УДК 691.327.333

DOI: 10.17223/24135542/18/4

# И.А. Прищепа<sup>1</sup>, А.И. Кудяков<sup>1</sup>, Ю.С. Саркисов<sup>1</sup>, Н.П. Горленко<sup>1</sup>, В.А. Журавлев<sup>2</sup>, В.И. Сусляев<sup>2</sup>, Д.О. Угоденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет (г. Томск, Россия)
<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет (г. Томск, Россия)

### Формирования структуры пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой в ранние сроки твердения

Представлены результаты исследований по влиянию термодифицированной торфяной добавки ТМТ600 на свойства пен. Установлено, что добавка ТМТ600 обеспечивает формирование устойчивой пенной системы. Отмечаются интенсивная миграция микрочастиц торфа по границам раздела фаз пены, формирование агрегатов крупных размеров, особенно в узлах ребер Плато-Гиббса. Представлены результаты влияния добавки ТМТ600 на свойства цементного теста и цементного камня. Установлено, что при введении добавки ТМТ600 в портландиемент при близких значениях нормальной густоты иементного теста ускоряются сроки схватывания и повышается прочность при сжатии иементного камня в 28-суточном возрасте на 54,2%. Исследованы электрофизические свойства (электрическая емкость и сопротивление) цементного теста контрольных образцов и с добавкой ТМТ600. Показано, что при введении добавки ТМТ600 в цементное тесто наблюдается снижение емкости и увеличение сопротивления образиов по сравнению с контрольными, что обусловлено изменением подвижности ионов  $OH^-$  и  $H^+$ , диполей воды и увеличением доли связанных между собой новообразований. Представлены результаты влияния добавки ТМТ600 на свойства пенобетонной смеси и пенобетона. Установлено, что при введении ТМТ600 в пенобетонную смесь в концентрации 0,5 мас. %. в сравнении с контрольными составами увеличивается показатель пластической прочности на 65%, а прирост прочности в 28 суток твердения – на 43%. При этом наблюдается увеличение общей и закрытой пористости, а также уменьшение теплопроводности.

**Ключевые слова:** пенобетон, пенообразователь, пена, термомодифицированная торфяная добавка, прочность, цементный камень, импедансная спектроскопия.

#### Введение

Согласно развиваемой концепции современного строительного материаловедения, все строительные материалы и технологии их получения должны отвечать семи фундаментальным критериям. К ним относятся: технологическая доступность и эффективность; ресурсоэнергосбережение; экологи-

ческая безопасность, природная сбалансированность и биосовместимость; экономическая целесообразность; этическая приемлемость применения на практике; эстетическая выразительность и социальная направленность. Всем этим требованиям в полной мере отвечают пенобетоны [1–3]. Однако до сих пор остаются актуальными вопросы регулирования физико-химических, физико-механических и эксплуатационных характеристик изделий на их основе. Сдерживающим фактором в производстве пенобетона неавтоклавного твердения является неоднородная и трудно регулируемая пористая структура. Основная причина – это расслоение пенобетонной смеси из-за большой средней плотности цементной матрицы, формирующей межпоровые перегородки [4, 5]. Управляя вязкостью, пористостью и структурообразованием, можно обеспечивать параметры качества стеновых материалов в широких пределах [6].

В настоящей работе выдвинута следующая гипотеза: направленно изменяя электрофизические характеристики строительной смеси модифицированного торфяной добавкой пенобетона, можно эффективно управлять его свойствами как в ранние, так и в поздние сроки структурообразования.

Цель исследования заключается в выявлении закономерностей влияния синтезированной торфяной добавки на процессы твердения цементного камня и свойства пенобетона.

