

УДК 66.021+621.69+532.135+691.327.332

## ПОВЫШЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ЖИДКИХ ГАЗОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ИХ ВИБРОПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2019 г. Ю. С. Сергеев<sup>1</sup>, А. А. Дьяконов<sup>1</sup>, С. В. Сергеев<sup>1</sup> \*, Е. Н. Гордеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия

\*E-mail: sergeevsv@susu.ru

Поступила в редакцию 19.12.2018 г.

После доработки 20.03.2019 г.

Принята к публикации 19.04.2019 г.

Показано, что вектор технического перевооружения стройиндустрии перенаправлен в сторону широкого применения ячеистых бетонов. Проанализирована рецептура, достоинства таких материалов и отмечены технологические трудности их получения. Наиболее трудным является обеспечение однородности быстрым перемешиванием газобетонных смесей из различных компонентов по составу и весовым частям до начала процессов интенсивного газообразования, газоудержания и тем более затвердевания. Устранить эти трудности удалось, применив новый способ виброструйного перемешивания как бингамовских, так и ньютоновских сред. По сути принудительная высокочастотная вибрация повышает тиксотропность смеси вне зависимости от числа компонентов, их массы и физико-механических свойств. Вместе с тем регулированием параметров вибрационного воздействия на смесь повышают циркуляцию и взаимодействие генерируемых затопленных струйных потоков. Разработаны реологические модели для определения технических характеристик вибропривода смесителя, а также технологических параметров процесса. Суперкомпьютерное моделирование различных сценариев виброструйного перемешивания в программе FlowVision позволило визуализировать и оптимизировать режимы для полного исключения в смесителе застойных зон. В ходе натурального эксперимента из газобетонных смесей, полученных центробежным способом и виброперемешиванием, были изготовлены контрольные образцы. Их сравнение проводилось как по показателям роста, так и прочности в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Полученные результаты показали высокую эффективность нового способа приготовления смесей и изделий из газобетона.

*Ключевые слова:* газобетонные смеси, виброструйное перемешивание, моделирование FlowVision, прочностные испытания образцов

DOI: 10.1134/S0040357119050105

### ВВЕДЕНИЕ

В мировых тенденциях и особенностях технического перевооружения, а соответственно, и модернизации предприятий стройиндустрии в настоящее время наблюдается сдвиг в направлении широкого применения в строительстве ячеистого бетона [1]. Это объясняется тем, что легкие бетоны признаны наиболее перспективными стеновыми материалами, поскольку изделия из них, обладая малой массой, но высокими теплоизоляционными свойствами позволяют возводить несущие стены в 2–3 этажа, а в комбинации с кирпичом и железобетонными изделиями и более высокие сооружения [2–4]. Среди легких бетонов с точки зрения дешевизны производства и простоты управления требуемыми эксплуатацион-

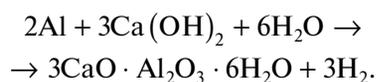
ными свойствами (прочность, морозостойкость, гигроскопичность, теплоизоляционность, долговечность и т.п.) получаемых строительных изделий наиболее перспективными являются газобетоны [5–7].

Газобетонные смеси — это строительные растворы, получаемые из вяжущих веществ (цемент, магнезиальные — оксид магния, каустический магнезит и т.п.), мелкодисперсных заполнителей (кварцевый песок, зола уноса), специальных модифицирующих добавок, газообразователей (алюминиевая паста или пудра) и воды. На практике требуемые эксплуатационные свойства изделий из ячеистого бетона любой марки обеспечивают оптимальным подбором количественного и качественного состава его компонентов [8, 9]. Причем

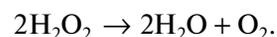
при подборе компонентов смесей сегодня уже рекомендуют учитывать последние достижения в области диспергирования вязких [10] и хрупких материалов [11], в частности такие показатели, как требуемые однородность и геометрия дисперсных частиц, поскольку они в значительной степени определяют эксплуатационные свойства изделий [12, 13]. В последнее время производители для улучшения свойств газобетона в смесь дополнительно вводят различные модифицирующие добавки: полуводный гипс, микрокремнезем, ускоритель твердения – хлорид кальция [14]. Наиболее перспективными в этом отношении являются дисперсно-армирующие волокна как искусственного (полимерное волокно различного состава, стекловолокно и т.д.), так и природного происхождения (асбестовое, базальтовое волокно) [15–17]. При наличии большого числа компонентов производство газобетона сопряжено с объективными трудностями приготовления смесей, а именно, эта проблема заключается в необходимости получения высокооднородной смеси за короткий промежуток времени на этапе введения реагента, о чем неоднократно упоминалось в работах [12, 18]. Аналогичные выводы делают и специалисты в области перемешивания ньютоновских сред центробежным способом [19–21]. Однако традиционные способы перемешивания и смесители не в состоянии в большом объеме наполнителя (в кг или м<sup>3</sup>) быстро равномерно распределить мелкодисперсные компоненты газообразователя, ускорителя твердения, дисперсно-армирующих волокон и т.п., которые, в зависимости от рецептуры, вводятся в полужидкую смесь в незначительных количествах (в мг или мм<sup>3</sup>). Неоднородность смеси возникает из-за наличия в традиционных смесителях так называемых мертвых зон, находящихся за пределами работы подвижных частей активатора. В этих зонах, как правило, смесь малоподвижна, поэтому требуется дополнительное время для ее перемешивания. При увеличении времени перемешивания процесс газообразования начинает происходить уже в смесителе. Это приводит к потере интенсивности реакции газообразования, а соответственно, и к уменьшению пористости структуры бетона и низкому качеству изделия.

