

DOI: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788

¹Кожухова Н.И., канд. техн. наук, доц.,¹Данакин Д.Н., аспирант,^{1,2}Кожухова М.И., PhD,¹Алфимова Н.И., канд. техн. наук, доц.,¹Чепурных А.А., магистрант¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин, США

рН-ПОКАЗАТЕЛЬ СРЕДЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ПЕН

Одним из основных этапов производства пенобетонных композитов, непосредственно оказывающих влияние на качество конечного ячеистого продукта, является формирование поровой структуры. В свою очередь, структура пены и ее устойчивость к воздействию внешних факторов, за частую, определяет поровый каркас композита.

В данной работе изучено влияние рН-показателя реакционной среды на формирование пены с использованием пенообразователей различной природы. Изучены особенности вариации параметров пены: стойкости и кратности, в зависимости от природы и концентрации пенообразователя в составе пеномассы. Установлено, что синтетический пенообразователь в высокощелочной среде, моделирующей рабочую реакционную среду геополлимерного вяжущего, не образует пеномассу (кратность равна 1) в сравнении с пеномассой, формируемой в нейтральной среде (кратность достигает 47). Выявлено, что при использовании белкового пенообразователя, пеномасса в обеих рабочих средах характеризуется одинаковой кратностью (кратность достигает 10). Установлена зависимость критической концентрации мицеллообразования, как основного показателя максимально возможной кратности пены, зависящего от типа пенообразователя и вида рабочей среды путем измерения поверхностного натяжения растворов. Для пенообразователя белкового типа выявлено, что критическая концентрация мицеллообразования в высокощелочной среде наступает при более низких концентрациях (3 %) по сравнению с нейтральной средой (4,5 %). Для синтетического пенообразователя Морпен критическая концентрация мицеллообразования достигает при концентрации пенообразователя от 6 и выше %.

Ключевые слова: высокощелочная среда, ПАВ различной природы, поверхностные явления пенообразования.

Введение. Ячеистые бетоны являются широко распространенным видом строительных материалов для ограждающих конструкций зданий благодаря своим выгодным теплофизическим характеристикам. Одними из наиболее востребованных на рынке потребителя являются газо- и пенобетонные композиты на основе портландцемента [1–4], что обусловлено их довольно высокими прочностными показателями в сочетании с низкой плотностью. На ряду с цементными системами активно ведутся исследования по разработке альтернативных видов бесцементных вяжущих, а также легковесных композитов на их основе [5–8].

Опираясь на имеющийся отечественный и зарубежный опыт, наиболее важным технологическим этапом, ответственным за качество конечного легковесного композита, является формирование ячеистого каркаса. Ранее проводились исследования, посвященные оптимизации поровой структуры в цементобетонных композитах автоклавного [3, 7] и неавтоклавного [9–12] твердения, а также в бесцементных композитах [13].

На сегодняшний день одним из перспективных видов вяжущих, способных по эксплуатационным характеристикам конкурировать с цементными аналогами, являются геополлимеры. Поэтому, получение ячеистых бетонов на их основе является перспективным. В тоже время, особенности эффективной поризации геополлимерных вяжущих практически не изучены.

Одной из отличительных особенностей твердения геополлимерных систем является высокощелочная среда, которая сохраняется длительное время в процессе всего периода твердения вяжущего. В связи с этим в рамках работы было изучено влияние щелочности реакционной среды на формирование пены для геополлимерных вяжущих систем.

Материалы и методы.

Материалы. В качестве порообразующего агента было использовано два типа пенообразователей: синтетический (Морпен) и белковый (Biofoam).

В рамках исследования в качестве рабочих сред для приготовления пен были использованы: водопроводная вода и водный раствор щелочи. В

качестве щелочного компонента был взят натр едкий NaOH, проявляющий наиболее высокую активирующую способность по отношению к кислым алюмосиликатам как основному сырью в геополимерных системах [14].

Методы. Основные характеристики пены: кратность и стойкость в различных реакционных средах определялись с использованием стандартных методик согласно ГОСТР 50588-93 [15].

В качестве индикатора устойчивости пены была принята длительность выделения 50 % жидкой фазы из пены. pH-значения пенообразователей и рабочих сред определяли с помощью pH-метра OYSTER-16 (Extech Instruments, США).

Значения поверхностного натяжения для растворов пенообразователей были измерены на приборе KRUSSDSA30.

