

DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-108-116

УДК 548.31; 691.3

Тип статьи: Оригинальная статья



## Активность поверхности порошков бетонного лома

А.М. Айзенштадт , Т.А. Дроздюк\* , В.Е. Данилов , М.А. Фролова , Г.А. Гарамов 

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

\*Контакты: e-mail: t.drozdyuk@narfu.ru

**РЕЗЮМЕ: Введение.** Одним из самых многотоннажных отходов стройиндустрии является бетонный лом, полученный в результате демонтажа зданий и сооружений, срок эксплуатации которых достиг своего максимума или требует значительных капитальных изменений. Особый интерес на наш взгляд представляют работы по использованию получаемой пылевидной фракции. Одним из перспективных методологических подходов в данном направлении является соблюдение принципов нанотехнологий, заключающихся в получении тонкодисперсных компонентов как активных составляющих создаваемых композиций. **Методы и материалы.** Поэтому объектами исследований в данной работе были тонкодисперсные порошки, полученные механическим размолотом легкого (образец 1) и тяжелого (образец 2) бетона пятиэтажного жилого панельного дома 1979 года постройки. Определен элементный состав и удельная поверхность образцов, проведена термогравиметрия исследуемых порошковых систем, методом ОВРК установлено поверхностное натяжение опытных проб и дисперсионная и поляризационная составляющие данного показателя. Предложен новый методический подход к определению поверхностного натяжения порошковых систем, основанный на определении функциональной зависимости поверхностного натяжения от усилия прессования опытных образцов. Показана возможность расчета макроэнергетических характеристик (энергия атомизации, удельная массовая энергия атомизации) образцов отработанного бетона. Данный физико-химический показатель характеризует потенциальный запас внутренней энергии системы, способной при механическом разрушении материала переходить в свободную поверхностную энергию. **Результаты и обсуждение.** ТГА-анализ опытных проб бетона показал наличие остаточного количества двухкальциевого силиката. Проведенные расчеты величины поверхностной активности образцов показали, что в качестве активной добавки в композициях, способной проявлять свойства связующего агента наиболее предпочтительнее использовать порошок, полученный путем дробления образца тяжелого бетона. **Заключение.** Для оценки активности пылевидных фракций бетонного лома как компонента в вяжущих композициях гидратационного типа твердения предложено использовать в качестве критерия величину активности поверхности порошковых систем. Абсолютное цифровое значение данного критерия равно отношению величин свободной поверхностной энергии исследуемого порошка и удельной массовой энергии атомизации исходного отработанного бетона. Установлено, что для бетонного лома величина данного критерия определяется поляризационной составляющей поверхностного натяжения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вторичный бетон, активность поверхности, композиционное вяжущее, энергия атомизации, пылевидная фракция бетонного лома, термогравиметрический анализ

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Исследования проводились на уникальном научном оборудовании «Физическая химия поверхностей нанодисперсных систем» при финансовой поддержке проекта Kolarctic № КО4068 «DeConcrete: Eco-efficient Arctic Technologies Cooperation».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Айзенштадт А.М., Дроздюк Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А., Гарамов Г.А. Активность поверхности порошков бетонного лома // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 2. – С. 108–116. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-108-116.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема переработки и повторного использования техногенных отходов является мировым ключевым фактором улучшения экологического состояния окружающей среды. Данное положение в полной мере относится и к индустрии строитель-

ных материалов. Кроме того, исследования в данном направлении позволяют также не только сохранять природные ресурсы, но и значительно уменьшать стоимость конечных строительных материалов. Одним из самых многотоннажных отходов стройиндустрии является бетонный лом, полученный в результате демонтажа зданий и сооружений, срок

© Айзенштадт А.М., Дроздюк Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А., Гарамов Г.А., 2021

эксплуатации которых достиг своего максимума или требует значительных капитальных вложений. Поэтому понятен значительный интерес исследований, направленных на решение проблемы использования различных фракций бетонного лома в строительном материаловедении [1–4].

Особый интерес, на наш взгляд, представляют работы по использованию получаемой пылевидной фракции. Так, например, результаты исследований [2, 5, 6] по влиянию пылевидной части отсевов дробления бетонного лома при создании композиционных вяжущих (КВ) на прочность цементного камня показали, что прочность цементного камня незначительно снижается при добавлении к цементу пыли отсева дробления бетонного лома. Таким образом данный отсев проявляет свойства низкомарочного вяжущего. Однако ряд нерешенных вопросов, связанных с определением активности данной фракции в качестве компонента КВ, сдерживает ее широкое применение. Во многом это связано со значительными временными и трудоемкими затратами при традиционном подходе к решению этой задачи. Вместе с тем, рассматривая пылевидную фракцию разрушенного бетона как тонкодисперсную систему, состоящую из микро- и наноразмерных частиц, обладающую повышенным энергетическим потенциалом, можно применить для оценки ее способности к трансформационным превращениям нанотехнологичный подход. Так, в [7–10] для определения активности поверхности ( $k_s$ ) подобных систем предложен количественный критерий, который рассчитывается исходя из отношений величин свободной поверхностной энергии высокодисперсной системы и потенциальной энергии, характерной для ее макросостояния.

