в течение 2 мин до получения однородной пластичной композиции. После этого в полученную смесь добавляется водный раствор пенообразователя, и все компоненты перемешиваются еще 4 мин.

С учетом результатов оптимизации технологических режимов приготовления пенобетонной смеси в лабораторном смесителе был разработан базовый (контрольный) состав пенобетона, приведенный в табл. 3.

Таблица 3

Базовый состав пенобетона на 1 м³

Вид пенобетона	Расход цемента, кг	Расход песка, кг	Расход воды, л	Расход пенообразователя, л
Базовый (контрольный)	240	120	180	1,4

При установлении закономерностей влияния зольной составляющей Северской ТЭЦ на свойства пенобетонной смеси и пенобетона зола вводилась в базовый состав пенобетона взамен 5, 10 и 15 % кварцевого песка по массе с последующей корректировкой рекомендуемых составов по значениям фактической средней плотности пенобетонной смеси.

Сохранение первичной поровой структуры при транспортировании готовой смеси и формовании изделий зависит от реологических характеристик пенобетонной смеси. В этой связи оценка реологических свойств пенобетонных смесей необходима в управлении технологическими процессами производства строительных конструкций, а также при исследовании структурообразования. Для достижения необходимой пластичности пенобетонной смеси для транспортировки ее по трубопроводу в процессе заливки смеси к месту ее укладки (опалубка, кирпичная кладка и т. д.) или посту формования, а также реализации принципов эмерджентности при управлении структурообразованием предлагается вводить в смесь современные суперпластификаторы. Для достижения требуемой пластичности (диаметра расплыва) пенобетонной смеси в работе рассмотрены несколько видов эффективных ПАВ, применяемых в строительной практике. При проведении исследований использовалась рекомендуемая изготовителями дозировка добавок – 1 % от массы цемента [21].

Результаты испытания свойств пенобетонных смесей с добавками приведены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние добавок на свойства пенобетонной смеси

Вид добавок в исследуемых смесях	Средняя плотность, кг/м ³	Расплыв смеси, см
Контрольный, без добавок	447	12,0
Зола 5 %	465	10,5
Зола 10 %	500	10,5
Зола 15 %	530	10,3
Реламикс Т-2	502	20,0
MasterGlenium 115	495	20,0
Gros-63MC	485	16,0
СП-1	452	13,0

Установлено, что при введении золы ЗШМ Северской ТЭЦ смесь становится менее подвижной, диаметр расплыва пенобетонной смеси уменьшился с 12,0 до 10,3 см, что объясняется высокой удельной поверхностью тонкодис-

персной добавки (золы). При этом наблюдается незначительное увеличение средней плотности по сравнению с контрольным образцом.

При введении суперпластификаторов в пенобетонную смесь диаметр расплыва пенобетонной смеси увеличивается с 12 до 20 см. Данный эффект обусловлен влиянием поверхностно-активных добавок на поверхностное натяжение воды в оболочках воздушных пор пенобетонной массы.

Результаты исследования влияния золы на прочностные свойства пенобетона приведены на рис. 1. Установлено, что прирост прочности на сжатие образцов с золой в 7-суточном возрасте составил 4–52 %, а в 28-суточном – 22–36 % по сравнению с контрольным образцом без добавки. При увеличении содержания золы до 15 % повышается средняя плотность пенобетонной смеси с 347 до 430 кг/м³, а также уменьшается объем готовой смеси. Положительное влияние золы на прочность пенобетона объясняется взаимодействием аморфного кремнезема дисперсных частиц золы с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующимся при гидратации цемента, с появлением низкоосновных гидросиликатов.

Рис. 1. Влияние золы на прочностные свойства пенобетона в 7- и 28-суточном возрасте

На рис. 2 представлены результаты исследований по влиянию суперпластификаторов на прочностные свойства пенобетона. Установлено, что в пенобетоне с суперпластификаторами «Реламикс Т-2», MasterGlenium 115, Gros-63МС прочность на сжатие в 7-суточном возрасте повышается на 34–43 %, в 28-суточном возрасте – на 31–47 %. Прочностные характеристики пенобетона с суперпластификатором СП-1 снижаются.