Экспериментальная часть. В рамках исследования были подготовлены растворы с различной концентрацией пенообразователей с использованием пенообразующих агентов различной природы: синтетический – Морпен и белковый – Biofoam. В качестве щелочного раствора приготовления пены использовался 9 %-водный раствор NaOH, что соответствует концентрации щелочного компонента в ранее разработанных оптимальных составах геополимерного вяжущего [14, 16], а также водопроводная вода. В качестве контрольной среды была принята дистиллированная вода.

Экспериментальные растворы были взбиты в пены с последующим определением значений кратности и стойкости как основных параметров (рис. 1).

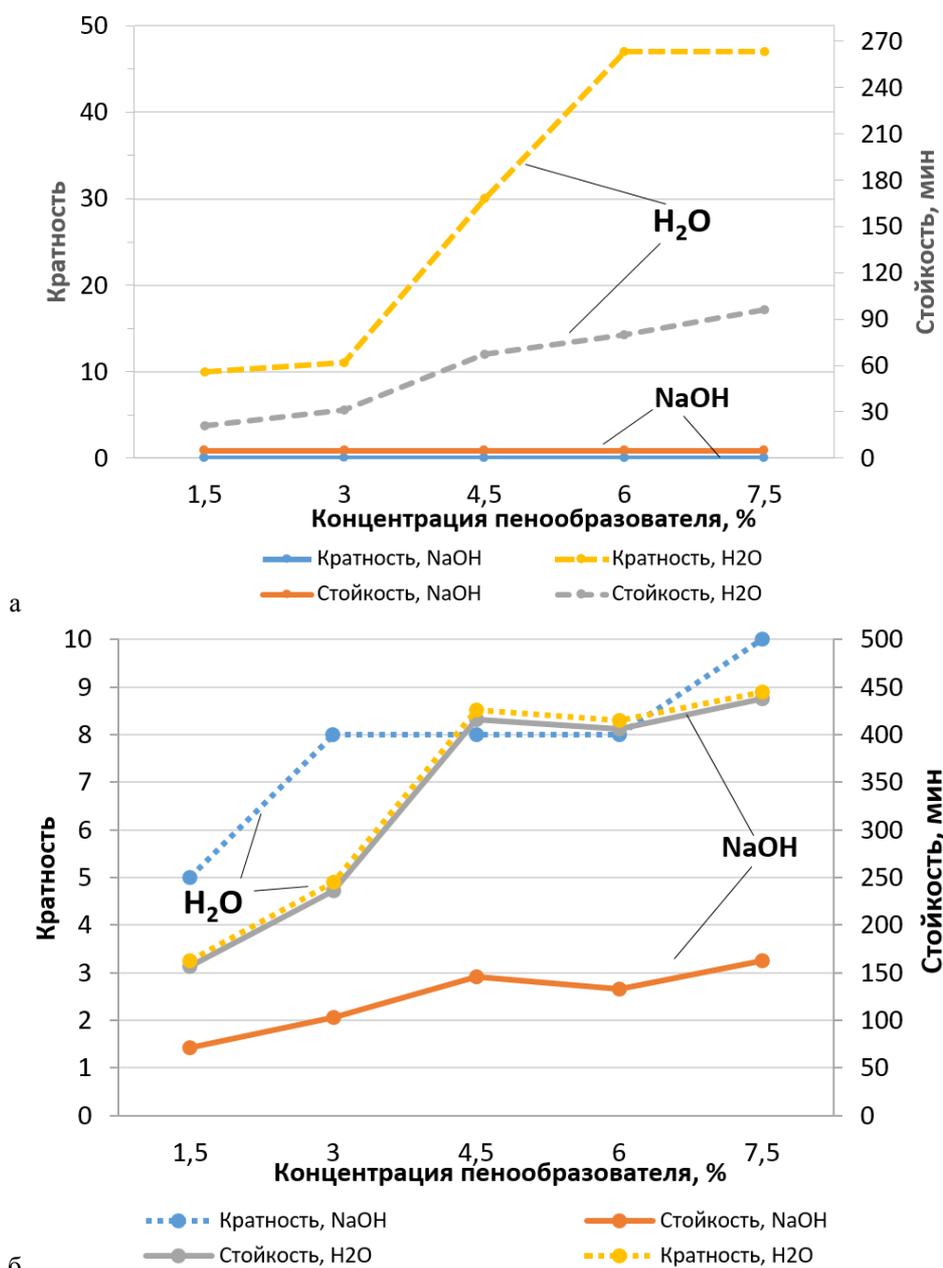


Рис. 1. Зависимость стойкости и кратности пены от типа и концентрации пенообразователя, а также щелочности рабочей среды: а) Морпен; б) Biofoam