### Материалы и методика эксперимента

При проведении лабораторных исследований цементного камня и пенобетона использовались: портландцемент Топкинского цементного завода ЦЕМ І 42,5 Б (ГОСТ 31108–2003); вода водопроводная (ГОСТ 23732–2011), пенообразователь Бенотех ПБ-С (ГОСТ 24211–2008, ТУ 2481-010-58771162–2007), термомодифицированная торфяная добавка ТМТ600, полученная путем термообработки низинного торфа в реакторе с ограниченным доступом воздуха при температуре 600°С [6]. По химическому составу термомодифицированная добавка представляет собой комплекс углеродных и температуроустойчивых органоминеральных соединений, обеспечивающих армирующий и структурирующий эффекты при твердении цементного камня пенобетона [7, 8].

При определении кратности пенообразования и стабильности пены готовился водный раствор с добавкой пенообразователя в металлическом сосуде, а пена взбивалась пеногенератором в течение трех минут. Подбор состава пенобетонной смеси проводился с учетом требований СН 277–80. Параметры качества пенобетона в соответствии с требованиями следующих национальных, стандартов: предел прочности на сжатие – ГОСТ 10180–2012; плотность – ГОСТ 12730.1–78; водопоглощение – ГОСТ 12730.3–78; показатель пористости – ГОСТ 12730.4–78; коэффициент теплопроводности – ГОСТ 7076–99. Определение коэффициента теплопроводности проводилось с помощью прибора ИТС-1.

Электрическая емкость и сопротивление в начальные сроки структурообразования цементного теста нормальной густоты исследовались на прецизионном измерителе RLC Agilent E4890A в диапазоне частот 20  $\Gamma$ ц – 2 М $\Gamma$ ц с помощью самодельной конденсаторной измерительной ячейки. Ячейка представляет собой плоский конденсатор, состоящий из двух прямоугольных пластин из нержавеющей стали толщиной 1 мм размерами 51,0 × 39,5 мм. Расстояние между пластинами 9,5 мм. Измерения проводились в течение суток с интервалом 30 мин с помощью программы, написанной в среде LabVIEW. Фото- и киносъемку процессов пенообразования осуществляли с помощью микроскопа EAKINS HD720P. Оценка качества пенобетона осуществлялась по  $\Gamma$ OCT 25485–2019.

### Результаты и обсуждение

Образование припленочного слоя из минеральных частиц (так называемый процесс минерализации пен) связано с механическим упрочнением, или «бронированием», пленок пены частицами твердой фазы и хемосорбционными процессами между молекулами ПАВ и заряженными минеральными частицами. Эффективность действия минеральных добавок на пенную пленку определяется их зарядом поверхности, дисперсностью и формой частиц, наибольшим допустимым расстоянием между ними. Наблюдается сильное хемосорбционное взаимодействие между заряженными воздушными пузырьками и минеральными частицами, которое подтверждается данными по кратности пены (рис. 1).

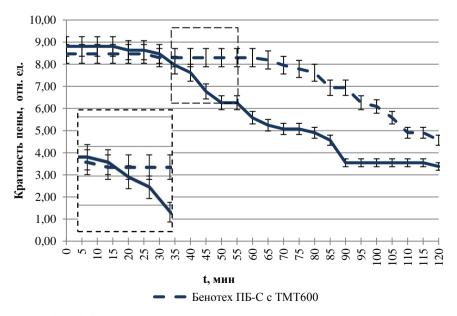


Рис. 1. Зависимость значений кратности пены от времени выдержки

Установлено, что при введении добавки ТМТ600 в пену значения ее кратности в течение 30 мин сопоставимы в сравнении с пеной без добавки. В дальнейшем этот показатель сохраняется в течение времени, соответствующего началу схватывания цементного теста, что является важным фактором в процессе формирования структуры цементного камня.

По данным фото- и киносъемки процесса формирования пены с добавкой ТМТ600, микрочастицы торфа интенсивно мигрируют по границам раздела фаз пены, формируются агрегаты достаточно крупных размеров, особенно в узлах ребер Плато–Гиббса (рис. 2).

