

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.12737/article\_5abfc9b7ce94e3.70688983

Попов А.Л., аспирант,  
Нелюбова В.В., канд. техн. наук, доц.,  
Нецвет Д.Д., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕН

nelybova.vv@bstu.ru

В работе рассматривается влияние природы пенообразователя на свойства пен. На основании анализа рынка современных поризующих добавок выбраны традиционные широко применяемые, а также новые пенообразователи. Проведен обзор технических характеристик выбранных добавок. В статье исследовано влияние концентрации, состава и основы пенообразователей на кратность, стойкость и плотность пен. Определены оптимальные («рабочие») концентрации пенообразующих добавок с учетом их стойкости. Изучена стойкость сформированных на базе рабочих растворов пен в поризуемых системах различного состава. На основании комплекса проведенных исследований протеиновые пенообразователи проранжированы по степени эффективности, оцененной по физико-техническим свойствам пен, полученных с их использованием.

**Ключевые слова:** пенообразователь, пена, ячеистый бетон, стойкость, кратность, плотность.

**Введение.** Не вызывает сомнения актуальность получения материалов, отличающихся пониженным коэффициентом теплопроводности и относительно высокими физико-механическими свойствами. Ячеистые материалы на минеральном сырье наиболее полно соответствуют данным критериям по своим эксплуатационным характеристикам. Анализ работ в области получения ячеистых бетонов, позволяет сделать вывод, что одним из основных факторов качества пенобетонов в числе прочих является пена [1–15]. Пена для пенобетонов – это высококонцентрированная дисперсная система с газовой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой. Её формирование возможно лишь в присутствии пенообразователя.

На сегодня существует множество разновидностей и марок пенообразователей, имеющих свои достоинства и недостатки [6–9]. Выбор пенообразователя для приготовления пенобетона должен исходить из множества технологических признаков, которые способны влиять на получаемую пену и композит: плотность, кратность, стойкость, стойкость в поризуемом растворе. В свою очередь данные признаки зависят от природы пенообразователей и их свойств. В работе предлагается рассмотрение влияния природы и свойств пенообразователей на свойства пен и их устойчивость в растворах вяжущих минеральных систем.

**Методология.** Основными характеристиками пенообразователей являются кратность,

стойкость во времени и стойкость в поризуемом растворе.

Кратность пены определяется значением отношения объема полученной пены к объему использованного для её формирования раствора пенообразователя:

$$K = \frac{V_{п}}{V_{по}}, \quad (1)$$

где  $V_{п}$  – объем полученной пены, л;  $V_{по}$  – объем раствора пенообразователя из которого была получена пена, л.

Стойкость пены определяется временем, в течение которого не происходит осаждения столба пены. Однако, с учетом различной природы пенообразователей, для чистоты эксперимента, стойкость пены оценивалась временем выделения из пены жидкости в количестве 50 % от использованного для её формирования раствора пенообразователя.

Кроме выше обозначенных показателей, стойкость пены определяется коэффициентами стойкости по синерезису ( $K_{с}^{п}$ ) и объему ( $K_{V}^{п}$ ), характеризующие процессы водоотделения:

$$K_{с}^{п} = 1 - \frac{M_{с}}{\rho_{п}}, \quad (2)$$

$$K_{V}^{с} = 1 - \frac{V_{н} - V_{т}}{V_{н}}, \quad (3)$$

где  $M_{с}$  – масса синерезиса 1 л пены (количество выделившейся воды), г;  $\rho_{п}$  – плотность пены, г/л;  $V_{т}$  – изменяемый во времени объем пены, л;  $V_{н}$  – начальный объем пены, л.

Физический смысл явления синерезиса состоит в стекании избыточной жидкости из плёнок пены в места их стыков и последующем вытекании под действием гравитации в нижние слои пены. Таким образом, утончение плёнок приводит к коалесценции пузырьков пены. Итогом указанного процесса становится снижение устойчивости пены и сокращение времени ее «жизни».

Стойкость пены в поризованном растворе рассчитывается отношением объема полученной пеносмеси к сумме исходных объемов пены и цементного раствора в раздельности:

$$C_{\text{пт}}^{\text{п}} = \frac{V_{\text{пт}}^{\text{пор}}}{V_{\text{пт}} + V_{\text{пен}}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{пт}}^{\text{пор}}$  – объем полученного поризованного теста, л;  $V_{\text{пт}}$  – объем цементного теста, л;  $V_{\text{пен}}$  – объем пены, л.