Результаты эксперимента показали, что получение пены на основе пенообразователя Морпен кардинально зависят от особенностей рабочей среды, в которой она формируется. Так, пена, образуемая в среде, близкой к нейтральной, которая типична для водопроводной воды, обладает средними показателями кратности и стойкости (рис. 1, а). В то же время, в высокощелочной среде (щелочной раствор NaOH), пена обеспечивает нулевые показатели по стойкости и кратности, т.е. она не взбивается независимо от концентрации пенообразователя (рис. 1, а, рис. 2, а).

H₂OH₂O

а

Несколько иные результаты наблюдаются для пенообразователя Biofoam, который относится к белковым (рис. 1, б, рис. 2, б). Для данного типа пенообразователя, пена с высокими показателями по кратности и стойкости формируется в обеих рабочих средах. Показатели кратности, при этом идентичны. Однако, следует отметить более высокую стойкость пен (до 29 %) на основе Biofoam, получаемых в нейтральной среде по сравнению аналогичными пенами в высокощелочной среде.

раствор NaOH



раствор NaOH



б

Рис. 2. Внешний вид пен в зависимости от природы пенообразователя и вида рабочей среды:

а) Морпен; б) Biofoam

Согласно ранее проведенным исследованиям [9–11], подтверждена гипотеза о том, что одним из критических факторов формирования пены в той или иной рабочей среде является стерический эффект¹, который является следствием разницы рН-характеристик между пенообразующим агентом и рабочей средой. Поэтому основ-

ным условием получения эффективной пены является обеспечение минимальной разницы рН-показателей.

В связи с этим, опираясь на литературные данные в рамках исследования были измерены значения рН-характеристик экспериментальных растворов пенообразователей (табл. 1).

¹ Стерический эффект — влияние пространственного объёма молекулы на ход химической реакции.

Таблица 1

Значения рН-показателя растворов пенообразователей

Наименование пенообразователя	Концентрация, %						
	0	1,5	3	4,5	6	7,5	100 %
Рабочая среда: водопроводная вода							
Морпен	7,34	7,47	7,48	7,48	7,47	7,63	6,63
Biofoam	7,34	7,23	7,20	7,23	7,23	7,21	6,78
Рабочая среда: 9-% р-р NaOH							
Морпен	12,56						6,63
Biofoam	12,56	9,72	9,72	9,73	9,72	9,71	6,78
Рабочая среда: дистиллированная вода							
Морпен	7,97	7,93	7,91	7,86	7,84	7,84	6,63
Biofoam	7,97	7,24	7,26	7,24	7,22	7,23	6,78

Результаты проведенного эксперимента показали, что значения рН-характеристик дистиллированной и водопроводной воды сопоставимы и близки к нейтральным (рН=7,97 и 7,34, соответственно). Однако, дистиллированная вода характеризуется более высокой щелочностью. В свою очередь, рН-значения используемых пенообразователей незначительно смещены в кислотную область. В результате, небольшая разница между рН-показателями пенообразователей и этими рабочими средами объясняет отсутствие проявления стерического эффекта и, как следствие, формирование пены.

В случае использования щелочного раствора (рН=12,56) в качестве рабочей среды, разница рН-показателей с пенообразователем значительно больше. В данном случае в значительной степени проявляется стерический эффект. Однако, пенообразователи различной природы ведут себя по-разному. При использовании белкового пенообразователя образуется стойкая пена, что связано с эффектом омыления. По своему определению, омыление представляет собой гидролиз сложного эфира с образованием спирта и кислоты или её соли в растворе щелочи. Образующаяся кислота/соль, в свою очередь, характеризуется пенообразующими свойствами.

При взбивании синтетического пенообразователя в щелочном растворе пена не образуется (рис. 2, а). Вероятно, это вызвано тем, что в составе синтетического пенообразователя присутствуют электролиты, которые в процессе химической реакции основного компонента и щелочного раствора замещаются ионами Na^+ и высвобождаются в рабочую среду, резко снижая поверхностное натяжение ПАВ, что препятствует образованию пены.

Оценивая влияние щелочности рабочей среды на дозировку ПАВ в случае с белковым пенообразователем Biofoam, следует отметить, что повышение рН-показателя среды способствует смещению оптимальной концентрации пенообразователя в сторону больших значений с точки зрения кратности пены независимо от типа рабочей среды (рис. 1).