Преднамеренное сокращение же времени перемешивания при традиционном способе приводит к неоднородности структуры смеси, а следовательно, к неравномерной пористости изделия и, тем более, не симметричной его форме (образуется большая срезаемая горбушка). Поэтому главным требованием к процессу получения газобетонных смесей из различных по количеству и объему компонентов является обеспечение максимальной однородности структуры за короткий временной отрезок (2–3 мин). Другими словами, необходимо тщательно приготовить смесь до на-

чала процесса интенсивного газовыделения, поскольку излишняя продолжительность перемешивания смеси вредна и приводит к нарушению процесса газоудержания. При полном же соблюдении такого требования будет гарантировано стабильное получение изделий с заданными эксплуатационными характеристиками, а структура газобетона должна характеризоваться равномерно распределенными мелкими порами правильной шаровидной формы [8]. Важно отметить, что формы, в которых вспучивается и твердеет газобетон, нельзя передвигать, подвергать сотрясениям и ударам, так как вспученная, но незатвердевшая масса может при этом осесть. Процесс производства ячеистого бетона напоминает выпекание бисквита (кондитерского хлеба) [22–24], поскольку возникают точно такие же проблемы с пористостью изделия из-за нарушения процесса газоудержания. Большинство производителей газобетона из-за несовершенства технологии перемешивания (применяются газобетономешалки пропеллерного типа) в погоне за производительностью, даже в ущерб улучшенным свойствам изделий, преднамеренно вынуждены уходить на более простую рецептуру – с наименьшим числом компонентов смесей [25], т.е. в составе смеси используют портландцемент, молотый кварцевый песок, воду и газообразователь. В качестве газообразователя одни производители используют наиболее распространенный алюминиевый порошок (пудра) в смеси с тонкомолотой негашеной известью. При взаимодействии алюминия с гидратом окиси кальция происходит реакция с выделением водорода



Выделяющийся водород вспучивает смесь, которая при затвердении образует пористую структуру бетона. Длительность процесса газообразования при использовании алюминиевого порошка 10–20 мин. Другие производители в качестве газообразователя применяют водный раствор перекиси водорода. Это нестойкое соединение, при добавлении в состав бетонной смеси, легко разлагается в щелочной среде с выделением кислорода, образующего пористую структуру бетона, по реакции



Но при разложении пергидроля выделение кислорода протекает быстрее (в течение 7–10 мин), чем при газообразовании с использованием алюминиевого порошка, а период вступления в реакцию любого из этих газообразователей составляет всего 1–2 мин. Поэтому всего за пару минут перемешиванием необходимо успеть равномерно распределить газообразующий реагент во всем имеющемся объеме бетонной смеси. Это позволит получить газобетон с равномерной пористостью

структуры. Сокращение времени перемешивания позволит в полной мере использовать газовыделяющую способность газообразователей, чтобы бетонная смесь могла легко вспучиваться и в то же время обладала бы достаточной пластической вязкостью, исключаящей прорыв сквозных путей и свободное удаление газа. Поэтому в процессе приготовления газобетона сначала вода, а затем вяжущее и кремнеземистая добавка поступают в бетономешалку, после перемешивания смеси вводят водную суспензию алюминиевой пудры, и некоторое время перемешивают все ингредиенты, а сразу же по окончании перемешивания газобетонную смесь выгружают в формы с расчетом на последующее увеличение объема бетонной смеси при вспучивании.

В настоящее время в стройиндустрии все шире внедряется в технологию производства шлакоблоков способ комплексной вибрации, позволяющий снизить содержание воды в смесях на 40–45%. В этом случае вибрация обеспечивает тиксотропное состояние полусухой бетонной смеси, что делает ее достаточно подвижной и податливой для хорошего уплотнения при уменьшенном содержании воды. Поэтому по аналогии для увеличения тиксотропности газобетонной смеси целесообразнее всего было бы применить вибрационное перемешивание [18, 21, 26–30].

В связи с изложенным целью работы является исследование технологических возможностей и практическая реализация нового способа вибро-струйного перемешивания [27, 31] для повышения однородности жидких газобетонных смесей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для реализации процесса вибрационного перемешивания газобетонной смеси была разработана установка, изображенная на рис. 1. Интенсификация процесса перемешивания газобетонной смеси в вибросмесителе обеспечивается взаимодействием встречных затопленных циркулирующих потоков  $I$  смеси [31]. Формирование же этих множественных потоков обеспечивает рабочий орган — ротор 2 с дисками 3, перфорированными коническими отверстиями 4. В процессе перемешивания ротору 2 с дисками 3 принудительно сообщают вращение  $\omega_{вр}$  от привода 5 через ременную передачу 6 и радиальные (круговые) колебания  $\omega$  от регулируемого вибровозбудителя 7 в соответствии со способом, описанным в [32]. Ротор 2 размещен в емкости 8 с возможностью вращения и покачивания посредством шруса 9, защищенного уплотнителем 10. Диски 3 при совместном вращении  $\omega_{вр}$  и колебаниях  $\omega$ , покачиваясь в осевом направлении, принудительно прокачивают через конические отверстия 4 смесь, обладающую упругими и вязки-

