

УДК 666.973.3

**К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ВСТРЯХИВАНИЯ****канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ, Е.В. РЯДЧИКОВ
(Полоцкий государственный университет)**

Исследуются физико-механические характеристики газобетона, полученного при различных способах формирования. Приведены преимущества и недостатки ударной технологии формирования ячеистобетонных изделий по сравнению с литьевой. Рассмотрены особенности образования ячеистой структуры в газобетоне при ударных воздействиях. Представлены результаты экспериментальных исследований плотности и прочности ячеистых бетонов по литьевой, ударной технологии и технологии встряхивания. Наиболее высокими характеристиками обладает газобетон, полученный по технологии встряхивания, по сравнению с ударной технологией, он имеет более равномерную структуру, обеспечивая однородность физико-механических характеристик по объему изготавливаемого массива.

Введение. Одна из основных задач при производстве ячеистобетонных блоков – обеспечение высокой прочности. Известно, что при уменьшении водотвердого отношения (В/Т) бетонной смеси прочность изделий повышается. Разработка эффективных технологических решений в производстве газосиликатных блоков является важной составляющей в комплексе мер, направленных на повышение уровня качественных показателей выпускаемой продукции.

Важным этапом производственного процесса, обеспечивающим достижение высоких показателей качества газосиликатных блоков, является формирование массивов. Существующие методы формирования ячеистобетонного массива назначаются в соответствии с принятым технологическим регламентом производства и могут быть по литьевой, вибрационной или ударной технологии [1].

Ударная технология базируется на использовании ударных воздействий для тиксотропного разжижения высоковязких смесей, энергию и частоту которых назначают в зависимости от реологических свойств смеси. По сравнению с литьевой технологией, ударная технология позволяет уменьшить расход сырьевых материалов: цемента – на 20...30 %, извести на 10...15 %, газообразователя – на 5...10 %. При этом время выдержки на посту вызревания сокращается до 1,0...1,5 часов, а энергозатраты при автоклавной обработке уменьшаются в среднем на 8...10 % [2].

Значительное снижение вязкости смеси за счёт ударных воздействий позволяет использовать высоковязкие ячеистобетонные смеси с пониженным водотвёрдым отношением, что способствует росту физико-технических характеристик материала. Для ячеистобетонных смесей на смешанном вяжущем и кварцевом песке В/Т может быть понижено до 0,37...0,38 по сравнению с 0,50...0,65 при применении литьевой технологии [3].

В настоящее время большинство заводов по выпуску газосиликатных блоков в Республике Беларусь ориентировано на использование ударной технологии. Применяются различные виды ударных площадок. Наиболее совершенной на данном этапе развития ударной технологии является ударная площадка с управляемыми параметрами. Например, специалистами ОАО «Забудова» и ОАО «Сморгонь-силикатобетон» совместно со специалистами фирмы «Маза-Хенке» разработана конструкция современной ударной площадки грузоподъемностью 15 тонн. Оптимальное соотношение массы формы со смесью и верхней рамы ударной площадки к массе нижней рамы ударной площадки и массе фундамента, а также специальный профиль эксцентрика кулачкового механизма обеспечили при минимальной высоте удара (подъем верхней рамы с формой) максимальную энергию удара.

В ходе процесса формирования ячеистобетонной смеси в зависимости от её реологических и тиксотропных параметров, кинетики вспучивания автоматически регулируется интенсивность динамических воздействий за счет плавного изменения высоты и частоты ударов. Расчет режимов формирования ячеистобетонной смеси был выполнен согласно «Руководству по ударной технологии изготовления ячеистобетонных изделий» [4].

Недостатком ударной технологии является то, что применение ударных площадок приводит к уплотнению нижних слоев массива, вызванному ударами, и, соответственно, ведет к появлению неоднородности вспучиваемого массива по объемной массе и прочности. К тому же механические воздействия резко сокращают срок службы форм [5].

