

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-8-18

Бруйко М.Г., *Баженова С.И., Ву Ким Зиен

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com

ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ С ВАРИАТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ НА СТАДИИ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты разработки одностадийного метода получения эффективных конструкционных и теплоизоляционных изделий на основе ячеистого бетона с вариатропной структурой и исследования их свойств. В статье приведены результаты исследований по определению влияния количественного соотношения исходных компонентов пеногазобетонной смеси и технологических режимов, для этого была создана модельная система $[Ca(OH)_2; Al; H_2O; NaF]$. Исследовано влияние коэффициента заполнения формы $(1,0 \div 0,7)$ формовочной пеногазобетонной смесью на формирование и свойства ячеистых бетонов с вариатропной структурой. Изучено влияние вариатропности ячеистых бетонов на прочностные характеристики изделий на их основе. Подтверждено, что изделия на основе ячеистого бетона с изменяющейся плотностью от периферии обладают достаточно хорошими теплоизоляционными свойствами за счёт низкой плотности в срединных слоях, при этом удовлетворяют всем требуемым показателями по прочности, твёрдости и морозостойкости благодаря высокой плотности поверхностного слоя. При этом отсутствие резкой границы предотвращает появление зоны контракционных напряжений и накопления конденсата. Результаты экспериментов подтверждают возможность получения изделий на основе вариатропных ячеистых бетонов с заданными свойствами, а также производство строительных изделий и элементов конструкций с более высокими прочностными показателями по сравнению с аналогичными изделиями на основе монотропных ячеистых бетонов при сохранении материалоемкости.

Ключевые слова: ячеистый бетон, вариатропная структура, газобетон, пенобетон, перфорированная форма.

Введение. Ячеистые бетоны конструкционно-теплоизоляционного назначения получили широкое распространение для производства строительных изделий при возведении малоэтажных зданий в качестве несущих элементов, а также при устройстве ограждающих конструкций и перегородок в многоэтажных гражданских и промышленных зданиях и сооружениях [1, 2].

Наиболее распространёнными технологическими способам получения ячеистых бетонов являются пенотехнология и газотехнология. Условия формирования бетонов по пенотехнологии и газотехнологии характеризуются монотропностью ячеистой структуры и характеристиками изделий по всему объёму. Ячеистые бетоны, полученные по пенотехнологии, обладают преимущественно закрытой пористой структурой. Бетоны, полученные по газотехнологии, характеризуются открытой пористой структурой. Характер пористой структуры ячеистых бетонов определяет эксплуатационную функциональность в качестве конструкционно-теплоизоляционных, и (или) акустических изделий [2–5].

Однако и в том и другом случае полученные изделия на основе пено- и газотехнологии характеризуются монотропностью, то есть постоянством свойств (прочность, теплоизолирующие

свойства, водопоглощение, диэлектрические свойства и так далее) бетонов по всему объёму изделия. Несущая способность изделий на основе ячеистых бетонов с монотропной структурой в основном зависит от их прочности и плотности. В связи с этим, для повышения несущей способности таких изделий требуется увеличение средней плотности бетона, что приводит к повышению их материалоемкости и снижению теплоизолирующих свойств. Поэтому решение проблемы, связанной с повышением несущей способности строительных элементов и изделий на основе ячеистых бетонов может быть обеспечено формированием и фиксированием вариатропной ячеистой структуры бетонов в период производства изделий на их основе.

Вариатропный ячеистый бетон – материал переменной плотности, получаемый путем уплотнения поверхностных зон механическими, химическими или физическими (ультразвуковыми, электромагнитными, температурными и т. п.) воздействиями для повышения его прочностных, атмосферозащитных и теплоизолирующих свойств. Изделия на основе ячеистого бетона с изменяющейся плотностью обладают низкой плотностью и более высокими теплоизоляционными свойствами в центре, а во внешних слоях

образца более высокой плотностью и прочностными характеристиками. Морозостойкость изделий на основе ячеистых вариатропных бетонов достигается за счет образования плотных внешних бетонных слоев [6–10].

На основе анализа научно-технической и патентной литературы были выявлены наиболее актуальные и перспективные пути решения получения изделий с вариатропной ячеистой структурой. Так, например, профессор О.В. Коротышевский предлагает технологию и оборудование по приготовлению пенобетонной смеси, используя способ одностадийного турбулентно-кавитационного перемешивания компонентов смеси. Этот способ заключается в поризации смеси при пониженном давлении, которое составляет 0,8 от атмосферного. При таком способе поризации обеспечивается незначительная разноточность бетонной смеси и различие свойств ячеистого бетона по всему объему (в пределах до 8–12 %), а саму структуру можно отнести к монотропной [11].

В патенте [12] описан способ получения слоистой конструкции из ячеистых бетонных смесей с различной плотностью, который заключается в последовательной послойной заливке формовочных газобетонных смесей в трехсекционную форму со съемными внутренними перегородками. Внутренняя секция заполняется формовочной смесью обеспечивающую более низкую плотность бетона по сравнению с внешними слоями. После окончания процесса вспенивания, перегородки извлекаются. Данная технология формования газобетонных изделий обеспечивает переход от бетона с более высокой плотностью периферийных слоев к более низкой плотности в центральной части. Выше указанная технология обладает технологической сложностью формования изделий с вариатропной структурой и отсут-

ствием возможности удаления избыточной формовочной влаги на стадии формирования ячеистой структуры бетонного изделия.