Определение данного показателя осуществляется по следующей методике. Для формирования 1 л поризованной смеси в равных количествах смешивается цементное тесто с В/Ц=0,4 и пена. Далее производится перемешивание смеси

в течение 1 минуты и замер высоты ее столба. После по формуле 1 рассчитывается значение стойкости пены в поризованном растворе. Пену следует считать удовлетворительной, если значение  $C_{\text{пт}}^{\text{п}}=0,8-0,85$ , качественной – если  $C_{\text{пт}}^{\text{п}}>0,95$ .

В качестве растворов применяли портландцементный раствор и наноструктурированное вяжущее (НВ) различного состава (из гранита и песка). Определение стойкости осуществлялось при естественной влажности приготовленных НВ. В работе использовались синтетические пенообразователи (ПО) – Пеностром и ПБ–Люкс, протеиновые – Reniment SB31L, Foamin, Foamcem, Эталон и GreenFroth. Последний ПО имеет разновидности:

- GreenFroth классический, получаемый из животного белка;
- GreenFroth V, производимый из растительного белка.

Основные технические характеристики пенообразователей, указанные производителями, приведены в таблице 1.

Таблица 1

#### Технические характеристики пенообразователей

Название ПО	Тип	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водородный показатель pH	Вязкость при 20 °С, сСтюкс
Пеностром	Анионного типа на основе сульфатов	1020–1090	8,7 ± 1,3	40 ± 5
ПБ Люкс	Анионного типа на основе сульфатов	1040–1100	9,2 ± 1,3	25 ± 5
Reniment SB31L	Гидролизат белков	1100–1140	7 ± 0,5	17 ± 5
Foamin	Гидролизат белков	1080–1120	7,0 ± 1,0	10 ± 5
GreenFroth	Гидролизат белков	1130–1170	6,7 ± 0,3	10 ± 5
GreenFroth V	Растительный белок	1000–1040	6,7 ± 0,3	10 ± 5

Пены получали путем перемешивания водного раствора пенообразователя в концентрациях, рекомендованных производителями. Перемешивание проводилось с использованием лабораторной верхнеприводной мешалки RW16 в течение 5 минут, до формирования стойкой однородной пены.

**Основная часть.** Согласно результатам, белковые пенообразователи характеризуются повышением кратности с увеличением концентрации ПО. Синтетические ПО имеют пик мицеллообразования, после которого кратность начинает снижаться (рис. 1).

Плотность пены является основной характеристикой, которая оказывает непосредственное влияние на плотность готового изделия. На основе практического опыта выяснено, что необходимо применять пену с плотностью 0,05–0,07 г/см<sup>3</sup>, хотя данный параметр выбирается с точки зрения проектируемой плотности конечного материала.

Согласно полученным данным, увеличение концентрации протеиновых пенообразователей в растворе приводит к снижению плотности пены, что, очевидно, связано с увеличением объема сформированной пены (рис. 2, а). При этом оптимальной плотности соответствует максимальная кратность пен.

В случае синтетических добавок увеличение концентрации рабочего раствора практически не изменяет плотность пены по отношению к начальному значению при минимальной концентрации (рис. 2, б). Однако, при использовании Пенострома в малых концентрациях отмечается высокая плотность пены, которая снижается более чем на 30 % уже при концентрации раствора равной 1 %.

Наилучшей стойкостью характеризуются пенообразователи Reniment SB31L и GreenFroth классический. При этом растительный гидролизат GreenFroth V обладает самой низкой стойкостью

среди белковых пенообразователей сопоставимой с синтетическими пенообразователями (рис. 3).

С учетом вышеописанного определены оптимальные дозировки ПО, после которых увеличение дозировки становится не эффективным с технической и экономической точки зрения: Reniment SB31L – 6 %, GreenFroth V – 5 %, GreenFroth классический – 4 %, Foamin – 2 %, ПБ-Люкс – 2 %, Пеностром – 1 %.

Исследование эффекта синерезиса (рис. 4) разделило пены на две группы. Первая группа пен – Greenfroth, Reniment, Foamin – характеризуются стойкой пеной в первые 15–20 минут, затем начинается медленное водоотделение.