Основные положения ударной технологии базируются на теории получения строительных материалов, разработанной К.Э. Горяиновым. Одной из причин, вызывающих снижение физико-технических свойств материала, являются образующиеся на всех этапах изготовления материала внутренние собственные задержанные деформации и порождаемые ими напряжения, превышающие допустимый предел и приводящие к образованию дефектов внутри твердого тела.

Происходящее за счет ударных воздействий периодическое разжижение смеси позволяет снизить возникающие в ней технологические напряжения до значений ниже критических и предотвратить развитие опасных деструктивных процессов в стенках межпорового материала. В период между ударами из-за восстановления структуры и роста вязкости смеси обеспечивается временная блокировка процесса газовой выделености наружу. При этом из-за некоторого увеличения давления внутри газового пузырька происходит уплотнение стенок (мембран) пор, обеспечивая в конечном итоге повышение их плотности и прочности.

В течение всего процесса формования происходит полное разжижение смеси, вызванное частыми ударными воздействиями и непрерывным (практически постоянным) колебательным движением смеси. При частоте менее 60 уд/мин изменение вязкости носит волнообразный характер. В начале процесса формования наблюдаются неустановившиеся собственные колебания, а начиная с периода интенсивного вспучивания – установившиеся, которые затухают по экспоненциальному закону.

Домбровским А.В. получено эмпирическое выражение для основной собственной частоты колебаний смеси f_0 в зависимости от ее объемной массы $\gamma_{см}$ [6]:

$$f_0 = 13,301 \cdot \ln \gamma_{см} + 11,533. \quad (1)$$

В процессе формования происходит некоторое перераспределение ускорения смеси за счет волнообразного характера его изменения, т.е. выравнивается количество общей энергии, переносимой за единицу времени сквозь единицу поверхности, нормальной к направлению ударных воздействий.

Из-за волнообразного характера изменения вязкости смеси в период формования создаются оптимальные условия образования пористой структуры материала. В момент удара газовый пузырек получает дополнительный импульс в направлении вспучивания, скорость его движения значительно увеличивается; уменьшение вязкости в этот момент также способствует повышению скорости движения пузырька. Таким образом, резко интенсифицируется вспучивание смеси, а сравнительно низкая вязкость позволяет газовому пузырьку равномерно и относительно легко (без значительного увеличения давления внутри и напряжения в межпоровом материале) увеличивать свой объем. При этом, несмотря на рост максимального мгновенного ускорения смеси в момент удара, опасность разрушения газового пузырька маловероятна, потому что длительность удара равна 10^{-4} с [6]. Динамические воздействия на смесь в процессе вспучивания осуществляют в виде кратковременных одиночных ударных импульсов, энергия и частота которых зависят в основном от реологических свойств, высоты формируемого массива и содержания газовой фазы в смеси. Сырьевая смесь обладает упруговязкими свойствами, поэтому можно считать, что для ячеистобетонных смесей упругие колебания от единичного импульса имеют периодический экспоненциально затухающий характер.

Максимальная энергия ударного импульса в течение процесса формования ограничивается предельно допустимой величиной в зависимости от реологических свойств смеси, объемной концентрации газовой фазы и высоты формируемого столба. Энергия ударных импульсов определяется по формуле:

$$T = \frac{\sum mv^2}{2}, \quad (2)$$

где $\sum m$ – суммарная масса свободно падающей системы; v – скорость при соударении свободно падающей системы с опорной частью ударной площадки.

Ограничение по максимальной энергии связано с тем, что ударные импульсы могут приводить к разрушению газовых пузырьков из-за резкого возрастания в них давления, превышающего критическое, в результате чего может происходить выхлоп газа через верхнюю поверхность и выброс смеси [7].

Основная часть. В Полоцком государственном университете разработана технология и запатентована установка для формования ячеистобетонного массива по технологии встряхивания [8]. Разработанный способ заключается в осуществлении ударных воздействий опорной части установки о верхнюю часть формы, тем самым встряхивая смесь. Ударные импульсы передаются через верх формы, создавая колебания смеси и, следовательно, приводя к тиксотропному разжижению смеси. Также, по нашему мнению, такие удары должны уменьшить оседание частиц в нижней области и способствовать более равномерному распределению пор в формируемых массивах.

