

УДК 691.54:666.962

МОДИФИЦИРОВАНИЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА ТОРФЯНОЙ ДОБАВКОЙ ТМТ600

Прищепа Инга Александровна¹,
ingaprishepa@mail.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2},
mostovshchikov@tsuab.ru

Саркисов Юрий Сергеевич¹,
sarkisov@tsuab.ru

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Изучено влияние термомодифицированной добавки на основе торфа ТМТ600 на свойства и структуру пенобетона неавтоклавного твердения. Предложена модель фрагмента структуры границы раздела фаз газ–твердое–жидкое и модель формирования пористой структуры рассматриваемой композиции. Выявлен механизм роли пенообразователя в процессе формирования пористой структуры пенобетона. Методами томографии показано соответствие реальной структуры пенобетона предложенным моделям, а также достижение однородности распределения пор по объему. Установлено, что в процессе гидратации после растворения тоберморита и этtringита происходит перезарядка частиц цемента, а следовательно, электростатический потенциал изменяется от положительных до отрицательных значений. При формировании пены массоперенос частиц осуществляется не только диффузионным, но и конвективным путем. Ускоренное перемещение частиц может осуществляться также за счет электростатического взаимодействия зарядов на поверхности пены и торфяной добавки. Геометрия структурных ячеек пены имеет вид многоугольников, состоящих преимущественно из шести- и пятиугольных граней. В результате происходящих процессов формируется сложная иерархическая структура, в которой каналы Плато–Гиббса в пене кальматируются (закупориваются), образуя более прочный скелет, и после гидратации цемента ввиду перезарядки поверхности последнего в конечном итоге формируются межпоровые перегородки повышенной прочности при одновременном равномерном распределении пор в структуре пенобетона. Разработанный стеновой материал обладает не только высокой прочностью, морозостойкостью, но и повышенными теплоизоляционными свойствами. Полученный с применением добавки ТМТ600 пенобетон полностью отвечает семи фундаментальным критериям современной концепции строительного материаловедения, таким как: технологическая доступность и эффективность, энергоресурсосбережение, экологическая безопасность и природная совместимость, экономическая целесообразность, эстетическая приемлемость применения на практике, эстетическая выразительность и социальная направленность.

Ключевые слова:

пенобетон, термомодифицированная торфяная добавка ТМТ600, кратность и стойкость пены, структурообразование, томография.

Введение

В условиях энергосберегающего вектора развития строительства и эксплуатации зданий и сооружений на первый план выходят такие стеновые строительные материалы и изделия, которые при минимальной себестоимости их производства позволяют сооружать эффективные по критерию тепло- и звукозащиты стеновые ограждающие конструкции. В то же время конструкция стены должна удовлетворять требованиям прочности и морозостойкости, надежности и долговечности. Немаловажным фактором является снижение общей нагрузки на фундамент за счет применения изделий с минимальной удельной массой, что благоприятно скажется на общей стоимости строительства.

Одним из перспективных материалов является пенобетон, который получил широкое распространение и востребованность по сравнению с классическими стеновыми материалами из-за простоты технологии производства, доступности сырьевой базы, относительно невысокой себестоимости и экологичности [1–4].

В настоящее время получение стеновых блоков пенобетона базируется на технологии автоклавирования, которая позволяет выпускать партии материала со стабильными и воспроизводимыми параметрами качества. Однако высокая энергоемкость, металлоемкость, экологическая безопасность, взрывоопасность, а также себестоимость готового продукта ограничивают применение автоклавных технологий в производстве пенобетона. В связи с этим возрастает спрос на производство пенобетона неавтоклавного твердения.

Формирование структуры неавтоклавного пенобетона на различных уровнях, несмотря на простоту технологии его изготовления, трудно поддается управлению. Это является следствием ряда технологических факторов: вероятность возникновения усадочных деформаций, замедление сроков начального структурообразования и т. п. Это затрудняет получение качественного конечного продукта стенового материала с заданными свойствами. Одним из путей решения этой проблемы, как это следует из научно-технической и

патентной литературы, является использование разнообразных модифицирующих добавок, включая нанодисперсные структуры различного природного происхождения. Как правило, эти добавки либо импортируются из-за рубежа, либо отличаются высокой стоимостью или усложненной технологией производства. К таким добавкам, безусловно, можно отнести торф [5, 6]. Исследованию торфов Томской области посвящен ряд работ, в которых показаны его функциональные свойства и перспективы применения в различных отраслях [7, 8]. Томская область является одним из наиболее богатых регионов России по месторождениям торфа [9–11]. Поэтому использование торфа в различных строительных технологиях как компонента строительных смесей или как основы для получения эффективных добавок является перспективным. В Томском государственном архитектурно-строительном университете на основании многолетних исследований разработаны эффективные добавки на основе термомодифицированного торфа, среди которых наибольшее распространения получила добавка ТМТ600 [12, 13]. Добавка ТМТ600 для регулирования свойств неавтоклавного пенобетона ранее не применялась.

Целью настоящей работы являлось исследование закономерностей влияния термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600 на свойства пены и пенобетона неавтоклавного твердения.