В источниках [7–9, 13–16] для газобетона вариатропность достигается путем уплотнения выступающего над бортами формы поверхностного слоя толщиной 2–5 см. Уплотнение поверхностного слоя происходит путем прикатывания жестким валом, опирающимся на борта формы. К недостатку предложенного способа можно отнести уплотнение исключительно только верхнего слоя изделия.

Технология газобетона располагает и другими приемами придания вариатропности бетона, такими как прикатывание и вибрирование поверхности. Однако все эти способы не обеспечивают удаление избыточной формовочной воды в период формирования ячеистой структуры. [3, 5, 14, 17, 18]. В дальнейшем, в процессе набора прочности цементного камня происходит удаление избыточной формовочной несвязной воды с образованием микропор и дефектов структуры минеральной матрицы, которые снижают конечную прочность бетона и изделий на их основе.

В статье приведены результаты разработки одностадийного способа получения эффективных конструктивно-теплоизоляционных изделий на основе ячеистых бетонов с вариатропной структурой и исследование их свойств.

Материалы. Для получения монотропного пенобетона с плотностью 900 кг/м³ использовались следующие компоненты.

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020: истинная плотность 3,10 г/см³, прочность цемента на сжатие в возрасте 3 суток – 27,2 МПа, в возрасте 28 суток – 46,1 МПа, НГ = 29,4 %.

Кварцевый речной песок с истинной плотностью 2,64 г/см³ и размером частиц от 0,14 мм до 0,63 мм использовался в бетонных смесях в качестве мелкого заполнителя (табл. 1).

Таблица. 1

Гранулометрический состав песка

Размер отверстия, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
Остатки на контрольных ситах, %	0	0	0,83	14,23	73,2	6,28
Полный остаток, %	0	0	0,83	15,06	88,26	94,54

Вода затворения соответствует нормативным требованиям ГОСТ 23732-2011.

Алюминиевая пудра соответствует ГОСТ 5494-95 «Пудра алюминиевая. Технические условия» или алюминиевые пасты в соответствии с ТУ.

Фтористый натрий соответствует ГОСТ 4463-76 «Реактивы. Натрий фтористый. Технические условия газообразования».

Использовался пенообразователь ЕАВАССОС с истинной плотностью 1,02 г/см³, который разбавляли водой в пропорции 2,5 %.

Для получения вариатропных ячеистых бетонов использовалась пено-газотехнология, которая заключалась в получении образцов из формовочной смеси, состоящей из минерального вяжущего, мелкого заполнителя, пенообразователя, воды, газообразователя и регуляторов процессов

газообразования. Технологии получения образцов заключались в следующем (рис. 1): формовочная смесь (состоящая из вышеперечисленных компонентов) подвергалась смешению в быстрорходном смесителе и вертикально загружалась в



форму с различным коэффициентом заполнения (K_3):

$$K_3 = K_1/K_2, \quad (1)$$

где K_1 – объем формовочной смеси, K_2 – объем формы.

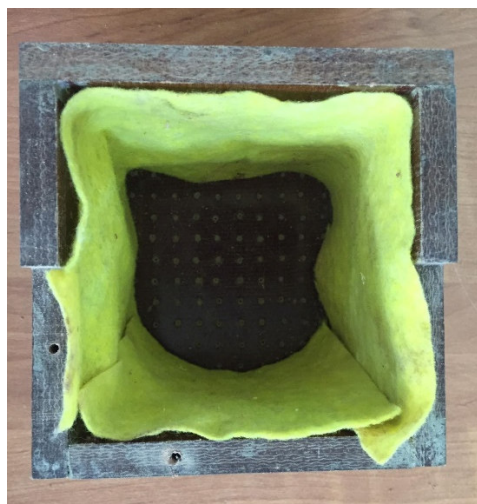


Рис. 1. Перфорированная форма

После чего форма закрывалась, и происходило формирование ячеистой структуры образца в изобарно-изохорных условиях.

Для получения образцов использовались формы в виде куба $15 \times 15 \times 15$ см с перфорированными стенками, диаметр отверстия $D=1,5$ мм, расстояние между отверстиями $a = 10$ мм.

Эффективность регуляторов газообразования в зависимости от химической природы исследовалась на модельной системе: оксид кальция, вода, алюминиевая пудра, фторид натрия. Определялась начало и конец газообразования и скорость газообразования в зависимости от количественного состава компонентов системы.

В работе исследовалось влияние изменения коэффициента заполнения формы ($1,0 \div 0,7$) формовочной пеногазобетонной смесью на формирование и свойства ячеистых бетонов с вариатропной структурой.

Методики. Определение влияния концентрации фтористого натрия на реакции газообразования с выделением водорода при взаимодействии алюминиевой пудры и щелочи (гидроксида кальция) проводилось на модельной системе $[Ca(OH)_2; Al; H_2O; NaF]$. Определялись сроки начала и окончания газообразования, а также скорость газообразования H_2 в системе.