В настоящее время нами разработан механизм экспериментального определения  $k_s$ , численно равный отношению двух характеристик:  $E_s/E_m$ . В этом выражении числитель представляет собой свободную поверхностную энергию дисперсной системы (Дж/кг), а знаменатель – удельную массовую энергию атомизации (Дж/кг) испытуемого материала. В свою очередь, расчет значений свободной поверхностной энергии осуществляется исходя из экспериментально определяемых величин удельной поверхности исследуемого тонкодисперсного порошка ( $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/кг) и его поверхностного натяжения ( $\sigma$ , Дж/м<sup>2</sup>) [11–13]:

$$E_s = \sigma \cdot S_{уд}. \quad (1)$$

Если с выбором метода определения величины удельной поверхности высокодисперсных порошков вопросов практически не возникает (точные и воспроизводимые результаты дают методы, основанные

на теории БЭТ и реализуемые путем криогенной адсорбции азота на аналитических системах Autosorb [14–16]), то определение поверхностного натяжения (удельной поверхностной энергии) порошковых систем, например, способом ОВРК [10, 11] требует применения точных рекомендаций, отработанных для таких стандартных жидкостей, как декан, этиленгликоль, глицерин, вода [13].

Удельная массовая энергия атомизации представляет собой алгебраическую сумму стандартных энтальпий образования химических соединений (энергия атомизации,  $E_a$ , Дж/моль), составляющих опытный образец с учетом их молекулярных (формульных) масс ( $M$ , моль/кг) [17, 18]:

$$E_m = E_a/M. \quad (2)$$

Стандартные энтальпии образования основных химических соединений (в пересчете на их оксиды) представлены в соответствующей справочной литературе [19–22].

Поэтому представлялось интересным провести сравнительный анализ по величине активности поверхности опытных образцов пылевидной фракции бетонного лома, полученных после предварительного помола макрообразцов до удельной поверхности, близкой гидравлическому цементному вяжущему (300 м<sup>2</sup>/кг). Данные значения удельной поверхности портландцемента определяются методом газопроницаемости Козени-Кармана на установке, например, ПСХ-10а.

Кроме того, значимые результаты в плане научного обоснования правомочности используемого критерия могут представлять результаты термогравиметрического анализа (ТГА) опытных образцов. Данный факт может быть связан с определением остаточного содержания негидролизовавшихся в процессе твердения бетона силикатов кальция [5, 23–25], которые путем механоактивации анализируемых проб до достаточной степени дисперсности переходят в активное состояние. Так, например, о степени гидратации клинкерных минералов можно судить по величине потери массы (кривая ТГА) в интервале температур 400–500°C, которая характеризует потерю прочносвязанной воды из цементного геля [26].

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В данной работе объектами исследования стали бетонные конструкции: внутренние стеновые панели и плита перекрытия (легкий бетон, образец 1) и наружные стеновые панели (тяжелый бетон, образец 2) пятиэтажного жилого панельного дома 1979 года постройки в поселке Обозерский Архангельской области. Остаточная прочность бетонных

Таблица 1

Значения поверхностных натяжений эталонных жидкостей [27]

Жидкость	$\sigma_s$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_s^p$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_s^d$ , мДж/м <sup>2</sup>
Вода	72,8	51,0	21,8
Глицерин	63,4	26,4	37,0
Декан	23,8	0	23,8

образцов определялась методом ударного импульса по ГОСТ 22690-2015 на приборе ИПС-МГ4. Перед предварительным дроблением образцы бетона доводились до постоянной массы в сушильном шкафу и подвергались процедуре измерения истинной плотности стандартным методом. Затем опытные образцы раскалывались на куски размером не более 120 мм, из которых извлекалась арматура. Далее фрагменты бетона дробились на щековой дробилке ДЩ 1-2. Отсевы были разделены на фракции на стандартном наборе сит. Элементный минеральный состав полученных пылевидных фракций определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа с помощью прибора ПРФА «МетЭксперт». Удельную поверхность полученных порошков бетона измеряли методами сорбции азота на анализаторе удельной поверхности и размеров пор AUTOSORB-iQ-MP и газопроницаемости Козени-Кармана на установке ПСХ-10а. Термогравиметрический анализ опытных образцов (синхронный термогравиметрический и дифференциальный термический анализ) проводили на термогравиметрическом анализаторе SDT Q650 (TA Instrument Inc., США) в атмосфере азота (расход 50 мл/мин) при скорости нагрева 10°С/мин. Образцы массой 11 мг помещали в глиноземный поддон и подвергали вакуумной сушке при температуре 30°С в течение 2 часов перед испытанием. Диапазон изменения температур составил 30–1500°С. Кроме этого, аналогичную аналитическую операцию проводили с портландцементом марки М400, для которого был определен элементный состав рентгенофлуоресцентным методом и удельная поверхность методом сорбции азота. Расчет поверхностного натяжения порошковых материалов по измеряемому экспериментально углу смачивания поверхности эталонными жидкостями осуществлялся следующим образом. Из полученных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 формировали уплотненные образцы диаметром 30 мм при воздействии в течение 2 минут фиксированного избыточного давления (р) 2, 4, 8, 12 и 16 тонн. Далее на гониометре DSA-20E (EasyDrop) определяли краевой угол смачивания поверхности образцов-запрессовок рабочими жидкостями с известными полярными и дисперсионными составляющими поверхностного натяжения: вода, глицерин,