Материалы и методы исследования

Для выполнения исследований использовали портландцемент Топкинского завода ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 30515–2020), песок Кудровского месторождения Томской области, модуль крупности 1,8 (ГОСТ 8736-2014). В качестве пенообразующей добавки был выбран синтетический пенообразователь Бенотех ПБ-С (ГОСТ 24211-2008), представляющий собой смесь анионоактивных ПАВ со стабилизирующими и функциональными добавками. Для затворения смесей используется водопроводная вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011. Для изготовления термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600 был использован торф Гусевского месторождения, который предварительно подвергли термообработке при температуре 600 °С. Добавка ТМТ600 содержит более 90 % минеральной части, 10 % органической и относится к минерал-органической добавке [14]. Средний размер частиц добавки ТМТ600 составлял 42 ± 3 мкм, удельная поверхность $0,6 \text{ м}^2/\text{г}$. Элементный состав торфяной добавки представлен в основном кальцием, углеродом и алюминием (рис. 1, табл. 1). В то же время ТМТ600 представляет собой иерархическую структуру на различных масштабных уровнях, которая включается в себя и молекулярный, и надмолекулярные уровни.

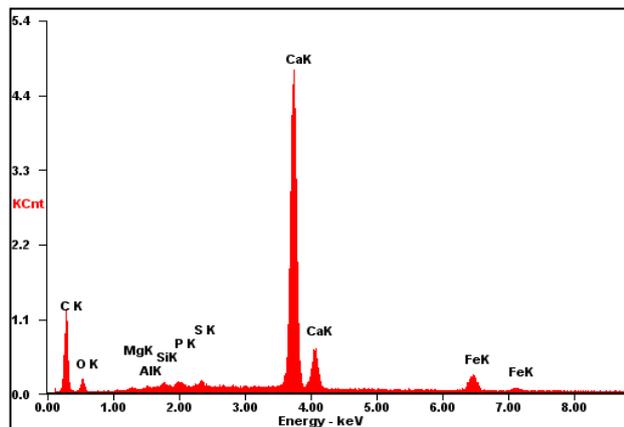
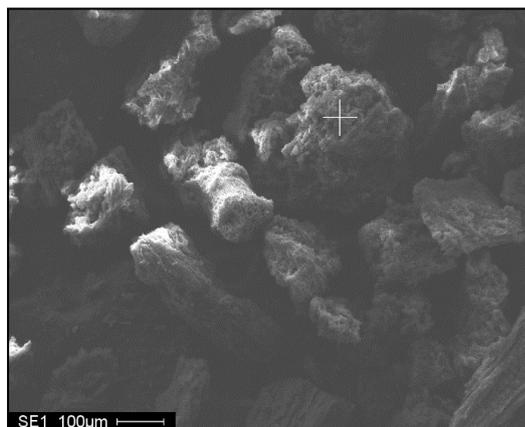


Рис. 1. Результаты исследования элементного состава модифицирующей добавки ТМТ600

Fig. 1. Results of the study of the elemental composition of the modifying additive TMT600

Таблица 1. Элементный состав модифицирующей добавки ТМТ600

Table 1. Elemental composition of the modifying additive TMT600

Элемент/Element	Мас. %/Wt. %	Ат. %/At. %
C	48,48	69,46
O	13,02	14,00
Mg	00,54	00,38
Al	00,46	00,29
Si	00,63	00,38
P	00,58	00,32
S	00,54	00,29
Ca	31,72	13,62
Fe	04,04	01,25

Нестабильное поведение пузырьков вызывает неравномерное распределение пор по размерам в пенобе-

тоне. Совместное действие выталкивающей силы, силы тяжести, давления раствора и внутреннего давления приводит к нестабильности пузырьков, когда они попадают в цементное тесто: чем меньше пузырек, тем заметнее нестабильность. Неустойчивое состояние в пузырьках приводит к непрерывному слиянию и росту пузырьков, что увеличивает их размер. Поведение пузырьков при слиянии становится более очевидным, когда используется большее количество пены.

В качестве рабочей гипотезы было сделано предположение, что введение добавки ТМТ600 в пенный раствор позволит модифицировать поверхность раздела фаз газ–жидкость и получить стабильные пены для производства пенобетона. Возникновение эффекта разделения между пузырьками

и цементно-песчаным раствором происходит под действием различных сил [15], состоящих из силы Стокса (F_c), силы тяжести (F_T), внутреннего давления пузырька ($P_{вн}$) и поверхностного натяжения ($F_{пн}$), индуцированных эффектом поверхностно-

активного вещества, а также силы Архимеда (F_A), как показано на рис. 2.

В настоящей работе была предложена вероятная модель формирования структуры неавтоклавного пенобетона с добавкой ТМТ600 (рис. 3).

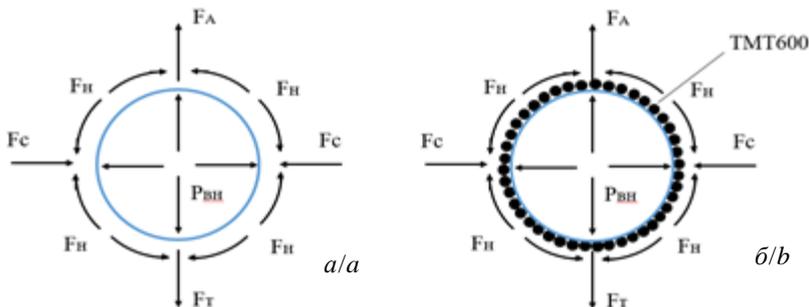


Рис. 2. Силы, действующие на пузырек (а) и пузырек, стабилизированный добавкой ТМТ600 (б)
 Fig. 2. Forces acting on a normal bubble (a) and addition of TMT600 stabilized bubble (b)