Моделирование процесса вспучивания проводилось с использованием сырьевой смеси из цемента, извести и воды. В качестве газообразователя в исследованиях использовалась алюминиевая суспензия, приготавливаемая на основе воды, алюминиевой пудры и ПАВ.

Образцы формовались в формах $10 \times 10 \times 10$ см с использованием литевой, ударной технологии и технологии встряхивания. Режим формования: амплитуда – 1 см, частота – 10 уд/мин. Выбор режимов формования и их оптимизация проводились с учетом обеспечения максимальной высоты вспучивания при изменении амплитуды и частоты ударов [9].

На первом этапе определялось влияние водотвердого отношения на вспучивание, которое оценивалось по величине максимального эффекта вспучивания (отношение высоты вспученной смеси к первоначальной высоте заливки). Результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние показателя В/Т на эффективность вспучивания

№ п/п	Режим	В/Т	Высота вспучивания, см (высота заливки, см)	Эффективность вспучивания	Примечание
1	Литьевая технология	0,45	4,5 (3,2)	1,41	
2		0,5	6 (3,5)	1,71	
3		0,55	7 (3,7)	1,89	
4		0,6	8 (4)	2	
5		0,64	9,5 (4,2)	2,3	После формования смесь осела до 8 см
6	Ударная технология	0,5	8 (3,5)	2,28	
7	Технология встряхивания	0,5	8,7 (3,5)	2,49	

Полученные данные свидетельствуют о том, что максимальная эффективность вспучивания по литьевой технологии обеспечивается при значении В/Т, равным 0,6. По ударной технологии и технологии встряхивания возможно снизить водотвердое отношение. Так, при В/Т = 0,5 ударная технология обеспечивает эффективность вспучивания на 0,57 больше, чем по литьевой, а технология встряхивания – на 0,78 больше, чем по литьевой, и на 0,21 больше, чем по ударной технологии.

На втором этапе проводилось формование образцов и исследование их физико-механических характеристик. Твердение образцов осуществлялось в пропарочной камере при заданном режиме твердения.

После изготовления массивов (рис. 1) из них выпиливались образцы-кубы размером $3 \times 3 \times 3$ см.

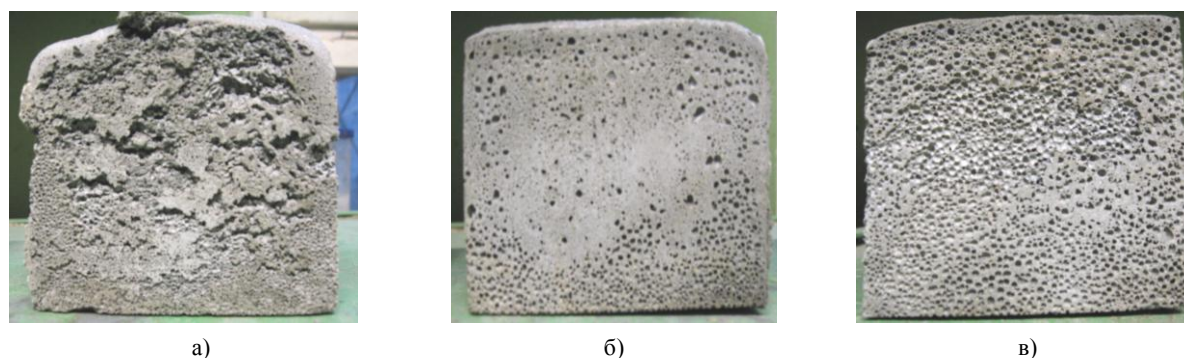


Рис. 1. Образцы после распалубки форм, полученные различными способами формования
а – литьевая технология; б – ударная технология; в – технология встряхивания