Методика заключалась в следующем: из реактора, в который помещались все исследуемые вещества модельной системы, выделяющийся в процессе реакции водород транспортировался в приемную емкость. За начало газообразования принималось начало образование пузырьков водорода. Скорость газообразования определялась

по изменению объема образованного водорода в единицу времени. По данной методике определяли следующие показатели: влияние концентрации NaF на начало и окончание процесса газыделения, скорость и общий объем выделенного водорода.

Метод определения изменяемой средней плотности вариатропного материала в объеме образца. Растворная смесь в заданных соотношениях исходных компонентов перемешивалась на высокоскоростном смесителе до получения однородной пеномассы. Смесь помещалась в форму с перфорированными боковыми поверхностями с различным коэффициентом заполнения и закрывалась крышкой, которая фиксировалась запорными механизмами. По окончании процесса вспенивания образец извлекался для проведения дальнейших исследований полученных свойств.

Результаты и обсуждение. Для получения образцов с различным коэффициентом вариатропности форма заполнялась формовочной смесью с различным значением коэффициента заполнения формы K_3 . После набора необходимой расплубочной прочности образца форма расплубливалась и полученный образец подвергался дальнейшим исследованиям. Для этого вырезались образцы-кубики из периферийных и центральных зон для определения вариатропности образца.

Для управления процессом вспенивания при получении газобетонов были проведены исследования о влиянии концентрации фторида натрия

на процесс газообразования на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ (рис. 2, 3). В результате было установлено, что соотношение $\text{Al}:\text{NaF}$, равное 1:1, является оптимальным для ускорения процессов начала и окончания газообразования, а

так же для увеличения скорости выделения водорода в исследуемой композиции с целью получения на ее основе вариатропной структуры ячеистых бетонов.

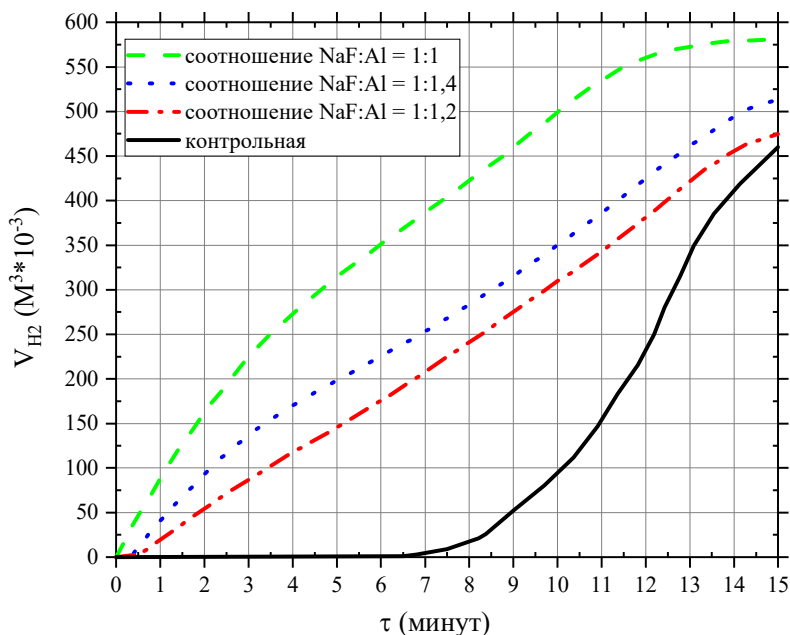


Рис. 2. Зависимость изменения газовыделения H_2 на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ от концентрации NaF

При исследовании изменения сроков начала и окончания газообразования от концентрации фторида натрия были получены следующие зависимости, представленные на рисунке 3. В результате воздействия окиси алюминия на поверхности алюминиевой пудры удаляется, что обеспечивает ускорение реакции химического взаимодействия между алюминием и оксидом кальция.

Из рисунков 2 и 3 видно, что присутствие в системе NaF активирует процесс газовыделения водорода. Повышение концентрации NaF интенсифицирует процесс газовыделения без увеличения концентрации газообразователя, а именно время начало-окончание и скорость образования водорода для придания вариатропности структуре изделия.

