

Сулейманова Л.А., д-р техн. наук, проф.,
Погорелова И.А., канд. техн. наук, доц.,
Марушко М.В., аспирант,
Огнев Н.В., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВИБРОВАКУУМИРОВАННЫЕ ГИПСОСОДЕРЖАЩИЕ КОМПОЗИТЫ

ludmilasuleimanova@yandex.ru

Пористую структуру бетона можно получить не только за счет выделения газа, но и, как следует из уточненного уравнения Рэлея-Плессета, за счет фактора внешнего давления. Вибровакуумный способ поризации формовочных смесей позволяет получать обширную гамму эффективных строительных материалов с пористой структурой, одним из которых является поризованный гипсобетон.

Ключевые слова: вибровакуумирование, ячеистые бетоны, пористая структура, поризованный гипсобетон, гипсосодержащие композиты.

Ячеистые бетоны традиционно получают с использованием газообразователя (газобетон) или пенообразователя (пенобетон), причем повышенного его количества. Однако пористую структуру бетона можно получить не только за счет выделения газа, но и, как следует из уточненного уравнения Рэлея-Плессета (1), за счет фактора внешнего давления [1–3].

$$P_T + P_{II} = P_a + P_{cm} + \rho_{cm} \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta\dot{R}}{R} + P_{изб} \quad (1)$$

В уравнении (1) P_T и P_{II} давление в газовой фазе поры соответственно водорода и водяного пара. Давление в жидкой фазе представлено в виде суммы атмосферного давления P_a и избыточного давления над смесью $P_{изб}$. Для промышленно применяемых технологий $P_{изб} = 0$ и процесс газообразования протекает в смеси при атмосферном давлении. При вакуумировании воздушного пространства над смесью $P_{изб}$ имеет отрицательную величину, что является предметом отдельного рассмотрения.

Гидростатическое давление смеси P_{cm} :

$$P_{cm} = \rho_{cm} \cdot g \cdot H, \quad (2)$$

где ρ_{cm} принята равной 1800 кг/м³; H – высота смеси над порой, м.

Давление, обусловленное инерционным сопротивлением смеси P_u :

$$P_u = \rho_{cm} \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right). \quad (3)$$

Капиллярное давление P_K :

$$P_K = \frac{2\sigma}{R}, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкой фазы в смеси, принимаемое равным величине поверхностного натяжения воды.

Давление, вызванное вязкостным сопротивлением смеси P_η :

$$P_\eta = 4\eta \frac{\dot{R}}{R}, \quad (5)$$

где η – вязкость ячеистобетонной смеси.

Установлена взаимосвязь между давлением газовой фазы в формовочной массе с ее реологическими и гравитационными свойствами, диаметром пор, давлением внешней среды и поверхностным натяжением раствора при различных внешних воздействиях на формовочную смесь.

Одним из способов вспучивания вязких композиций является снижение давления ($P_{изб}$) воздуха над смесью или вспучивание смеси в вакууме. Уменьшение давления над смесью обеспечивает расширение газовой поры с компенсацией сил тяжести и инерции, Лапласа и вязкости в соответствии с уточненным уравнением Рэлея-Плессета (1). Это реализовано в разработанной вакуумной технологии формирования пористой структуры ячеистого бетона.

Определяющая роль давления над поризуемой смесью при формировании ячеистой структуры композита достигается за счет его снижения до уровня вакуума, соответствующего 0,06...0,095 МПа.

При вспучивании вязких смесей с низким водовязущим отношением наряду с вакуумом возможны динамические воздействия на смесь, снижающие значимость сил вязкости.

Совместное воздействие вакуума и вибрации реализовано в разработанной вибровакуумной технологии формирования пористой структуры ячеистого бетона.