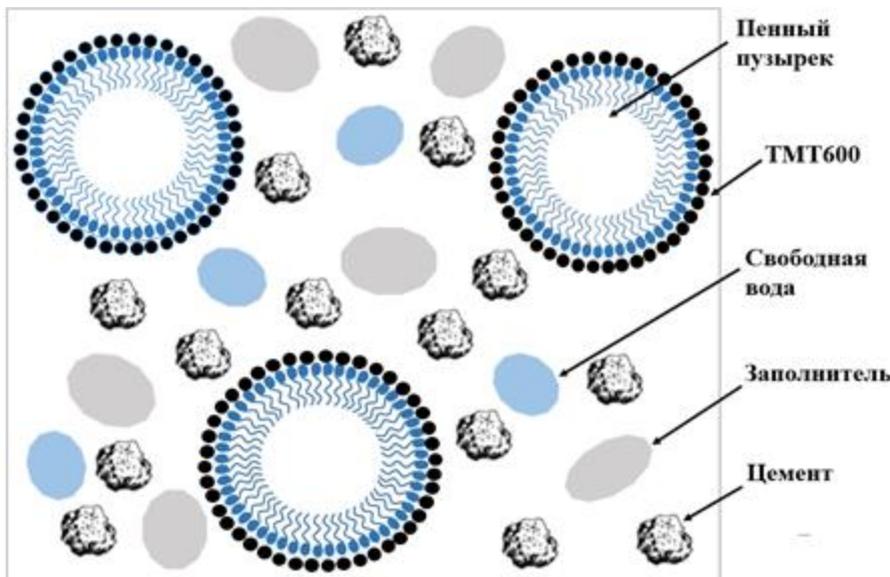


Рис. 3. Вероятная модель фрагмента структуры пенобетона с добавкой ТМТ600 на границе раздела фаз газ–твердое–жидкость
 Fig. 3. Probable model of a fragment of the structure of foam concrete with the addition of TMT600 at the gas–solid–liquid interface

Как видно из рис. 3, пенообразователь формирует каналы Плато–Гиббса, которые кальматируются торфяной добавкой, что обеспечивает в дальнейшем усиление адгезионных свойств цементно-песчаной матрицы.

Результаты и их обсуждение

Добавка ТМТ600 по своим физико-химическим свойствам на 80 % представляет собой неполярный адсорбент и на 20 % полярный адсорбент. В этой связи, согласно правилу полярности фаз Ребиндера П.А. [16], вода будет адсорбироваться на ТМТ600 в основном неполярным водородом, а на полярных оксидах кальция, кремния, алюминия, железа, напротив, – гидроксильной группой. При добавлении пенообразователя, в зависимости от заряда функциональных групп, его взаимодействие с адсорбентами определя-

ется правилом Кёна [16]: эффективность пенообразователя будет максимальной при выполнении условия: $\epsilon_B > \epsilon_{ПВ} > \epsilon_C$.

В связи с этим пузырек воздуха пены, который заряжен отрицательно, наиболее сильно будет притягиваться к поверхности частиц адсорбента ТМТ600 и значительно слабее к поверхности цемента, частицы которого в воде заряжены отрицательно. Этот результат косвенно подтверждается реограммами, из которых следует, что добавка ТМТ600, введенная в цементную систему, меняет реологию исследуемой системы, понижая ее тиксотропность и повышая реопексию (рис. 4).

В процессе гидратации после растворения тоберморита и этtringита происходит перезарядка частиц цемента, а, следовательно, электрокинетический потенциал изменяется от положительных значений до

отрицательных [17]. В результате происходящих процессов формируется сложная иерархическая структура, в которой каналы Плато–Гиббса в пене кальматируются (закупориваются), образуя более прочный скелет, и после гидратации цемента ввиду перезарядки поверхности последнего в конечном итоге формируется межпоровая перегородка повышенной прочности при одновременном равномерном распределении пор в структуре пенобетона. Влияние торфяной добавки на кратность и стойкость пены приведено на рис. 5.

Из анализа данных, представленных на рис. 5, следует, что при увеличении добавки ТМТ600 вплоть до 2 % в водном растворе пенообразователя наблюдается возрастание стойкости пены. Наибольший эффект по стабильности (стойкости) наблюдается у пены с 1,5–2,5 % торфяной добавки ТМТ600. Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение в раствор пены добавки ТМТ600 приводит к улучшению свойств пены за счет инкапсуляции частиц торфа на поверхности пены (рис. 6). Микрочастицы добавки ТМТ600 мигрируют по границам раздела фаз пены с образованием агрегатов достаточно крупных разме-

ров, особенно в узлах ребер Плато, что приводит к повышению ее устойчивости, что хорошо согласуется с литературными данными [18].

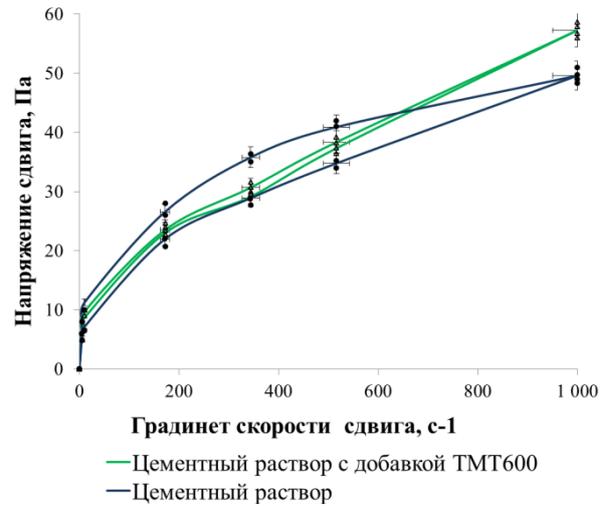


Рис. 4. Реологические свойства цементного раствора
 Fig. 4. Rheological properties of cement slurry

