

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВОВЛЕЧЕНИЯ В ОБВОДНЕННЫЕ ГРУБОДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

© 2016 В. Т. Перцев, Т. Ф. Ткаченко, О. Б. Рудаков

Воронежский государственный технический университет, Московский пр., 14, 394026 Воронеж, Россия  
e-mail: peres\_v@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2016 г.

**Аннотация.** Изучены реологические свойства обводненных грубодисперсных систем, состоящих из частиц песка и цемента, в условиях сдвига. Изучены процессы сорбции газов и формирования пористой структуры при турбулентном режиме перемешивания грубодисперсных обводненных систем цемент — песок — вода — ПАВ. Найдены оптимальные условия получения пенобетонных смесей со стабильными свойствами. Предложены методические приемы и количественные оценки оптимальной дозировки добавки ПАВ. Определены структура и баланс энергозатрат при перемешивании пенобетонных смесей и их зависимость от гидродинамических критериев Рейнольдса и Вебера. Установленные количественные закономерности позволили оптимизировать процессы при перемешивании пенобетонных смесей и обеспечить при средней плотности 350—500 кг/м<sup>3</sup> получение достаточно высоких показателей однородности пенобетонов по средней плотности и прочности.

**Ключевые слова:** грубодисперсные системы, межфазные границы, поверхностно-активные вещества, адсорбция, массоперенос, пенобетонная смесь, перемешивание, гидродинамические критерии.

### ВВЕДЕНИЕ

Пенобетон является универсальным строительным материалом, область применения которого постоянно расширяется [1]. Производство пенобетона считается перспективным при средней плотности 300—400 кг/м<sup>3</sup> для тепло- и звукоизоляции и средней плотности 500—600 кг/м<sup>3</sup> для ограждающих конструкций. К настоящему времени накоплен большой научно-практический опыт, определяющий основные направления повышения качества неавтоклавных пенобетонов [1—3]. Результаты многочисленных исследований и практического применения показывают, что существующие технологии нуждаются в совершенствовании, и многие представления о процессах формирования структуры неавтоклавных пенобетонов при их приготовлении требуют дальнейшего развития на основе применения подходов таких фундаментальных наук, как коллоидная химия, физика и химия твердого тела, механика гетерогенных сред и др. [4—6].

Целью данной работы является изучение процессов формирования пористой структуры в турбу-

лентном режиме перемешивания грубодисперсной системы цемент — песок — вода — ПАВ при сорбции газов и подбор условий приготовления пенобетонных смесей, обладающих стабильными свойствами.

### СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполняли на модельных системах и пенобетонных смесях, при приготовлении которых использовались портландцемент ОАО «Осколцемент» марки ПЦ500 Д0, кварцевый песок с модулем крупности 1,8, вода затворения техническая. В качестве воздухововлекающей добавки использовали синтетическое анионоактивное ПАВ нового поколения со стабилизирующими компонентами «Пионер 118М3», представляющее собой модифицированный алкилсульфат на основе высших первичных спиртов общей формулой  $C_nH_{2n+1}OSO_3Me$ , где  $n = 10—14$ .

**Исследования на модельных системах.** Известно, что одним из основных процессов техноло-

гии пенобетонов является процесс адсорбции ПАВ на межфазной границе. При оценке процесса адсорбции ПАВ использовали метод, основанный на определении критической концентрации мицеллообразования (ККМ) водного раствора ПАВ, которая служит основой для назначения оптимальной дозировки добавки и устанавливается путем нахождения точки выполаживания изотермы поверхностного натяжения на границе раздела фаз «жидкость — воздух». В нашей работе [7] показано, что для определения ККМ предпочтительнее совместное рассмотрение зависимостей поверхностного натяжения и величины адсорбции от концентрации раствора ПАВ, причем не только в водных растворах ПАВ, но и в системах, моделирующих пенобетонную смесь цемент — песок — вода — ПАВ. Такой метод обеспечивает повышение точности определения ККМ, что позволяет определить оптимальную дозировку воздухововлекающей добавки.

Исследованиями влияния частиц твердой фазы — цемента и песка — на дозировку добавки ПАВ установлено, что присутствие частиц цемента приводит к увеличению ККМ в 1.5 раза, соответственно — к необходимости увеличения дозировки добавки до 50 % по сравнению с ее водным раствором.

**Испытания на пенобетонных смесях.** Для выявления степени влияния массопереноса при турбулентном перемешивании на реологические характеристики пенобетонной смеси, параметры процесса перемешивания, структуру и свойства смеси определялись коэффициент эффективной диффузии, средняя минимальная эффективная вязкость пенобетонной смеси, структура потоков перемешиваемой смеси, дисперсность заполнителя и гидродинамические критерии Рейнольдса и Вебера.

