

УДК 691-405.8:666.973.2:691.14

Модификация технической пены для монолитного пенобетона введением вторичной целлюлозной фибры

Валерий Игорьевич ФЕДОРОВ, старший преподаватель, e-mail: valeriyif.ykt@gmail.com

Алексей Егорович МЕСТНИКОВ, доктор технических наук, зав. кафедрой производства строительных материалов, изделий и конструкций, e-mail: mestnikovae@mail.ru

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», 677000 г. Якутск, ул. Белинского, 58

Аннотация. Для получения устойчивой пенобетонной смеси с целью повышения качества монолитного пенобетона применяется модификация технической пены введением вторичной целлюлозной фибры. В статье сравниваются результаты исследования параметров пены контрольного состава и состава с добавлением фибры. Рассмотрены процесс извлечения целлюлозной фибры из листа бумаги и технология разволокнения макулатуры в пропеллерном смесителе. Определены морфометрические показатели вторичной целлюлозной фибры. Экспериментальные исследования проведены с использованием стандартных средств и методов измерения, а также комплекса современных физических методов анализа. Выявлена причинно-следственная взаимосвязь между концентрацией порообразующей добавки, кратностью и устойчивостью технической пены. В результате анализа экспериментальных данных установлена критическая концентрация мицеллообразования пенной системы, описаны структура и механизм разрушения пены под воздействием силы гравитации. Обосновано положительное влияние вторичной целлюлозной фибры на структуру технической пены, а также рассмотрен процесс формирования оптимальной пористой структуры пенобетона в присутствии волокна.
Ключевые слова: техническая пена, монолитный пенобетон, вторичная целлюлозная фибра, модификация, макроструктура, устойчивость, кратность, канал Плато-Гиббса, макропора, ячейка.

MODIFICATION OF TECHNICAL FOAM FOR MONOLITHIC FOAM CONCRETE BY INTRODUCING SECONDARY CELLULOSE FIBER

Valerij I. FEDOROV, e-mail: valeriyif.ykt@gmail.com

Aleksej E. MESTNIKOV, e-mail: mestnikovae@mail.ru

North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk 677000, Republic Sakha (Yakutia), Russian Federation

Abstract. To produce a stable foam concrete mixture in order to improve the quality of monolithic foam concrete the modification of technical foam is used by introducing the secondary cellulose fiber. Results of the study of parameters of the foam control composition and a composition with fiber addition are compared in the article. The process of removing the cellulose fiber from a sheet of paper and the technology of dissociation of waste paper in a propeller mixer are considered. Morphometric parameters of secondary cellulose fiber were determined. Experimental studies were carried out with the use standard means and methods of measurement, as well as a complex of modern physical methods of analysis. The causal relationship between the concentration of the pore-forming additive, multiplicity and stability of the technical foam is revealed. As a result of the analysis of experimental data, a critical concentration of the micelle formation of the foam system is established, the structure and mechanism of foam destruction under the influence of gravity are described. The positive influence of secondary cellulose fibers on the structure of technical foam is substantiated, and also the process of formation of the optimal porous structure of foam concrete in the presence of fiber is considered.

Key words: technical foam, monolithic foam concrete, secondary cellulose fiber, modification, macrostructure, stability, multiplicity, Plateau-Gibbs channel, macropore, cell.

Введение

В суровых климатических условиях Якутии в качестве теплоизоляционного материала хорошо себя зарекомендовал монолитный пенобетон, обладающий достаточно высокой эксплуатационной стойкостью. В монолитно-каркасном и малоэтажном строительстве Якутии разработа-

на технология совместного использования монолитного пенобетона с пенополистирольным вкладышем [1]. Сочетание монолитного пенобетона с пенополистирольной плитой позволяет обеспечить оптимальную энергоэффективность стеновой ограждающей конструкции вследствие достижения «бесшовной» экран-

ной теплоизоляции. Однако на структурообразование пенобетонной смеси влияет широкий спектр внешних и внутренних воздействий, которые крайне трудно поддаются управлению.

Общеизвестно, что ключевыми факторами, влияющими на формирование оптимальной пористой структуры пенобетона,

прежде всего являются параметры технической пены (далее — ТП). Согласно литературным данным [2–4], большинство дефектов макро- и микроструктуры пенобетона возникают на первых этапах твердения и структурообразования смеси. Вследствие высокого значения V/T , присущего разновидностям теплоизоляционного пенобетона [2], происходит дестабилизация структуры пенобетонной смеси под воздействием силы гравитации. В связи с этим возникает так называемый *эффект синерезиса*, который в последующем приводит к постепенному расслоению цементно-песчаного раствора из пенобетонной смеси. Исходя из изложенного, исследование по обеспечению устойчивости и стабильности ТП является актуальной прикладной задачей в технологии ячеистых бетонов [3].