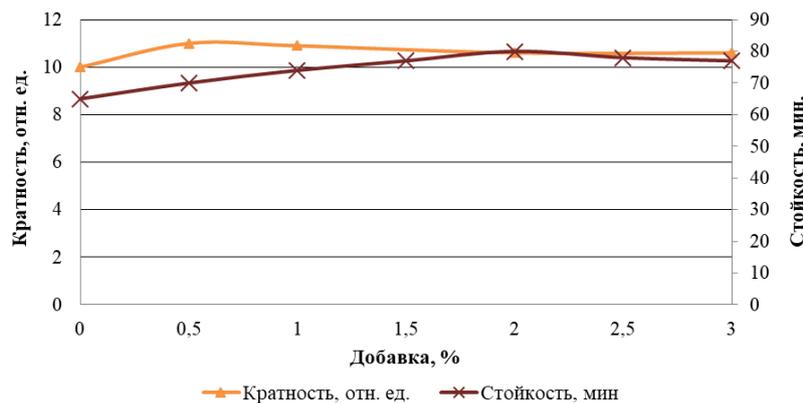
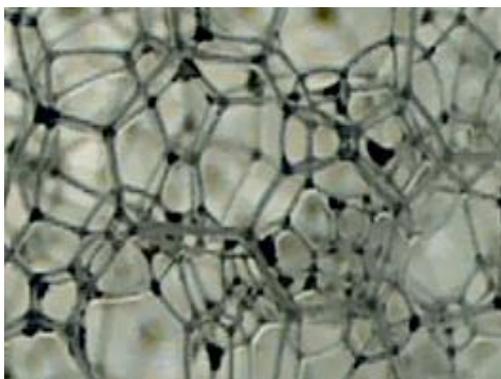
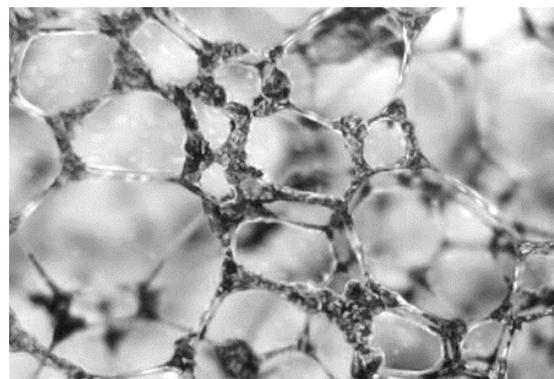


Рис. 5. Влияние торфяной добавки ТМТ600 на кратность и стойкость пены
 Fig. 5. Influence of peat additive TMT600 on the expansion rate and foam stability



а/а



б/б

Рис. 6. Распределение добавки ТМТ600 по каналам Плато–Гиббса: а) 5 минут после приготовления пены; б) 60 минут после приготовления пены

Fig. 6. TMT600 additive distribution through the Plateau–Gibbs channels: a) 5 minutes after foam preparation; b) 60 minutes after foam preparation

Массоперенос частиц осуществляется не только диффузионным, но и конвективным путем при фор-

мировании пены. Ускоренное перемещение частиц может осуществляться также за счет электростатиче-

ского взаимодействия зарядов на поверхности пены и торфяной добавки. Геометрия структурных ячеек пены имеет вид многоугольников, состоящих преимущественно из шести- и пятиугольников. С течением времени в результате проявления эффекта синергизма и взаимодействия анионоактивных пенообразующих ПАВ происходит уплотнение пространственной структурной сетки пены, сопровождаемое отделением жидкости через каналы Плато–Гиббса. Происходит это из-за схлопывания более нестабильных пузырьков и путем формирования новых связей между стабильными пузырьками. Добавка ТМТ600 увлекается жидкостью и распределяется в узлах, уплотняя микроструктуру и повышая стойкость пены.

Свойства пенобетона неавтоклавного твердения определяются его фазовым составом и структурой. Следовательно, моделирование структур пенобетона неавтоклавного твердения с учетом фазовых превращений их составляющих является основой для последующего прогноза свойств пенобетона и системного подхода к получению пенобетона с добавкой ТМТ600.

Частицы цемента имеют противоположный заряд с пенообразователем, а угол смачивания частиц цемента после реакции с пенообразователем увеличивается [15], поэтому частицы цемента легко поглощаются пузырьками при смешивании цементного раствора с готовыми пенами. В цементном растворе, прилегающем к пузырькам, снижается концентрация частиц цемента. В затвердевшем пенобетоне формируется оболочечная структура, окруженная воздушными порами пенобетона, отдаленного от цементной матрицы на определенное расстояние. При гидратации цемента ионы Са диффундируют в жидкую оболочку (межчастичный зазор). Цемент абсорбирует пенообразователь, и ионы Са, осажаясь на границе газ–жидкость, препятствуют ионам мигрировать в сторону границы соприкосновения с атмосферой воздуха. Схема (рис. 7) рассматриваемых процессов позволила объяснить поровую структуру пенобетона, которая хорошо согласуется с литературными данными [15–20].