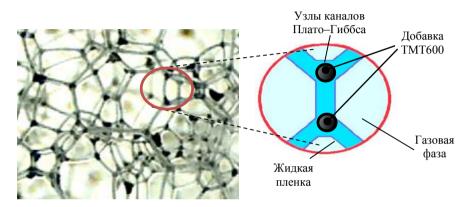


Рис. 2. Формирование структуры пены с добавкой ТМТ600

Добавка ТМТ600 распределяется на границах раздела фаз пенообразователя, где сосредоточена наибольшая нескомпенсированная энергия сил поверхностного натяжения. Массоперенос частиц осуществляется не только диффузионным, но и конвективным путем. Ускоренное перемещение частиц, на наш взгляд, может осуществляться также за счет электростатического взаимодействия зарядов на поверхности как пены, так и торфяной добавки. Геометрия пены имеет преимущественно вид пяти- и шестиугольников. При этом концентрация добавки ТМТ600 в узлах и на поверхности границы раздела фаз пены обеспечивает ее устойчивость.

Портландцемент является полиминеральным веществом. В процессе гидратационного твердения портландцемента с модифицирующей добавкой ТМТ600 минералы вступают в химическое взаимодействие с водой. Степень энергетической связи полярных молекул воды в системе и упорядоченность ее структуры определяют важнейшие свойства цементного камня, матрицы пенобетона и в первую очередь механическую прочность. В табл. 1 представлены свойства цементного теста и цементного камня с добавкой ТМТ600.

Как видно из табл. 1, при введении добавки ТМТ600 в портландцемент при близких значениях нормальной густоты цементного теста ускоряются сроки схватывания и повышается прочность при сжатии цементного камня в 1, 14, 28-суточном возрасте соответственно на 13,7, 25,6 и 54,2%.

Уменьшение сроков схватывания и существенное повышение прочности цементного камня позволяют предполагать, что на ранней стадии гидратации минералов цемента образуются продукты с более высокой степенью дисперсности и кристалличности. Так как концентрация добавки ТМТ600 составляет всего 0,5 мас. % от массы цемента, то можно предположить и ее каталитическое действие на процесс гидратации цемента.

Таблица 1 Влияние добавки ТМТ600 на свойства цементного теста и цементного камня

Состав	ТМТ600, мас. %	Нормальная густота, %	Сроки схватыва-		Кинетика набора проч-		
			ния цементного		ности цементного камня,		
			теста, ч:мин		МПа		
			начало	конец	1 сутки	14 суток	28 суток
Контрольный образец	-	26,0	01:20	04:10	14,6	30,9	32,3
С добавкой ТМТ600	0,5	25,6	01:00	03:40	16,6	38,8	49,8

В процессе гидратации цемента, самопроизвольного диспергирования частиц цемента в воде и последующего структурообразования происходят существенные изменения концентрации и подвижности ионов, образующихся на определенной стадии твердения, а также изменения свойств и состава самой жидкой фазы [9–11]. В силу этого измерения электропроводности и диэлектрической проницаемости или связанных с ними величин электрической емкости и сопротивления измерительной ячейки, заполненной твердеющими цементными системами, позволяют достаточно точно оценивать протекающие в них процессы, определять временные интервалы соответствующих этапов структурообразования [12, 13]. Этот метод чувствителен к изменениям водотвердого отношения, температуры смеси и к другим факторам, влияющим на скорость твердения.

Электрическая емкость в системе «цемент-вода» является результатом возникновения двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела фаз «зерно цемента — электролит». Поверхность зерна в первоначальный момент затворения вяжущего водой представляет собой продукты гидратации цемента, а электролит — подвижную водную фазу растворенных ионов. Твердотельная поверхность цементной частицы заряжена отрицательно, а приэлектродный ионный слой, состоящий из плотной положительно заряженной (гельмгольцевской) и диффузной частей, компенсирует избыточный отрицательный заряд поверхности.