ми свойствами. Изменяя параметры  $\omega_{вр}$  и  $\omega$ , управляют траекториями потоков  $I$  смеси в трехмерном пространстве, а значит, и интенсивностью процесса перемешивания. Поскольку на интенсивность процесса будут влиять состав и физические свойства компонентов смесей, то необходимо выяснить, как они будут влиять на технологические параметры вибропривода под нагрузкой. Задачи динамики машин с упругими связями под нагрузкой решаются методами реологии, т.е. для получения уравнений динамики вычисляют упруго-вязкие силы, которые связаны с напряжением  $\sigma$  в упруго-вязком теле выражением

$$P_{упр} = \sigma S = (E\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon})S. \quad (1)$$

Выразив деформацию  $\varepsilon$  и скорость деформации  $\dot{\varepsilon}$  смеси через путь и скорость в декартовой системе координат, получим

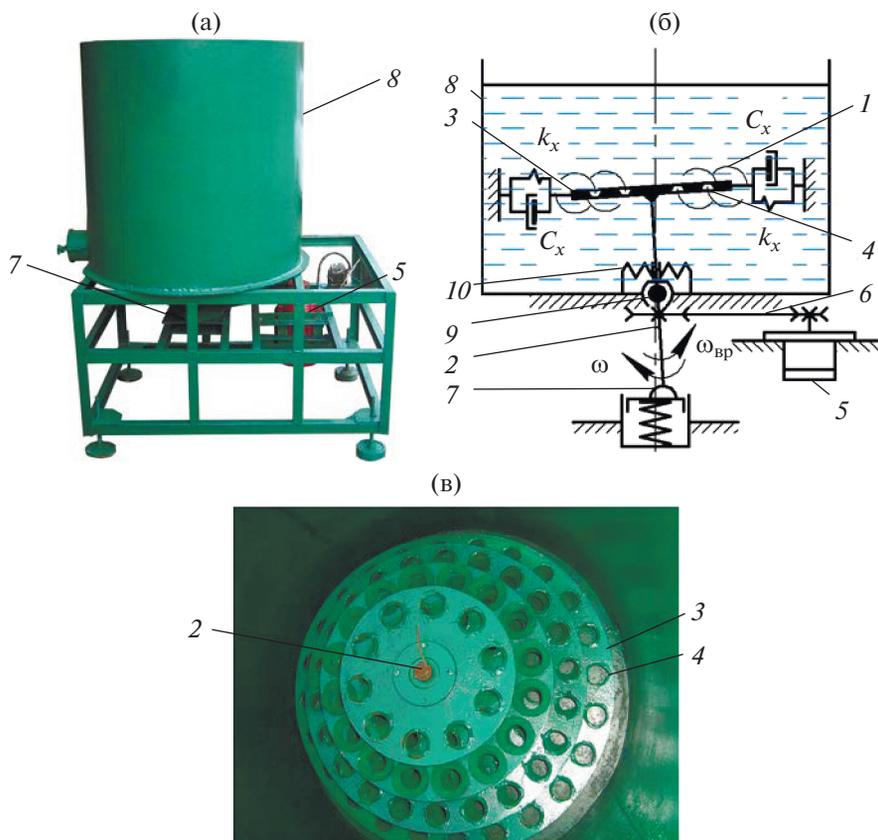
$$P_{упр,x} = k_x x + C_x \dot{x}; \quad (2)$$

$$P_{упр,y} = k_y y + C_y \dot{y}. \quad (3)$$

В этих выражениях члены с упругими элементами  $k_x, k_y$  и демпферы с коэффициентами вязкости  $C_x, C_y$  отражают восстанавливающие силы, пропорциональные амплитуде колебаний  $p$ , и силы сопротивления, пропорциональные частоте радиальных (круговых) колебаний  $\omega$  диска 3. Величины  $k$  и  $C$  вычисляются для конкретных условий работы вибросмесителя отдельно. Заметим, что в соответствии с рис. 1 тарелка ротора 2 вибровозбудителя 7 посредством шруса 9 имеет возможность слегка покачиваться и перемещаться практически в горизонтальной плоскости, т.е. совершать плоскопараллельное движение. Поэтому пренебрегая деформациями элементов системы (деформациями дисков 3 и стебля ротора 2), можно упростить схему взаимодействия устройства возбуждения колебаний со средой и представить ее в одной из координатных плоскостей. Расчетная схема работы вибровозбудителя в упруго-вязкой среде показана на рис. 2.

На схеме вибровозбудитель 7 и масса колебательной системы смеси показаны сосредоточенной массой  $M$ , упруго-вязкие элементы среды изображены в виде параллельно соединенных пружин и демпфера. Пружины характеризуются жесткостью  $k_x, k_y$  и создают восстанавливающую силу, пропорциональную их деформации  $x, y$  —  $k_x x, k_y y$ ; демпфер моделирует гистерезисные потери в упругой системе, пропорциональные скоростям деформации в декартовой системе  $\dot{x}, \dot{y}$  и зависящие от коэффициента вязких сопротивлений  $C_x, C_y$ . Сила вязких сопротивлений упругого элемента равна  $C_x \dot{x}, C_y \dot{y}$ .