Наибольшей стойкостью обладает пена на основе гидролизата животного белка марки Greenfroth.

Вторая группа пен: Пеностром, ПБлюкс, Greenfroth V отличаются падением стойкости в первые 10 минут. Прогнозируемо в эту группу попали пены на основе синтетических пенообразователей, а также выяснилось, что пены на основе гидролизата растительного белка обладают таким же течением синерезиса, как пены на пенообразователе анионного типа на основе сульфатов. Анализ кинетики изменения объема пены подтверждают данные по синерезису (рис. 5).

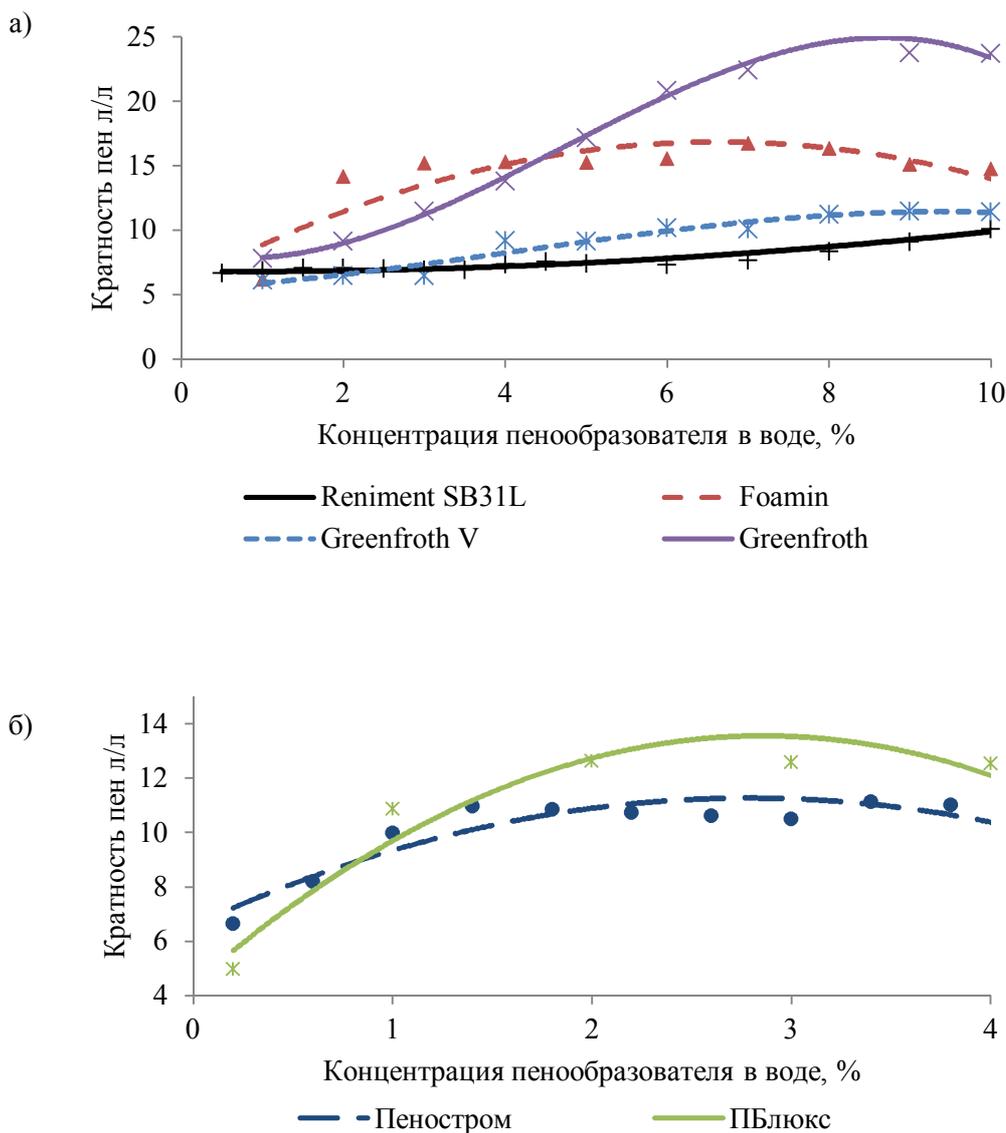


Рис. 1. Зависимость кратности пены от концентрации пенообразователей: а) протеиновые; б) синтетические