При изучении массопереноса в процессе перемешивания компонентов пенобетонных смесей в турбулентных смесителях привлекались различные модели. В качестве модели, отражающей наиболее важные закономерности массопереноса при механическом перемешивании, была принята модель «проницания и обновления поверхности» [5]. Показано, что воздухововлечение осуществляется в основном в процессе турбулентной диффузии, кинетической характеристикой которой служит коэффициент эффективной диффузии. Установлено, что коэффициент эффективной диффузии для принятых режимов перемешивания лежит в интервале  $2.9 \cdot 10^3$ — $3.0 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/с. Коэффициент эффективной диффузии был использован для опи-

сания процесса получения пенобетона и его оптимизации.

Введение воздушной фазы в исходный цементно-песчаный раствор мало влияет на характер реологических кривых (рис. 1), однако вызывает сильное снижение предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости смеси.

При оптимальной величине напряжения сдвига достигается минимальная величина эффективной вязкости, что обеспечивает энергетически наиболее выгодные условия массопереноса в процессе воздухововлечения при перемешивании пенобетонной смеси. Так как величина эффективной вязкости пенобетонной смеси зависит от многих факторов — состава и средней плотности смеси, свойств ее компонентов, В/Т-отношения (отношение массы воды к массе твердой фазы цемент — песок), напряжения сдвига, представляется целесообразным использовать минимальное ее значение —  $\eta_{ПБ}^*$  (рис. 1б). В связи с тем, что в процессе перемешивания ранняя структура пенобетона претерпевает определенные изменения вследствие перехода от исходного цементно-песчаного раствора к пенобетонной смеси, в технологических расчетах был использован усредненный показатель минимальной эффективной вязкости  $\eta_{cp}^*$ , определяемый как среднее значение между минимальными эффективными вязкостями цементно-песчаного раствора ( $\eta_{ЦП}^*$ ) и пенобетонной смеси ( $\eta_{ПБ}^*$ ):

$$\eta_{cp}^* = \frac{\eta_{ЦП}^* + \eta_{ПБ}^*}{2}.$$

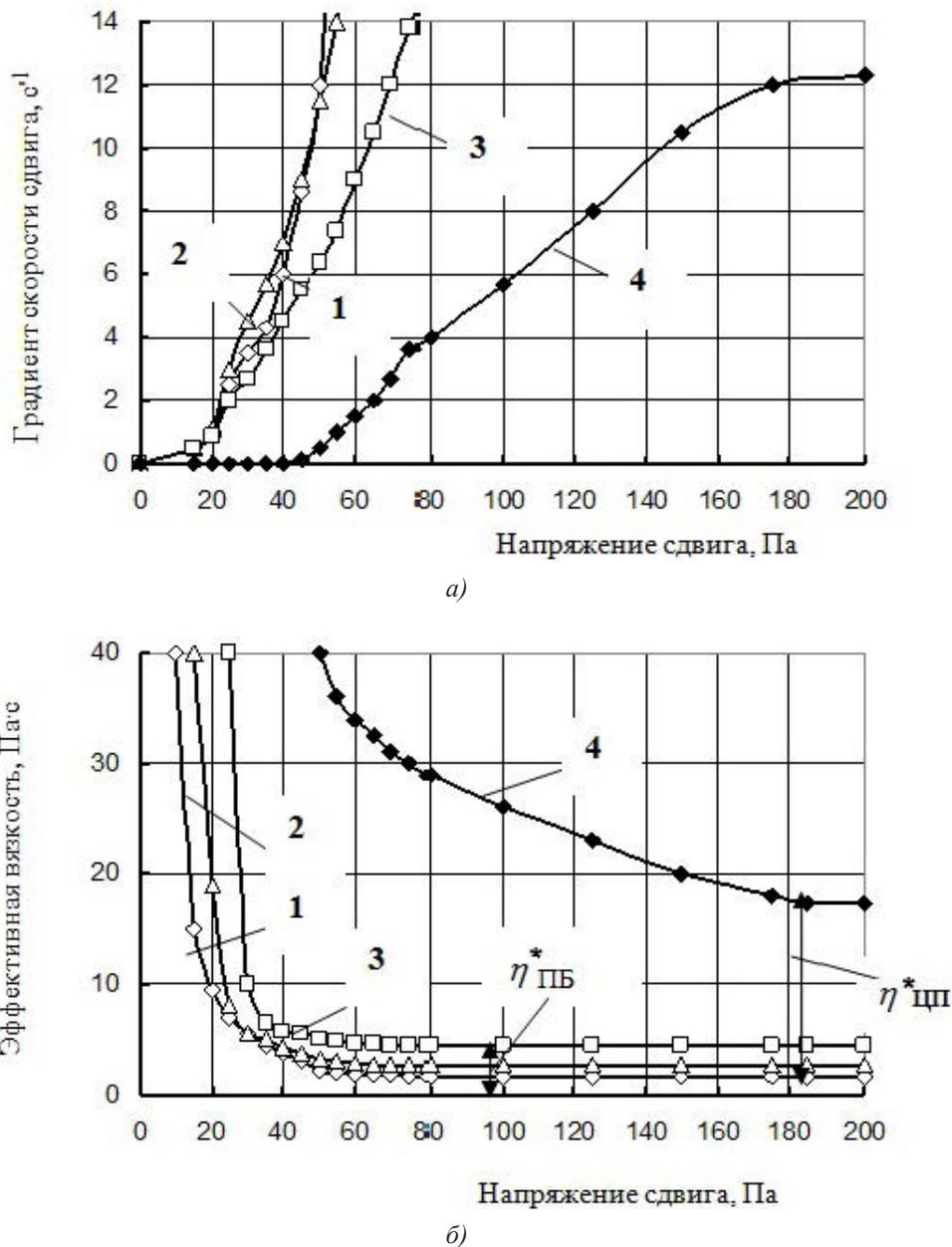
Установлено (рис. 2), что показатели  $\eta_{cp}^*$  пенобетонных смесей согласуются с величиной их средней плотности и временем приготовления смесей: чем меньше средняя минимальная эффективная вязкость, достигаемая при завершении процесса перемешивания пенобетонной смеси, тем меньше средняя плотность пенобетонной смеси.