По результатам исследования влияния суперпластификаторов на свойства пенобетонной смеси и пенобетона была выбрана добавка «Реламикс Т-2», т. к. при ее использовании достигается наибольшее среднее значение прочности на сжатие в 28-суточном возрасте без снижения объема готовой смеси и обеспечение наибольшей пластичности (диаметр расплыва составляет 20 см).

С целью повышения качества теплоизоляционного пенобетона проводились исследования по совместному влиянию суперпластификатора и золы Северской ТЭЦ на свойства пенобетонной смеси и пенобетона.

Рис. 2. Влияние суперпластификаторов на прочностные свойства пенобетона в 7- и 28-суточном возрасте

Результаты совместного влияния золы и добавки пластификатора на свойства пенобетонной смеси представлены в табл. 5. При проведении исследований использовались следующие дозировки добавок: «Реламикс Т-2» – 1 % от массы цемента и зола Северской ТЭЦ – 10 и 15 % взамен кварцевого песка.

По результатам исследований установлено, что совместное введение комбинированной добавки, включающей золу и «Реламикс Т-2», приводит к увеличению диаметра расплыва с 12,0 до 17,5–18,0 см по сравнению с составом без добавок.

Таблица 5

**Влияние золы и пластифицирующих добавок
на свойства пенобетонной смеси**

Суперпластификатор/состав	Средняя плотность, кг/м³	Расплыв смеси, см
Контрольный	447	12,0
Зола 10 %, Реламикс Т-2	515	18,0
Зола 15 %, Реламикс Т-2	520	17,5

На рис. 3 представлены результаты исследований по определению средней плотности и прочности на сжатие пенобетона с комбинированной добавкой, включающей золу Северской ТЭЦ и «Реламикс Т-2».

Как видно из представленного графика, совместное введение добавок пластификатора «Реламикс Т-2» и золы Северской ТЭЦ приводит к незначительному увеличению средней плотности, при этом прочность на сжатие в 7-суточ-

ном возрасте увеличивается на 45–90 %, а в 28-суточном возрасте – на 26–66 % по сравнению с составом без добавок.

Теплопроводность – одна из важнейших характеристик пенобетона, отражающая его способность обеспечивать теплозащиту и комфортность проживания человека в зимнее время, а также энергоэффективность дома. Этот критерий определяет область и возможность применения стеновых материалов, их эксплуатационные свойства. Для достижения высокой энергоэффективности здания необходимо использовать материалы для ИЖС с низким коэффициентом теплопроводности [22].

Рис. 3. Влияние пластифицирующих добавок на свойства пенобетона в 7- и 28-суточном возрасте

Результаты определения теплопроводности пенобетона с комбинированной добавкой приведены табл. 6. По полученным результатам можно сделать вывод, что коэффициент теплопроводности разработанных бетонов соответствует нормативным требованиям ГОСТ 25485–2014 для пенобетонов с маркой по средней плотности D400.

Таблица 6

Результаты исследования теплопроводности и водопоглощения пенобетона

Состав	Теплопроводность при 15%-й влажности, Вт/м·°С	Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/м·°С	Водопоглощение по массе, %
Контрольный D400	0,13	0,11	66,9
Зола 10 % Реламикс Т-2 D400	0,15	0,09	47,4
Зола 15 % Реламикс Т-2 D400	0,16	0,11	44,5

От способности стены поглощать и удерживать влагу зависит ее долговечность и морозостойкость. Чем меньше влагопоглощение пенобетона, тем выше эксплуатационные характеристики и долговечность. По результатам испытаний, представленным в табл. 6, установлено, что при совместном введении золы и суперпластификатора «Реламикс Т-2» влагопоглощение по массе пенобетона снижается на 29–30 %. Следует отметить, что при визуальном осмотре образцов пенобетона с комбинированными добавками структура более однородная, отсутствует нарушение целостности поровой структуры [23].