Следует отметить, что исследования взаимосвязей электрофизических параметров с технологическими и физико-механическими свойствами цементного теста (камня) с добавкой термомодифицированного торфа не проводились.

В данной работе представлены результаты суточных измерений изменения электрической емкости (C) и сопротивления (R) цементного теста

контрольных образцов (рис. 3, a) и с добавкой термомодифицированного торфа (рис. 3,  $\delta$ ) через часовые интервалы времени.

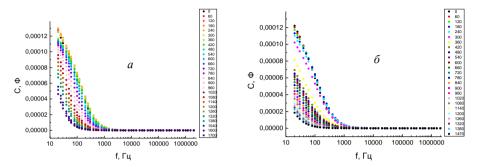


Рис. 3. Зависимости значений электрической емкости (C) ячейки от частоты (f): a – контрольный образец;  $\delta$  – образец с добавкой ТМТ600 в концентрации 0,5 мас. %

Согласно рис. 3, наибольшие временные изменения электрической емкости обоих образцов происходят на частотах до  $\sim 1\,000\,$  Гц. Далее они существенно снижаются.

Величины сопротивления R (рис. 4, a,  $\delta$ ) в обоих случаях быстро уменьшаются на частотах до  $\sim 100~\Gamma$ ц, а затем меняются слабо с ростом частоты. Минимальные величины  $R \sim 17~\mathrm{OM}$  на частотах  $> 200~\Gamma$ ц имеют контрольные образцы.

С ростом времени выдержки наблюдается увеличение сопротивления у обоих образцов, однако у образца с добавкой ТМТ600 сопротивление растет быстрее и после суточной выдержки в два раза превышает величину R контрольного образца (см. рис. 4,  $\delta$ ).

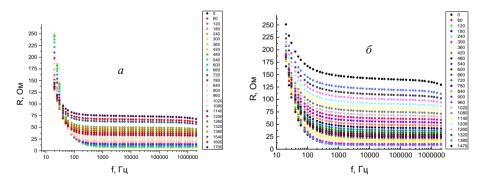


Рис. 4. Зависимости значений сопротивления (R) ячейки от частоты (f): a — контрольный образец;  $\delta$  — образец с добавкой ТМТ600 в концентрации 0,5 мас. %. Разное время измерений выделено цветом маркеров

В связи с вышеизложенным анализ временных зависимостей емкости и сопротивления для исследованных образцов был проведен для частоты 200 Гц. Результаты измерений представлены на рис. 5.

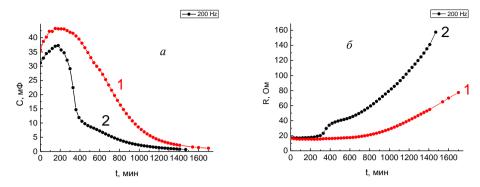


Рис. 5. Кинетика изменения емкости (a) и сопротивления ( $\delta$ ) в системе «цемент–вода» в первоначальные сроки твердения: I – контрольный образец; 2 – образец с добавкой ТМТ600 в концентрации 0,5 мас. %. Разное время измерений выделено цветом маркеров

Согласно рис. 5, а, в начале выдержки (с момента затворения цемента водой) наблюдается рост емкости как контрольного образца, так и образца с добавкой до времени ~ 200 мин. После прохождения максимума величины С наблюдается снижение в течение всего времени эксперимента. Причем если у контрольного образца емкость убывает плавно, то у образца с добавкой ТМТ600 процесс убывания величины емкости происходит гораздо быстрее, с резким падением при временах выдержки ~ 300 мин. Меньшее значение электрической емкости образца с добавкой ТМТ600 по сравнению с контрольным в первоначальный момент времени можно объяснить тем, что в плотный слой Гельмгольца наряду с противоионами первоначально встраиваются и объемные частицы торфяной добавки. При этом в электролите уменьшается число заряженных частии. Это подтверждается данными рис. 5, б, который показывает существенное увеличение сопротивления раствора электролита при введении добавки ТМТ600. На зависимости R = f(t) образца с добавкой в момент времени ~ 300 мин наблюдается скачок сопротивления образца, тогда как зависимость R = f(t)контрольного образца не имеет особенностей.