Процесс формирования воздушных пузырьков в пенобетонной смеси существенно осложнен межчастичным и межфазным, в первую очередь, капиллярно-пленочным взаимодействием, зависящим в основном от В/Т-отношения, дисперсности и природы твердой фазы (рис. 3).

Зависимость пустотности непоризованных систем от В/Т-отношения позволяет установить область преимущественного действия пленочных и капиллярных сил. Так, например, в системах «вода — песок» и «вода — цемент» (рис. 3, кривые 1, 3, 5) при В/Т-отношениях, лежащих в диапазоне  $l_0 - l_1$ , преобладает пленочное расклинивание, при-

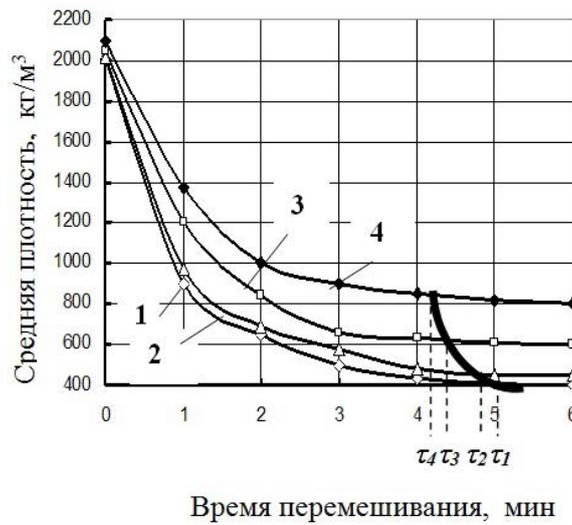
водящее к увеличению пустотности системы. При превышении В/Т-отношений, соответствующих точке  $l_1$ , преобладают капиллярные силы стяжения, способствующие уплотнению системы. Установлено, что с увеличением дисперсности песка В/Т-отношения, соответствующие точкам  $l_0$  и  $l_1$ , смещаются в сторону более высоких значений. В процессе перемешивания в системах «вода — ПАВ — песок», «вода — ПАВ — цемент» (рис. 3, кривые 2, 4, б) образование воздушных пузырьков начинает-

ся лишь с момента превышения значений В/Т-отношений, соответствующих точке  $l_1$ , то есть в области действия капиллярных сил при условии преобладания энергии образования пузырька. Такие же изменения пустотности и средней плотности характерны и для систем «вода — песок — цемент» и «вода — ПАВ — песок — цемент» (рис. 3, кривые 7, 8), то есть для пенобетонной смеси. Вышеприведенный механизм иллюстрируется графической моделью (рис. 4).