декан (табл. 1). После двух параллельных измерений краевого угла смачивания образцов каждой рабочей жидкостью рассчитывали средний угол смачивания и его косинус. Дисперсионная ( $\sigma_{sd}$ ), поляризационная ( $\sigma_{sp}$ ) составляющие и суммарное значение ( $\sigma_s$ ) поверхностного натяжения исследуемого материала определяли по методу ОВРК (Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле). Далее, путем экстраполяции зависимости  $\sigma_s = f(p)$  получали значение  $\sigma_s$  при избыточном давлении  $p = 0$ . Данное значение поверхностного натяжения и использовалось для расчета активности поверхности высокодисперсной системы (порошки бетона и цемент). Расчет значений удельной массовой энергии атомизации  $E_m$  порошков бетона и цемента проводили с учетом предварительно определенного элементного состава (в пересчете на оксиды) путем алгебраического сложения стандартных энтальпий образования соответствующих оксидов, взятых из справочной литературы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение остаточной прочности опытных образцов бетона показало, что легкий бетон (образец 1) можно отнести к классу В22,5, а тяжелый (образец 2) – к В40. Усредненное значение истинной плотности ( $\rho$ ) исследуемых образцов составило для образца 1 – 2253 кг/м<sup>3</sup>, а для образцов 2 – 2350 кг/м<sup>3</sup>. Диспергирование и фракционирование исходного бетонного лома позволило получить по 9 размерных фракций, отличающихся размерными характеристиками частиц. Для дальнейших исследований использовались фракции, которые имели размеры частиц менее 0,14 мм.

Элементный состав полученных опытных образцов высокодисперсных порошков бетонного лома и портландцемента представлен в табл. 2. Здесь же даны стандартные энтальпии образования данных оксидов и их молекулярные массы.

Данные, представленные в табл. 2, позволили рассчитать макроэнергетическую характеристику исследуемых образцов. Так, для бетонного лома образца 1 энергия атомизации ( $E_a$ ) равна 1510 кДж/моль, для образца 2 – 1281 кДж/моль, а для используемого портландцемента – 1237 кДж/моль. Удельная

Таблица 2

Элементный состав опытных образцов (в пересчете на оксиды), энтальпии образования ( $\Delta H_{298}$ ) оксидов, энергия атомизации ( $E_a$ ) и их молекулярные массы (M)

Оксид	Содержание, %			$\Delta H_{298} \cdot 10^{-3}$ , кДж/кмоль	$E_a$ , кДж/моль	M, г/моль
	Образец 1	Образец 2	Портланд-цемент			
SiO <sub>2</sub>	36,68	16,73	8,98	–910,7 [22]	1859	60,0
CaO	51,39	76,63	80,99	–635,1 [21]	1062	72,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,18	5,89	6,72	–823,4 [19]	2398	143,6
TiO <sub>2</sub>	0,75	0,76	–	–944,0 [20]	1916	80,0
SO <sub>3</sub>	–	–	3,31	–438,4 [19]	1463	80,0

массовая энергия атомизации ( $E_m$ ) для бетона (образцы 1 и 2) и портландцемента принимают следующие значения:  $4,3 \cdot 10^3$  кДж/кг,  $3,6 \cdot 10^3$  кДж/кг и  $3,5 \cdot 10^3$  кДж/кг, соответственно.

Величина удельной поверхности анализируемых образцов, определенная методом сорбции азота, составила:  $5000 \pm 30$  м<sup>2</sup>/кг для пылевидной фракции легкого бетона (образец 1), тяжелого (образец 2) –  $5150 \pm 50$  м<sup>2</sup>/кг и  $500 \pm 10$  м<sup>2</sup>/кг для используемого при сравнении портландцемента. Определение удельной поверхности опытных образцов на приборе ПСХ-10а привело к получению следующих значений удельной поверхности: 260 м<sup>2</sup>/кг – для образца 1, 240 м<sup>2</sup>/кг – для образца 2. Заниженные результаты по величине удельной поверхности, полученные на приборе ПСХ, можно объяснить сложной структурой частиц опытных образцов бетона. Так, фильтрация газа через слой порошка в этом методе осуществляется при давлении, близком к атмосферному, в режиме «просачивания» газовых потоков по порам порошкового тела. Однако в этом случае не учитывается развитая поверхность частиц порошка (вязкое течение проходит только по внешней поверхности частиц порошка). Данный эффект исключается при определении удельной поверхности дисперсных систем методом сорбции азота. Однако проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о наличии развитой поровой структуре порошковых опытных образцов бетона в отличие от частиц портландцемента.