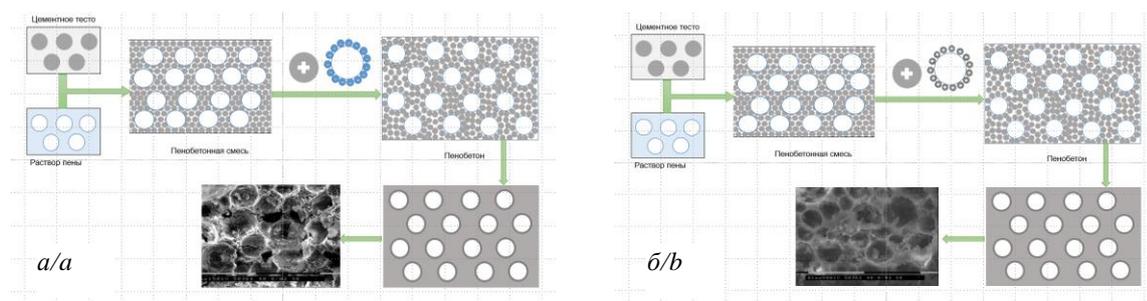


Рис. 7. Схема пористой структуры пенобетона, подготовленного с анионным пенообразователем (а) и анионным пенообразователем и добавкой ТМТ600 (б)

Fig. 7. Schematic formation of the porous structure of foam concrete with anionic surfactant (a) and with anionic surfactant with additive TMT600 (b)

Согласно рис. 7, основным визуальным признаком качества образцов пенобетона с добавками является более однородная структура: поры равномерно заполняют все пространство. В образцах пенобетона без введения добавки поры расположены хаотично, а также имеются поры, основания некоторых из них с трещинами, целостность межпоровых перегородок нарушена, что является нежелательным для структуры теплоизоляционных материалов.

Традиционным способом исследования структуры пенобетонов и других пенных материалов является метод последовательного среза слоев с последующим анализом подготовленной поверхности визуальным-измерительным методом или с помощью обработки цифровых фотографических изображений специализированными программами. Основными недостатками указанного выше способа является его низкая производительность, образование облака пылевидных частиц, искажение структуры среза испытуемых образцов механическим воздействием на материал. Современным подходом является использование компьютерной томографии, позволяющей оценивать структуру образцов горных пород и строительных материалов, в том числе и пенобетонов [19, 20]. Совокупный анализ изображений сечений (рис. 8)

испытанных образцов позволил сделать выводы о меньших размерах пор пенобетона с ТМТ600, повышенной однородности структуры по распределению пор с малым количеством уплотненных структур с размером, превышающим 0,3 мм. Эти выводы подтверждают эффективность предлагаемой в статье технологии изготовления неавтоклавного пенобетона с добавкой ТМТ600.

Совершенствование качества пенобетонов в строительстве обуславливает необходимость получения информации о таких параметрах, как линейные размеры пор, площади их сечений и объемы [19, 20]. Указанные параметры являются случайными величинами, причём зависимыми друг от друга. Случайность этих параметров вызывает потребность в получении информации и о характерах их распределений. Указанная информация является необходимой для совершенствования технологий изготовления пенобетона с высокими потребительскими свойствами. Потребительские свойства пенобетона тем выше, чем меньше среднее значение и рассеяние размера пор (площади сечения, объема). Общая пористость и характер распределения пор по размерам определяют тепло- и звукоизоляционные свойства пенобетона. Конструктивные свойства пенобетона зависят от толщины слоя затвердевшего цементного теста

[21–24], которое разделяет соседние поры. Такая толщина также является случайной величиной, которая характеризуется своей плотностью распределения.

На рис. 9 приведены выборочные значения плотности распределения эффективного диаметра пор для испытанных образцов пенобетона.

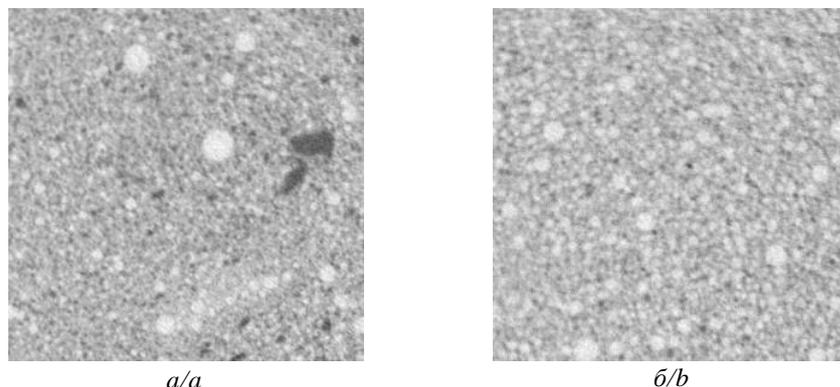


Рис. 8. Реконструированные изображения сечений: а) пенобетон; б) пенобетон с добавкой ТМТ600
 Fig. 8. XCT reconstructions of foam concrete structure: a) foam concrete; b) foam concrete with additive TMT600