В основе этих явлений лежат процессы растворения, гидратации, гидролиза, диспергирования, кристаллизации, ионного обмена, адсорбции и укрупнения частиц. Увеличивается доля связанных между собой новообразований, изменяется состояние воды, и, как следствие, концентрация высокоподвижных ОН<sup>-</sup> и Н<sup>+</sup> ионов уменьшается [12]. Указанные и ряд других многочисленных процессов, протекающих в твердеющей системе, могут совершаться скачкообразно, по мере накопления критической массы химических продуктов в коллоидном и (или) аморфно-кристаллическом состояниях, что и отражается на кривых рис. 5, особенно заметных на образцах с торфяной добавкой. Следует отметить, что в настоящее время сложно выделить процессы, наиболее ответственные за изменение электрической емкости и сопротивления твердеющей цементной системы. Что касается изменений значений емкости и частоты, то здесь как для контрольного, так

и для модифицированного образца наблюдается существенное уменьшение значений электрической емкости на частотах выше 1 200  $\Gamma$ ц (см. рис. 4, a,  $\delta$ ). Учитывая этот факт, можно предположить, что поворот таких частиц в ДЭС не успевает следовать за частотой изменения внешнего потенциала.

Для пенобетонных смесей важной характеристикой является показатель удобоукладываемости. Однако в ряде случаев не менее важным показателем является и пластическая прочность, например для определения момента распалубки отформованных изделий, что на практике поможет существенно скоординировать временные интервалы при проведении пенобетонных работ или по реологическим кривым выполнить анализ структуры композитных систем [14, 15] и др. Оценку влияния добавки ТМТ600 на интенсивность межчастичных взаимодействий, возникающих сразу после завершения перемешивания компонентов в исследуемых дисперсно-зернистых системах, осуществляли по величине пластической прочности (*P*) (рис. 6).

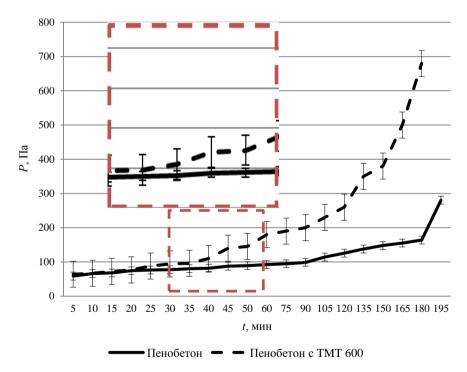


Рис. 6. Пластическая прочность пенобетонной смеси

Из полученных результатов можно сделать вывод, что пенобетонные смеси с добавкой ТМТ600 в начальные сроки твердения имеют более высокие показатели пластической прочности, которые через 3 ч твердения увеличиваются по сравнению с контрольными составами на 65%.

Данные результаты можно объяснить тем, что при введении добавки ТМТ600 в пенобетонную смесь дополнительно поризуются межпоровые перегородки, что, с одной стороны ведет к увеличению пластической прочности смеси, а с другой – к уплотнению частиц в межпоровых перегородках, т.е. к появлению стесненного состояния при гидратации цемента.

Таким образом, введение в пенобетонную смесь добавок ТМТ600 позволяет ускорить процесс начального структурообразования пенобетона, повысить агрегативную устойчивость пенобетонных смесей. Смеси, содержащие тонкодисперсную добавку, не имеют признаков расслоения и усадки.