В тоже время, для пен на основе белкового ПАВ увеличение концентрации пенообразователя выше 4,5 % не приводит к дальнейшему повышению кратности пены, что может быть объяснено достижением системы критической концентрации мицеллообразования (ККМ).

ККМ следует понимать как минимальную концентрацию ПАВ в растворе, обеспечивающую полное насыщение данным веществом области на границе раздела фаз. В результате ПАВ переходит из молекулярного состояния в мицеллярное. Если концентрация ПАВ меньше ККМ, в растворах молекулы ПАВ существуют в состоянии отдельных молекул. В этом случае зависимость любого свойства раствора определяется в большей степени концентрацией молекул. При образовании мицелл в растворе его свойства будет претерпевать существенное изменение в связи с резким увеличением размера растворенных частиц.

В рамках данного исследования ККМ было определено на основании данных поверхностного натяжения растворов белкового пенообразователя Biofoam с различной его концентрацией в рабочей среде (рис. 3).

Результаты измерения поверхностного натяжения (рис. 3) показали, что ККМ для обоих рабочих сред наблюдаются при концентрации пенообразования от 4–4,5 % (участки выполаживания кривых), что подтверждает данные о кратности этих составов (рис. 1, б).

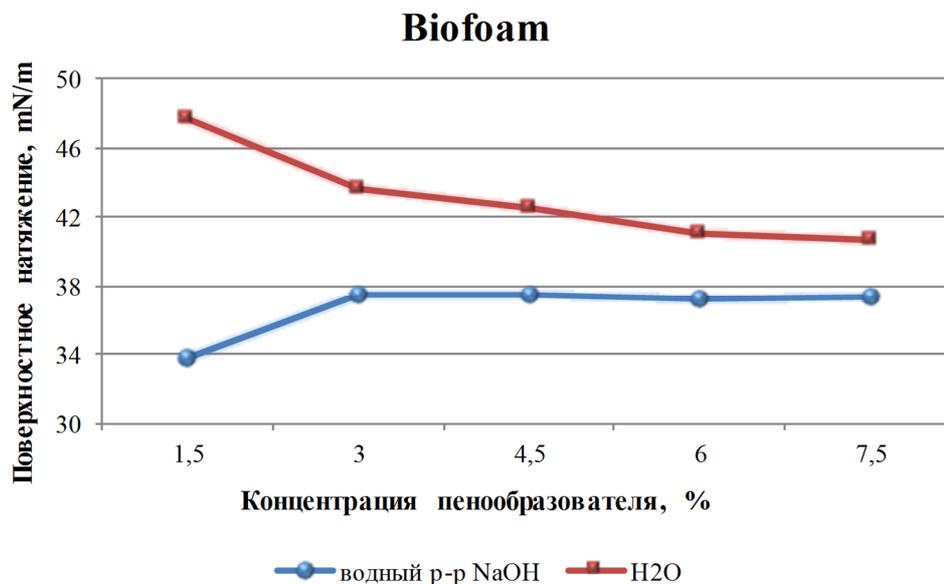


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации пенообразователя

Выводы. В рамках исследования установлена неэффективность использования синтетического пенообразователя Морпен в высокощелочной среде за счет наличия в его составе электролитов, которые в процессе химического взаимодействия компонентов раствора приводят к резкому снижению поверхностного натяжения ПАВ в рабочей среде.

Белковый пенообразователь Biofoam проявляет пенообразующие характеристики в нейтральной и высокощелочной среде с одинаковой степенью эффективности. Формирование пены белковым пенообразованием в высокощелочной среде связано с омылением белкового ПАВ.

Формирование пены средней и высокой кратности в нейтральной среде с использованием обоих типов пенообразователей связано с отсутствием значительной разницы между рН-показателями пенообразователя и рабочей среды, что обеспечивает отсутствие стерического эффекта.

Установлено, что оптимальное содержание белкового пенообразователя Biofoam в разных средах обеспечивается при разных концентрациях, что связано с проявлением эффекта ККМ. Так, ККМ в высокощелочной среде наступает при более низких концентрациях (3 %) по сравнению с нейтральной средой (4,5 %).