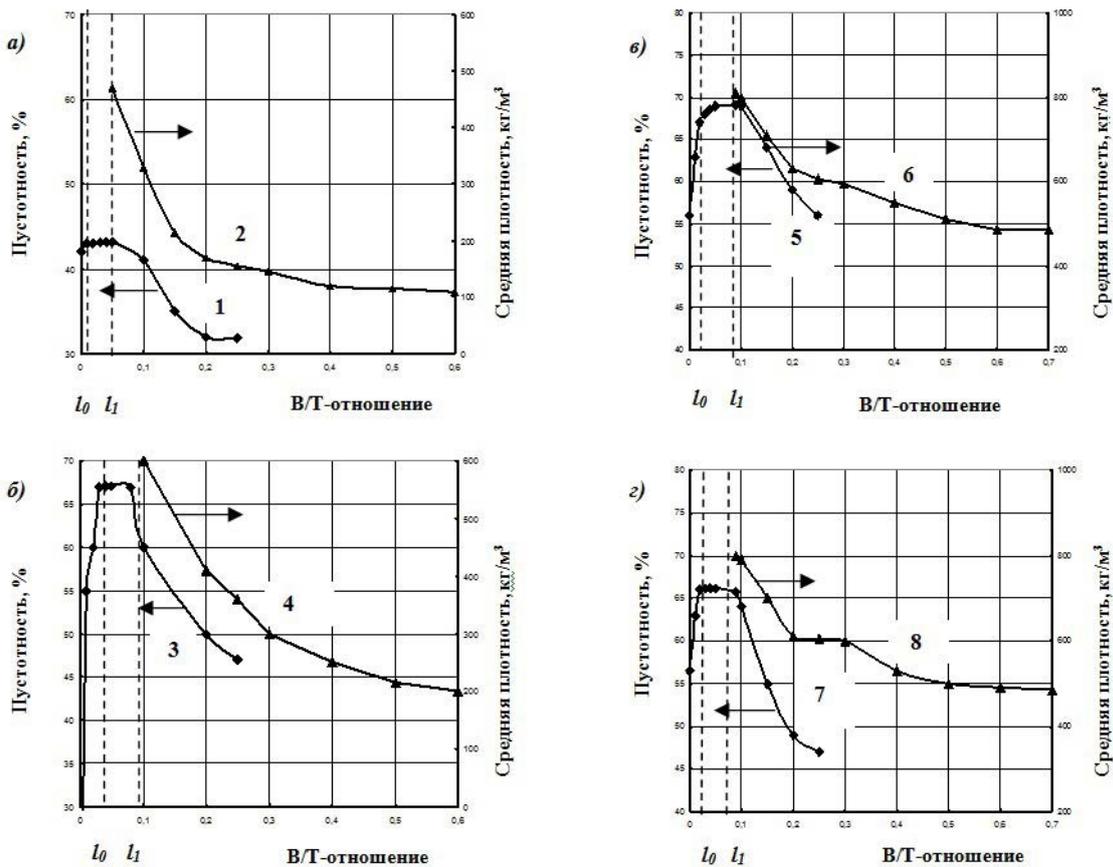


**Рис. 1.** Зависимости градиента скорости сдвига (а) и эффективной вязкости пенобетонной смеси (б) от напряжения сдвига: средняя плотность пенобетонной смеси:

1 —  $\rho = 330 \text{ кг/м}^3$ ; 2 —  $530 \text{ кг/м}^3$ ; 3 —  $850 \text{ кг/м}^3$ ; 4 — цементно-песчаный раствор ( $В/Ц = 0.65$ ).  $\eta^*_{цп}$  — минимальная эффективная вязкость цементно-песчаного раствора;  $\eta^*_{пб}$  — минимальная эффективная вязкость пенобетонной смеси



**Рис. 2.** Зависимость средней плотности пенобетона от времени перемешивания смеси:  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$  – время достижения требуемой средней плотности:  
 1 —  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3; \eta_{cp}^* = 2.24 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; 2 —  $\rho = 450 \text{ кг/м}^3; \eta_{cp}^* = 2.62 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; 3 —  $\rho = 600 \text{ кг/м}^3; \eta_{cp}^* = 3.78 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; 4 —  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3; \eta_{cp}^* = 5.33 \text{ Па}\cdot\text{с}$



**Рис. 3.** Зависимости пустотности непоризованной и средней плотности поризованной систем от В/Т-отношения и дисперсности кварцевого песка:

а) «вода — песок»,  $S_{уд\text{пес}} = 10 \text{ м}^2/\text{кг}$ : 1 — непоризованная; 2 — то же, с добавкой ПАВ; б) «вода — песок»,  $S_{уд\text{пес}} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$ : 3 — непоризованная; 4 — то же, с добавкой ПАВ; в) «вода — цемент»,  $S_{уд\text{цеи}} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$ : 5 — непоризованная; 6 — то же, с добавкой ПАВ; з) «вода — песок — цемент»,  $S_{уд\text{пес}} = 10 \text{ м}^2/\text{кг}, S_{уд\text{цеи}} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$ : 7 — непоризованная; 8 — то же, с добавкой ПАВ;  
 $l$  — межчастичное расстояние