При проведении научных исследований на основании полученных экспериментальных данных были разработаны оптимальные составы теплоизоляционного пенобетона с применением золы Северской ТЭЦ и суперпластификатора «Реламикс Т-2», позволяющие изготавливать пенобетон с улучшенными показателями качества. Рекомендуемые составы пенобетонов с маркой по средней плотности D400 приведены в табл. 7.

Таблица 7

Рекомендуемые составы пенобетонов на 1 м³ для ИЖС

№ состава	Расход цемента, кг	Расход песка, кг	Расход воды, л	Расход ПО, л	Расход золы, кг	Расход пластификатора, кг
1	240	96	180	1,4	24	2,4

По результатам исследований разработаны рекомендации по использованию комбинированной добавки в виде золы ЗШМ Северской ТЭЦ и пластификатора «Реламикс Т-2» в производстве пенобетонов естественного твердения в ИЖС строительными организациями.

Выводы

Обоснована возможность использования золы из ЗШМ Северской ТЭЦ Томской области при изготовлении пенобетонов для устройства стен при индивидуальном жилищном строительстве.

1. При введении комбинированной добавки, включающей золу из ЗШМ Северской ТЭЦ и суперпластификатор «Реламикс Т-2», в пенобетонную смесь при одностадийной технологии перемешивания компонентов получен эффективный теплоизоляционный пенобетон D400 с повышенным классом по прочности на сжатие B0,75 и теплопроводностью 0,09–0,11 Вт/м·°С.

2. Разработаны практические рекомендации по технологии пенобетона естественного твердения с комбинированной добавкой, включающей золу ЗШМ Северской ТЭЦ и суперпластификатор «Реламикс Т-2», для использования строительными организациями в реальном секторе ИЖС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dien V.K., Ly N.C., Lam T.V., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2020. V. 1425. P. 012199. DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012199
2. Zuhua, Z., John L., Provis A.R., Hao W. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2014. V. 56. P. 113–127.

3. Girnienė, I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations. *Materials Science*. 2002. № 1. P. 77–82.
4. Семенов А.А. Строительство и промышленность строительных материалов в 2017 г. Краткосрочный прогноз // *Строительные материалы*. № 4. С. 4–8.
5. Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Пенобетон с пластифицирующими и микроармирующими добавками // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2018. № 3 (52). С. 26–40.
6. Попов А.Л., Строкова В.В. Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44>
7. Пименова Л.Н., Кудяков А.И. Пенобетон, модифицированный силикагелем // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 2. С. 229–233.
8. Кудяков А.И., Белых С.А., Лебедева Т.А. Стеновые теплоизоляционные материалы и изделия из наполненных пеностекольных композиций / под ред. А.И. Кудякова. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 192 с.
9. Elviņa Namsone, Genādijs Šahmenko, Aleksandrs Korjajkins, Eva Namsone. Influence of porous aggregate on the properties of foamed concrete // *Construction Science*. 2016. № 19. P. 13–20. DOI: 10.1515/cons-2016-0006
10. Перфилов В.А., Котляревская А.В., Канавец У.В. Исследование влияния нанокремнеземных добавок и полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2016. № 44-2. С. 119–124.
11. Савенков А.И., Баранова А.А. Пенобетон теплоизоляционный с применением пластификаторов нового поколения // *Вестник ВСГУТУ*. 2014. № 3. С. 70–73.
12. Моргунов В.Н., Моргунов Л.В. Обоснование одного из методов совершенствования структуры пенобетонов // *Строительные материалы*. 2018. № 5. С. 24–16.
13. Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Исследование влияния кристаллического глиоксаля на свойства цементного пенобетона естественного твердения // *Письма о материалах*. 2015. Т. 5. № 1 (17). С. 3–6.
14. Steshenko A.B., Kudjakov A.I., Konusheva V.V., Syrkin O.O. Structure formation control of foam concrete // *AIP Conf. Proc.* 2017. V. 1800. № 020001. P. 1–8. DOI: 10.1063/1.4973017
15. Kudjakov A.I., Steshenko A.B., Simakova A.S., Latypov A.D. Methods of introduction of glyoxal-containing additives into foam concrete mixture // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. P. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/597/1/012037
16. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 77–84.
17. Кудяков А.И., Копаница Н.О., Прищепа И.А., Шаньгин С.Н. Конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны с термомодифицированной торфяной добавкой // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 1 (38). С. 172–177.
18. Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I. Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes // *Materials Science*. 2006. V. 12. № 2. P. 147–151.
19. Машкин Н.А., Кудяков А.И., Бартеньева Е.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсно-армированный минеральными и волокнистыми добавками // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. № 8 (716). С. 58–68.
20. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Влияние армирующих волокон на формирование структуры ячеистых бетонов в раннем возрасте // *Вестник гражданских инженеров*. 2014. № 3. С. 154–158.
21. Набокин О.Д., Насыров В.А. Влияние золы Северской ТЭЦ на свойства пенобетонной смеси // *Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых : сборник докладов*, 2019. С. 185–188.
22. Davraz M., Kilinçarslan Ş., Koru M., Tuzlak F. Investigation of relationships between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity coefficient in foam concretes // *Acta Physica Polonica Series a*. 2016. V. 130. № 1. DOI: 10.12693/APhysPolA.130.469
23. Кудяков А.И., Стешенко А.Б., Конушева В.В., Сыркин О.О. Технологические приемы уменьшения усадки неавтоклавного пенобетона и повышения класса по прочности // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 5 (58). С. 129–139.