Принятая реологическая модель достаточно точно моделирует влияние реальной упруго-вяз-



**Рис. 1.** Опытный газобетонный вибросмеситель: (а) – общий вид; (б) – принципиальная схема взаимодействия вибровозбудителя с упруго-вязкой средой; (в) – ротор с перфорированными дисками; 1 – циркулирующие потоки; 2 – ротор; 3 – диски; 4 – конические отверстия; 5 – привод; 6 – ременная передача; 7 – вибровозбудитель; 8 – емкость; 9 – шрус; 10 – уплотнитель.

кой среды на вибропривод смесителя. Возбуждение радиальных колебаний  $\omega$  вибровозбудителя 7 осуществляется вращающимся и совершающим круговые планетарные движения ротором, сосредоточенная масса тарелки и амплитуда радиальных (круговых) колебаний ротора равны соответственно  $m$  и  $\rho$ , а частота круговых колебаний ротора равна  $\omega$ . Считаем, что ротор 2 находится в

центре инерции вибровозбудителя. А при работе вибровозбудителя 7 ротор 2 кинематически создает вращающуюся возмущающую силу  $m\rho\omega^2$  [32, 33].

На основании метода Лагранжа уравнения движения вибровозбудителя 7 в упруго-вязкой среде будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + C_x\dot{x} + k_x x = m\rho\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + m\rho\ddot{\varphi} \sin \varphi, \\ (M + m)\ddot{y} + C_y\dot{y} + k_y y = m\rho\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - m\rho\ddot{\varphi} \cos \varphi, \\ (I + m\rho^2)\ddot{\varphi} = M_{кр} + m\rho\ddot{x} \sin \varphi - m\rho\ddot{y} \cos \varphi - mgr \cos \varphi - \\ - \frac{1}{2} f_{п} D_{п} m (\rho\dot{\varphi}^2 - \ddot{x} \cos \varphi - \ddot{y} \sin \varphi) - M_{тр}. \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) позволяет проанализировать движение вибровозбудителя на холостом ходу (в отсутствие рабочих сопротивлений) в любом режиме работы – при пуске и выбеге, в установившемся движении. Для исследования установившегося режима работы систему можно суще-

ственно упростить, полагая  $\ddot{\varphi} = 0$ ,  $\dot{\varphi} = \omega$ . Решив эти дифференциальные уравнения, удалось теоретически определить основные технологические параметры, характеризующие колебательный процесс. А это, в свою очередь, позволило определить мощность, затрачиваемую на поддержание уста-

новившихся колебаний на холостом ходу. Затем исследовали влияние свойств среды на характеристики колебательного процесса. В частности, установлено, что при взаимодействии перфорированных дисков с упруго-вязкой средой амплитуда его принудительных колебаний изменяется в зависимости от свойств упруго-вязкой среды и массы колебательных элементов; частота колебаний остается неизменной; между перемещением ротора и составляющими, давление на упруго-вязкую среду имеет сдвиг фаз, колебания системы, так же как и колебания ротора, круговые, в случае однородности свойств среды во всех направлениях.

Для достижения поставленной цели и определения рациональных технологических параметров процесса выполнено его компьютерное моделирование. Поскольку виброперемешивание газобетонных смесей – это быстропротекающие процессы практически в бингамовских средах [34–36], то целесообразнее использовать топологический метод моделирования [26, 37]. Для достоверности, более полного и наглядного представления таких процессов [26, 27] посредством суперкомпьютерных ресурсов ЮУрГУ [38, 39] и программного продукта FlowVision были выполнены расчеты скоростей потоков сред, оптимальные временные характеристики при переменных амплитудно-фазочастотных параметрах вибропривода. На рис. 3 приведен пример полученного результата вычислений. Интенсивность процесса виброперемешивания оценивается по шкале скорости и густоте потоков. Из рис. 3 видно, что в таком смесителе практически отсутствуют зоны застоя.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При проверке стабильности процесса виброперемешивания для получения однородной многокомпонентной газобетонной смеси сначала его промоделировали. При этом был определен диапазон наиболее благоприятных режимов ( $\omega_{вр} = 3–5$  рад/с,  $\omega = 3–10$  рад/с). Затем эти режимы были воспроизведены при натурном эксперименте с использованием опытной установки (см. рис. 1). Для сравнения технологических возможностей перемешивание смеси производили двумя способами. Сначала установку настраивали на работу в режиме тривиальной пропеллерной мешалки (на рисунках условно не показано), т.е. без вибраций рабочего органа. Затем установку перенастраивали на виброперемешивание смеси в режиме высокочастотного вибросмесителя. В обоих случаях на перемешивание одинакового весового количества компонентов по одинаковой рецептуре было затрачено одинаково по две, три минуты работы установки. После разливки готовых смесей по формам в первом случае (традици-

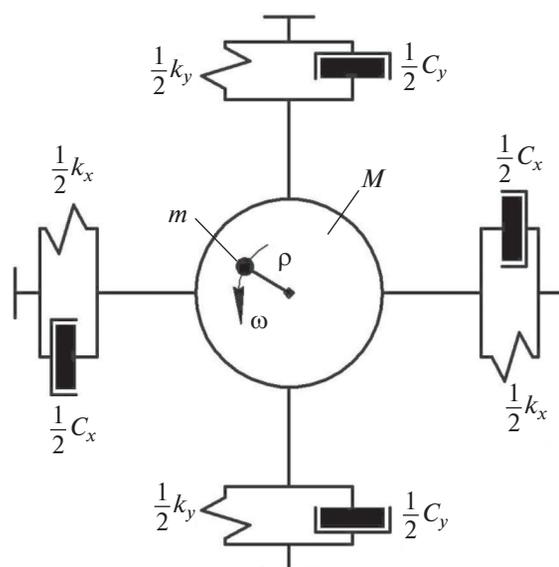


Рис. 2. Гармонический осциллятор с вибровозбудителем планетарного типа.