После распалубки массивов выполнено сравнение структуры газобетона, полученного разными способами. Образец, изготовленный по литьевой технологии (рис. 1, а), имеет расслоившуюся структуру, также выявлено множество пустот большого размера. Это можно объяснить тем, что в спокойной форме движение массы вверх тормозится боковыми стенками формы [10]. Также из-за низкой вязкости смеси происходит слияние газовых пузырьков, что приводит к образованию крупных пор и каверн. Образцы, изготовленные по ударной технологии и технологии встряхивания, имеют однородную структуру, причем более равномерное распределение пор наблюдается у кубика, полученного по технологии встряхивания. Для образцов, изготовленных по ударной технологии, характерна неоднородность структуры по высоте массива. Выделяется придонная область интенсивного газообразования, в которой сосредоточено основное количество мелких пузырьков. Это косвенно свидетельствует о более высокой плотности смеси в нижней части, что может быть вызвано ударными воздействиями в процессе формования.

Домбровским А.В. сделана попытка объяснить процессы вспучивания. По ударной технологии в момент удара газовый пузырек получает дополнительный импульс в направлении вспучивания, и скорость его движения значительно увеличивается [6].

Энергия ударного импульса, передаваемая через поддон формы в смесь в виде распространяющейся от поддона перпендикулярно вверх плоской волны высокого динамического давления, создает в смеси напряжение сжатия, которое затем переходит в кинетическую энергию экспоненциально затухающих свободных колебаний столба смеси. Такая форма передачи энергии ударного импульса через поддон в смеси позволяет в течение малого промежутка времени более равномерно и более эффективно проработать весь её объем, тем самым способствуя более эффективному тиксотропному разжижению смеси, а возникающие после воздействия ударного импульса свободные экспоненциально затухающие периоди-

ческие колебания столба смеси оптимизируют процесс вспучивания в течение длительного промежутка времени в паузе между импульсами [7].

По технологии встряхивания в момент удара газовый пузырек получает дополнительный импульс по направлению вспучивания и увеличивает скорость его движения; уменьшение вязкости в этот момент также интенсифицирует вспучивание смеси.

Также процесс газообразования при механических воздействиях можно описать в виде движения системы, состоящей из формы, смеси и газовых пузырьков. Причем движению газовых пузырьков препятствует сила сопротивления.

Формула Стокса [11] позволяет определить силу сопротивления, действующую на медленно движущийся в вязкой среде шарик (газовый пузырек):

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi\eta rv, \quad (3)$$

где η – вязкость смеси; r – радиус шарика; v – его скорость.

Чем меньше сила сопротивления, тем легче газовые пузырьки будут вспучивать смесь. Из формулы (3) следует, что сила сопротивления пропорциональна скорости шарика в вязкой среде ($F_{\text{сопр}} \sim v$).

В момент удара скорость движения пузырька газа относительно формы определяется следующим выражением:

$$\bar{v}_{n/\phi} = \bar{v}_{n/c} + \bar{v}_{c/\phi}, \quad (4)$$

где $\bar{v}_{n/\phi}$, $\bar{v}_{n/c}$ – скорости движения пузырька относительно формы и относительно смеси соответственно; $\bar{v}_{c/\phi}$ – скорость движения смеси относительно формы.

Из формулы (4) можно определить скорость движения пузырька относительно смеси (рис. 2), которая будет равна

$$\bar{v}_{n/c} = \bar{v}_{n/\phi} - \bar{v}_{c/\phi}. \quad (5)$$

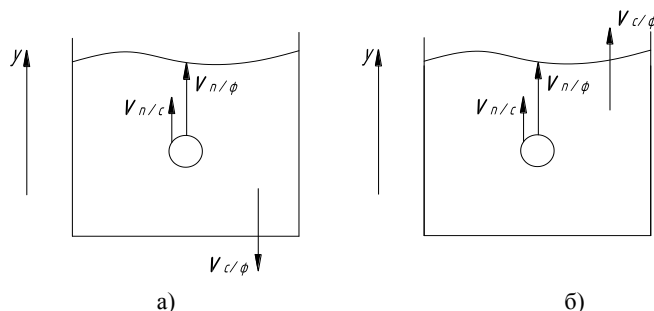


Рис. 2. Схема для определения скорости движения газового пузырька:
а – при применении ударной технологии; б – при применении технологии встряхивания