Таблица 2 Физическо-механические свойства пенобетона

Свойства пенобетона	Контрольный	С добавкой ТМТ600	
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	660,0	633,0	
Пористость, %:			
общая	37,2	50,2	
открытая	33,2	22,5	
закрытая	4,2	27,7	
Водопоглощение, %:			
по объему	33,2	22,5	
по массе	50,8	39,2	
Теплопроводность, Вт/м·К	0,12	0,09	
Предел прочности при сжатии, МПа	2,6	3,45	

Экспериментальные исследования влияния добавки ТМТ600 на свойства пенобетона представлены в табл. 2.

#### Заключение

Исследованы физико-химические и электрофизические свойства пенобетонной смеси при введении активного пористого минерального дисперсного наполнителя в виде термодифицированного торфа в концентрации 0,5 мас. %. Показано, что путем регулирования электрофизических параметров строительной смеси можно эффективно управлять свойствами пенобетона как в ранние, так и в поздние сроки структурообразования. По результатам проведенных исследований установлено, что введение термомодифицированной добавки приводит к ускорению сроков схватывания цементного теста, повышению прочности при сжатии цементного камня, увеличению общей и закрытой пористости, уменьшению теплопроводности пенобетона.

#### Литература

- 1. Семенов А.А. Строительство и промышленность строительных материалов в 2017 году: краткосрочный прогноз // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 4–8.
- 2. Машкин Н.А.; Кудяков А.И.; Бартеньева Е.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсноармированный минеральными и волокнистыми добавками // Известия вузов. Строительство. 2018. № 8. С. 58–68.
- 3. Селютина Л.Г. Конкурентные процессы в современном строительстве // Вестник ИНЖЭКОНа, 2013. № 1. С. 101–106.

- 4. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. P. 113–127.
- 5. Копаница Н.О.; Кудяков А.И.; Саркисов Ю.С. Стеновые строительные материалы на основе модифицированных торфов Сибири. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. vн-та. 2013. 294 с.
- 6. Кудяков А.И., Копаница Н.О., Прищепа И.А., Шаньгин С.Н. Конструкционнотеплоизоляционные пенобетоны с термомодифицированной торфяной добавкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1. С. 172–177.
- 7. Пат. РФ RU 2393128 C2. Теплоизоляционная композиция для производства строительных материалов на основе торфа / H.O. Копаница, А.И. Кудяков, М.А. Калашникова. 27.06.2010; Заявка № 2008101233/03 от 09.01.2008.
- 8. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Наумова Л.Б., Кудяков А.И., Копаница Н.О. Физикохимические особенности процессов активации и модифицирования торфа в технологии строительных материалов // Вестник Томского государственного архитектурностроительного университета. 2008. № 4. С. 26–30.
- 9. Бердов Г.И., Плетнев П.М., Бернацкий А.Ф., Хританков А.Ф., Виноградов С.А. Исследование влияния дисперсных минеральных добавок на свойства строительных материалов на цементных вяжущих диэлькометрическим методом // Известия вузов. Строительство. 2017. № 6. С. 15–22.
- 10. Краснянский Г.Е., Азнаурян И.А., Дугинов В.Е., Кучерова Г.В. Электрофизические исследования формирования структуры твердеющих цементных систем // Містобудування та територіальне планування. 2014. Вип. 51. С. 261–267.
- 11. Капранов В.В. Твердение вяжущих веществ и изделий на их основе. Челябинск : Южно-Урал. кн. изд-во, 1970. 190 с.
- Liu K., Cheng X., Li J., Gao X., Cao Y., Guo X., Zhuang J., Zhang C. Effects of microstructure and pore water on electrical conductivity of cement slurry during early hydration // Composites. Part B. 2019. Vol. 177. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107435
- 13. Лотов В.А. Периодичность процессов гидратации и твердения цемента // Строительные материалы. 2018. № 7. С. 55–59. DOI: 1031659/0585-430X-2018-761-7-55-59
- 14. Сахаров Г.П., Корниенко П.В. Образование оптимальной структуры ячеистого бетона // Строительные материалы. 1973. № 1. С. 7–12.
- 15. Шахова Л.Д. Технология пенобетона: теория и практика. М.: АСВ, 2010. 246 с.