REFERENCES

1. Dien V.K., Ly N.C., Lam T.V., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1425. 012199. DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012199
2. Zuhua Z., John L., Provis A.R., Hao W. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 56. Pp. 113–127.
3. Girnienė I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations. *Materials Science*. 2002. No. 1. Pp. 77–82.
4. Semenov A.A. Stroitel'stvo i promyshlennost' stroitel'nykh materialov v 2017 g. Kratkosrochnyi prognoz [Construction and building material industry in 2017. Short-term forecast]. *Stroitel'nye materialy*. No. 4. Pp. 4–8. (rus)
5. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Penobeton s plastifitsiruyushchimi i mikroarmiruyushchimi do-bavkami [Lightweight concrete with pasticizing and micro-reinforcing additives]. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2018. No. 3 (52). Pp. 26–40. (rus)
6. Popov A.L., Strokova V.V. Fibropenobeton avtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovanie kompozitsion-nogo vyazhushchego [Autoclaved fiber concrete with composite binder]. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 5. Pp. 38–44. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44 (rus)
7. Pimenova L.N., Kudyakov A.I. Penobeton, modifitsirovannyi silikagelem [Lightweight concrete modified with silica gel]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 229–233. (rus)
8. Kudyakov A.I. (Ed.), Belykh S.A., Lebedeva T.A. Stenovye teploizolyatsionnye materialy i izdeliya iz napolnennykh penostekol'nykh kompozitsii [Wall thermal insulation materials and products from filled foam glass compositions]. Tomsk: TSUAB, 2016. 192 p. (rus)
9. Namsone E., Šahmenko G., Korjajins A., Namsone E. Influence of porous aggregate on the properties of foamed concrete. *Construction Science*. 2016. No 19. Pp. 13–20. DOI: 10.1515/cons-2016-0006
10. Perfilov V.A., Kotlyarevskaya A.V., Kanavets U.V. Issledovanie vliyaniya nanouglerodnykh do-bavok i polykh steklyannykh mikrosfer na svoystva penofibrobetonov [Nano-carbon additive and hollow glass microsphere effect on lightweight concrete properties]. *Vestnik Volgograd-skogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arkhi-tektura*. 2016. No. 44-2. Pp. 119–124. (rus)
11. Savenkov A.I., Baranova A.A. Penobeton teploizolyatsionnyi s primeneniem plastifikatorov no-vogo pokoleniya [Heat-insulating foam concrete with new-generation plasticizers]. *Vestnik VSGUTU*. 2014. No. 3. Pp. 70–73. (rus)
12. Morgun V.N., Morgun L.V. Obosnovanie odnogo iz metodov sovershenstvovaniya struktury [Method of improving the foam concrete structure]. *Stroitel'nye materialy*. 2018. No. 5. Pp. 24–16. (rus)
13. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Issledovanie vliyaniya kristallicheskogo glioksalya na svoystva tsementnogo penobetona estestvennogo tverdeniya [The influence of crystalline glyoxal on properties of air hardened cement-based foam concrete]. *Pis'ma o materialakh*. 2015. V. 5. No. 1 (17). Pp. 3–6. 14 (rus)
14. Steshenko A.B., Kudyakov A.I., Konusheva V.V., Syrkin O.O. Structure formation control of foam concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 1800. Pp. 1–8. DOI: 10.1063/1.4973017
15. Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Simakova A.S., Latypov A.D. Methods of introduction of glyoxal-containing additives into foam concrete mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/597/1/012037
16. Markov A.Yu., Strokova V.V., Markova I.Yu. Otsenka svoystv toplivnykh zol kak komponentov kompozitsionnykh materialov [The properties of fuel ashes as components of composite materials]. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 4. Pp. 77–84. (rus)
17. Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Prishchepa I.A., Shan'gin S.N. Konstruktsionno-teploizolyatsionnye penobetony s termomodifitsirovannoi torfyanoi dobavkoi [Constructional and heat-insulating foam concretes with thermally modified peat additive]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 1 (38). Pp. 172–177. (rus)
18. Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I. Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes. *Materials Science*. 2006. V. 12. No. 2. Pp. 147–151.