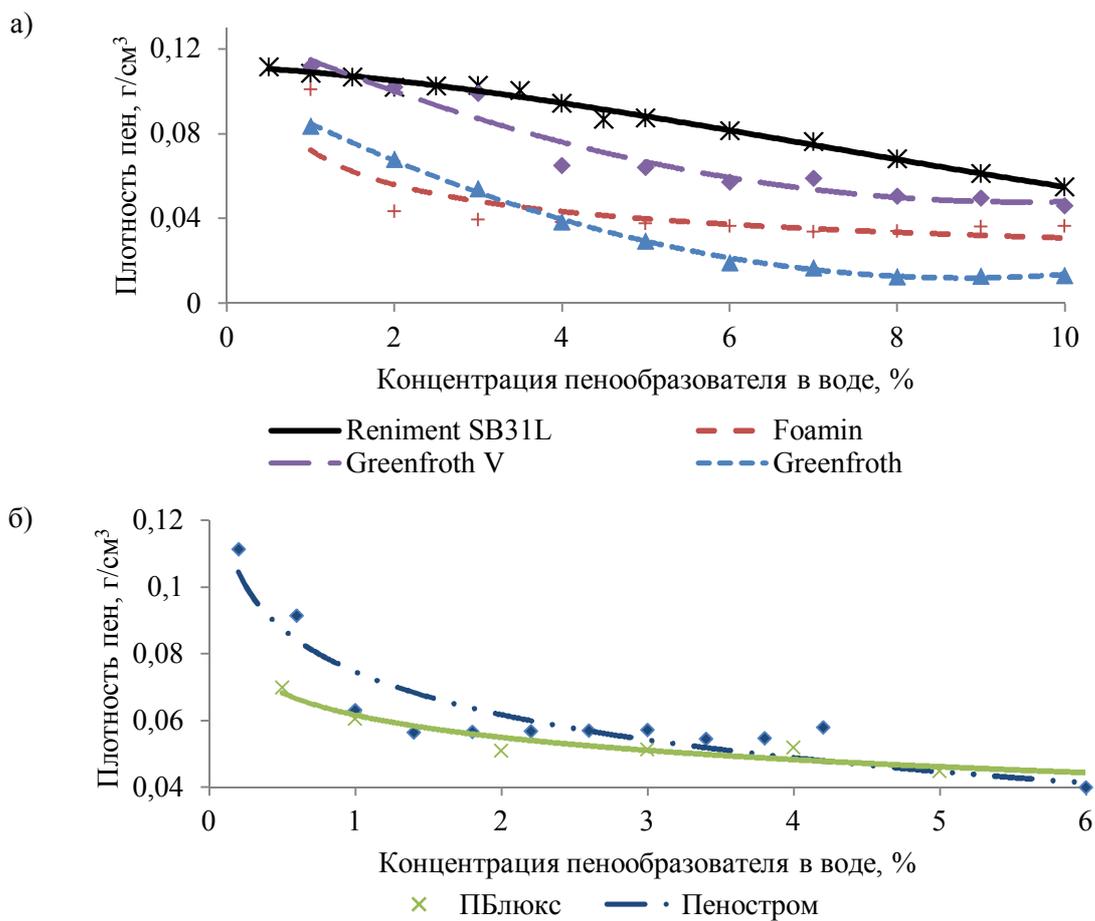


Рис. 2. Зависимость плотности пены от концентрации пенообразователей  
 а) органические пенообразователи; б) синтетические пенообразователи