Техническая пена представляет собой двухфазную дисперсную систему, состоящую из газовой фазы — ячеек, разделенных пленками жидкой фазы [5]. Обычно газ рассматривается как дисперсная фаза, а жидкость — как непрерывная дисперсионная среда [2, 5].

В целях повышения качества и стабилизации структуры ТП используют различные технологические приемы [6, 7]. Наиболее рациональным способом стабилизации структуры ТП и улучшения физико-механических показателей пенобетона является модификация состава вторичной целлюлозной фиброй (далее — ВЦФ) [3, 4, 8].

В этой связи цель данной исследовательской работы — установление причинно-следственной взаимосвязи и количественная оценка влияния ВЦФ на кратность¹ и устойчивость² ТП.

ВЦФ как производное первичной целлюлозы имеет идентичные ей свойства [9]: она не растворима в воде, кислотах и органике, хорошо удерживает и поглощает жидкость, устойчива к воздействию температуры до 235 °С [10]. Предпосылкой использования ВЦФ для модификации свойств технической пены является стойкость к воздействию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и существенное повышение физико-механических показателей пенобетона.

Исходные материалы и методы исследования

Для получения ВЦФ использована макулатура марки МС-8В (газетная бумага), соответствующая требованиям ГОСТ 10700–97 «Макулатура бумажная и картонная. Технические условия». Данная марка макулатуры выбрана вследствие ее широкой распространенности и относительно низкого содержания наполнителей и связующих веществ.

ВЦФ изготовлена путем роспуска листа макулатуры в водной среде. Перед роспуском макулатуру предварительно замачивают в течение определенного промежутка времени. Намоченные листы макулатуры распускают с помощью лабораторного высокоскоростного смесителя пропеллерного типа. Частота вращения вала смесителя в процессе роспуска составляет 200 с^{-1} . Следует отметить, что прочность волокон, составляющих бумагу и картон, намного превышает прочность намоченного листа, поэтому механические воздействия позволяют разделить лист на отдельные волокна без нарушения их структуры [9, 10]. Продолжительность роспуска макулатуры — 1 ч [4].

В исследовании использована

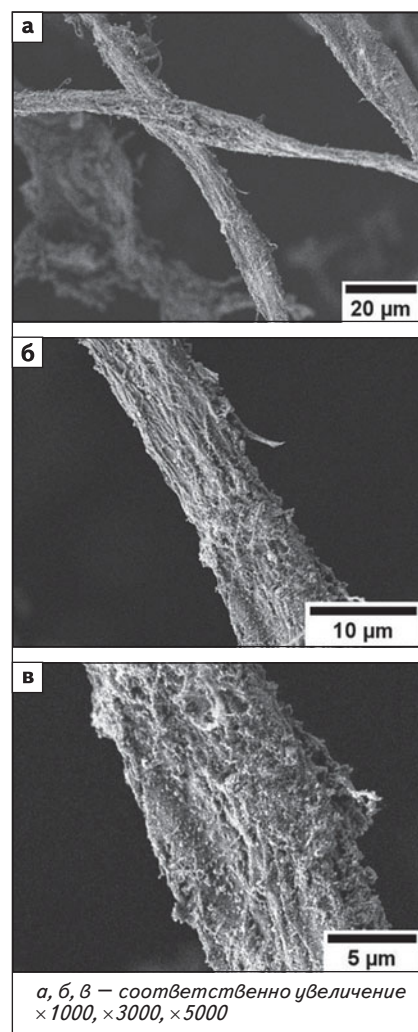


Рис. 1. Микрофотографии вторичной целлюлозной фибры

пена со средней плотностью 75 кг/м^3 . В качестве порообразующей добавки применили белковый пенообразователь «Foamset» (Италия)³. Техническая пена получена методом кавитационного воздухововлечения на растворосмесителе. Поризация водного раствора пенообразователя происходит за счет процессов кавитации. Отсюда следует, что при достижении определенного объема воздухововлечения вязкоупругая пенная смесь поднимается по валу ротора за счет нормального напряжения, действующего перпендикулярно вектору напряжения сдвига [2].

Кратность и устойчивость ТП определены по методике ГОСТ

¹ Кратность пены — безразмерная величина, равная отношению объема пены к объему раствора.

² Устойчивость пены — промежуток времени, при котором из пены вытекает 50% жидкой фазы.