#### Информация об авторах:

**Прищепа Инга Александровна,** старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета (Томск, Россия). E-mail: ingaprishepa@mail.ru

**Кудяков Александр Иванович,** доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета (Томск, Россия). E-mail: kudyakow@mail.tomsknet.ru

**Саркисов Юрий Сергеевич,** доктор технических наук, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурностроительного университета (Томск, Россия). E-mail: sarkisov@tsuab.ru

**Горленко Николай Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурностроительного университета (Томск, Россия). E-mail: gorlen52@mail.ru

**Журавлев Виктор Алексеевич,** доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ptica@mail.tsu.ru

**Сусляев Валентин Иванович,** доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: susl@mail.tsu.ru

**Угоденко Дмитрий Олегович,** аспирант кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: Ugodenko\_ne@inbox.ru

Tomsk State University Journal of Chemistry, 2020, 18, 35-46. DOI: 10.17223/24135542/18/4

## I.A. Prishchepa<sup>1</sup>, A.I. Kudyakov<sup>1</sup>, Yu.S. Sarkisov<sup>1</sup>, N.P. Gorlenko<sup>1</sup>, V.A. Zhuravlev<sup>2</sup>, V.I. Suslyaev<sup>2</sup>, D.O. Ugodenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russia) <sup>2</sup> National research Tomsk state University (Tomsk, Russia)

# Formation of foam-concrete structure with thermomodified peat additive at early period of hardening

Studies of the influence of thermally modified peat additive TMT600 on the properties of foam are presented. It was found that the addition of TMT600 provides the formation of a stable foam system. Intensive migration of peat microparticles along the boundaries of the foam phase interface and the formation of large aggregates, especially in the nodes of the Plateau-Gibbs ribs, are noted. Results of the influence of TMT600 additive on properties of cement dough and cement stone are presented. When pre-baking TMT600 was introduced into Portland cement at values close to the normal density of cement dough, the setting time was accelerated and the compression strength of cement stone at 28 days of age was increased by 54.2%. Electrophysical properties (electrical capacity and resistance) of cement dough control samples and samples with the addition of TMT600 were investigated, showing that when TMT600 was added to the cement dough, there was a decrease in capacity and an increase in the resistance of the samples compared to the controls, which were also due to a change in the mobility of the O- and H+ ions and dipoles of water, and an increase in the proportion of bonded new growths. Results of the effect of TMT600 additive on properties of foam-concrete mixture and foam concrete are presented. It was found that when the TMT600 was administered at a concentration of 0.5 mass. %. in foamconcrete mixture, plastic strength index increases by 65% in comparison with control compositions, and strength at 28 days of hardening by 43%. At the same time, an increase in volume and closed porosity is observed, as well as a decrease in thermal conductivity.

**Keywords:** foam concrete, foaming agent, foam, thermomodified peat additive, strength, cement stone, impedance spectroscopy.

#### References

- Semenov, A. A. Stroitel'stvo i promyshlennost' stroitel'nyh materialov v 2017 godu. Kratkosrochnyj prognoz. Stroitel'nye materialy. 2018, 4, 4–8.
- Mashkin, N. A.; Kudyakov, A. I.; Barten'eva, E. A. Neavtoklavnyj penobeton, dispersnoarmirovannyj mine-ral'nymi i voloknistymi dobavkami. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2018, 8, 58–68.
- 3. Selyutina, L.G. Konkurentnye processy v sovremennom stroitel'stve. *Vestnik INZHEKONa*. 2013, 1, 101–106.
- 4. Zhang, Z.; Provis, J. L.; Reid, A.; Wang, H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014, 56, 113–127.
- Kopanica, N. O.; Kudyakov, A. I.; Sarkisov, Yu. S. Stenovye stroitel'nye materialy na osnove modificirovannyh torfov Sibiri. Tomsk: Izd-vo Tom. gos. arhit.-stroit. un-ta, 2013; 294 s.