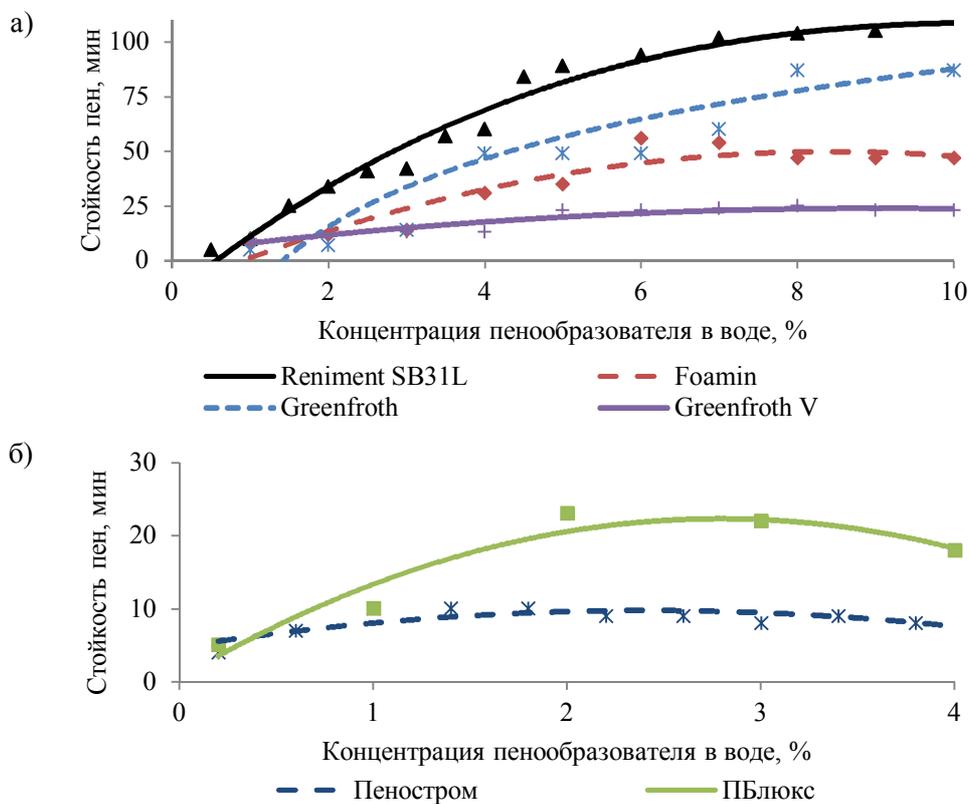


Рис. 3. Зависимость стойкости пены от концентрации пенообразователей:  
 а) протеиновых; б) синтетических