С учетом значений истинной плотности анализируемых объектов и удельной поверхности рассчитан диаметр эквивалентной сферы (как размерная характеристика пористых частиц краеугольной несимметричной формы) ( $d_{\text{экв}}$ ) частиц по следующему выражению [28]:

$$d_{\text{экв}} = 2/\rho S_{\text{уд}} \quad (3)$$

Для образцов 1 и 2 данный параметр равен 177 нм и 165 нм, соответственно.

Результаты термогравиметрического анализа образца 1 и портландцемента представлены на рис. 1 и 2.

На представленных диаграммах (рис. 1), на наш взгляд, следует обратить внимание на следующие характерные температурные области. Так, в диапазоне температур 400–500°C потеря массы образца связана с удалением прочносвязанной воды из цементного геля. Общая потеря массы образца за счет его температурной модификации составила 16%. Кроме того, отмечаются четкие эндотермические эффекты в районе 570, 735 и 1300°C. В первом случае проявившийся эффект связан с модификационным превращением кварца ( $\alpha \rightarrow \beta$ ). Эндотермические эффекты в температурных диапазонах 730–800°C и 1300–1350°C связаны с наличием остаточного (не израсходованного в основном процессе гидратации) количества двухкальциевого силиката ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Эндотермические эффекты в диапазонах температур 420–430 и 900–1200°C, сопровождающиеся потерей массы образца, могут быть связаны с разложением кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) и выделением  $\text{CO}_2$ .

В табл. 3 приведены первичные экспериментальные данные экспериментов, полученные методом ОВРК, и расчетные значения поверхностных натяжений опытных образцов.

Для определения величины поверхностного натяжения ( $\sigma_0$ ), соответствующей исходной порошковой системе без принудительного ее уплотнения, необходимого при реализации экспериментальных приемов по определению краевого угла поверхности порошков, получены зависимости поверхностного натяжения уплотненных образцов ( $\sigma_s$ ) при разном (фиксированном) усилии прессования (p), имеющие прямолинейный характер с высоким значением коэффициента достоверности аппроксимации, (R),