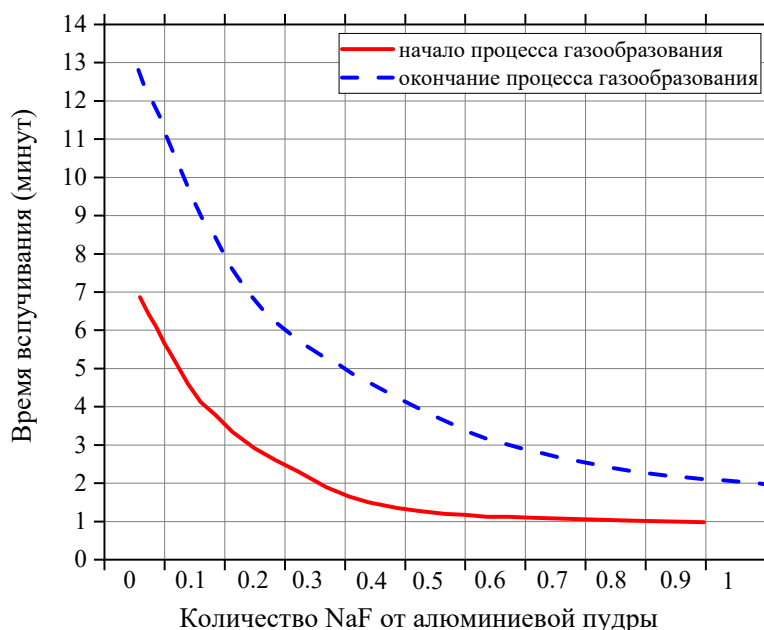


Рис. 3. Изменение сроков начала и окончания газообразования H_2 на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ от концентрации NaF

При производстве ячеистого бетона по пено-технологии в системе характерно повышенное водо-твёрдое отношение, где воды значительно больше, чем необходимо для процессов гидратации вяжущего. Снижать водотвёрдое отношение путём удаления избыточной формовочной воды на стадии формования массива при формировании структуры предполагается с использованием перфорации боковых стенок формы.

После заливки предварительно вспененной смеси с определенным коэффициентом заполнения формы происходит дальнейшее увеличение объема массы в результате процесса газообразования. До момента полного заполнения формы процесс формирования структуры происходит в изобарном режиме, дальнейшее формирование структуры осуществляется в изохорном режиме с

повышения давления внутри вспениваемой массы. Повышение давления внутри системы происходит за счет выделения водорода, что способно обеспечить такой градиент давления с внешней средой, который будет способен удалить через перфорированные стенки формы последовательно газообразной и жидкой фазы. В это время последовательно удаляются через перфорацию боковых стенок из растворной смеси: газообразные продукты, цементное молоко, с последующей кольматацией отверстий формы. Нетканый волокнистый материал в пристеночной части изделия, между перфорированными стенками формы и изделием впитывая удерживает цементное молоко и препятствует кольматации отверстий перфорации формы (рис. 4).



Рис. 4. Процесс вспучивания

В результате протекающих процессов в форме окончательно формируется вариатропная структура бетона. При этом периферийные слои бетона имеют значения средней плотности до 1800 кг/м^3 , а в центральной части образца средняя плотность может иметь значение менее 400 кг/м^3 . Следует отметить плавный переход более плотной части вариатропного бетона к поризованной его части. В зависимости от коэффициента заполнения формы и индекса перфорации формы возможно изменять соотношение и величину объема плотной и поризованной части вариатропного бетона. При этом коэффициент вариатропности может достигать значения $2,2 \dots 2,4$, а

по общим характеристикам такой бетон может использоваться для производства строительных изделий конструкционно-теплоизоляционного назначения.

Зависимость изменения плотности материала для различной степени заполнения формы показана на рисунке 5. Коэффициент заполнения формы брался 1, 0.8 и 0.7 соответственно. При дальнейшем уменьшении значения K_1 давление, создаваемое в системе, оказывалось недостаточным для получения необходимых высоких значений плотности на периферии изделия.

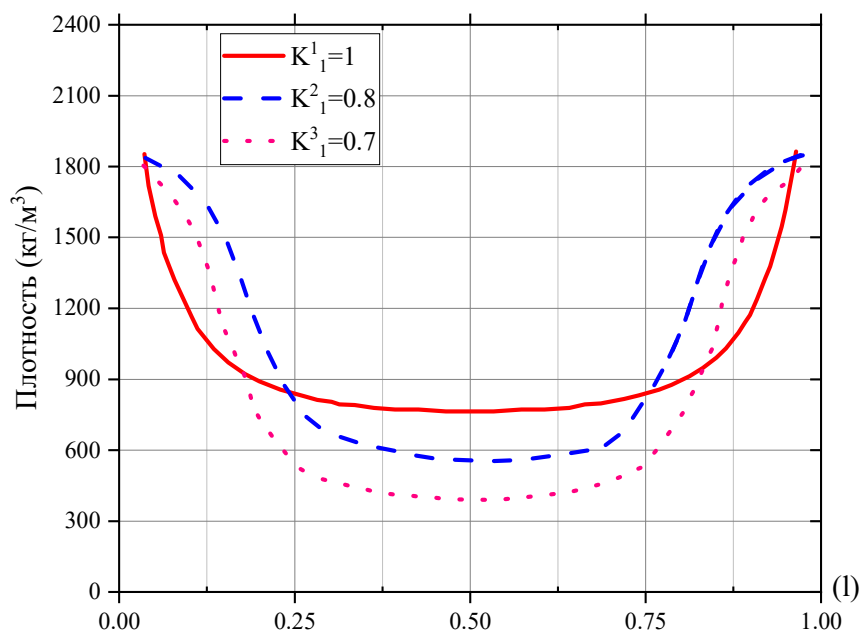


Рис. 5. Зависимость изменения плотности материала для различной степени заполнения формы

При производстве вариатропных материалов предлагается формировать изделие горизонтально в формах с перфорированными горизонтальными поверхностями. В данном случае под действием массы самой бетонной смеси увеличивается давление на нижний слой бетона по сравнению с верхним. В результате плотность, а, следовательно, и прочность, корки изделия у основания

будет немного выше, чем в верхней части. Так же происходит небольшое смещение минимума плотности относительно центра, которое зависит от высоты формы, то есть от толщины давящей бетонной смеси. Чем сильнее давление, тем больше разница плотности и прочности на горизонтальных границах изделия.