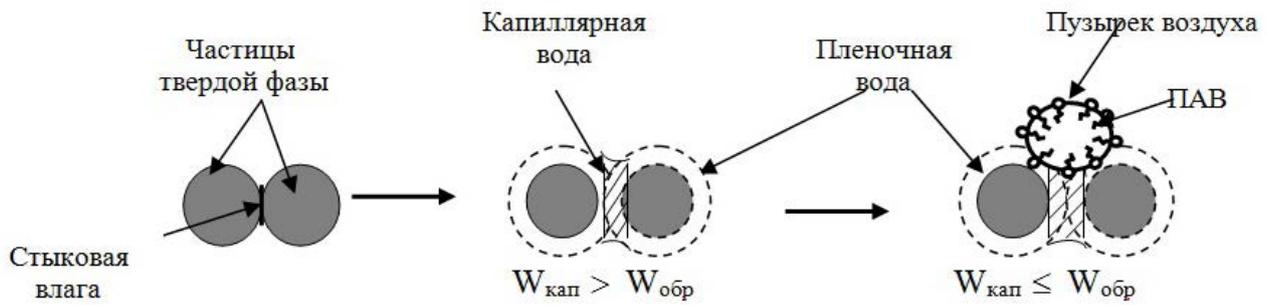


Рис. 4. Модель формирования воздушных пузырьков:

$W_{обр}$  — энергия образования пузырька;  $W_{кап}$  — энергия капиллярных сил

При равенстве капиллярных сил и сил формирования воздушных пузырьков происходит поризация системы. Установлено, что для обеспечения условий формирования замкнутой воздушной пористости с увеличением дисперсности песка необходимо увеличение В/Т-отношения. С другой стороны, увеличение размеров частиц песка ограничено условиями возникновения их относительного движения в потоке пенобетонной смеси при перемешивании. Согласно положению, приведенному в работе А. Фортье [8], применение крупных частиц может вызывать их относительное движение в потоках дисперсных систем. При перемешивании пенобетонной смеси относительное движение крупных частиц песка, приводящее к разрушению воздушных пузырьков, возникает при условии:

$$\frac{d_{част}}{D_{ном}} > \frac{10}{|\rho_{част} / \rho_{см}|^{1/3} Re^{2/3}},$$

где  $d_{част}$  — размер частицы песка, м;  $D_{ном}$  — эквивалентный диаметр потока пенобетонной смеси, образуемый лопаткой турбины, м;  $\rho_{част}$  — истинная плотность песка, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{см}$  — средняя плотность пенобетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, оптимизация дисперсности кварцевого песка определяется балансом капиллярно-пленочных сил и сил образования пузырьков. Верхняя граница дисперсности устанавливается предельно допустимой величиной В/Ц-отношения (масса воды к массе цемента), а нижняя — наличием относительного движения частиц песка. Оптимизация дисперсности песка по вышеприведенному факту показала, что эффективным в пенобетонных смесях является применение песков фракции 0.63—2.50 мм.

Результаты проведенных исследований позволили получить важную в практическом отношении экспериментальную зависимость, которая дает возможность с использованием положений гидро-

динамики оптимизировать энергозатраты на перемешивание и получать пенобетонную смесь заданной средней плотности со стабильными структурой и свойствами:

$$\rho = B \cdot D_{\text{э}} \cdot Re^{1,36} \cdot \tau^{-0,36} \text{ при } 0 \leq \tau \leq 6,$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от состава смеси и типа смесителя;  $D_{\text{э}}$  — коэффициент эффективной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  — время перемешивания пенобетонной смеси, мин;  $Re$  — критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot \rho_{cp} \cdot h_L}{\eta_{cp}^*},$$

где  $w$  — скорость вращения мешалки, м/с;  $\rho_{cp}$  — средняя плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $h_L$  — высота лопасти мешалки, м;  $\eta_{cp}^*$  — среднее значение минимальной эффективной вязкости, Па·с.

Важнейшей задачей технологии пенобетонов является обеспечение сохранности сформированных пузырьков воздуха, испытывающих при перемешивании воздействие внешних сил, определяемое динамикой рабочего органа смесителя (рис. 5).