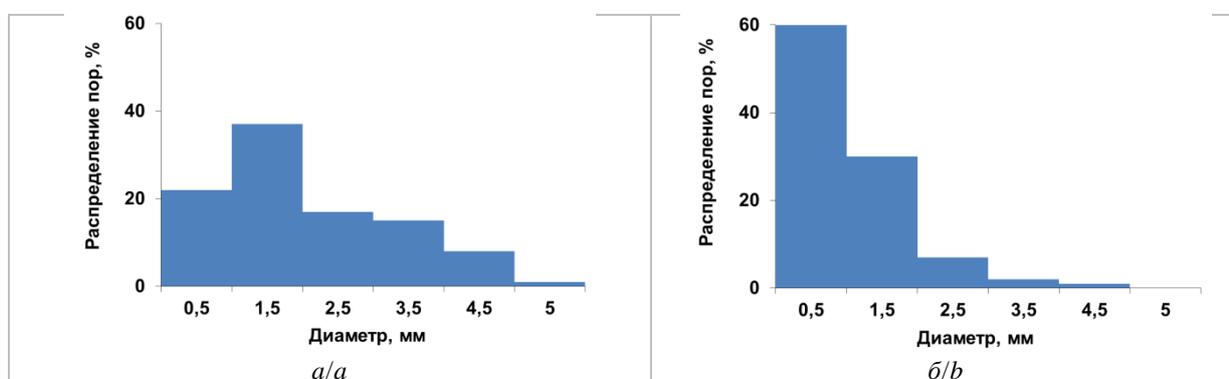


Рис. 9. Распределение пор по диаметру: а) пенобетон; б) пенобетон с добавкой ТМТ600
 Fig. 9. Pore size distribution: a) foam concrete; b) foam concrete with additive TMT600

Таблица 3. Физико-механические показатели пенобетона с добавкой ТМТ600

Table 3. Physical and mechanical properties of foam concrete with additive TMT600

Показатели Indicators	Пенобетон с добавкой ТМТ 600 Foam concrete with additive TMT 600
Марка по средней плотности Average density grade	D700
Класс по прочности на сжатие Compressive strength class	B2,5
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м °С Thermal conductivity coefficient in dry state, W/m °C	0,10
Марка по морозостойкости Frost resistance grade	F75
Водопоглощение по массе Water absorption by mass, %	34,5
Среднее значение по плотности, кг/м ³ Average density, kg/m ³	633
Среднее значение по прочности, МПа Average strength value, MPa	3,58
Усадка при высыхании, мм/м Drying shrinkage, mm/m	1,7

Из анализа гистограмм, приведённых на рис. 9, следует вывод, что среднее значение диаметра пор

существенно меньше и соответствующая плотность распределения значительно уже, чем в образцах пенобетона с добавкой ТМТ600.

В табл. 2 приведены сводные данные физико-механических и эксплуатационных показателей пенобетона в 28-суточном возрасте с добавкой ТМТ600.

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о соответствии полученного материала современным технико-экономическим требованиям. Изготовленные составы пенобетона с добавкой ТМТ600 обладают рядом преимуществ, таких как снижение коэффициента теплопроводности и усадки при высыхании, а также предела прочности при сжатии.

Заключение

- В пенах с добавкой ТМТ600 стойкость увеличивается в 1,8 раза, это обусловлено реализацией механизма эмульгирования твердыми веществами, а именно, утолщением пленки на поверхности пенного пузырька за счет адсорбции твердых дисперсных частиц на поверхности раздела фаз и обволакиванием воздушного пузырька, тем самым препятствуя разрушению пены. Избыток не сорбированной на поверхности пузырька твердой фазы вследствие её высокой концентрации обес-

печивает закупорку свободного пространства (каналов Плато–Гиббса) с формированием плотноупакованной структуры твердых частиц в межпупырковом пространстве ввиду их полидисперсности. Всё это обеспечивает пространственную и временную стабилизацию пенной структуры.

- Установлено, что введение в пенобетонную смесь добавки ТМТ600 позволяет получить однородную мелкопористую структуру пенобетона с размерами пор 0,5 мм до 60 %, что приводит к уменьшению теплопроводности на 34,8 % (0,1 Вт/м·°С) и получению марки по морозостойкости F75 при одновременном сохранении класса по прочности пенобетона до В2,5 (с сохранением марки D700).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокурова О.В., Баранова А.А. Влияние пен различной кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17. – № 1. – С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59.
2. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming / R.E. Lukpanov, D.S. Dyussebinov, Ye.B. Utegov, D.O. Bazarbayev, D.V. Tsygulyov, S.B. Yenkebayev et al. // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 103 (3). – P. 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13.
3. Hao Y., Yang G., Liang K. Development of fly ash and slag based high-strength alkali-activated foam concrete // Cement and Concrete Composites. – 2022. – V. 128. – P. 104447. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104447
4. Кудяков А.И., Прищепа И.А., Осипов С.П. Цементный пенобетон неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 40–49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-40-49.
5. Кузнецова И.Н., Рашупкина М.А., Жуков С.В. Технология пенобетона на основе торфа // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 4 (38). – С. 72–76.
6. Ляхевич Г.Д., Ляхевич А.Г., Ортнер Д.В. Технология и эффективность использования торфяных зол в цементобетоне // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 16–23.
7. Формирования структуры пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой в ранние сроки твердения / И.А. Прищепа, А.И. Кудяков, Ю.С. Саркисов и др. // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2020. – № 18. – С. 35–46. DOI: 10.17223/24135542/18/4.
8. Торфо-содержащие композиции на основе магнезиального вяжущего / Н.А. Митина, В.А. Лотов, М.А. Ковалева, Н.О. Копаница // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 81–88. DOI: 10.6060/ivkkt.20186108.5729.
9. Марков М.Л., Потапова Т.М., Задонская О.В. Региональные особенности эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2589.
10. Архипов В.С. Распределение химических элементов в геохимически сопряжённых болотных ландшафтах таежной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 32–40.
11. Вещественный состав торфов Тимирязевского болота (Томск, западная Сибирь) / О.Г. Савичев, М.А. Рудмин, А.К. Мазуров и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 51–61. DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3100.
12. Способ получения модифицирующей добавки для цементной композиции и цементная композиция: пат. Рос. Федерация, № 2576766, заявл. 21.01.2015; опубл. 10.03.2016. Бюл. № 7. – 7 с.
13. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives / A.I. Kudyakov, N.O. Kopanitsa, A.V. Kasatkina, I.A. Prischepa, J.S. Sarkisov // IOP Conference Series: Materials

- Пенобетон с добавкой ТМТ600 полностью отвечает семи фундаментальным критериям современной концепции строительного материаловедения, таким как: технологическая доступность и эффективность, энегоресурсосбережение, экологическая безопасность и природная совместимость, экономическая целесообразность, этическая приемлемость применения на практике, эстетическая выразительность и социальная направленность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FEMN-2022-0001.