Вибровакуумный способ поризации формовочных смесей позволяет получать обширную гамму строительных материалов с пористой структурой, в частности получать и поризованный гипсобетон [4–6]. Сущность его заключается

в том, что если в формовочной массе содержатся зерна с заземленным в них в любой форме воздухом, то при создании вакуума над смесью этот воздух извлекается и поризует ее. При этом смесь вспучивается. Однако в процессе сдвигового деформирования вспучиваемой массы в ее структуре возникает множество локальных разрывов сплошности, которые фиксируются при твердении материала и существенно должны снижать его прочность и долговечность. Поэтому с целью ликвидации структурной дефектности, возникающей при вспучивании, целесообразно смесь вибрировать в процессе вспучивания, что должно привести к снижению дефектности структуры и повышению прочности гипсобетона.

Исследования показывают, что указанные выше локальные разрывы сплошности устраняются лишь при вибрировании, параметры которого обеспечивают достижение минимального уровня вязкости системы, соответствующие разрыву всех коагуляционных контактов между частицами [7].

В исследованиях использовался строительный гипс β – модификации марки Г-6 со сроками начала и конца схватывания 4 и 0 минут. Формовались кубы размером $10 \times 10 \times 10$ см, которые твердели в естественных условиях, высушивались до постоянной массы и испытывались через 28 суток.

Режимы формования образцов:

– вакуумирование: после укладки смеси в форму, она помещалась в вакуумкамеру, в которой создавался заданный вакуум, и выдерживалась в вакууме до фиксации полученной структуры.

– вибровакuumирование: данный режим отличался тем, что во время увеличения вакуума в камере смесь подвергалась дополнительно вибрированию. После достижения необходимого вакуума вибрация прекращалась, а смесь выдерживалась в вакууме до фиксации структуры.

Результаты испытаний образцов поризованного гипсобетона по двум режимам представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты испытания вакуумированного гипсобетона

№№ п/п	В/Г	Вакуум, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
1	0,4	0,06	903	3,75
2		0,065	918	2,6
3		0,07	900	2,6
4		0,075	824	3,2
5		0,08	830	1,2
6		0,085	760	1,6
7		0,09	722	1,4
8		0,095	688	0,89
9	0,5	0,06	851	2,0
10		0,065	805	1,8
11		0,07	780	1,7
12		0,075	775	1,6
13		0,08	737	1,5
14		0,085	722	1,2
15		0,09	647	0,69
16		0,095	629	0,55
17	0,6	0,06	764	0,88
18		0,065	707	1,06
19		0,07	720	0,99
20		0,075	707	0,78
21		0,08	693	0,57
22		0,085	664	0,9
23		0,09	630	0,44
24		0,095	567	0,24
25	0,7	0,06	698	0,69
26		0,065	678	0,85
27		0,07	691	0,31
28		0,075	633	0,63
29		0,08	766	3,32
30		0,085	748	2,7
31		0,09	697	1,28
32		0,095	648	1,41

Таблица 2

Результаты испытания вибровакuumированного гипсобетона

№№ п/п	В/Г	Вакуум, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
1	0,4	0,06	1012	13,1
2		0,065	1035	13,5
3		0,07	988	10,75
4		0,075	963	12,85
5		0,08	962	10,9
6		0,085	880	8,4
7		0,09	730	3,3
8		0,095	689	5,1
9	0,5	0,06	818	3,7
10		0,065	838	3,18
11		0,07	835	3,6
12		0,075	785	2,8
13		0,08	780	3,06
14		0,085	712	2,69
15		0,09	794	6,8
16		0,095	663	5,1
17	0,6	0,06	797	6,8
18		0,065	791	2,4
19		0,07	750	2,4
20		0,075	797	6,24
21		0,08	770	6,4
22		0,085	696	1,8
23		0,09	689	4,3
24		0,095	522	1,28
25	0,7	0,06	655	1,13
26		0,065	700	1,4
27		0,07	688	1,67
28		0,075	713	3,5
29		0,08	725	2,97
30		0,085	680	1,29
31		0,09	783	2,06
32		0,095	727	1,55