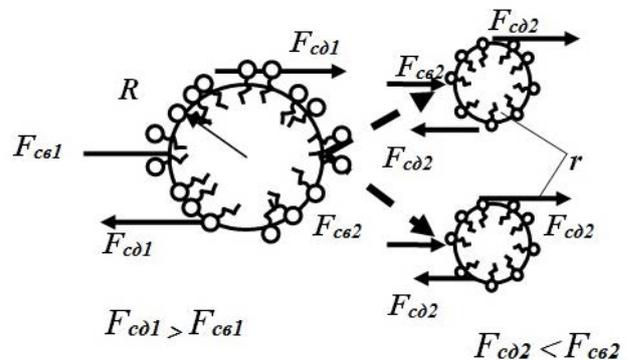


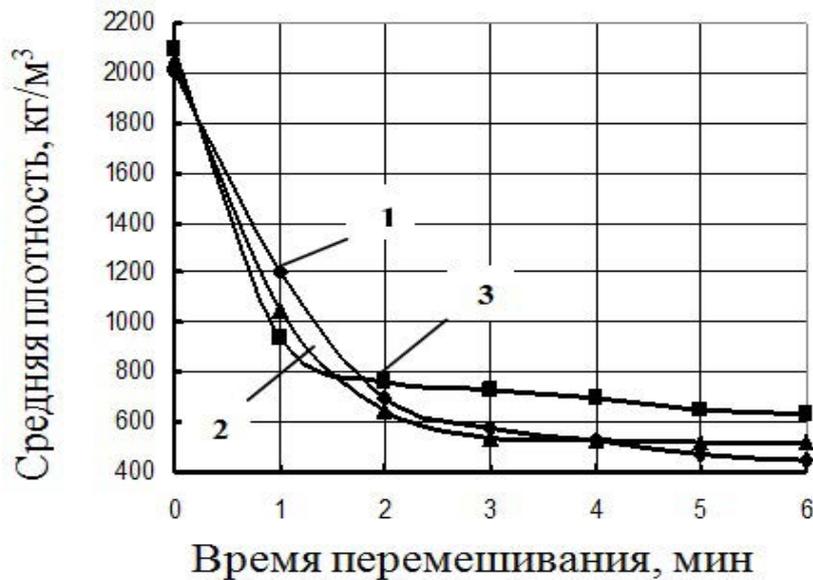
Рис. 5. Модель процесса формирования замкнутой воздушной пористости:

$F_{сд}$  — силы сдвига;  $F_{св}$  — силы связи

В свою очередь сохранность пузырьков обеспечивается внутренними силами ( $F_{ce}$ ): поверхностным натяжением, адсорбционными силами, Лапласовским давлением, зависящим от радиуса пузырька. Установлено, что формирование и сохранение замкнутой воздушной пористости определяется величиной критерия Вебера ( $We$ ), который отражает, так называемую, неустойчивость Кельвина—

Гельмгольца. Разрушение воздушной фазы происходит при выполнении условия  $We > We^* = 2\pi$ , где  $We^*$  — критическое число Вебера.

Режим перемешивания смеси характеризуется значением критерия Рейнольдса. Результаты исследований показали (рис. 6), что при режимах перемешивания с  $Re \leq 50$  обеспечивается устойчивый процесс поризации бетонной смеси.



**Рис. 6.** Изменение средней плотности пенобетонных смесей при различных режимах перемешивания:  
 1 —  $\rho = 450$  кг/м³; 2 —  $\rho = 520$  кг/м³; 3 —  $\rho = 630$  кг/м³;  $Re$ : 1 — 50.8; 2 — 59.8; 3 — 67.8

При указанных значениях  $Re$  величина  $We < 1$  и  $We^*/We$  не превышает критического значения  $2Re$ . Показана целесообразность реализации режимов перемешивания пенобетонных смесей при обеспечении условия  $35 \leq Re \leq 50$ . Таким образом, выполненные исследования подтвердили правомочность применения критериев  $We$ ,  $We^*/We$  к процессу перемешивания пенобетонных смесей. Полученные экспериментальные зависимости  $We^*/We = f(Re)$ , учитывающие соотношение вязких и инерционных сил, позволили определить области устойчивого и неустойчивого существования воздушных пузырьков при перемешивании пенобетонных смесей в смесителях турбулентного типа. Выбор рациональных величин критериев  $Re$  и  $We$  обеспечил сокращение энергозатрат на перемешивание смесей примерно на 45 % по сравнению с трехстадийной технологией.