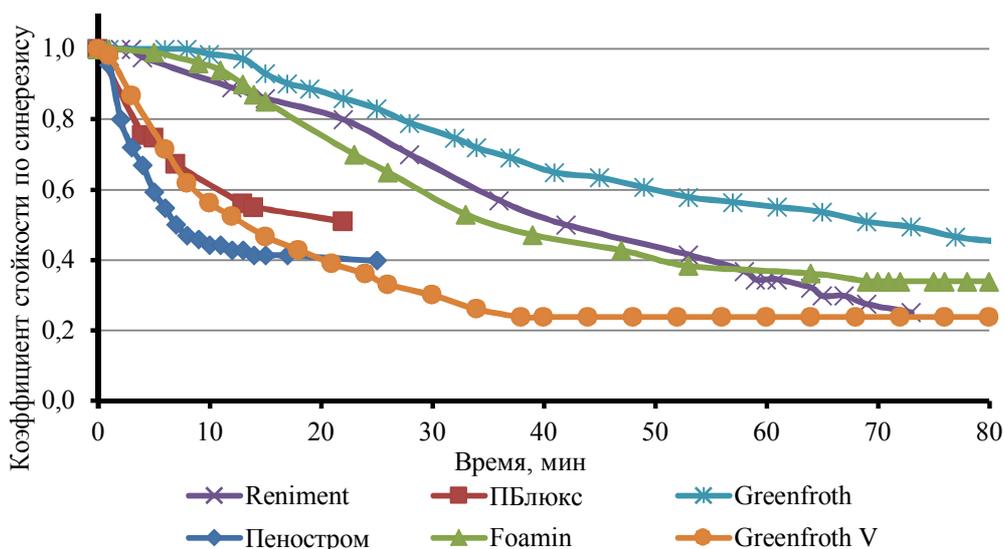


Рис. 4. Кинетика устойчивости пен во времени по синерезису

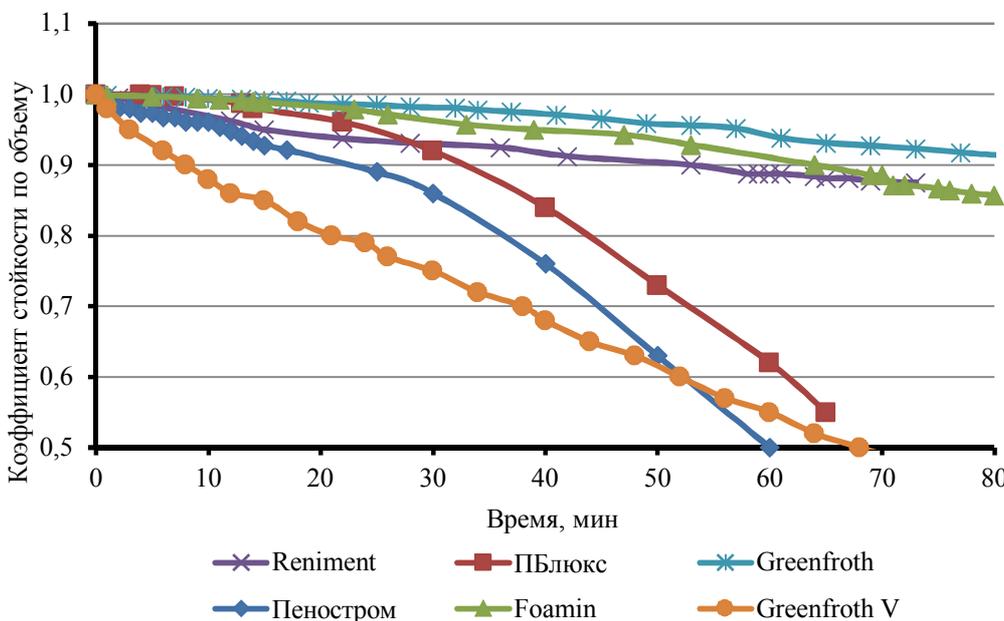


Рис. 5. Кинетика устойчивости пен во времени по объему

Стойкость в поризуемом растворе определялась согласно вышеописанной методике. Исследования проводились с целью оценки сохраняемости ячеистой структуры пены при смешении со связующими. Так, пониженная стойкость (менее 0,8) говорит об увеличении плотности, обусловленной недостатками компонентов смеси. В

связи с этим, была исследована поризация различных минеральных систем. Для сравнения в случае наноструктурированного бесцементного вяжущего эксперимент проводили как при начальной (исходной) влажности суспензии, так и при разбавлении системы в соответствии с методикой до  $V/T=0,4$ .

Таблица 2

**Стойкость пены в различных поризованных растворах**

Пенообразователь	Reniment SB31L	Пеностром	ПБ-Люкс	Foamin	GreenFroth	GreenFroth V
Концентрация ПО, %	6	1	2	2	4	5
Портландцемент	0,96	0,98	0,94	0,96	0,99	0,99
НВ из песка	0,89	0,98	0,95	0,98	0,85	0,62
НВ из песка (В/Т = 0,4)	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,74
НВ из гранита (ВАВС)	0,55	0,61	0,55	0,90	0,82	0,55
НВ из гранита (В/Т = 0,4)	0,60	0,76	0,60	0,99	0,95	0,60

Согласно полученным данным стойкости в цементном растворе (таблица 2) пенообразующие добавки обеспечивают формирование качественной пеной, так как значения  $S_{\text{цт}}^{\text{п}}$  больше и близки к 0,95. В наноструктурированном вяжущем пены также показывают высокую стойкость, кроме пены на органическом пенообразователе растительного происхождения GreenFroth V, где стойкость ниже удовлетворительной. Значения стойкости поризованных растворов ВАВС имеют низкие показатели для большинства пенообразователей, кроме Foamin и GreenFroth, которые имеют высокие значения стойкости пены.

**Выводы.** На основе полученных результатов, можно охарактеризовать использованные пенообразующие добавки с учетом их состава и природы.

Протеиновые пенообразователи по степени эффективности, оцениваемой с учетом данных о кратности пен, стойкости по синерезису и в поризуемом растворе можно ранжировать в следующей последовательности (по уменьшению качества пены): Foamin → Reniment SB31L → GreenFroth.

Reniment SB31L обеспечивает относительно низкую кратность – 7–10, но высокую стойкость пены – 80–120 мин. Пена на его основе отличается хорошей стойкостью в поризованных растворах цементного теста и наноструктурированного вяжущего. Пенообразователь Foamin: кратность пены не превышает 15, стойкость варьируется от 30 до 50 мин. Протеиновый пенообразователь Foamin обладает самыми лучшими показателями стойкости в поризованных растворах и достигает качественной отметки со всеми видами минеральных вяжущих.