19. Mashkin N.A., Kudyakov A.I., Barten'eva E.A. Neavtoklavnyi penobeton, dispersno-armirovannyi mineral'nymi i voloknistymi dobavkami [Nonautoclaved dispersion-reinforced foam concrete with mineral or fibrous additives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2018. No. 8 (716). Pp. 58–68. (rus)
20. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Staroverov V.D. Vliyanie armiruyushchikh volokon na formirovanie struktury yacheistyykh betonov v rannem vozraste [The influence of reinforcement fiber on cellular concrete structure formation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2014. No. 3. Pp. 154–158. (rus)
21. Nabokin O.D., Nasyrov V.A. Vliyanie zoly severskoi TETs na svoystva penobetonnoi smesi [Seversk TTP ash effect on foam concrete mixture properties]. In: *Izbrannye doklady 65-i Yubileinoi universitetskoj nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh Sbornik dokladov (Proc. Sci. Conf. of Students and Young Scientists)*. 2019. Pp. 185–188. (rus)
22. Davraz M., Kiliçarslan Ş., Koru M., Tuzlak F. Investigation of relationships between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity coefficient in foam concretes. *Acta Physica Polonica A*. 2016. V. 130. No. 1. DOI: 10.12693/APhysPolA.130.469
23. Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Konusheva V.V., Syrkin O.O. Tekhnologicheskie priemy umen'sheniya usadki neavtoklavnogo penobetona i povysheniya klassa po prochnosti [Production methods of reducing non-autoclave foamed concrete shrinkage and increasing its quality class]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 5 (58). Pp. 129–139. (rus)

Сведения об авторах

Кудяков Александр Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kudyakow@mail.tomsknet.ru

Стешенко Алексей Борисович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, steshenko.alexey@gmail.com

Душенин Николай Петрович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, dushenin57@mail.ru

Рябцева Наталья Евгеньевна, студентка, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ryabtseva96@mail.ru

Authors Details

Aleksandr I. Kudyakov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solynaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kudyakow@mail.tomsknet.ru

Aleksey B. Steshenko, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solynaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, steshenko.alexey@gmail.com

Nikolai P. Dushenin, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solynaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, dushenin57@mail.ru

Natal'ya E. Ryabtseva, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solynaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ryabtseva96@mail.ru