Результаты опытов со всей убедительностью подтверждают, что при прочих равных условиях вибрирование формовочной смеси во время вспучивания существенно повышает прочность гипсобетона. Так, например, при водогипсовом отношении В/Г = 0,4 и величине вакуума 0,07 МПа образцы, изготовленные без вибрирования, имели $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $R = 2,6 \text{ МПа}$, а приготовленные с вибрацией $\rho = 988 \text{ кг/м}^3$ и $R = 10,75 \text{ МПа}$; при вакууме 0,085 МПа композит имел следующие характеристики: $\rho = 880 \text{ кг/м}^3$, $R = 8,4 \text{ МПа}$, т.е. прочность кубов, полученных с применением вибрации, увеличилась в 3 и более раз.

Построены зависимости средней плотности и прочности поризованного гипсобетона от В/Г отношения при различных режимах формования образцов (рис. 1–4).

Анализ закономерностей изменения прочности и средней плотности отформованных при различных режимах образцов показывает, что если при формовании кубов не используется вибрация, то при повышении вакуума до 0,07 МПа с увеличением В/Г отношения снижается средняя плотность и прочность гипсобетона (рис. 1, 2). При более высоком вакууме (0,08 МПа и выше) до В/Г = 0,55...0,6 сохраняется такая же закономерность, а при более высоких значениях В/Г отношения наблюдается обратная картина. Особенно такая закономерность четко проявляется при изменении средней плотности, что объясняется тем, что при высоких значениях В/Г отношения и вакуума воздух, содержащийся с формовочной смеси, уже не удерживается ею и удаляется из массы, что естественно повышает плотность и прочность материала. Вязкость смеси в таких условиях достигает предельных значений, при которых масса уже не в состоянии удерживать газ и вспучиваться.

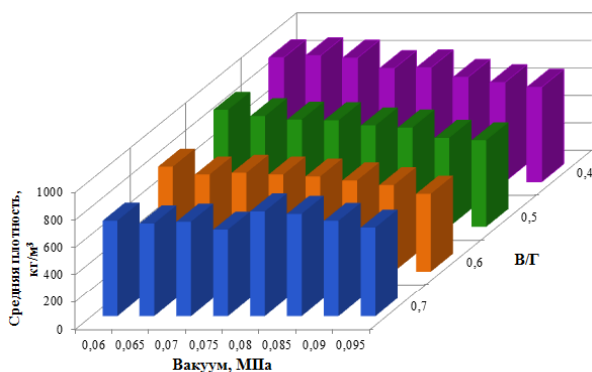


Рис. 1. Зависимость средней плотности вакуумированного гипсобетона от В/Г и величины вакуума

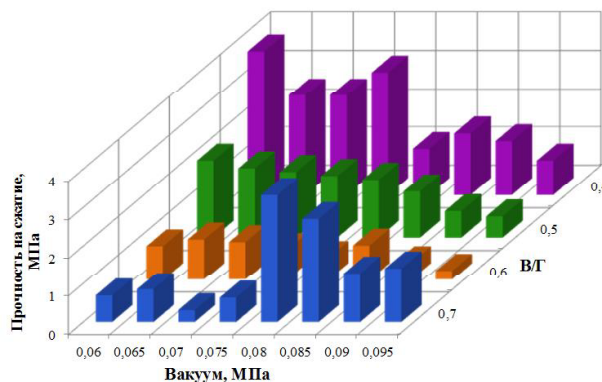


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие вакуумированного гипсобетона от В/Г и величины вакуума

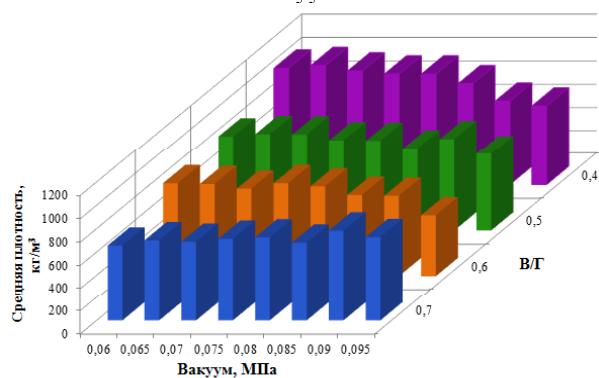


Рис. 3. Зависимость средней плотности вибровакuumированного гипсобетона от В/Г и величины вакуума