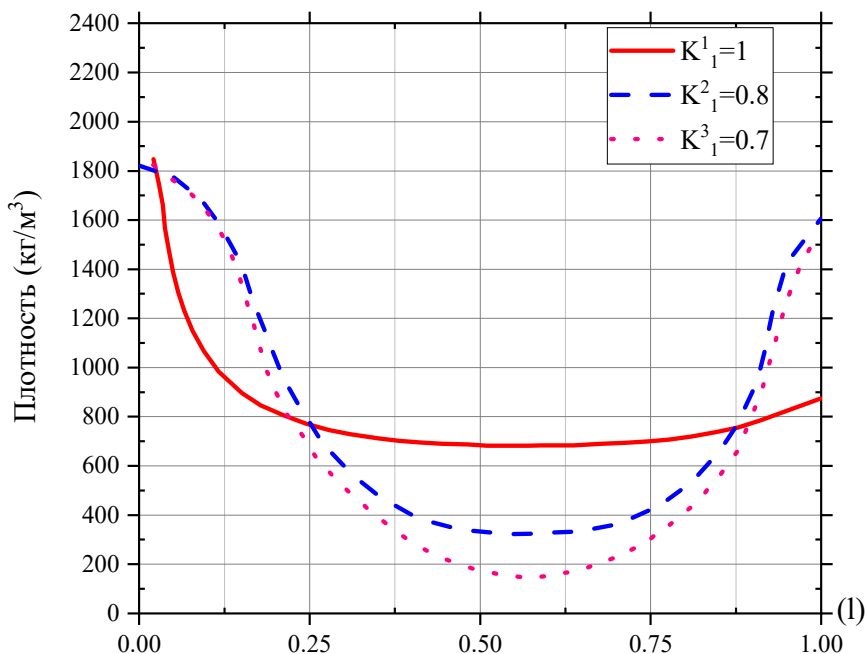


Рис. 6. Изменение плотности при различном индексе перфорации поверхностей

В соответствии с зависимостями изменения плотности строятся зависимости изменения прочности по толщине изделия.

Рисунок 6 может наглядно охарактеризовать изменение плотности в образце при вертикальном способе загрузки пенобетонной смеси при

условии различного индекса перфорации противоположных стенок формы.

На рисунке 7 представлено изменение прочности по одному из сечений материала. Несимметричность зависимостей связана с особенно-

стями формирования изделия. Графики представлены для изделий, отформованных по пеногазотехнологии со следующими коэффициентами заполнения формы: $K_1^1 = 1$; $K_1^2 = 0,8$; $K_1^3 = 0,7$.

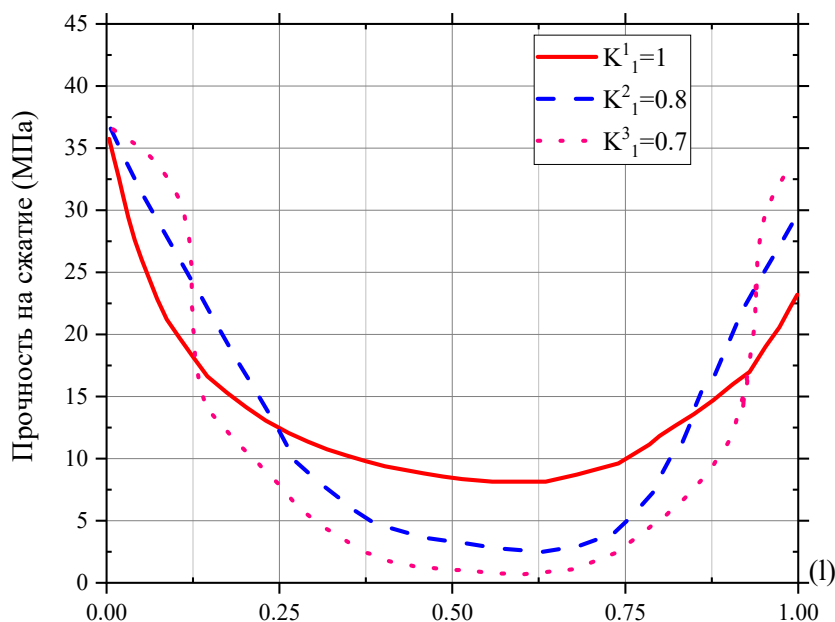


Рис. 7. Зависимость изменения прочности материала для различной степени заполнения формы с перфорированными вертикальными поверхностями

Из полученных зависимостей видно, что при повышении давления в системе плотность внешних слоёв не изменяется, а увеличивается плотность центральной части изделия, отвечающей за теплопроводность. То есть теплоизоляционные свойства материала ухудшаются, повышается

теплопроводность материала. Более наглядно соотношение различных значений плотностей в материале можно проиллюстрировать на рисунках 8, 9 и 10 представленных для значений плотностей в изделии с коэффициентами заполнения 1; 0.8 и 0.7 соответственно.