³ Технические характеристики «Foamset» приведены на сайте <http://мивас-тх.рф> (дата обращения: 04.11.2017).

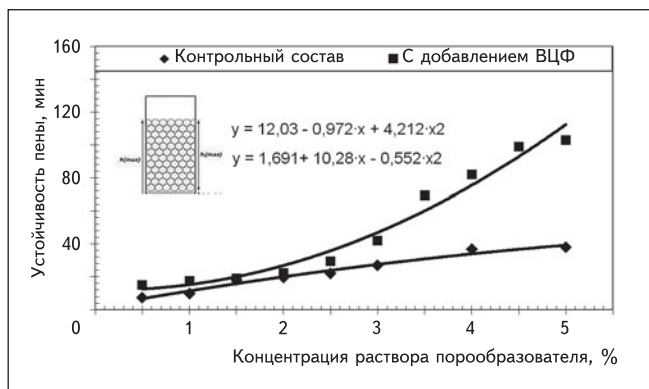


Рис. 2. Дифференциальное распределение макропор пенобетона по диаметру

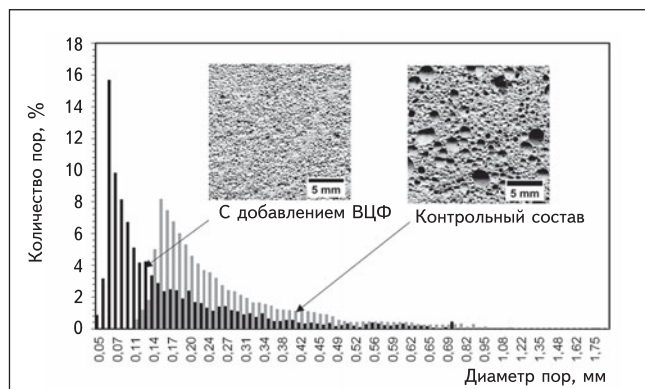


Рис. 3. Влияние содержания вторичной целлюлозной фибры на устойчивость технической пены

23409.26–78 «Смеси жидкие самотвердеющие. Метод определения пенообразующей способности и устойчивости пены растворов поверхностно-активных веществ» и ГОСТ Р 50588–2012 «Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний». Микроструктуру ВЦФ исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JSM-7600F. Обработка экспериментальных данных выполнена в программе «Microsoft office Excel 2013», уравнения регрессии получены с помощью программы «MathCAD 2001i». Микрофотографии ВЦФ (рис. 1) и макрофотографии пенобетона (рис. 2) обработаны в графических редакторах «ImageJ» и «Corel DRAW X6».

Результаты эксперимента

Как показано на рис. 1, волокно имеет развитую сморщенную шероховатую поверхность, что позволяет волокну лучше сцепляться с цементной матрицей пенобетона. Вместе с тем анализ микрофотографий позволил предположить существование дополнительного усиления сцепления с цементной составляющей благодаря наличию отслоившихся микрофибрилл целлюлозы (см. рис. 1б).

Микрофибриллы, равномерно распределенные по поверхности

волокна, предположительно образовались в результате извлечения ВЦФ из макулатуры при механическом воздействии вала диспергатора (смесителя). С помощью программы «ImageJ» измерены морфометрические параметры ВЦФ, приведенные в табл. 1.

1. Морфометрические показатели ВЦФ

Линейные размеры, мкм:

длина	5319
ширина	23
толщина	4
Объем, мкм ³	121 348
Площадь поперечного сечения, мкм ²	92
Площадь поверхности, мкм ²	71 410

Для количественной оценки влияния фибры на параметры ТП проведено сравнение показателей пены с добавлением ВЦФ и контрольного раствора. Концентрация раствора порообразователя варьировалась в пределах 0,5–5 %. Количество ВЦФ на 1 л пены составило 1 г, что примерно равно 5–5,5 млн шт. ВЦФ. Данная пропорция соответствует максимальной прочности пенобетона с добавлением ВЦФ и согласуется с законом Створа об оптимальной структуре ИСК¹. Зависимость кратности и устойчивости ТП от концентрации поро-

образователя показана в табл. 2. Причем установлено, что пенообразующая способность раствора повышается с увеличением концентрации порообразователя.

По результатам эксперимента, вспениваемость раствора контрольного состава увеличивается до максимального значения (3,5 %), а затем остается практически постоянной вплоть до предела растворимости порообразователя (5 %). Увеличение пенообразующей способности с ростом концентрации связано с мицеллообразованием [11], поскольку при достижении критической концентрации мицеллообразования (далее – ККМ) наблюдается максимальный объем пены. Кроме того, в области ККМ происходит завершение формирования адсорбционного слоя с максимальной механической прочностью [12].