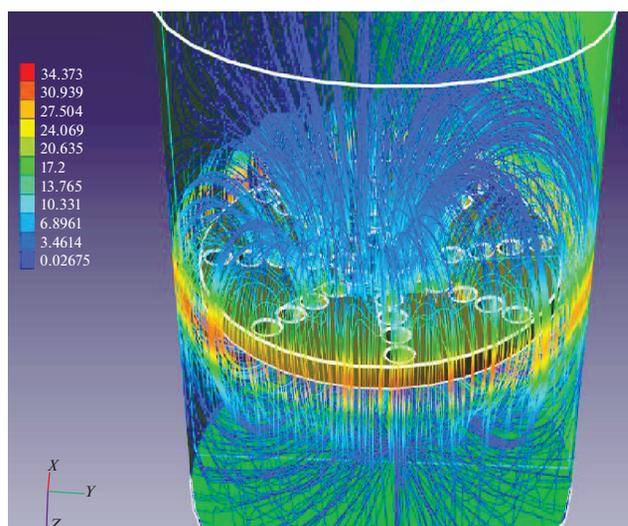
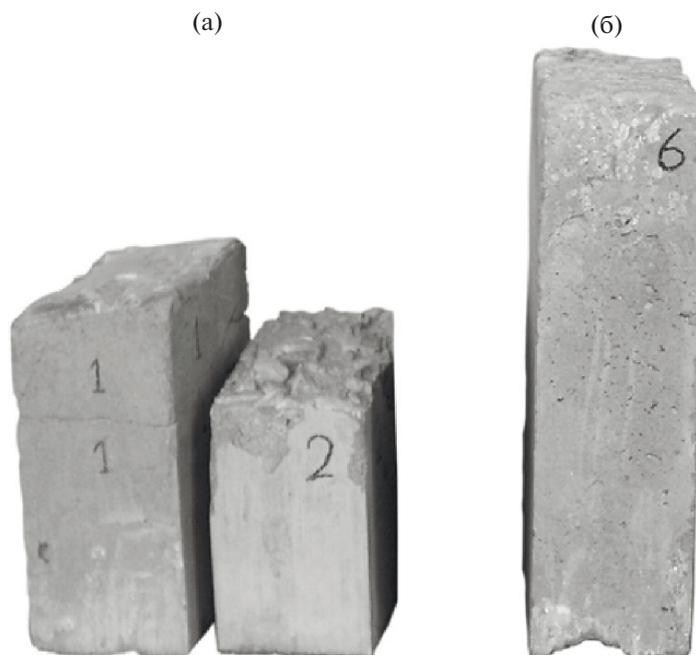


Рис. 3. Результат компьютерного моделирования виброперемешивания ( $\omega_{вр} = 5$  рад/с,  $\omega = 4$  рад/с).

онное перемешивание) просматривался незначительный (порядка 30–40%) и, главным образом, неравномерный рост смеси из-за ее неоднородности, т.е. в верхней части образца образовывалась несимметричная корка (срезаемая горбушка до 15–20 мм, рис. 4а), а пористость изделия была неравномерной. Во втором случае процесс виброперемешивания протекал гораздо интенсивнее (вместе с тем наблюдалось виброкипение пульпы), а уже через одну минуту смесь была высокооднородной по качеству. После ее разливки, прямо в формах был замечен более интенсивный процесс газообразования, а рост вспученной сме-



**Рис. 4.** Образцы из газобетона: (а) — после традиционного центробежного перемешивания; (б) — после виброперемешивания.

си составил до 250%. При этом затвердевший продукт всегда получался с более равномерной пористостью, а срезаемая горбушка у блоков была незначительной (в пределах 7–8 мм) (см. рис. 4б). Повышение скорости вращения рабочего органа  $\omega_{вр}$  при перемешивании смеси в режиме пропеллерной мешалки не позволило за то же время 2–3 мин добиться улучшения однородности смеси, а соответственно, сколь существенного его роста при газообразовании. Это происходило потому, что при повышении скорости  $\omega_{вр}$  даже визуально наблюдалось преобладание центробежных потоков смеси и одновременно появлялись застойные зоны в виде воронки вокруг вала. Увеличение времени перемешивания при любых скоростях  $\omega_{вр}$  приводило к уменьшению роста смеси в форме, поскольку газовыделение начинало происходить уже во время перемешивания до разлива ее по формам.

Отметим, что в соответствии с [40] основными характеристиками процесса получения суспензий являются интенсивность и эффективность, а также расход энергии на проведение процесса. В целом эффективность перемешивания можно охарактеризовать равномерностью распределения дисперсной фазы в сплошной. Интенсивность перемешивания определяется количеством энергии, подводимой в единицу времени к единице объема или массы перемешиваемой среды. Поскольку [40] на интенсивность перемешивания влияет главным образом характер движения жидкой среды в смесителе, то при новом спо-

собе перемешивания [31] наряду с организацией управляемых смешанных течений в виде множества взаимодействующих вращающихся затопленных струй дополнительно обеспечена и высокая виброподвижность среды [30]. Такая совокупность эффектов для перемешивания одних и тех же компонентов и объемов смеси позволяет обеспечить лучшую равномерность распределения дисперсной фазы в сплошной быстрее (всего за 1–2 мин), чем при использовании пропеллерной мешалки. А это значит, что для совершения одной и той же работы посредством виброструйной мешалки за меньшее время будет затрачено меньше энергии. Поэтому эффективность предлагаемого процесса будет выше.