При ударной технологии (рис. 2, а) скорость движения газового пузырька $v_{n/c1}$ будет равна

$$v_{n/c1} = v_{n/\phi} - (-v_{c/\phi}) = v_{n/\phi} + v_{c/\phi}. \quad (6)$$

При технологии встряхивания (рис. 2, б) скорость движения газового пузырька

$$v_{n/c2} = v_{n/\phi} - v_{c/\phi}. \quad (7)$$

Таким образом, $v_{n/c1} > v_{n/c2}$, а в соответствии с формулой Стокса $F_{\text{сопр}1} > F_{\text{сопр}2}$. Следовательно, механическое воздействие по технологии встряхивания способствует более эффективному вспучиванию смеси.

На следующем этапе были определены средние значения плотности и прочности образцов из газобетона. Результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 2. По данным таблицы построены гистограммы (рис. 3, 4).

Таблица 2

Значения средней плотности и прочности по образцам из газобетона

Показатели	Режимы		
	литьевая технология	ударная технология	технология встряхивания
ρ , кг/м ³	925,95	865,73	741,7
σ , МПа	0,57	1,58	1,58



Рис. 3. Сравнительные данные плотности ячеистого бетона

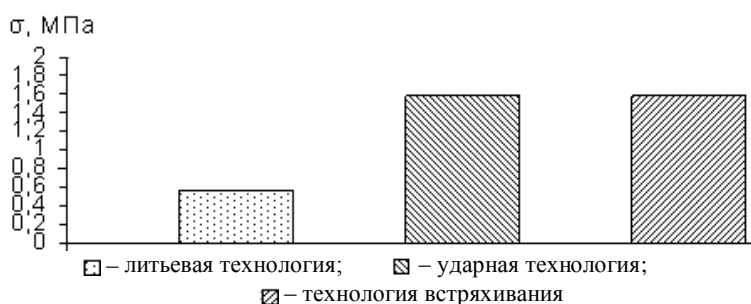


Рис. 4. Сравнительные данные прочности ячеистого бетона

Полученные данные свидетельствуют о том, что плотность ячеистого бетона, полученного по ударной технологии на 6,5 % меньше по сравнению с ячеистым бетоном, полученным по литевой технологии, но выше, чем по технологии встряхивания на 13,5 %. Прочность образцов, полученных по ударной технологии и технологии встряхивания, сравнительно одинакова и превышает значение прочности газобетона, полученного по литевой технологии, в 1,7 раза.

Далее исследовались показатели средней плотности и прочности ячеистых бетонов по высоте. Результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 3. По данным таблицы построены гистограммы (рис. 5, 6).

Таблица 3

Значения средней плотности и прочности образцов по высоте

Показатели		Режимы		
		литьевая технология	ударная технология	технология встряхивания
Нижний слой	ρ, кг/м³	981,5	819,7	759,13
	σ, МПа	0,66	1,57	1,56
Верхний слой	ρ, кг/м³	870,4	891,3	743
	σ, МПа	0,48	1,59	1,6