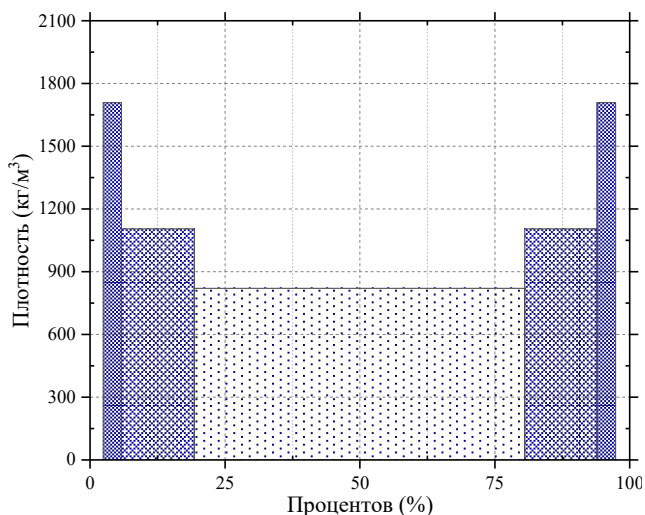


Рис. 8. Диаграмма распределения плотностей при коэффициенте заполнения формы $K_1^1=1$

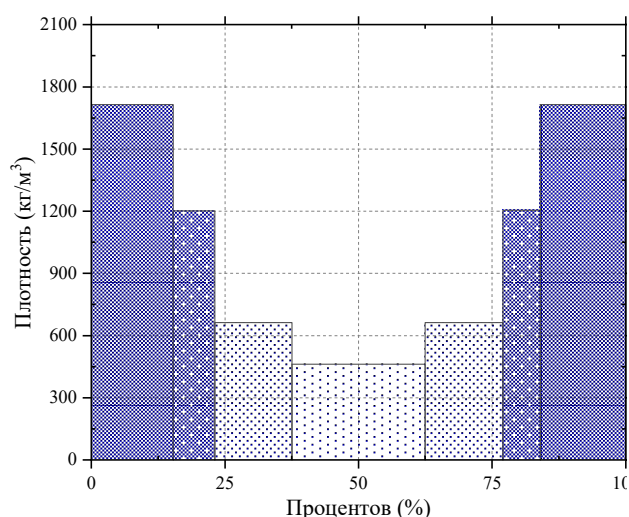


Рис. 9. Диаграмма распределения плотностей при коэффициенте заполнения формы $K_1^2=0,8$

Проанализировав имеющиеся диаграммы, можно сказать, что наилучшее соотношение

между плотной коркой и хорошими теплоизоляционными свойствами центра обладает изделие, полученное при коэффициенте заполнения

формы равно 0.7. При $K_1=1$ образец обладает более значительной конструкционной прочно-

стью и может использоваться в качестве облегченного конструкционного материала в малоэтажном строительстве.

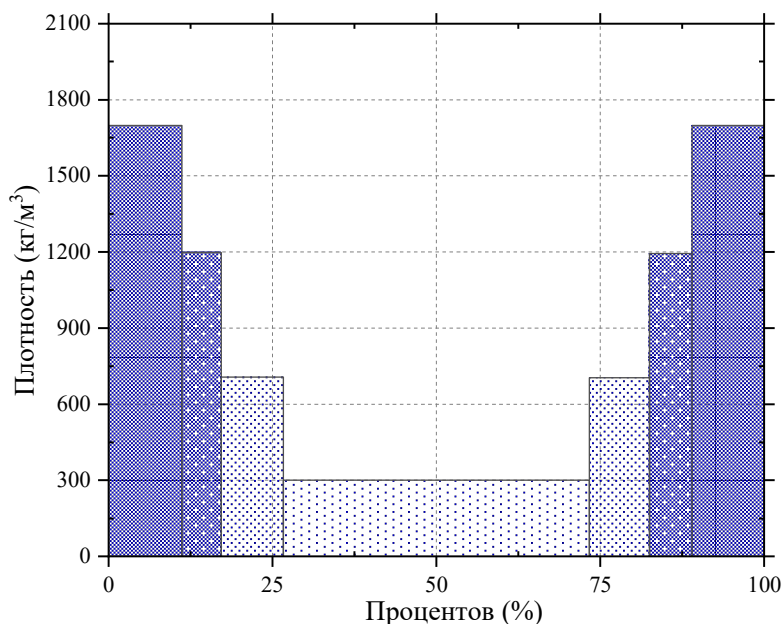


Рис. 10. Диаграмма распределения плотностей при коэффициенте заполнения формы $K_1^3=0,7$

Выводы. Полученные результаты и представленные закономерности говорят о возможности регулирования коэффициента вариатропности для ячеистых бетонов, которые зависят так же от коэффициента заполнения формы. С увеличением значения K_3 степень вариатропности увеличивается в 1,5 раза, что обеспечивает регулируемое повышение эксплуатационной нагрузки строительных изделий с вариатропной ячеистой структурой по сравнению с ячеистыми бетонами монотропной структуры при одинаковой материалоемкости изделия. Изменения значения площади перфорации, количества и типа отверстий перфорации поверхности формы позволит получать регулируемо дифференцированную вариатропность ячеистых изделий.