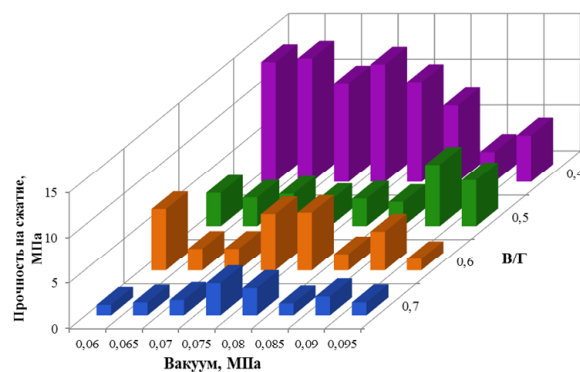


Рис. 4. Зависимость средней прочности на сжатие вибровакuumированного гипсобетона от В/Г и величины вакуума

В целом аналогичная закономерность наблюдается и при формовании образцов с применением вибрации. Однако, в этом случае вибрирование повышает воздухоудерживающую способность формовочной смеси и поэтому даже при вакууме, равном 0,08 МПа, воздух не удаляется из нее и с увеличением В/Г отношения средняя плотность четко, а прочность гипсобетона с колебаниями снижаются (рис. 3, 4). И только при высоком вакууме порядка 0,095 МПа и В/Г больше 0,6 воздух при вибровакuumировании

удаляется из смеси, что приводит к увеличению плотности и прочности материала.

Таким образом, установлены закономерности влияния В/Г отношения и режима формования образцов на их среднюю плотность и прочность на сжатие, что дает возможность определять оптимальные технологические параметры для получения наиболее эффективных поризованных гипсобетонов.

Отработаны эффективные вакуумная и вибровакуумная технологии получения газогипсовых композитов, основанные на теоретических результатах изучения системы «полуводный гипс-вода», поризация которой наиболее эффективна при использовании вяжущих с определенной морфологией сложно структурированной поверхности новообразований с заземленным и адсорбированным воздухом на поверхности частиц, так называемых адсорбционных центрах этого вяжущего [8–11]. В состав вяжущих с менее сложной структурированной поверхностью новообразований (гипсовые вяжущие α – модификации) целесообразно введение высокопористых компонентов, которые за счет дополнительно вовлеченного воздуха улучшают процесс вспучивания смеси, таких как перлитовая пудра – отход производства перлитового песка.

Поризация осуществляется без пено- и газообразователей за счет вакуумирования гипсовой смеси. При снижении атмосферного давления над поверхностью смеси, происходит увеличение количества пузырьков газовой фазы за счет имеющегося в системе воздуха в виде адсорбированного заземленного между частицами гипсового вяжущего, растворенного в воде и вовлеченного при ее перемешивании.