Для достоверного сравнения полученных результатов каждый эксперимент проводился не менее 50 раз, а ограничивался только наиболее востребованными рецептурой смесей и марками газобетона. Затем полученные контрольные образцы в виде кубиков с размером ребра 150 мм подвергались прочностным испытаниям по стандартной процедуре в соответствии с ГОСТ 10180-2012.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты в теоретической и экспериментальной частях работы позволяют заключить, что предложенный виброструйный способ приготовления газобетонной смеси эффективнее центробежных, существующих в промышленности. Это объясняется тем, что принудительная виб-

**Таблица 1.** Характеристики газобетона

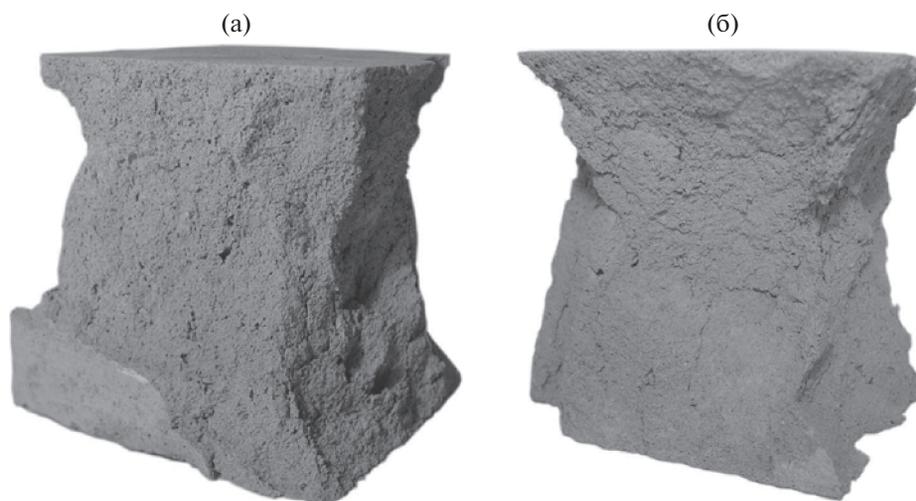
| Характеристики                                                    | Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup> |      |      |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------|------|
|                                                                   | 600                                         | 1000 | 1400 |
| Прочность на сжатие, МПа                                          | 3.55                                        | 6.45 | 10.6 |
| Пористость, %                                                     | 73                                          | 63   | 42   |
| Водопоглощение (по объему), %                                     | 40                                          | 33   | 28   |
| Теплопроводность, Вт/(м К)                                        | 0.14                                        | 0.23 | 0.3  |
| Снижение прочности, % при цикличности (морозостойкости) 20 циклов | 11                                          | 14   | 16   |

рация позволяет ослабить межмолекулярные связи и, снизив динамическую вязкость смеси, приводит ее к тиксотропному состоянию. Вместе с тем принудительное формирование множества колеблющихся затопленных потоков в жидкой бингамовской среде заставляет их активно циркулировать и взаимодействовать между собой одновременно во всем объеме. А моделирование процесса (см. рис. 3) доказало полное исключение застойных зон. Кроме того, организация процесса вихревого перемешивания жидких сред позволяет управлять как его производительностью, так и качеством продукта в зависимости от числа компонентов и их физико-механических свойств. О том, что поставленная цель достигнута свидетельствуют полученные результаты. В частности, технические характеристики и некоторые основные качественные показатели газобетона, полученного виброперемешиванием, приведены в табл. 1, а на рис. 5 показаны примеры контрольных образцов с характерно правильным разрушением после прочностных испытаний.

Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность предлагаемого усовершенствования процесса смешивания, позволяющего получать равномерную пористую структуру материала, о чем свидетельствует срез полученного пористого газобетонного изделия на рис. 5.

Дальнейшее развитие работы предполагается в отладке технологического процесса получения качественных газобетонов на различном связующем и внедрение в производство. Ожидается экономический эффект от повышения качества продукции и улучшения эксплуатационных свойств. Возможно получение изделий плотностью до 800 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при сжатии более 6.9 МПа. При применении пергидроля возможно получение конструктивных разновидностей газобетона

ных образцов с характерно правильным разрушением после прочностных испытаний.



**Рис. 5.** Контрольные образцы (150 × 150 × 150 мм) газобетонных конструктивно-теплоизоляционных блоков: (а) — марки 35; (б) — марки 50.

с плотностью до 1200 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при сжатии – до 11.7 МПа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая скорость приготовления однородной смеси обеспечивается повышением ее тиксотропности путем применения нового способа виброструйного перемешивания. Это, в свою очередь, позволило максимально повысить эффективность процессов газообразования и газоудержания до начала затвердевания газобетонной смеси. Тем самым удалось повысить и стабилизировать качество (прочность, теплоизоляционность, гигроскопичность, морозостойкость, долговечность и др.) строительных изделий из ячеистого бетона по сравнению с традиционными способами изготовления.