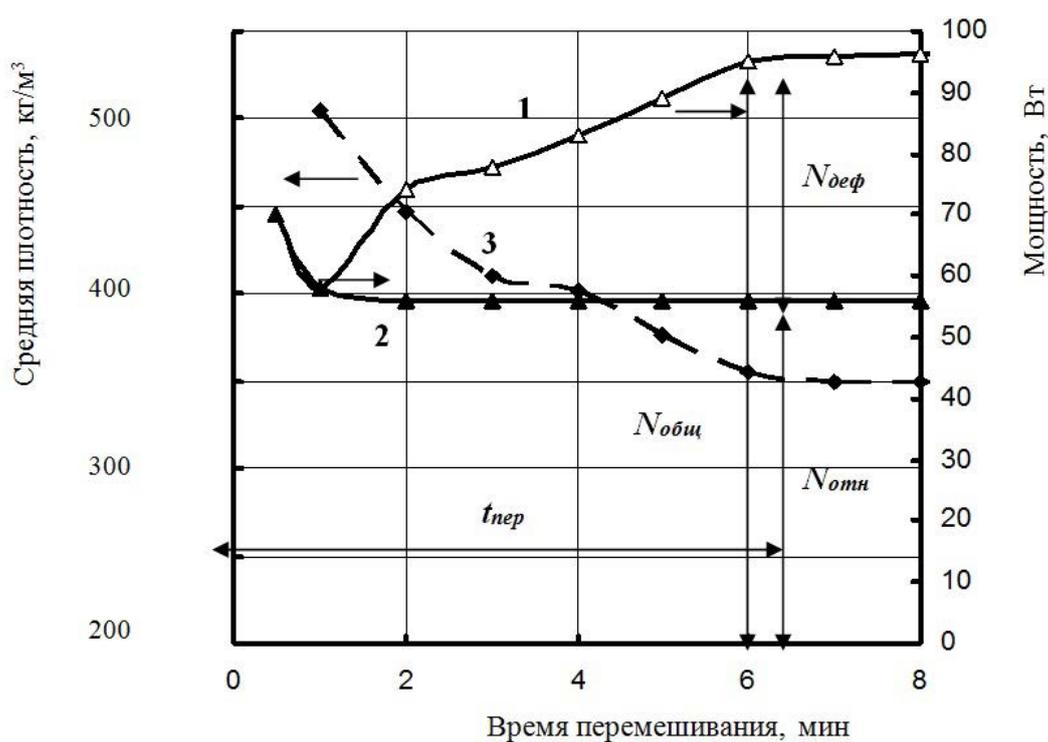
Установлено, что энергетический баланс процесса перемешивания имеет следующую структуру (рис. 7): энергия на относительное движение

фаз составляет 70—80 % общего ее расхода; на деформирование воздушных пузырьков — около 30 %, энергозатраты на формирование воздушной пористости незначительны — менее 1 %. Установленные энергетические закономерности процесса перемешивания пенобетонных смесей могут являться основой для его оптимизации.

В табл. 1 и 2 приведены физико-механические свойства пенобетонов, различающиеся соотношением содержания цемента и кварцевого песка и соответственно плотностью бетонов, полученных на основе результатов выполненных исследований.

### ВЫВОДЫ

Полученные физико-механические свойства пенобетонных смесей и пенобетонов (табл. 1), подтвердили высокую эффективность предложенных подходов при совершенствовании технологии неавтоклавных пенобетонов, достигнуты требуемые нормативные показатели пенобетонов по средней плотности и марочной прочности.



**Рис. 7.** Изменение средней плотности и потребляемой мощности во времени при перемешивании бетонных смесей: 1, 3 — поризованная смесь; 2 — непоризованная смесь

**Таблица 1.** Физико-механические свойства пенобетонов различных составов

Номер состава	Показатели свойств			
	плотность, кг/м <sup>3</sup>	прочность при сжатии, МПа	морозостойкость, циклы	коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·К)
1	350	1.52	-	0.075
2	450	1.91	-	0.09
3	530	2.25	> 30	0.11

**Таблица 2.** Результаты полупромышленных испытаний пенобетона (В/Т = 0.45; масса добавки 0.23 % от массы цемента)

Расход цемента (Ц) и песка (П) на 1 м <sup>3</sup> пенобетона, кг	$\bar{\rho}_{ПВ}^{c.c}$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент вариации по плотности, $C_v$ , %	$\bar{R}_{28сж}^{c.c}$ , МПа	Коэффициент вариации по прочности, $C_v$ , %
Ц = 250 П = 120	350	2.1	1.52	2.7
Ц = 350 П = 200	450	1.7	1.91	2.1
Ц = 450 П = 280	530	2.1	2.25	5.5

Обеспечена высокая однородность структуры пенобетонной смеси и пенобетона при его требуемой средней плотности с коэффициентом вариации менее 2.1 % (табл. 2) и при средней прочности с коэффициентом вариации менее 5.5 %. Показано, что при твердении в нормируемых ГОСТ условиях отмечен рост прочности пенобетонов в период с 28 суток до 1 года.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №16-43-360174 p\_a

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистов Ю. Д. // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*, 2003, № 8, с. 24—25.
2. Евлашин А. В. // *Пенобетон — незаменимый материал для строительства в XXI веке*, строительные

материалы, оборудование, технологии XXI века, 2008, № 9, с. 36.