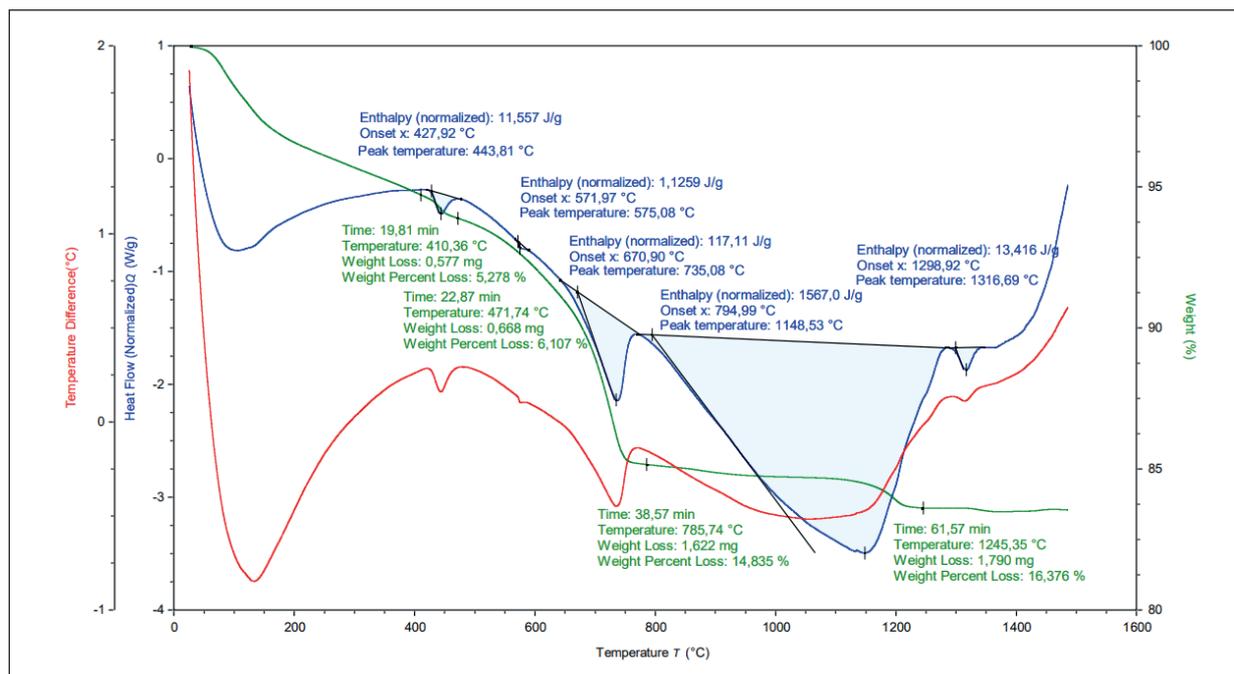


Рис. 1. ТГА образца бетона

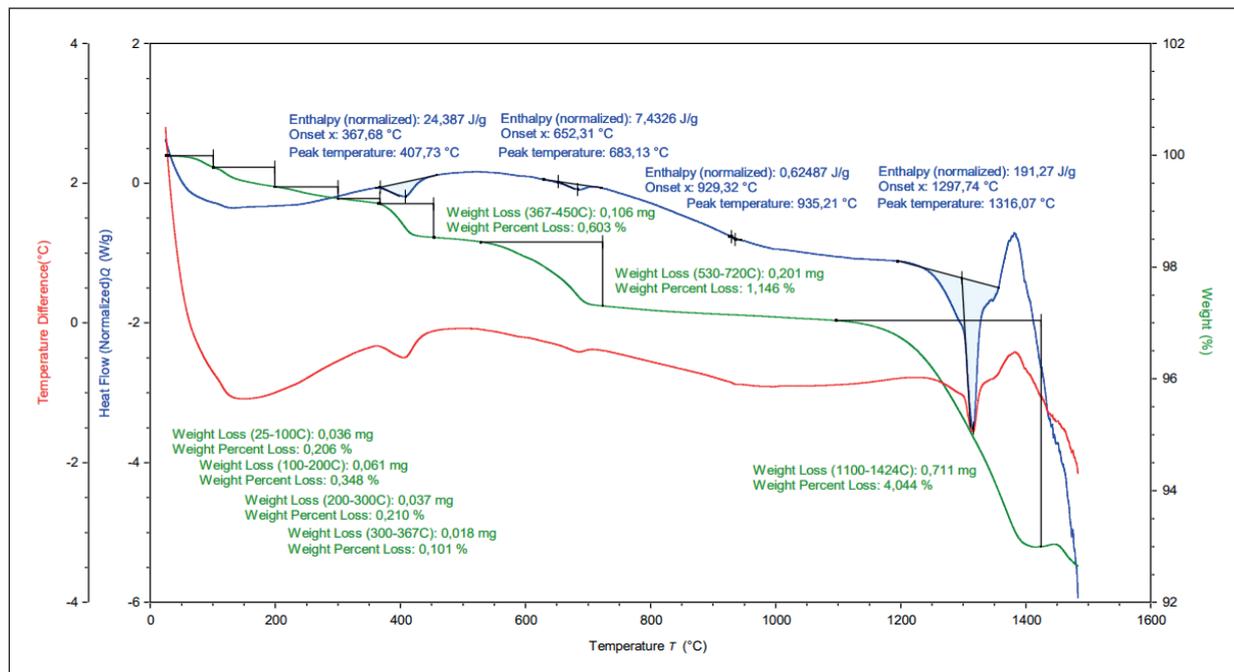


Рис. 2. ТГА образца портландцемента

с последующей экстраполяцией данной зависимости на  $p = 0$  (рис. 3 и 4). Так, в результате проведенной математической операции величина  $\sigma_0$  составила для образцов пылевидной фракции легкого и тяжелого бетонов 60,23 мДж/кг и 65,45 мДж/кг, соответственно.

Поверхностное натяжение конденсированных дисперсных систем представляет собой удельную поверхностную энергию, величина которой определяется ван-дер-ваальсовым взаимодействием частиц (дисперсионная составляющая) и наличием активных центров поверхности (поляризационная

Таблица 3

Краевые углы смачивания опытных порошков и рассчитанные по ним значения поверхностных натяжений методом ОВРК

Порошок	Усилие прес- сования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{cp} \pm 0,1, ^\circ$			Поверхностное натяжение, мДж/м <sup>2</sup>		
		декан	глицерин	вода	$\sigma_s^p$	$\sigma_s^d$	$\sigma_s$
Бетон (образец 1)	2	15,5	31,9	33,4	38,38	21,87	60,26
	4	12,8	30,4	33,6	38,07	22,32	60,40
	8	10,3	29,1	34,1	37,63	22,72	60,36
	12	9,0	25,0	34,8	37,24	23,37	60,61
	16	9,2	23,4	35,2	37,04	23,58	60,62
Бетон (образец 2)	2	14,3	28,5	25,5	42,58	21,60	64,19
	4	11,3	23,3	25,0	42,69	22,37	65,06
	8	10,2	21,9	26,5	41,92	22,71	64,63
	12	10,0	21,9	28,3	41,00	22,90	63,90
	16	9,3	21,9	28,4	40,90	22,95	63,85