- Science and Engineering. Advanced Materials in Construction and Engineering. – Tomsk, TSUAB, 2015. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012012.
14. Наномодифицирующая добавка для регулирования триботехнических свойств узлов и агрегатов транспортных машин / В.В. Ионов, С.А. Ларионов, Ю.С. Саркисов и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 6 (59). – С. 160–169.
 15. Foam concrete: a state-of-the-art and state-of-the-practice review / Yanbin Fu, Xiuling Wang, Lixin Wang, Yunpeng Li // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 2020. – Article ID 6153602. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6153602> (дата обращения 15.08.2022).
 16. Арсланов В.В. Нанотехнология. Коллоидная и супрамолекулярная химия: Энциклопедический справочник. Более 1000 словарных статей, упорядоченных по английским эквивалентам. – М.: Ленанд, 2019. – 400 с.
 17. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 99–110.
 18. Лотов В.А., Сударев Е.А. Влияние хлористого натрия и углекислого кальция на реологические характеристики и синтетических пенообразователей в производстве пенобетона // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 50–52.
 19. Influence of foaming agent on cement and foam concrete / Li Hou, Jun Li, Zhongyuan Lu, Yunhui Niu // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 280. – 122399. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399> (дата обращения 15.08.2022).
 20. The effects of surfactants on properties of lightweight concrete foam / A. Kashani, T.D. Ngo, T.N. Nguyen, A. Haji mohammadi, S. Sinaie, P. Mendis // Magazine of Concrete Research. – 2020. – V. 72. – P. 163–172.
 21. An analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography / Yuzhu Guo, Xudong Chen, Bo Chen, Rongkun Wen, Peng Wu // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 273. – 121773. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121773> (дата обращения 15.08.2022).
 22. Компьютерная томография пенобетона / С.П. Осипов, И.А. Прищепа, А.И. Кудяков и др. // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 146–152. – DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-146-152.
 23. Relation between density and compressive strength of foamed concrete / R. Othman, R.P. Jaya, K. Muthusamy, M. Sulaiman, Y. Duraisamy, M.M.A.B. Abdullah, A. Przybył, W. Sochacki, T. Skrzypczak, P. Vizireanu et al. // Materials. – 2021. – vol. 14. – 2967.
 24. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches / S.Y. Chung, C. Lehmann, M. Abd Elrahman, D. Stephan // Applied Sciences. – 2017. – V. 7. – № 550. – P. 1–19.

*Поступила: 14.09.2022 г.
Дата рецензирования: 09.12.2022 г.*

Информация об авторах

Прищепа И.А., старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Мостовщиков А.В., доктор технических наук, директор научно-исследовательского института строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета; профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саркисов Ю.С., доктор технических наук, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 691.54:666.962

MODIFICATION OF NON-AUTOCLAVED FOAM CONCRETE WITH PEAT ADDITIVE TMT600**Inga A. Prishchepa**¹,
ingaprishepa@mail.ru**Andrei V. Mostovshchikov**^{1,2},
mostovshchikov@tsuab.ru**Yuri S. Sarkisov**¹,
sarkisov@tsuab.ru¹ Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk 634003, Russia.² National Research Tomsk Polytechnic university,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The authors have studied the effect of a thermally modified additive based on peat TMT600 on the properties and structure of foam concrete of non-autoclave hardening and proposed a model of a fragment of the structure of the gas–solid–liquid interface and a model for the formation of a porous structure of foam concrete of non-autoclave hardening. The paper reveals the mechanism of the role of the foaming agent in formation of the porous structure of foam concrete. Tomography methods have shown that the real structure of foam concrete corresponds to the proposed models, as well as the achievement of a uniform distribution of pores by volume. It was established that in hydration after the dissolution of tobermorite and ettringite, the cement particles are recharged, and, consequently, the electrokinetic potential changes from positive to negative values. The mass transfer of particles is carried out not only by diffusion, but also by convection during foam formation. The accelerated movement of particles can also be carried out due to the electrostatic interaction of charges both on the surface of the foam and the peat additive. The geometry of the structural cells of the foam has the form of polygons, consisting mainly of hexagons and pentagons. As a result of the ongoing processes, a complex hierarchical structure is formed, in which the Plateau–Gibbs channels in the foam are calmed (clogged), forming a stronger skeleton, and after cement hydration, due to the recharging of the surface of the latter, an interpore partition of increased strength is eventually formed with a simultaneous uniform distribution of pores in foam concrete structure. The developed wall material has not only high strength, frost resistance, but also increased thermal insulation properties. The foam concrete obtained with the use of the TMT600 additive fully meets the seven fundamental criteria of the modern concept of building materials science, such as: technological availability and efficiency, energy and resource saving, environmental safety and natural compatibility, economic feasibility, ethical acceptability of practical application, aesthetic expressiveness and social orientation.