- Kudyakov, A. I.; Kopanica, N. O.; Prishchepa, I. A.; SHan'gin, S. N. Konstrukcionnoteploizolyacionnye penobetony s termomodificirovannoj torfyanoj dobavkoj. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2013, 1, 172–177.
- 7. Kopanica, N. O.; Kudyakov, A. I.; Kalashnikova, M.A. Teploizolyacionnaya kompoziciya dlya proizvodstva stroi-tel'nyh materialov na osnove torfa. Patent RF RU 2393128 C2, 27.06.2010. Zayavka № 2008101233/03 ot 09.01.2008.
- 8. Sarkisov, Yu. S.; Gorlenko, N. P.; Naumova, L. B.; Kudyakov, A. I.; Kopanica, N. O. Fizi-ko-himicheskie osobennosti processov aktivacii i modificirovaniya torfa v tekhnologii stroitel'nyh materialov. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2008, 4, 26–30.
- 9. Berdov, G. I.; Pletnev, P. M.; Bernackij, A. F.; Hritankov, A. F.; Vinogradov, S. A. Issledovanie vliyaniya dis-persnyh mineral'nyh dobavok na svojstva stroitel'nyh materialov na cementnyh vyazhushchih diel'kometri-cheskim metodom. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2017, 6, 15–22.
- Krasnyanskij, G. E.; Aznauryan, I. A.; Duginov, V. E.; Kucherova, G. V. Elektrofizicheskie issledovaniya formiro-vaniya struktury tverdeyushchih cementnyh system. *Mistobuduvannya ta teritorial'ne planuvannya*. 2014, 51, 261–267.
- 11. Kapranov, V. V. Tverdenie vyazhushchih veshchestv i izdelij na ih osnove. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izd-vo, 1970; 190 s.
- Liu, K.; Cheng, X.; Li, J.; Gao, X.; Cao, Y.; Guo, X.; Zhuang, J.; Zhang, C. Effects of microstructure and pore water on electrical conductivity of cement slurry during early hydration. Composites Part B. 15 November 2019, V. 177. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107435.
- 13. Lotov, V. A. Periodichnost' processov gidratacii i tverdeniya cementa. Stroitel'nye materialy. 2018, 7, 55–59. DOI: 1031659/0585-430X-2018-761-7-55-59.
- 14. Saharov, G. P.; Kornienko, P. V. Obrazovanie optimal'noj struktury yacheistogo betona. *Stroitel'nye ma-terialy*. 1973, 1, 7–12.
- 15. Shahova, L. D. Tekhnologiya penobetona. Teoriya i praktika. Moskva: Izd-vo Assoc. stroitel'nyh vuzov, 2010; 246 s.

#### Information about the authors:

**Prishchepa Inga,** Senior Lecturer Department of Building Materials and Technologies of Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ingaprishepa@mail.ru

**Kudyakov Alexander,** PhD, Professor of the Department of Building Materials and Technologies of Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kudyakow@mail.tomsknet.ru

**Sarkisov Yuri,** PhD, Professor of the Department of physics, chemistry and theoretical mechanics of Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sarkisov@tsuab.ru

**Gorlenko Nikolai,** PhD, Professor of the Department of physics, chemistry and theoretical mechanics of Tomsk State University of architecture and Building (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gorlen52@mail.ru

Zhuravlev Viktor, Associate Professor of the Department radioelectronics of the National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ptica@mail.tsu.ru Suslyaev Valentin, Associate Professor of the Department radioelectronics of the National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: susl@mail.tsu.ru Ugodenko Dmitry, graduate student of the Department radioelectronics of the National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: Ugodenko\_ne@inbox.ru