3. Баженов Ю. М., Рахимов Р. З. // *Достижения, проблемы и направления развития теории и практики строительного материаловедения*, X Акад. чтения РААСН, Пенза-Казань, 2006, с. 3—7.

4. Фридрихсберг Д. А. *Курс коллоидной химии*. СПб.: Химия, 1995, 400 с.

5. Кафаров В. В. *Основы массопередачи*. М.: Высшая школа, 1979, 439 с.

6. Нигматулин Р. И. *Механика гетерогенных сред*. М.: Наука, 1978, 336 с.

7. Перцев В. Т. Дис. ... докт. техн. наук. Воронеж, 2002, 241 с.

8. Фортъе А. *Механика суспензий*. М.: Мир, 1971, 264 с.

## PHYSICO-CHEMICAL APPROACHES TO IMPROVE PROCESSES GAZOBALLONNYJ WATERED THE COARSE SYSTEM IN OBTAINING CONCRETE MIXTURES

© 2016 V. T. Pertsev, T. F. Tkachenko, O. B. Rudakov

Voronezh State Technical University, Moskovsky pr., 14, 394026 Voronezh, Russia  
e-mail: perec\_v@mail.ru

Received 13.10.2016

**Abstract.** The rheological properties of the moist particulate systems composed of particles of sand and cement in shear conditions are studied. We investigated the sorption processes of gases and formation of porous structure in turbulent mixing mode of the coarse wet system cement — sand — water — surfactant. The optimum conditions for obtaining foam concrete mixtures with stable properties are found. The instructional techniques and quantification of optimal dosage of the additive surfactant are suggested. The structure and balance of energy consumption for mixing concrete mixtures and their dependence on hydrodynamic criteria of Reynolds and Weber are defined. quantitative regularities have allowed to optimize the processes for mixing concrete mixtures and to ensure sufficiently high levels of uniformity of foam concrete according to average density (350—500 kg/m<sup>3</sup>) and strength.

**Keywords:** coarse-dispersed systems, interphase boundaries, surfactants, adsorption, mass transfer, foam-concrete mix, mixing, hydrodynamic criteria.

#### REFERENCES

1. Chistov Yu. D. *Building Materials, Equipment, Technologies of XXI Century*, 2003, no. 8, p. 24—25

2. Evlashin A. V. *Foam Concrete — Irreplaceable Material for Construction in the XXI Century, Construction Materials, the Equipment, Technologies of the 21-st Century*, 2008, no. 9, p. 36.

3. Bazhenov Yu. M., Rakhimov R. Z. *Achievements, Problems and Directions of Development of the Theory and Practice of Construction Materials Science*, X Academician of Reading RAASN, Penza-Kazan, 2006, pp. 3—7.

4. Fridrikhsberg D. A. *Course of Colloidal Chemistry*. SPb, Chemistry Publ., 1995, 400 p.

5. Kafarov V. V. *Mass Transfer Bases*. Moscow, Higher School Publ., 1979, 439 p.

6. Nigmatullin R. I. *Mechanics of Heterogeneous Environments*. Moscow, Science Publ., 1978, 336 p.

7. Pertsev V. T. Dis. ... doct. tekhn. nauk.. Voronezh, 2002, 241 p.

8. Fortye A. *Mechanics of Suspensions*. Moscow, World Publ., 1971, 264 p.

*Перцев Виктор Тихонович* — д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: +7 (908) 1419555, e-mail: perec\_v@mail.ru

*Ткаченко Татьяна Федоровна* — к. т. н., доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет; тел.: +7 (951) 8653074, e-mail: ttf@voon.ru

*Рудаков Олег Борисович* — д. х. н., профессор, заведующий кафедрой химии, Воронежский государственный технический университет; тел.: +7 (912) 2453083, e-mail: rudakov@vgasu.vrn.ru

*Perzev Victor T.* — Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; ph.: +7 (908) 1419555, e-mail: perec\_v@mail.ru

*Tkachenko Tatyana F.* — Can. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Voronezh State Technical University; ph.: +7 (951) 8653074, e-mail: ttf@voon.ru

*Rudakov Oleg B.*, — Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of Chemistry, Voronezh State Technical University; ph.: +7 (912) 2453083, e-mail: rudakov@vgasu.vrn.ru