Key words:

foam concrete, thermally modified peat additive TMT600, foam expansion and stability, structure formation, tomography.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FEMN-2022-0001.

REFERENCES

- Vinokurova O.V., Baranova A.A. The influence of foams, having different expansion ratios, on the structuration of thermal insulation foam concrete. *Monthly Journal on Construction and Architecture*, 2022, vol. 17 (1), pp. 50–59. In Rus. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59
- Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Utepov Ye.B., Bazarbayev D.O., Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming. *Magazine of Civil Engineering*, 2021, no. 103 (3), pp. 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13.
- Hao Y., Yang G., Liang K. Development of fly ash and slag based high-strength alkali-activated foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2022, vol. 128, pp. 104447. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104447.
- Kudyakov A.I., Prishchepa I.A., Osipov S.P. Non-autoclaved cement foam concrete with thermal modified peat additive. *Construction Materials*, 2022, no. 1–2, pp. 40–49. In Rus.
- Kuznetsova I.N., Rashchupkina M.A., Zhukov S.V. Technology of foamed concrete on the basis of peat. *Bulletin of SibADI*, 2014, vol. 38, no. 4, pp. 72–76. In Rus.
- Liakhevich G.D., Liakhevich A.G., Ortner D.V. Technology and efficiency of peat ash usage in cement concrete. *Science & Technique*, 2015, vol. 2, pp. 16–23. In Rus.
- Prishchepa I.A., Kudyakov A.I., Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P., Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Ugodenko D.O. Formation of foam concrete structure with thermally modified peat additive in early terms of hardening. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, 2020, no. 18, pp. 35–46. In Rus. DOI: 10/17223/24135542/18/4.
- Mitina N.A., Lotov V.A., Kovaleva M.A., Kopanitsa N.O. Peat-containing composition containing magnesia binder. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 81–88. In Rus.
- Markov, M.L. Regional features of ecological geochemical condition of surface water bodies in taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 7–15. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2589.
- Arkipov V.S. Distribution of chemical elements in geochemically conjugated wetland landscapes of the taiga zone in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 32–40. In Rus.
- Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Fedchenko A.S., Ruban A.S., Dauletova A.B. Material composition of peats of the Timiryazev Mire (Tomsk, Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 51–61. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/3/3101
- Kopanitsa N.O., Sarkisov Y.S., Demyanenko O.V., Kasatkina A.V., Gorlenko N.P. *Sposob polucheniya modifitsiruyushchey dobavki dlya tsementnoy kompozitsii i tsementnaya kompozitsiya* [A method for obtaining a modifying additive for a cement composition and a cement composition]. Patent RF, no. 2015101778, 2016.

13. Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prishchepa I.A., Sarkisov Y.S. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives. *Advanced Materials in Construction and Engineering International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014*. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2015. pp. 012012.
14. Ionov V.V., Larionov S.A., Sarkisov Y.S., Kopanitsa N.O., Gorshkova A.V., Gorlenko N.P., Belyaev S.A. Nano-modifier for tribological properties of machine components. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*, 2016, vol. 6, pp. 160–169. In Rus.
15. Yanbin Fu, Xiuling Wang, Lixin Wang, Yunpeng Li. Foam concrete: a state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 2020, Article ID 6153602. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/6153602> (accessed 15 August 2022).
16. Arslanov V.V. *Nanotechnologiya. Kolloidnaya i supramolekulyarnaya khimiya: entsiklopedicheskiy spravochnik. Bolee 1000 slovarnykh statey, uporyadochennykh po angliyskim ekvivalentam* [Colloidal and supramolecular chemistry: encyclopedic handbook. More than 1000 entries sorted by English equivalents]. Moscow, Lenand Publ., 2019. 400 p.
17. Lotov V.A. Interaction of cement particles with water or mechanism of hydration and hardening of cement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 99–110. In Rus.
18. Lotov V.A., Sudarev E.A. Effect of sodium chloride and calcium carbonate on the rheological characteristics of synthetic foaming agents in the production of foam concrete. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 3, pp. 50–52. In Rus.
19. Li Hou, Jun Li, Zhongyuan Lu, Yunhui Niu. Influence of foaming agent on cement and foam concrete. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 280, 122399. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399> (accessed 15 August 2022).
20. Kashani A., Ngo T.D., Nguyen T.N., Hajimohammadi A., Sinaie S., Mendis P. The effects of surfactants on properties of lightweight concrete foam. *Magazine of Concrete Research*, 2020, vol. 72, pp. 163–172.
21. Yuzhu Guo, Xudong Chen, Bo Chen, Rongkun Wen, Peng Wu. Analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 273, 121773. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121773> (accessed 15 August 2022).
22. Osipov S.P., Prishchepa I.A., Kudyakov A.I., Batranin A.V., Osipov O.S. Computer tomography of foam concrete. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 146–152. In Rus.
23. Othman R., Jaya R.P., Muthusamy K., Sulaiman M., Duraisamy Y., Abdullah M.M.A.B., Przybył A., Sochacki W., Skrzypczak T., Vizureanu P. Relation between density and compressive strength of foamed concrete. *Materials*, 2021, vol. 14, 2967.
24. Chung S.Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 550, pp. 1–19.

Received: 14 September 2022.

Reviewed 9 December 2022.

Information about the authors

Inga A. Prishchepa, senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building.

Andrei V. Mostovshchikov, Dr. Sc., director of the Research Institute of Building Materials and Technologies, Tomsk State University of Architecture and Building; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yuri S. Sarkisov, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Architecture and Building.