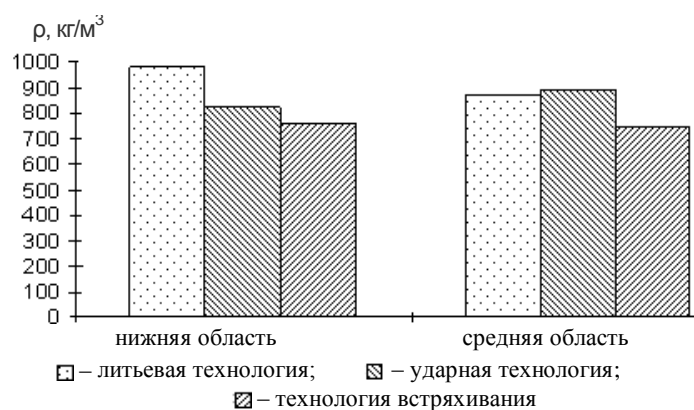


Рис. 5. Сравнительные данные плотности образцов по высоте

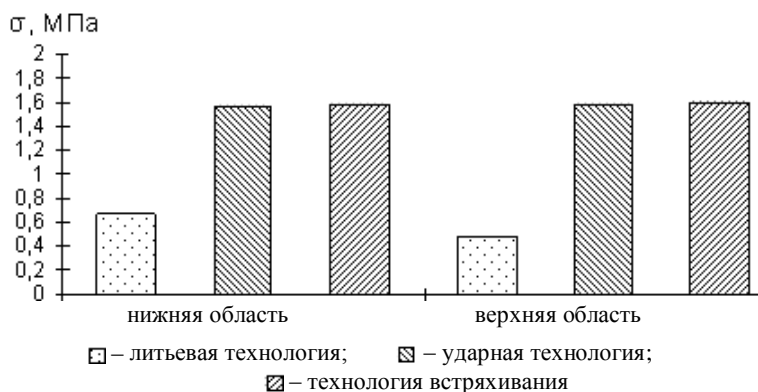


Рис. 6. Сравнительные данные прочности образцов по высоте

Полученные данные свидетельствуют о том, что плотность газобетона, полученного по литьевой технологии, в нижней области больше, чем в верхней, на 13 %, а прочность – на 37 %; по ударной технологии – плотность в верхней области на 9 % больше, чем в нижней части; по технологии встряхивания – расхождение значений по высоте не превышает 2 %; значения прочности по ударной технологии и технологии встряхивания в верхней и нижней областях сравнительно одинаковы.

Вывод. Газобетон, полученный по технологии встряхивания, по сравнению с ударной технологией, имеет более равномерную структуру, обеспечивая однородность физико-механических характеристик по объему изготавливаемого массива, причем обеспечивается снижение средней плотности на 20 % по сравнению с литьевой технологией, и на 13,5 % по сравнению с ударной. Прочность газобетона, полученного по ударной технологии и технологии встряхивания, превышает прочность ячеистого бетона, полученного по литьевой технологии. Также при использовании технологии встряхивания снижаются негативные воздействия от ударных нагрузок на оснастку, что позволяет значительно увеличить межремонтный период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зейфман, М.И. Изготовление силикатного кирпича и силикатных ячеистых материалов / М.И. Зейфман. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
2. Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения в Республике Беларусь / Т.Г. Голубева [и др.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ais.by>. – Дата доступа: 10.02.09.
3. Сажнев, Н.П. Технично-экономические показатели ячеистого бетона, изготовленного по литьевой технологии / Н.П. Сажнев, Н.Н. Сажнев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ais.by>. – Дата доступа: 10.10.08.
4. Руководство по ударной технологии изготовления ячеистобетонных изделий. – Рига, 1991.
5. Недостатки ударной технологии производства газобетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aac-plant.ru/ab.php>. – Дата доступа: 05.09.08.
6. Домбровский, А.В. Исследование ударной технологии формования ячеистобетонных изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.В. Домбровский; ВЗИСИ. – М., 1980. – 20 с.
7. Формирование ячеистобетонных массивов высотой до 1,5 м импульсным способом / К.Э. Горайнов [и др.] // Строительные материалы. – 1983. – № 8.
8. Установка для вспучивания ячеистобетонных смесей: пат. 5298 Респ. Беларусь на полезную модель / В.В. Бозылев, Е.В. Рядчиков, Д.Н. Шабанов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20080861; заявл. 20.11.2008; опубл. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3(68). – С. 202.
9. Рядчиков, Е.В. Особенности процесса вспучивания ячеистобетонной смеси при применении различных способов формования / Е.В. Рядчиков // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 36. Строительство. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 100 – 102.
10. Левин, С.Н. Производство изделий из ячеистого силикатного бетона методом вибровспучивания (докл. к семинару по обмену передовым опытом в производстве и применении изделий из силикатобетона) / С.Н. Левин, А.П. Меркин. – М., 1960.
11. Яворский, Б.М. Справочник по физике для студентов вузов и инженеров / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1968.

Поступила 04.12.2009