Изделия на основе ячеистого бетона с изменяющейся плотностью от периферии обладают достаточно хорошими теплоизоляционными свойствами за счёт низкой плотности в срединных слоях, при этом удовлетворяют всем требуемым показателями по прочности, твёрдости и морозостойкости благодаря высокой плотности поверхностного слоя. При этом отсутствие резкой границы предотвращает появление зоны контракционных напряжений и накопления конденсата.

Материалы исследования используются для оформления заявки на интеллектуальную собственность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kim D.V., Cong L.N., Van L.T., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic- mineral additives // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1425. Pp. 1–12.
2. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I. Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete // World Applied Sciences Journal. 2013. №25(1). Pp. 48–54.
3. Chica L., Alzate A. Cellular concrete review: new trends for application in construction // Construction and Building Materials. 2019. №200. Pp. 637–647.
4. Besbes E., Jury V., Monteau J.Y., Le B. A. Characterizing the cellular structure of bread crumb and crust as affected by heating rate using X-ray microtomography // Journal of Food Engineering. 2013. №115(3). Pp. 415–423.
5. Булавин В. А. Газобетон для монолитных ограждающих конструкций с вариатропной поровой структурой: диссертация. Ростов-на-Дону 2003. 145 с.
6. Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я., Шаимов М.Х., Кузьменко С.А. Способ изготовления вариатропных ячеистобетонных изделий. Патент RU 2243190 С1. 27.12.2004. 5 с
7. Чернов А.Н. Вариатропный ячеистый бетон переменной плотности // Бетон и железобетон. 1982. №03. С 26–29.
8. Большаков В.И., Мартынеко В. А. Вариатропный ячеистый бетон // Строительные материалы и изделия. 2002. №9. 3 с.

9. Кара К.А., Шорстов Р.А. Приемы создания газобетона с вариатропной структурой // Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 23–28.

10. Miryuk O. Formation of structure magnesium foamed concrete // International Journal of Civil Engineering, 2017. Vol. 6, Issue 2. Pp. 1–10.

11. Коротышевский О.В., Шкуридин В.Г. Способ приготовления поризованной строительной смеси и устройство для его осуществления (варианты). Патент РФ №2081099 С1. (1997). 19 с.

12. Бруяко М.Г., Ушков В.А., Торосян Д.В., Григорьева АИ., Волов АД., Ергенян А.М., Творогова Е.А. Способ изготовления вариатропного ячеистого бетона. Патент RU 2626092 С1. 21.07.2017. 6 с.

13. Шорстов Р.А., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Технологии получения многослойных конструкций вариатропной структуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №4. С. 32–39. DOI: 10.34031/article_5cb1e65fe51130.63177531.

14. Richard C., Bruno F., Anne-lise B., He'le'ne D., Sophie O. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity // Construction and Building Materials. 2006. № 20. С. 286–295.

15. Olga M. Liquid-glass concrete of variable density // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 869. 2020. 032025. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/869/3/032025

16. Казанцева Л.К. Формирование ячеистой структуры и технология пеноматериалов из цеолитсодержащего сырья: диссертация. Томск 2002. 262 p.

17. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: A review // Cement and Concrete Composites. 2000. №22(5). Pp. 321–329.

18. Ramamurthy K., Kunhanandan N.E.K., Indu S.R.G. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and Concrete Composites. 2009. №31(6). Pp. 388–396.

19. ГОСТ 23499-2009. Материалы и изделия звукоизоляционные и звукопоглощающие строительные. Общие технические условия ГОСТ от 10 ноября 2010 г. № 23499–2009. 35 с

Информация об авторах

Бруяко Михаил Герасимович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительного материаловедения». E-mail: mbruyako@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Баженова Софья Ильдаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительного материаловедения». E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Ву Ким Зиен, аспирант кафедры «Строительного материаловедения». E-mail: kimdienxdtb@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 16.01.2022 г.

© Бруяко М.Г., Баженова С.И., Ву Ким Зиен, 2022

Bruyako M.G., *Bazhenova S.I., Vu Kim Dien

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com*

CELLULAR CONCRETES WITH AN VARIATROPIC STRUCTURE AT THE PRODUCT FORMING STAGE

Abstract. The paper presents a one-stage method of development results to obtaining effective structural and thermal insulation products based on cellular concrete with variatropic structure and the study of their properties. In addition, the paper presents the study's results on determining the influence of initial components quantitative ratio of the foam-aerated concrete mixture and technological regimes. For this purpose, a model system $[Ca(OH)_2; Al; H_2O; NaF]$ has been created. The effect of the foam-aerated concrete mixture's form filling ratio ($1.0 \div 0.7$) and the perforation index of the form walls on the formation and properties of cellular concrete with a variatropic structure is studied. Influence of variatropic structure of cellular concretes on strength characteristics of products based on them is studied. It is confirmed that products based on cellular concrete with variable density from the periphery have sufficiently good thermal insulation properties due to the low density in the central zone. Concurrently, it meets all the required

indicators of strength, hardness and erosion resistance due to the high density of the surface layer. At the same time, the absence of a sharp boundary prevents the zone appearance of contractive stresses and condensate accumulation. The experimental results confirm the possibility of obtaining products based on variatropic cellular concrete with the specified properties and producing building products and structural elements with higher strength indicators than similar products based on monotonic cellular concrete while maintaining material intensity.