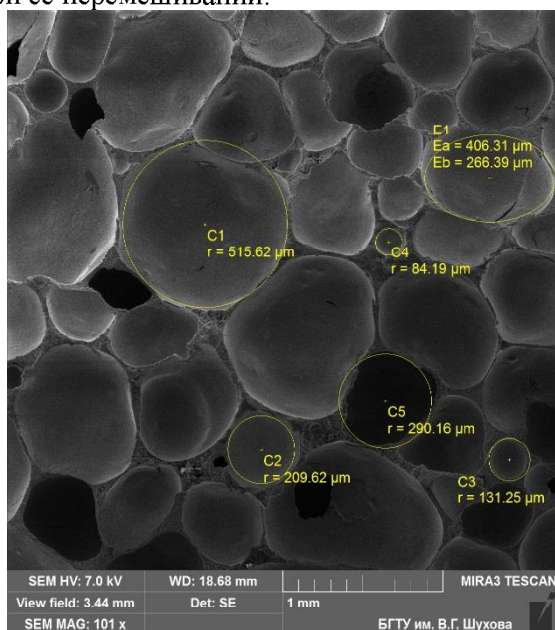


Рис. 5. Микроструктура порового пространства вибровакуумированного гипсобетона

Вибровакуумированный гипсобетон характеризуется улучшенной микроструктурой порового пространства (рис. 5.), с более ровной внутренней поверхностью пор и более плотным прилегающим к ней слоем, чем у вакуумированного гипсобетона, что и объясняет улучшенные физико-механические характеристики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулейманова Л.А., Лесовик В.С. Газобетон неавтоклавно твердения на композиционных вяжущих. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 304 с.
2. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76.
3. Сулейманова Л.А. Вибровакуумированный ячеистый бетон. Белгород: Изд-во БГТУ, 1997. 130 с.
4. А.с. 1357400 (СССР) Способ изготовления ячеистых гипсобетонных изделий /Д.И. Гладков, А.Е. Грушевский, В.П. Балдин, С.А. Погорелов и др. Опубл. 07.12.87; Бюл. № 45. С. 81.
5. Лесовик В.С., Гладков Д.И., Сулейманова Л.А. Способ изготовления ячеистобетонных изделий. Патент на изобретение RUS 2228264 29.05.2001.
6. Гладков Д.И., Дедурина Е.А., Сулейманова Л.А., Тысячук В.В., Калашников А.В. Способ получения ячеистых бетонов. Патент на изобретение RUS 2137600 07.05.1998.
7. Урьев Н.Б. Взаимосвязь контактных взаимодействий и структурно-реологических свойств цементных паст, растворных и бетонных смесей. Реология бетонных смесей и ее технологические задачи. Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума в Юрмале, 1982. Рига, РПИ, 1982. 3–6 с.
8. Ферронская А.В. Эксплуатационные свойства бетонов на основе композиционного гипсового вяжущего // Строительные материалы. 1998. № 6. С. 34–36.
9. Гипсовые материалы и изделия. Справочник. Под общей ред. А.В. Ферронской. М.: Изд-во АСВ, 2004. 488 с.
10. Производство и применение гипсовых материалов и изделий. Терминологический словарь (основные термины и определения на русском и немецком языках). Под общей ред. А.В. Ферронской. М.: Изд-во АСВ, 2006. 263 с.
11. Коровяков В.Ф. Повышение эффективности гипсовых вяжущих и бетонов на их основе: диссертация ... доктора технических наук: 05.23.05. М., 2002. 367 с.

Информация об авторах

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительства и городского хозяйства.

E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Погорелова Инна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства.

E-mail: innapogorelova@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Марушко Михаил Викторович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства.

E-mail: 12michailmar@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Огнев Никита Владиславович, студент кафедры строительства и городского хозяйства.

E-mail: ognev.nikita.vl@gmail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в августе 2017 г.

© Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Марушко М.В., Огнев Н.В., 2017

Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Ognev N.V.
VIBRO-VACUUM GYPSIFEROUS COMPOSITES

Porous structure of concrete can be got not only by gassing, but also from correct Rayleigh–Plesset equation by factor of external pressure. Vibration-vacuum method of aeration of forming mixes allows to get wide gamma of effective building materials with porous structure, one of which is expanded gypsum concrete.

Keywords: *vibro-vacuum, aerated concretes, porous structure, expanded gypsum concrete, gypsum-containing composites.*

Information about the authors

Suleymanova Lyudmila Aleksandrovna, PhD, Professor

E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Pogorelova Inna Aleksandrovna, PhD, Assistant professor

E-mail: innapogorelova@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Marushko Mikhail Viktorovich, Postgraduate student

E-mail: 12michailmar@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Ognev Nikita Vladislavovich, Bachelor student.

E-mail: ognev.nikita.vl@gmail.com

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Received in August 2017

© Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Ognev N.V., 2017