Кратность пен с добавлением ВЦФ на 10–15 % ниже по сравнению с контрольной пеной вследствие создания неравномерных пространственных структур в разделе жидкой и твердой фаз в процессе вспенивания. Наряду с этим ВЦФ в значительной степени увеличивает устойчивость пены. На рис. 3 показано влияние содержания ВЦФ на устойчивость ТП, откуда видно, что с увеличением концентрации порообразователя, устойчивость пены повышается прямо пропор-

¹ ИСК – искусственный строительный конгломерат.

ционально. Причем степень прироста устойчивости наблюдается при концентрации 2,5 % и выше. Это свидетельствует о том, что эффективность использования ВЦФ в большей степени зависит от дисперсности пены, так как с ростом концентрации раствора параллельно увеличивается и степень ее дисперсности [5, 6].

Существенное повышение устойчивости пены предположительно связано с закупоркой каналов Плато–Гиббса. Эти каналы в поперечном сечении образуют треугольники, в каждом ребре которых сходятся по три пленки, углы между ними равны и составляют примерно 120° [13]. Эта взаимосвязанная система пронизывает весь каркас пены по всему ее объему. Истечение жидкости в пузырьке пены приводит к уменьшению поперечного сечения каналов Плато–Гиббса, вследствие чего происходит истечение жидкой фазы под воздействием силы гравитации [13].

В целях оценки влияния ВЦФ на формирование макропор пенобетона нами изготовлены образцы пенобетона марки D500 контрольного состава и с добавлением ВЦФ. После достижения 28-суточного возраста образцы срезали и обработали поверхность наждачной бумагой. Затем на сканере изображений получили фотографии срезов, фотографии обработали с помощью программы «ImageJ» и получили кривые дифференциального распределения макропор. Из рис. 2 видно, что кривая распределения макропор пенобетона с добавлением ВЦФ имеет вытянутую фор-

2. Зависимость кратности (в числителе) и устойчивости (в знаменателе), мин, технической пены от концентрации раствора порообразователя

Концентрация раствора порообразователя, %	Контрольный состав	Состав с добавлением ВЦФ
0,5	4,97/7,5	2,8/15
1	7,09/9,75	5,04/17,5
1,5	7,5/18	5,73/19
2	8,1/19,6	6,22/22,5
2,5	8,5/22	6,33/29,5
3	8,94/27	6,35/42
3,5	—	6,70/69,5
4	9,38/37	6,83/82
4,5	—	6,89/99
5	9,4/38	6,93/103

му и смещена в области мелких пор (0,07 мм), а кривая контрольного состава находится в области относительно крупных пор (0,17 мм).

В ы в о д ы

1. На основании проведенных исследований установлено положительное влияние ВЦФ на устойчивость ТП и на формирование оптимальной пористой структуры пенобетона. Введение ВЦФ позволяет увеличить устойчивость пены с 38 до 108 мин при максимальном значении ККМ. В силу объективных причин, увеличение устойчивости пены, скорее всего, зависит от степени однородности распределения фибр по всему объему ТП.

2. Следует отметить, что ВЦФ, как и любое растительное сырье, имеет гидрофильную поверхность, что позволяет фибре находиться примерно посередине

раздела фаз системы «газ–жидкость». Данное явление, вероятнее всего, и создает эффект микроармирования межпоровой перегородки, тем самым равномерно распределяя внутренние напряжения.

3. Наблюдается снижение кратности пены на 10–15 % при различных концентрациях раствора порообразователя. Однако, как показали результаты эксперимента, незначительное снижение кратности существенно не влияет на формирование оптимальной пористой структуры пенобетона.

4. Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать вывод о целесообразности использования вторичной целлюлозной фибры в монолитном пенобетоне вследствие значительного повышения устойчивости пены и формирования оптимальной пористой структуры.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Местников А. Е., Корнилов Т. А., Егорова А. Д., Рожин В. Н. Легкие ограждающие конструкции жилых зданий для резко континентального климата Севера // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 46–47.
2. Шахова Л. Д. Технология пенобетона. Теория и практика. М. : АСВ, 2010. 248 с.
3. Федоров В. И. Дисперсно-армированный пенобетон с применением целлюлозных фибр // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. в рамках Междунар. выставки «СТРОЙСИБ-2015», 3–6 февраля 2015 г. Новосибирск : НГАУ, 2015. С. 124–123.
4. Федоров В. И., Местников А. Е. Пеноцементный композит с целлюлозной фиброй для малоэтажного

- строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 8. С. 22–25.
5. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.
 6. Кругляков П. М., Эксерова Д. Р. Пены и пенные пленки. М.: Химия, 1990. 432 с.
 7. Вилкова Н. Г., Еланева С. И., Волкова Н. В. Течение растворов ПАВ через пену: теория и эксперимент // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. 2012. № 29. С. 348–351.
 8. Игамбердиев Б. Г., Артикова М. А. Использование волокон из вторичного сырья для улучшения свойств вяжущих веществ // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 23 (105). С. 14–17.
 9. Фляте Д. М. Свойства бумаги. М.: Лесная промышленность, 1986. 680 с.
 10. Муллина Э. Р., Мишурина О. А., Нигматуллина Л. И., Ишкuvatова А. Р. Влияние процесса вторичной переработки макулатуры на бумагообразующие свойства целлюлозного сырья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 4-1. С. 32–34.
 11. Вилкова Н. Г., Мишина С. И., Вилкова А. С. Течение жидкости через пену // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-9. С. 1877–1881.
 12. Савенков А. И., Тюлькин С. В., Плосконосова А. Е., Гринюк Р. А. Устойчивость пен на протеиновых пенообразователях // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2017. № 1. С. 128–129.
 13. Гибс Дж. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 584 с.

REFERENCES

1. Mestnikov A. E., Kornilov T. A., Egorova A. D., Rozhin V. N. Light enclosing constructions of residential buildings for sharply continental climate of the North. *Zhishhnoe stroitel'stvo*, 2010, no. 1, pp. 46–47. (In Russian).
2. Shahova L. D. *Tehnologija penobetona. Teorija i praktika* [Technology of foam concrete. Theory and practice]. Moscow, ASV Publ., 2010. 248 p. (In Russian).
3. Fedorov V. I. Dispersion-reinforced foam concrete with the use of cellulosic fibers. *Materialy Mezhdunar. nauchno-tehn. konf. v ramkah Mezhdunar. vystavki «STROJSIB-2015»* [Proc. of the International scientific.-tech. conf. in the framework of the Intern. exhibition "STROYSIB-2015"]. Febr. 3–6 2015. Novosibirsk, NGAU Publ., 2015, pp. 123–124. (In Russian).
4. Fedorov V. I., Mestnikov A. E. Foam cement composite with cellulose fiber for low-rise construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2016, no. 8, pp. 22–25. (In Russian).
5. Tihomirov V. K. *Peny. Teorija i praktika ih poluchenija i razrushenija* [Foam. Theory and practice of obtaining and destroying them]. Moscow, Himija Publ., 1983. 264 p. (In Russian).
6. Krugljakov P. M., Ekserova D. R. *Peny i pennye plenki* [Foams and films]. Moscow, Himija Publ., 1990. 432 p. (In Russian).
7. Vilkova N. G., Elanjova S. I., Volkova N. V. The flow of surfactant solutions through foam: theory and experiment. *Izvestija PGPU im. V.G. Belinskogo*, 2012, no. 29, pp. 348–351. (In Russian).
8. Igamberdiev B.G., Artikova M. A. Using fibers from recycled materials to improve the properties of binders. *Problemy sovremennoj nauki i obrazovanija*, 2017, no. 23(105), pp. 14–17. (In Russian).
9. Fljate D. M. *Svoystva bumagi* [Paper properties]. Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1986. 680 p. (In Russian).
10. Mullina Je .R., Mishurina O. A., Nigmatullina L. I., Ishkuvatova A. R. Influence of the recycling process of waste paper on the paper-forming properties of cellulose raw materials. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2015, no. 4-1, pp. 32–34. (In Russian).
11. Vilkova N. G., Mishina S. I., Vilkova A. S. The flow of liquid through the foam. *Fundamental'nye issledovanija*, 2015, no. 2-9, pp. 1877–1881. (In Russian).
12. Savenkov A. I., Tjul'kin S. V., Ploskonosova A. E., Grinjuk R. A. Stability of foams on protein foaming agents. *Sovremennye tehnologii i nauchno-tehnicheskij progress*, 2017, no. 1, pp. 128–129. (In Russian).
13. Gibbs Dzh. *Termodinamika. Statisticheskaja mehanika* [Thermodynamics. Statistical Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 584 p. (In Russian).

Для цитирования: Федоров В. И., Местников А. Е. Модификация технической пены для монолитного пенобетона введением вторичной целлюлозной фибры // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 48–52.

For citation: Fedorov V. I., Mestnikov A. E. Modification of Technical Foam for Monolithic Foam Concrete by Introducing Secondary Cellulose Fiber. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2018, no. 1, pp. 48–52. ■