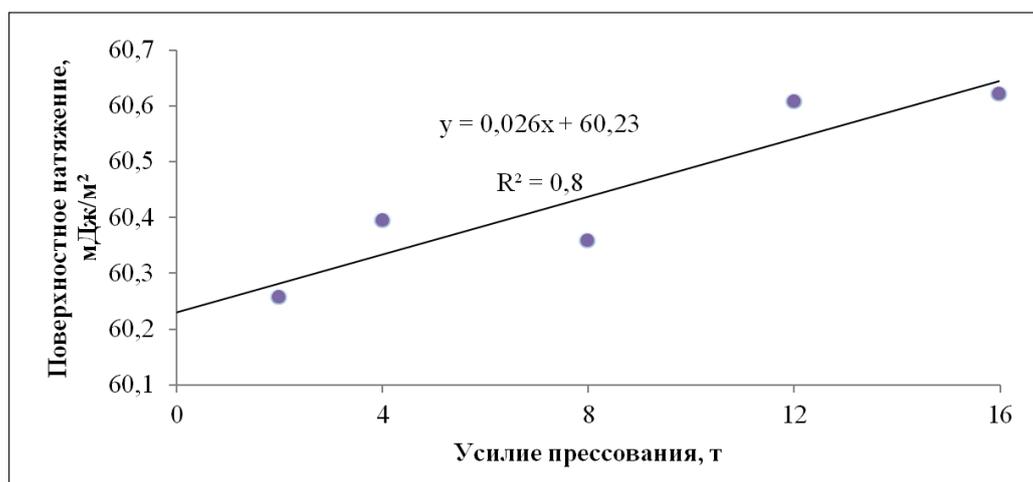


Рис. 3. Функциональная зависимость  $\sigma_s = f(T)$  для порошка легкого бетонного лома (образец 1)

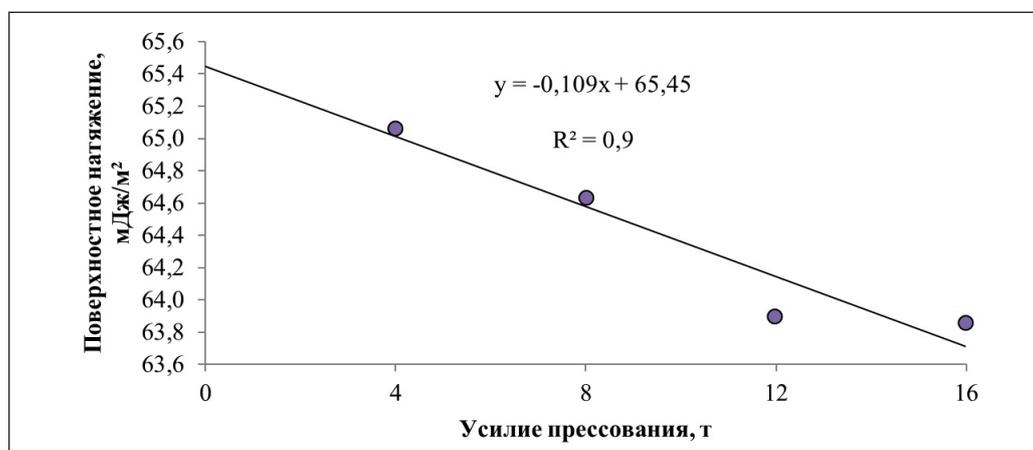


Рис. 4. Функциональная зависимость  $\sigma_s = f(T)$  для порошка тяжелого бетонного лома (образец 2)

составляющая). Учитывая данное положение, следует отметить, что для порошков бетона (образцы 1 и 2) поляризационный эффект преобладает над дисперсионным взаимодействием. Однако для образцов тяжелого бетона эта разница значительно больше, чем для легкого. Это может быть связано с тем, что в процессе прессования происходит дополнительное разрушение структуры частиц данных систем. С наличием такого эффекта, на наш взгляд, связано аномальное значение дисперсионной составляющей поверхностного натяжения при усилии в 2 т для образца 2, не сочетающегося с остальным массивом данных. Исходя из этого факта, данную экспериментальную точку для образца 2 не использовали при аппроксимации функциональной зависимости  $\sigma_s = f(T)$  уравнением прямой линии. Кроме того, результаты экспериментов показали, что увеличение усилия прессования

приводит к более значительному возрастанию ван-дер-ваальсового дисперсионного взаимодействия частиц у образцов легкого бетона, чем у образцов тяжелого бетона (рис. 5). Так, угловой коэффициент функциональной зависимости  $\sigma_s^d = f(T)$  для образца 1 более чем в два раза выше, чем для образца 2. В то же время, уменьшение значений поляризационных составляющих поверхностного натяжения с увеличением усилия прессования опытных проб происходит практически с одинаковой скоростью (рис. 6).

Физико-химические и энергетические характеристики поверхности опытных порошков представлены в табл. 4.

Можно отметить, что для порошков легкого и тяжелого бетонов наблюдается практически равенство отношений составляющей поверхностного натяжения ( $\sigma_{sd}/\sigma_{sp}$ ), изменяющееся в диапазоне  $0,5 \div 0,6$ , однако