Изучена реология нового процесса виброперемешивания. Это позволило определить технологические параметры и технические характеристики вибропривода принципиально нового смесителя.

Для компьютерного моделирования быстропротекающих процессов виброперемешивания бингамовских сред применен топологический метод. А суперкомпьютерные ресурсы ЮУрГУ и программный пакет FlowVision позволили не только визуализировать, но и оптимизировать технологические параметры получения многокомпонентных смесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 9.7960.2017/ВР).

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

|         |                                                                               |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $C_x$   | коэффициент, учитывающий вязкость среды по оси $X$                            |
| $C_y$   | коэффициент, учитывающий вязкость среды по оси $Y$                            |
| $D_{п}$ | диаметр подшипника в шрусе, м                                                 |
| $E$     | модуль упругости среды, Па                                                    |
| $f_{п}$ | коэффициент трения в шрусе                                                    |
| $g$     | ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>                                |
| $I$     | момент инерции системы, приведенный к оси вибровозбудителя, кг м <sup>2</sup> |
| $k_x$   | коэффициент, учитывающий упругость среды по оси $X$                           |
| $k_y$   | коэффициент, учитывающий упругость среды по оси $Y$                           |
| $M$     | совокупная масса всей колебательной системы (вибровозбудителя и смеси), кг    |

|                  |                                                                                          |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $M_{кр}$         | крутящий момент привода, Н м                                                             |
| $M_{тр}$         | момент трения качения подвижных частей вибровозбудителя, Н м                             |
| $m$              | масса тарелки ротора, генерирующая радиальные колебания вибровозбудителя, кг             |
| $P_{упр}$        | упруго-вязкая сила сопротивления смеси, Н                                                |
| $S$              | площадь поверхности перфорированного диска, взаимодействующего со средой, м <sup>2</sup> |
| $x$              | перемещение смеси по оси $X$ , м                                                         |
| $\dot{x}$        | скорость перемещения смеси по оси $X$ , м/с                                              |
| $\ddot{x}$       | ускорение перемещения смеси по оси $X$ , м/с <sup>2</sup>                                |
| $y$              | перемещение смеси по оси $Y$ , м                                                         |
| $\dot{y}$        | скорость перемещения смеси по оси $Y$ , м/с                                              |
| $\ddot{y}$       | ускорение перемещения смеси по оси $Y$ , м/с <sup>2</sup>                                |
| $\epsilon$       | деформация смеси, %                                                                      |
| $\dot{\epsilon}$ | скорость деформации смеси, с <sup>-1</sup>                                               |
| $\mu$            | вязкость среды, Па с                                                                     |
| $\rho$           | амплитуда колебаний вибропривода, м                                                      |
| $\sigma$         | напряжения в упруго-вязком теле, Па                                                      |
| $\varphi$        | угол сдвига фаз колебаний, рад                                                           |
| $\omega$         | частота радиальных колебаний вибропривода, рад/с                                         |
| $\omega_{вр}$    | частота вращения ротора, рад/с                                                           |

### ИНДЕКСЫ

|     |                     |
|-----|---------------------|
| $x$ | свойства по оси $X$ |
| $y$ | свойства по оси $Y$ |

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П. Ячеистый бетон как испытанный временем материал для капитального строительства стен // Строит. матер. 2004. № 3. С. 44.
2. Ватин Н.И., Горшков А.С., Корниенко С.В., Пестряков И.И. Потребительские свойства стеновых изделий из автоклавного газобетона // Строит. уник. зданий сооруж. 2016. № 1. С. 78.
3. Weber H., Hullmann H. Porenbeton Handbuch. Planen und Bauen mit System. 5 Auflage. Gütersloh: BertelsmannSpringer Baurverlag, 2002.
4. Besoiu T., Popa A. Infill Walls Contribution on the Progressive Collapse Resistance of a Typical Mid-rise RC Framed Building // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. V. 245. P. 022026.