Источник финансирования. Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова; Стипендия Президента РФ на 2018–2020 гг., с использованием оборудования на базе Центра Высочайших Технологий, БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесниченко Е.Н., Когут Е.В., Ермолаева А.Э., Елистраткин М.Ю. О перспективах использования ячеистых бетонов в 3D аддитивных технологиях // Наука и инновации в строительстве (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 125–130.
2. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Жерновский И.В. Особенности получения геополимерного газобетона на основе золы-уноса Новотроицкой ТЭЦ // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 113–117.
3. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozukhova N.I. Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete // World Applied Sciences Journal. 2013. № 25 (1). P. 347–354
4. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Марушко М.В. Применение композиционных вяжущих в технологии ячеистого бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 2. С. 10–16.
5. Череватова А.В., Алехин Д.А., Бурьянов А.Ф., Жерновский И.В., Кожухова Н.И. Особенности комплексного механизма структурообразования в системе композиционного гипсокремнеземистого вяжущего // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 12–16.
6. Nelubova V., Strokova V., Cherevatova A., Altynnik N., Sobolev K. Autoclaved composites with nanostructured silica additive // Journal of the Society for American Music. 2014. T. 1611. № 2

7. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Sumin A.V., Jernovskiy I.V. The structure formation of the cellular concrete with nanostructured modifier // *Key Engineering Materials*. 2017. Т. 729. С. 99–103.

8. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н. Особенности стабилизации пеномассы в ячеистых щелоча-активированных системах // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2017. № 1 (8). С. 89–93.

9. Щербин С.А., Горбач П.С., Щербина Н.А. Выбор типа и концентрации пенообразователя при производстве пенобетона. Часть 3 // Вестник АГТА. 2013. № 7. С. 45–47.

10. Горбач П. С., Щербин С. А. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона // Вестник ТГАСУ № 5. 2014. С. 126–132

11. Горбач П. С., Щербин С. А. Научно обоснованный выбор пенообразователя и его концентрации // Вестник ТГАСУ. № 4. 2012. С. 191–199.

12. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н. Стабилизирующая добавка как способ оптимизации поровой структуры легковесных композитов на основе геополимерного вяжущего // Строительные материалы. 2017. № 5. С. 33–35.

13. Кожухова Н.И., Войтович Е.В., Череватова А.В., Жерновский И.В., Алехин Д.А. Термостойкие ячеистые материалы на основе композиционных гипсо-кремнеземных вяжущих // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 65–69.

14. Julia Shekhovtsova, Igor Zhernovsky, Maxim Kovtun, Natalia Kozhukhova, Irina Zhernovskaya, Elsabe P Kearsley Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33.

15. ГОСТР 50588-93 Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2012.

16. Кожухова Н.И., Жерновский И.В., Соболев К.Г. Влияние различий рентгеноаморфной фазы в составе низкокальциевых алюмосиликатов на прочностные характеристики геополимерных систем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 4–12.

Информация об авторах

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов.

E-mail: kozhuhova.ni@bstu.ru; kozhuhovanata@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Данакин Дмитрий Николаевич, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов.

E-mail: danakin93@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожухова Марина Ивановна, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук.

E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru

Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин

Р.О. Вох 413, Милуоки, WI 53201, США

Инженер кафедры материаловедения и технологии материалов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Алфимова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

E-mail: alfimova.ni@bstu.ru; alfimova.ni@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чепурных Алина Александровна, магистрант.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в мае 2018 г.

© Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Алфимова Н.И., Чепурных А.А., 2018

N.I. Kozhukhova, D.N. Danakin, M.I. Kozhukhova, N.I. Alfimova, A.A. Chepurnykh
pH-VALUE OF REACTION MEDIUM AS A FACTOR OF FOAM STRUCTURE FORMATION

One of the basic stage when production of foam concrete, directly effecting on quality of final cellular product is formation of cellular structure. At the same time, such characteristics of foam as structure and environmental stability are depend of framework of cellular composite.

In this paper the effect of pH-value of reaction medium on foam formation using different types of surfactants was studied. The effect of type of surfactant and its concentration on such parameters of relevant foam as foam expansion ratio and foam stability was determined. When reaction between synthetic surfactant and high-alkali medium, that simulates a reaction geopolymeric medium, the foam is not formed (foam expansion ratio was 1) vs. reaction between synthetic surfactant and water medium, where foam expansion ratio is up to 47. Protein surfactant makes a foam in both media: high-alkali and water with foam expansion ratio up to 10.