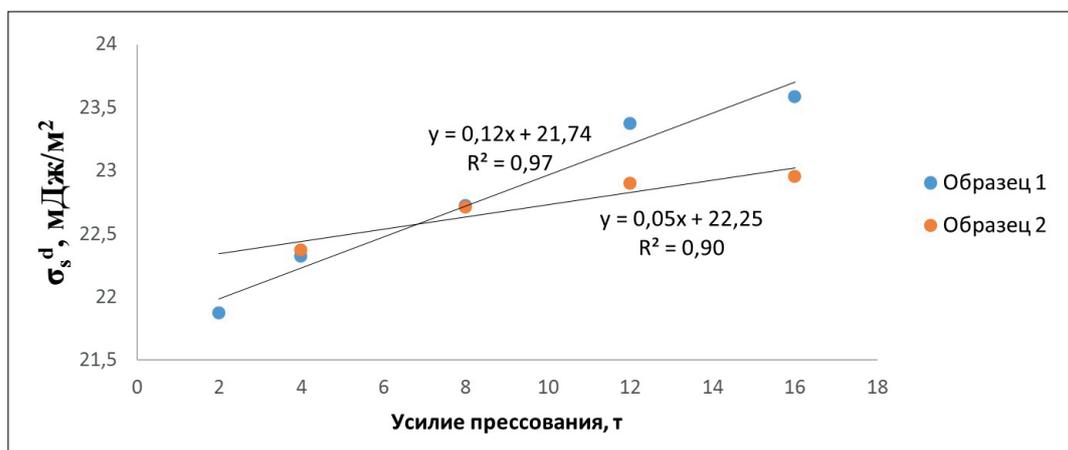


Рис. 5. Функциональная зависимость вида  $\sigma_s^d = f(T)$  для порошков бетона

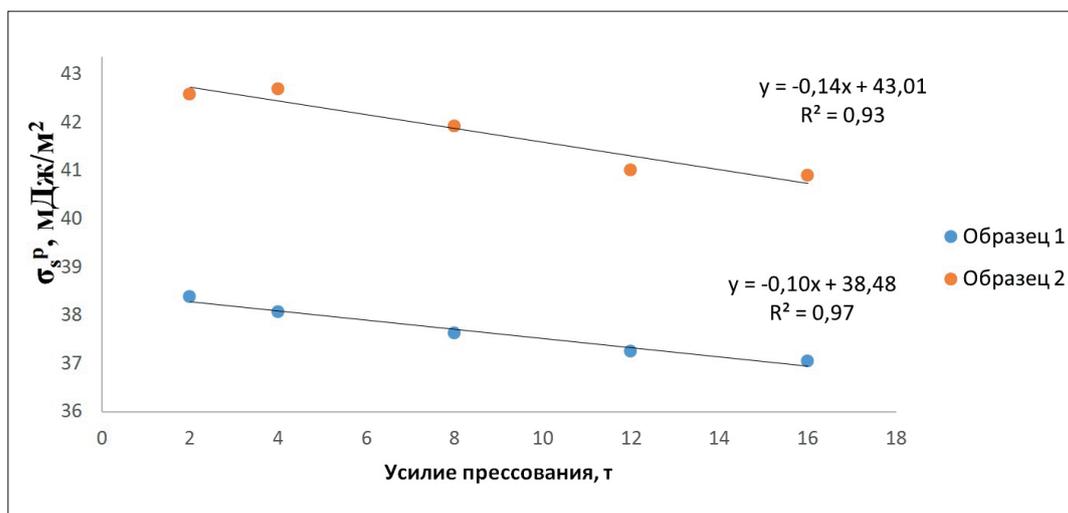


Рис. 6. Функциональная зависимость вида  $\sigma_s^p = f(T)$  для порошков бетона

Таблица 4

## Физико-химические и энергетические характеристики порошков

Порошок	$\sigma_0 \cdot 10^3$ , Дж/м <sup>2</sup>	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	$E_s \cdot 10^{-4}$ , Дж/кг	$E_m \cdot 10^{-6}$ , Дж/кг	$k_s \cdot 10^3$
Образец 1	60,23	5000	0,030	4,3	0,070
Образец 2	65,45	5150	0,034	3,6	0,094

абсолютное значение поляризационной составляющей поверхностного натяжения для образца 2 выше, чем для образца 1. Данный факт свидетельствует об увеличенном содержании активных центров поверхности порошковой системы тяжелого бетона, что и является преобладающим фактором в проявлении большей реакционной способности частиц.

Проведенные расчеты величины поверхностной активности образцов показали, что в качестве активной добавки в композициях, способной проявлять свойства связующего агента, наиболее предпочтительнее использовать порошок, полученный путем дробления образца 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность расчета макроэнергетических характеристик (энергия атомизации,

удельная массовая энергия атомизации) образцов отработанного бетона с использованием результатов рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что, несмотря на схожесть элементного состава, бетон с остаточным классом прочности В15 имеет более высокое значение энергии атомизации. Данный физико-химический показатель характеризует потенциальный запас внутренней энергии системы, способной при механическом разрушении материала переходить в свободную поверхностную энергию.