GreenFroth классический и на растительных белках обладает диаметрально различными характеристиками. Кратность GreenFroth классический достигает 15–25, стойкость 50–120 мин, GreenFroth V обладает кратностью около 10, стойкость 20–25 минут. Растительный GreenFroth имеет неудовлетворительные показатели стойкости в поризованных растворах бесцементных вяжущих, когда как GreenFroth V на растительных ПАВ имеет качественные значения для растворов с В/Ц=0,4 и удовлетворительные для наноструктурированных вяжущих с естественной влажностью.

Синтетические пенообразователи Пеностром и ПБ-Люкс имеют схожие показатели кратности и стойкости. Значение показателей: кратность 10–12 и 12–13, стойкость 8–10 и 17–20 мин. для пенообразователей Пеностром и ПБ-Люкс соответственно.

**Источник финансирования.** Грант Президента для молодых кандидатов МК-5980.2018.8; Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бухало А.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Теплоизоляционный неавтоклавный пеногазобетон с нанодисперсными модификаторами. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 137 с.
2. Володченко А.Н., Строкова В.В. Повышение эффективности силикатных ячеистых материалов автоклавного твердения // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 2 (58). С. 60–69.
3. Володченко А.Н., Строкова В.В. Особенности технологии получения конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов на основе нетрадиционного сырья // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 138–143.
4. Кобзев В.А., Нелюбова В.В., Безродных А.А. Влияние органических модификаторов на стабильность пенных систем // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе: сборник научных трудов по материалам 5-ой Международной научно-практической конференции, СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов. 2017. С. 86–89.
5. Кобзев В.А., Строкова В.В., Сивальнева М.Н. Бесцементное вяжущее из гранодиорита и пенобетон на его основе. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017 г. 142 с.
6. Кобзев В.А., Нецвет Д.Д. Особенности поризации ячеистобетонной смеси на основе различных типов вяжущего // В сборнике: Научные технологии и инновации Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). 2014. С. 182–186.
7. Кобзев В.А., Нелюбова В.В., Безродных А.А. Влияние органических модификаторов на стабильность пенных систем // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2017. № 1 (8). С. 86–89.
8. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Бухало А.Б. Неавтоклавные ячеистые композиты с наноконпонентами: монография. Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 109 с.
9. Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Капуста И.Н. Микроструктурные особенности фибропенобетонных композитов на основе наноструктурированного вяжущего // В сборнике: Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий Материалы X Межрегиональной научно-технической конференции молодых

ученых, специалистов и студентов вузов. Под редакцией А.И. Николаева, Д.П. Домонова. 2016. С. 105–108.

10. Сумин А.В., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Еременко С.А. Пеногазобетон с наноструктурированным модификатором // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 70–75.

11. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Volodchenko A.N., Zagorodnjuk L.H. Improving the efficiency of wall materials for «green» building through the use of aluminosilicate raw materials // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10, № 24. С. 45142–45149.

12. Sivalneva M.N., Pavlenko N.V., Pastushkov P.P., Strokov V.V., Netsvet D.D., Shapovalov N.A. Steam curing characteristics of cellular concrete on

the base of nanostructured binder // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2016. Т. 8. № 3S. С. 1480–1485.

13. Nelyubova V.V., Strokov 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.

14. Pavlenko N.V., Strokov V.V., Kapusta M.N., Netsvet D.D. About application prospectivity of rocks with different geological and morphological features as basic raw component for free-cement binder production // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 670-671. С. 462–465.

15. Panesar D.K. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents // Construction and Building Materials. 2013. Т. 44. С. 575–584.

#### Информация об авторах

**Попов Александр Леонидович**, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов

E-mail: surrukin@gmail.com

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

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

**Нелюбова Виктория Викторовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов

E-mail: nelybova.vv@bstu.ru

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

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

**Нецвет Дарья Дмитриевна**, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов

E-mail: netsvet\_dd@mail.ru

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

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

*Поступила в декабре 2017 г.*

© Попов А.Л., Нелюбова В.В., Нецвет Д.Д., 2018

### A.L. Popov, V.V. Nelyubova, D.D. Netsvet THE INFLUENCE OF THE FOAMING AGENTS NATURE ON PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES OF FOAM