The relationship between the critical micelle concentration as a major parameter of the max foam expansion ratio and such parameters as type of surfactant and pH-value of reaction medium was studied by measurement of surface-tension energy of the foams. Critical micelle concentration for protein based foam in high-alkali medium was achieved at lower concentration (3 %) vs. protein based foam in water medium (4,5 %). For synthetic based foam the critical micelle concentration was observed at 6 % and higher.

Keywords: high-alkali medium, different types of surfactants, surface effects of foam formation.

REFERENCES

1. Lesnichenko E.N., Kogut E.V., Ermolaeva A.E., Elistratkin M.Yu. On prospective od cellular concrete using in 3D additive technologies. Proceeding of Int. research to practice conference «Science and innovations in construction». Belgorod: BSTU named after V.G. Shoukhov, 2017, pp. 125–130.
2. Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Zhernovsky I.V. Features of Producing Geopolymeric Gas Concrete on the Basis of Fly Ash of Novotroitskaya TPS. *Stroitel'nye Materialy*, 2017, no. 1–2, pp. 113–117.
3. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozukhova N.I. Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 25 (1), pp. 347–354
4. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V. Use of polydisperse composite binder in technology of aerated concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2018, no. 2, pp. 10–16.
5. Cherevatova A.V., Alekhin D.A., Bur'yanov I.V., Zhernovsky I.V., Kozhukhova N.I. Features of Complex Structure Formation in Composite Gypsum-Silica Binder. *Stroitel'nye Materialy*, 2016, no. 11, pp. 12–16.
6. Nelubova V., Strokova V., Cherevatova A., Altynnik N., Sobolev K. Autoclaved composites with nanostructured silica additive. *Journal of the Society for American Music*, 2014, vol. 1611, no. 2.
7. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Sumin A.V., Jernovskiy I.V. The structure formation of the cellular concrete with nanostructured modifier. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 729, pp. 99–103.
8. Kozhukhova N.I., Danakin D.N. Features of foam in cellular alkali-activated systems. *Resource and energy effective technologies in regional construction complex*, 2017, no. 1 (8), pp. 89–93.
9. Shcherbin S.A., Gorbach P.S., Shcherbina N.A. Choosing of type and concentration of foam agent when foam concrete production. Part 3. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2013, no. 7, pp. 45–47.
10. Shcherbin S.A., Gorbach P.S., The effect of frothers on foam and foam concrete properties. *Vestnik of TSUAB*, 2014, no. 5, pp. 126–132.
11. Gorbach P.S., Shcherbin S.A., Scientifically reasonable choice of foaming agent and its concentration. *Vestnik of TSUAB*, 2012, no. 4, pp. 191–199.
12. Kozhukhova N.I., Danakin D.N. A Stabilizing Additive as a Method for Optimization of Porous Structure of Lightweight Composites on the Basis of Geopolymeric Binder. *Stroitel'nye Materialy*, 2017, no. 5, pp. 33–35.
13. Kozhukhova N.I., Voitovich E.V., Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Alekhin D.A. Heat-Resistant Cellular Materials on the Basis of Composite Gypsum-Silica Binders. *Stroitel'nye Materialy*, 2015, no. 6, pp. 65–69.
14. Julia Shekhovtsova, Igor Zhernovsky, Maxim Kovtun, Natalia Kozhukhova, Irina Zhernovskaya, Elsabe P Kearsley Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 178, pp. 22–33.
15. GOSTR 50588-93 Foaming agents for fire extinguishing. General technical requirements and test methods. Moscow: Standaryinform, 2012.
16. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Sobolev K.G. Effect of variations in vitreous phase of low-calcium aluminosilicates on strength properties of geopolymer systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2018, no. 4, pp. 4–12.

Information about the author

Natalia I. Kozhukhova, PhD, Assistant professor.

E-mail: kozhuhova.ni@bstu.ru; kozhuhovanata@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Dmitry N. Danakin, Postgraduate student.

E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Marina I. Kozhukhova, PhD, Post-Doctoral Associate.

E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru

University of Wisconsin-Milwaukee.

3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Natalia I. Alfimova, PhD, Assistant professor.

E-mail: alfimovan@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Alina A. Chepurnykh, Master student

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Received in May 2018

Для цитирования:

Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Алфимова Н.И., Чепурных А.А. pH-показатель среды как фактор формирования поровой структуры пен // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №8. С. 101–108. DOI: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788

For citation:

Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Kozhukhova M.I., Alfimova N.I., Chepurnykh A.A. pH-value of reaction medium as a factor of foam structure formation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 8, pp. 101–108. DOI: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788