Для оценки активности пылевидных фракций бетонного лома как компонента в вяжущих композициях гидратационного типа твердения предложено использовать в качестве критерия величину активности поверхности порошковых систем. Установлено, что для бетонного лома величина данного критерия определяется классом прочности бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефименко А.З. Бетонные отходы – сырье для производства эффективных строительных материалов // Технология бетонов. – 2014. – 2. – С. 17–21.
2. Гусев Б.В., Кудрявцева В.Д., Потапова В.А. Бетоны с нанодобавкой из обожженного вторичного бетона // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Т. 12, № 5. – С. 245–249. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-245-249.
3. Красникова Н.М., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // Строительные материалы. – 2020. – Т. 1, № 2. – С. 56–65. – DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65.
4. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х. Вяжущее из пылевидной фракции фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – Т. 1, № 42. – С. 69–76.
5. Гусев Б.В., Кривобородов Ю.Р., Потапова В.А. Возможность вторичного применения бетонолома // Техника и технология силикатов. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 28–31.
6. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аль Мамури С.К.Ш., Гунченко Т.С. Композиционные вяжущие на основе бетонного лома // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 7. – С. 8–18. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-8-18.
7. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Вешнякова Л.А., Тутыгин А.С. Энергетика высокодисперсных композитов горных пород // Нанотехнологии в строительстве. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 56–65.
8. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 2. – С. 68–72.
9. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // Материаловедение. – 2016. – № 5. – С. 45–48.
10. Морозова М.В., Акулова М.В., Фролова М.А., Щепочкина Ю.А. Определение энергетических параметров песков на примере месторождений Архангельской области // Материаловедение. – 2020. – Т. 9, № 45. – С. 48.
11. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтеновых веществ методом Оуэнса-Вендта-Рабея-Каелбле // Свиридовские чтения. – 2012. – № 8. – С. 253–260.
12. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Dispersion Interactions as Criterion of Optimization of Cementless Composite Binders. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018;9(4):767–771.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

13. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М. Измерение краевых углов смачивания порошков методом «sessile drop» // Физика и химия обработки материалов. – 2020. – № 6. – С. 75–82. – DOI: [10.30791/0015-3214-2020-6-75-82](https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-6-75-82)
14. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Комплексный подход к оценке наноразмерных фракций полидисперсных систем измельченных горных пород // Нанотехнологии в строительстве. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 97–110. – DOI: [10.15828/2075-8545-2016-8-3-97-110](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-97-110).
15. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ., 2-е издание. – Москва: Мир, 1984. – 306 с.
16. Альмяшева О.В., Федоров Б.А., Смирнов А.В., Гусаров В.В. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26–36.
17. Зуев В. В., Поцелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. – СПб.: Изд-во завода «Альфапол», 2006. – 139 с.
18. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Вешнякова Л.А., Фролова М.А., Казлитин С.А. Расчет энергоемкости горных пород — как сырья для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 10. – С. 23–25.
19. Binnewies M., Milke E. *Thermochemical Data of Elements and Compounds*. Hannover: Wiley-VCH; 2002.
20. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. издание: В 4 т /Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.]. – М.: Наука, 1982. – Т. IV, Кн. 2. – 560 с.
21. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. издание: В 4 т /Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.]. – М.: Наука, 1981. – Т. III, Кн. 2. – 400 с.
22. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. издание: В 4 т /Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.]. – М.: Наука, 1979. – Т. II, Кн. 2. – 344 с.
23. Гусев Б.В., Кудрявцева В.Д. Дробление железобетонных изделий и вторичное использование бетона // Техника и технология силикатов. – 2013. – Т. 20, № 2. – С. 25–28.
24. Галкин Ю.Ю., Удодов С.А. Фазовый анализ структуры цементного камня, изолированного при его раннем нагружении // Транспортные сооружения. – 2018. – С. 1. – <https://t-s.today/PDF/21SATS118.pdf> (доступ свободный). – DOI: [10.15862/21SATS118](https://doi.org/10.15862/21SATS118).
25. Хабас Т.А., Кулинич Е.А., Егоров Е.Ю. Термогравиметрический метод анализа силикатных материалов / Методические указания по курсам «Физикохимия твердого тела» и Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов». – Томск: ТПУ, 2007. – 20 с.
26. Агзамов Ф.А., Ломакина Л.Н., Гафурова Э.А., Бикмеева Н.Б. Исследование процесса структурообразования бетона в условиях зимнего бетонирования // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 6. – С. 384–400.
27. Gayda J., Ayzenshtadt A., Tutygin A., Frolova M. Organic-Mineral Aggregate for Sandy Subsoil Strengthening. *Procedia Engineering*. 2016;143:90–97.
28. Левин А.В. Основные принципы анализа размера частиц. ГК «Энерголаб». – URL: <https://docplayer.ru/43708708-Osnovnye-principy-analiza-razmerov-chastich.html> (дата обращения 02.03.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Айзенштадт Аркадий Михайлович**, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии, Заслуженный работник высшей школы РФ, Почетный работник науки и высоких технологий РФ. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2904-2549>, e-mail: [a.isenshtadt@narfu.ru](mailto:a.isenshtadt@narfu.ru)

**Дроздук Татьяна Анатольевна**, старший преподаватель кафедры композиционных материалов и строительной экологии, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1847-408X>, e-mail: [t.drozdyuk@narfu.ru](mailto:t.drozdyuk@narfu.ru)

**Данилов Виктор Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5013-5339>, e-mail: [v.danilov@narfu.ru](mailto:v.danilov@narfu.ru)

**Фролова Мария Аркадьевна**, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4079-5066>, e-mail: [m.aizenstadt@narfu.ru](mailto:m.aizenstadt@narfu.ru)

**Гарамов Георгий Андреевич**, магистрант, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5496-1080>, e-mail: [georgiigaramov1997@gmail.com](mailto:georgiigaramov1997@gmail.com)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 09.03.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 31.03.2021.

Статья принята к публикации: 02.04.2021.