5. Корниенко С.В., Горшков А.С. Натурные теплофизические испытания жилых зданий из газобетонных блоков // Инж.-строит. ж. 2016. № 4. С. 10.
6. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Zagorodnjuk L.H., Popelova E.A., Shatalova S.V. New point of view on materials development // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 327. № 3. P. 032020.
7. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П., Гринфельд Г.И. Теплофизические испытания фрагмента кладки стены из газобетонных блоков марки по плотности D400 // Инж.-строит. ж. 2009. № 8. С. 17.
8. Сахаров Г.П. Теоретические предпосылки создания неавтоклавного поробетона повышенной прочности по энергосберегающей технологии // Изв. высш. учебн. завед. Строит. 2004. № 7. С. 51.
9. СП 339.1325800.2017. Конструкции из ячеистых бетонов. Правила проектирования. 2017.
10. Сергеев С.В., Гордеев Е.Н. Совершенствование процесса измельчения отходов металлов и пластмасс при их переработке. Монография. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2010.
11. Piina L.V., Rakov M.A. Non-Autoclaved Aerated Concrete with Mineral Additives // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1698. № 1. P. 070007. <https://doi.org/10.1063/1.4937877>
12. Ефименко А.З., Петров К.Г., Дрозд П.А. Смешивание сухих компонентов с алюминиевой пудрой и его влияние на качество газобетона // Технол. бетонов. 2014. № 8 (97). С. 36.
13. Liu Y., Leong B.S., Hu Z.-T., Yang E.-H. Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent // Constr. Build. Mater. 2017. V. 148. P. 140.
14. Małaszkiwicz D., Chojnowski J. Influence of addition of calcium sulfate dihydrate on drying of autoclaved aerated concrete // Open Eng. 2017. V. 7. № 1. P. 273.
15. Сулейманова Л.А., Кара К.А. Газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства. Монография. Белгород: Константа, 2011.
16. Berdov G.I., Piina L.V., Mukhina I.N., Rakov M.A. Aerated concrete with mineral dispersed reinforcing additives // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015. V. 71. P. 012017.
17. Pehlivanlı Z.O., Uzun İ., Demir İ. Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber // Constr. Build. Mater. 2015. V. 96. P. 428.
18. Ефименко А.З. Повышение качества смешивания компонентов сырьевых смесей – средство улучшения структуры и свойств материалов // Сухие строит. смеси. 2011. № 3. С. 33.
19. Semenov E.V., Zhukov V.G., Karamzin A.V. Implementation of procedure for centrifugal hydrodynamic fractionation of finely disperse particles // Chem. Pet. Eng. 2013. V. 49. № 1–2. P. 78.
20. Zhukov V.G., Chesnokov V.M. Free-flow centrifugal filtration with regulated dwell time of sediment in a conical sieve // Chem. Pet. Eng. 2015. V. 50. № 11–12. P. 685.
21. Barabash V.M., Abiev R.S., Kulov N.N. Theory and Practice of Mixing: A Review // Theor. Found. Chem. Eng. 2018. V. 52. № 4. P. 473. [Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н. Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теор. осн. хим. технол. 2018. Т. 52. № 4. С. 367.]
22. Косенко Н.Ф., Мусеев П.И. Химия и технология автоклавного ячеистого бетона. Иваново: ИГХТУ, 2014.
23. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: A review // Cem. Concr. Compos. 2000. V. 22. № 5. P. 321.
24. Wu Q., Guang J., Li Sh., Wang Sh., Zou X., Zhu H., Zhang Ch. Development of Autoclaved Aerated Concrete from Mechanically Activated Magnesium-Rich Nickel Slag // J. Mater. Civ. Eng. 2018. V. 30. № 7. P. 04018134.
25. Жуков А.Д., Чукулин А.С., Карпова А.О. Вариотропия давлений в технологии высокопористых материалов. Монография. М.: НИУ МГСУ, 2015.
26. Rosti M.E., De Vita F., Brandt L. Numerical simulations of emulsions in shear flows // Acta Mech. 2019. V. 230. № 2. P. 667. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2265-5>
27. Сергеев Ю.С., Сергеев С.В., Мальцев П.С. Интенсификация гидродинамических процессов при получении и регенерации технологических многокомпонентных смесей // Наука ЮУрГУ. Материалы 67-й научной конференции. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2015. С. 1762.
28. Гладков Д.И., Ерохина Л.А., Загороднюк Л.Х. Вибровакуумная технология ячеистых бетонов // Бетон железобетон. 1991. № 9. С. 13.
29. Сулейманова Л.А. Динамика расширяющейся газовой полости // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 56.
30. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994.
31. Сергеев Ю.С., Сергеев С.В. и др. Способ перемешивания жидкости. Патент 2543204 РФ. 2015.
32. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Сергеев С.В. Способ возбуждения круговых колебаний и устройство для его осуществления. А. с. 1664412 СССР // Бюлл. изобрет. 1991. № 27. С. 8.
33. Кузмичев В.А. Основы проектирования вибрационного оборудования. СПб.: Лань, 2014.
34. Гноевой А.В., Чесноков В.М. Бингамовская среда как объект исследования // Изв. Акад. наук. Мех. тверд. тела. 2003. № 3. С. 90.
35. Borzenko E.I., Shragar G.R. Structure of a viscoplastic flow during the mold-filling process // Theor. Found. Chem. Eng. 2018. V. 52. № 4. P. 514. [Борзенко Е.И., Шрагер Г.Р. Структура течения вязкопластичной жидкости при заполнении канала // Теор. осн. хим. технол. 2018. Т. 52. № 4. С. 412.]

36. *Amanbaev T.R.* Effect of the fine-dispersed fraction on the motion of the large particle in the suspension // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2015. V. 49. № 2. P. 207. [*Аманбаев Т.Р.* Влияние мелкодисперсной фракции на движение крупной частицы в суспензии // *Теор. осн. хим. технол.* 2015. Т. 49. № 2. С. 214.]
37. *Demianov A.Yu., Doludenko A.N., Inogamov N.A., Son E.E.* The turbulent mixing of non-Newtonian fluids // *Phys. Scr.* 2013. V. 155. P. 014019. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2013/T155/014019>
38. *Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y.* SUSU Supercomputer Resources // *Proc. 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016) (CEUR Workshop Proceedings. V. 1576).* Arkhangelsk, 2016. P. 561.
39. *Rekachinsky A.I., Chulkevich R.A., Kostenetskiy P.S.* Modeling Parallel Processing of Databases on the Central Processor Intel Xeon Phi KNL // *Proc. 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) (Opatija, Croatia, 2018).* Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2018. P. 1605. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400288>
40. *Разинов А.И., Клинов А.В., Дьяконов Г.С.* Процессы и аппараты химической технологии. Казань: КНИТУ, 2017.