Keywords: Cellular concrete, variable structures, aerated concrete, foam concrete, perforated mold.

REFERENCES

1. Kim D.V., Cong L.N., Van L.T., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic- mineral additives. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1425. Pp. 1–12.
2. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I.: Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete. *World Applied Sciences Journal*. 2013. No. 25(1). Pp. 48–54.
3. Chica L., Alzate A. Cellular concrete review: new trends for application in construction. *Construction and Building Materials*. 2019. 200. Pp. 637–647.
4. Besbes E., Jury V., Monteau J.Y., Le Bail A.: Characterizing the cellular structure of bread crumb and crust as affected by heating rate using X-ray microtomography. *Journal of Food Engineering*. 2013. No. 115(3). Pp. 415–423.
5. Bulavin V.A. Aerated concrete for monolithic enclosing structures with a variotropic porous structure: dissertation [Gazobeton dlya monolitnykh ograždayushchikh konstruktsiy s variatropnoy porovoy strukturoy]. Rostov-on-Don 2003. 145 p. (rus)
6. Korolev A.S., Voloshin E.A., Trofimov B.Ya., Shaimov M.Kh., Kuzmenko S.A. Method for manufacturing variotropic cellular concrete products [posob izgotovleniya variatropnykh yacheistobetonnykh izdeliy]. Patent RU 2243190 C1. 12/27/2004. 5p. (rus)
7. Chernov A.N. Variotropic cellular concrete of variable density [Variatropnyy yacheisty beton premennoy plotnosti]. *Concrete and reinforced concrete*. 1982. No. 03. Pp. 26–29. (rus)
8. Bolshakov V.I., Martynenko V.A. Variotropic cellular concrete [Variatropnyy yacheisty beton]. *Building materials and products*. 2002. No. 9. 3 p. (rus)
9. Kara K.A., Shorstov R.A. Techniques for creating aerated concrete with a variotropic structure [Priyemy sozdaniya gazobetona s variatropnoy strukturoy] Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Pp. 23–28. (rus)
10. Miryuk O. Formation of structure magnesium foamed concrete. *International Journal of Civil Engineering*. Feb - Mar 2017. Vol. 6, Issue 2. Pp. 1–10.
11. Bruyako M.G., Ushkov V.A., Torosyan D.V., Grigor'eva A.I., Volov A.D. Ergenyan A. M and Tvorogova E.A. Method for making variatropic cellular concrete [Sposob izgotovleniya variatropnogo yacheistogo betona]. Patent RU 2626092 C1. 21.07.2017. 6 p. (rus)
12. Shorstov R.A., Suleimanova L.A., Kara K.A. Technologies for obtaining multilayer structures of a variotropic structure [Tekhnologii polucheniya mnogoslonykh konstruktsiy variatropnoy struktury]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 4. Pp. 32–39. DOI: 10.34031/article_5cb1e65fe51130.63177531. (rus)
13. Richard C., Bruno F., Anne-lise B., He'le'ne D., Sophie O. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. *Construction and Building Materials*. 2006. No. 20. Pp. 286–295.
14. Olga M. Liquid-glass concrete of variable density. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 869. 2020. 032025. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/869/3/032025.
15. Kazantseva L.K. Formation of a cellular structure and technology of foam materials from zeolite-containing raw materials [Formirovaniye yacheistoy struktury i tekhnologiya penomaterialov iz tseolitsoderzhashchego syr'ya]: dissertation. Tomsk 2002. 262p. (rus)
16. Narayanan N., Ramamurthy K.: Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2000. No. 22(5). Pp. 321–329.
17. Ramamurthy K., Kunhanandan N.E.K., Indu S.R.G. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009. No. 31(6)/ Pp. 388–396.
18. GOST 23499-2009. Sound-proof and sound-absorbing building materials and products [Materialy i izdeliya zvukoizolyatsionnyye i zvukopogloshchayushchiye stroitel'nyye]. General technical conditions GOST dated November 10, 2010 No. 23499-2009. 35p. (rus)

Information about the authors

Bruyako, Mikhail G. PhD, Associate Professor of Department of Building Materials Science. E-mail: mbruyako@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Bazhenova, Sofya I. PhD, Associate Professor of Department of Building Materials Science. E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Vu Kim Dien. Postgraduate student, Department of Building Materials Science. E-mail: kimdienxdb@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Received 16.01.2022

Для цитирования:

Бруйко М.Г., Баженова С.И., Ву Ким Зиен. Ячеистые бетоны с вариатропной структурой на стадии формования изделия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-8-18

For citation:

Bruyako M.G., Bazhenova S.I., Vu Kim Dien. Cellular concretes with an variatropic structure at the product forming stage. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-8-18