*The paper considers the influence of the nature of foaming agent on the properties of foams. Based on the analysis of the market of modern pore-forming additives, from the number of foaming agents the most widely used components, as well as novelties of the market, have been chosen. The technical characteristics of the foaming agents provided on the market are reviewed. The influence of foaming agent concentration, composition and base on the foam expansion, stability and density of foams is studied in the paper. The optimum ("working") concentrations of foaming additives are determined taking into account their stability. The stability of foams formed on the basis of working solutions in porous systems of various compositions is studied. Based on the complex of studies, the protein foaming agents are ranked according to the degree of their effectiveness, according to the data on the physical and technical properties of foams obtained on their basis.*

**Keywords:** foaming agent, foam, cellular concrete, stability, foam expansion, density.

#### REFERENCES

1. Bukhalo A.B., Strokov V.V., Nelyubova V.V. Heat-insulating non-autoclave foam gas-concrete with nanodispersed modifiers: monograph. Belgorod: publishing house of BSTU, 2015. 137 p.

2. Volodchenko A.N., Strokov V.V. Increase of efficiency of silicate honeycomb materials of autoclave hardening. // Vestnik of North-Eastern Federal University, 2017, no. 2 (58), pp. 60–69.

3. Volodchenko A.N., Strokov V.V. Peculiarities of technology for obtaining structural and heat-

insulating cellular concrete on the basis of non-traditional raw materials // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2017, no. 1, pp. 138–143.

4. Kobzev V.A., Nelyubova V.V., Bezrodnykh A.A. Influence of organic modifiers on the stability of foam systems // Resource-energy-efficient technologies in the construction complex: collected scientific papers on the materials of the 5th International Scientific and Practical Conference, SSTU named after Gagarin Yu.A., Saratov, 2017, pp. 86–89.

5. Kobzev V.A., Strokova V.V., Sivalneva M.N. Cement-free binder based on granodiorite and foam concrete on its basis: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, 142 p.

6. Kobzev V.A., Netsvet D.D. Peculiarities of porous concrete mixture on the basis of various types of binder // In the collected book: High technology and innovations. Jubilee International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 60th anniversary of the BSTU named after V.G. Shukhov (XXI scientific readings), 2014, pp. 182–186.

7. Kobzev V.A., Nelyubova V.V., Bezrodnykh A.A. Influence of organic modifiers on the stability of foam systems // Resource-efficient technologies in the construction complex of the region, 2017, no. 1 (8), pp. 86–89.

8. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Bukhalo A.B. Non-autoclaved cellular composites with nano-components: monograph. Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017, 109 p.

9. Sivalneva M.N., Strokova V.V., Kapusta I.N. Microstructural features of fiber-foamed concrete composites based on nanostructured binder // In the collected book: Scientific and practical problems

in the field of chemistry and chemical technologies. Materials of the X Interregional Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Specialists and University Students. Edited by A.I. Nikolaev, D.P. Domonov, 2016, pp. 105–108.

10. Sumin A.V., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Eremenko S.A. Foam-gas concrete with nanostructured modifier // Stroitel'nye Materialy, 2016, no. 1-2, pp. 70–75.

11. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Volodchenko A.N., Zagorodnjuk L.H. Improving the efficiency of wall materials for «green» building through the use of aluminosilicate raw materials // International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 45142–45149.

12. Sivalneva M.N., Pavlenko N.V., Pastushkov P.P., Strokova V.V., Netsvet D.D., Shapovalov N.A. Steam curing characteristics of cellular concrete on the base of nanostructured binder // Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2016, vol. 8, no. 3S, pp. 1480–1485.

13. 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.

14. Pavlenko N.V., Strokova V.V., Kapusta M.N., Netsvet D.D. About application prospectivity of rocks with different geological and morphological features as basic raw component for free-cement binder production // Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 670–671, pp. 462–465.

15. Panesar D.K. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents // Construction and Building Materials, 2013, vol. 44, pp. 575–584.

#### *Information about the author*

**Aleksandr L. Popov**, Postgraduate student.

E-mail: [surrukin@gmail.com](mailto:surrukin@gmail.com)

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Viktoriya V. Nelyubova**, PhD, Assistant professor.

E-mail: [nelyubova.vv@bstu.ru](mailto:nelyubova.vv@bstu.ru)

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Daria D. Netsvet**, Postgraduate student.

E-mail: [netsvet\\_dd@mail.ru](mailto:netsvet_dd@mail.ru)

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in December 2017*