

Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

*Д.т.н., профессор Е.И. Шмитько;
к.т.н., доцент А.А. Резанов;
аспирант А.А. Бедарев*,*

ФГБОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: газосиликат; ячеистый бетон; мультипараметрическая модель; оптимизация структуры

Сегодня силикатный ячеистый бетон (газосиликат) занимает ведущие позиции среди стеновых строительных материалов. Это вполне объясняется многочисленными преимуществами данного материала: он негорюч, легок и прочен, экологически чист и экономичен. Благодаря этим свойствам технология ячеистого силикатного бетона широко распространена по всему миру.

В настоящее время активизировались работы по вопросам технического регулирования автоклавных ячеистых бетонов нового поколения [1]. Усиление концепции энергосбережения относительно ограждающих конструкций сформировало необходимость более эффективного использования сырьевых и энергетических ресурсов. Это представляется возможным за счет максимального снижения плотности и теплопроводности стеновых конструкций при заданных показателях их качества [2–5]. Однако современный уровень технологии не позволяет стабильно получать ячеистый бетон совершенной структуры, что особенно характерно для изделий пониженной плотности. Создание совершенных структур возможно лишь на основе эффективного управления процессами структурообразования ячеистого бетона.

Многие исследователи отмечают, что прочность ячеистого бетона снижается с уменьшением плотности по закону, близкому к степенному [4], в связи с нарастанием макроструктурных дефектов в виде рваных слившихся пор и их конгломератов, образующихся вследствие утончения межпоровых перегородок [6–14]. Особенно заметно это проявляется в изделиях плотностью менее 300 кг/м^3 [15]. Поэтому решение общей задачи предполагает создание условий, способствующих одновременному формированию в изделиях и качественной ячеистой структуры, и максимально прочной силикатной матрицы.

Для получения газосиликата пониженной средней плотности с требуемым уровнем прочностных свойств необходимо создать условия для формирования как можно менее дефектной ячеистой структуры и как можно более прочной межпоровой перегородки [13]. Поскольку одни и те же факторы одновременно оказывают влияние как на свойства микро-, так и на свойства макроструктуры ячеистого бетона [6, 7], решение такой трудной задачи оказывается возможным лишь на основе эффективного управления процессами структурообразования на всех масштабных уровнях и стадиях процесса.

Решить такую задачу удалось только методами современного компьютерного моделирования, которые все чаще применяются в исследованиях строительных материалов [16–27]. Этому решению и посвящена данная работа.

Задача учета взаимосвязи и влияния определяющих факторов на процессы структурообразования различных масштабных уровней с их последующей оптимизацией потребовала разработки мультипараметрической модели на основе системно-структурного метода.

Наши исследования охватывают самые перспективные марки по плотности ячеистого силикатного бетона: D500, D400, D300 и D100.

В исследованиях использованы: известково-песчаное вяжущее (ИПВ) активностью 30–33% и временем гашения (без применения замедлителя) 2 мин; портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Осколцемент»; в качестве замедлителя – гипс полуводный Г-5; в качестве затворителя – вода водопроводная. Исследования ориентированы на литьевую технологию блок-массивов.

Методика компьютерного моделирования предполагает, прежде всего, тщательный анализ факторов, влияющих на ход процесса. При рассмотрении данной задачи учитывалось, что Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

качество микроструктуры определяется, главным образом, составом вяжущего, тонкостью его помола, В/Т-отношением и режимом автоклавной обработки. На процессы макроструктурообразования ячеистого бетона оказывает влияние довольно обширный ряд факторов: дозировка и активность газообразователя, В/Т-отношение, дозировки сырьевых компонентов, их удельные поверхности и температуры, режим перемешивания и характеристики смесителя. При этом очень важно обеспечить согласованность процессов газообразования и нарастания вязко-пластичных свойств смеси.

Такое обилие управляющих факторов потребовало разработки мультипараметрической модели, которая позволяет провести последовательную оптимизацию на всех этапах исследования и масштабных уровнях.

Исследования проводились следующим образом. Вначале осуществлялась оптимизация факторов, влияющих на формирование микроструктуры, а затем, при оптимальных значениях этих факторов, проводились исследования по оптимизации макроструктуры. Это позволило получить ячеистый бетон с максимально высокими качественными показателями. Таким образом, создание мультипараметрической модели проводилось в несколько этапов.

На первом этапе сформирована математическая модель, описывающая влияние состава силикатной матрицы ячеистого бетона на его прочность. Для этого использованы основные положения теории повышения качества микроструктуры ячеистого бетона, развитые в работах Е.М. Чернышова и Е.И. Дьяченко [28, 29]. Полученные ими экспериментальные зависимости представлены в специальной методике оптимизации, суть которой заключается в следующем. На основе задаваемой минимально возможной средней плотности изделий, исходя из принципа максимального использования потенциала сопротивления разрушению микробетона, вычисляется величина средней плотности силикатного микробетона. Данные о плотности ячеистого бетона и силикатного микробетона используются для определения доли ячеистых пор в ячеистом бетоне. Определяется средний диаметр ячеистых пор на основе его взаимосвязи с объемной долей ячеистой пористости. По экспериментальным зависимостям вычисляется ожидаемый коэффициент плотности упаковки, который, совместно с данными о вероятном среднем диаметре ячеистых пор, используется для вычисления толщины межпоровой перегородки. В соответствии с толщиной межпоровой перегородки производится расчет среднего диаметра зерна кремнеземистого компонента из необходимого и достаточного условия обеспечения укладки в межпоровую перегородку 4–5 зерен по ее толщине. На основе найденного значения диаметра зерна кремнеземистого компонента выполняется расчет его требуемой удельной поверхности, а затем – величины массовой доли активного СаО в составе смеси. Исходя из данных об активности извести, осуществляется расчет ее дозировки и дозировки кремнеземистого компонента. В связи с введением портландцемента производится корректировка содержания СаО.

Зависимости, представленные в методике [29], устанавливают однозначную связь между проектируемой средней плотностью газосиликата, дозировками извести, кремнеземистого компонента, их удельными поверхностями, дозировкой портландцемента, его химическим и минералогическим составом, активностью извести и дозировкой газообразователя с позиций получения оптимального количества цементирующего вещества, что позволяет вместо перечисленных независимых управляющих факторов использовать лишь один. Например, принимая дозировку портландцемента за независимый управляющий фактор, для газосиликата любой проектной марки по плотности определяются оптимальные значения других перечисленных факторов.

Применение такого подхода позволило проводить дальнейшую оптимизацию макроструктуры ячеистого бетона на составах, обеспечивающих оптимальное микроструктурообразование, а также исключить из рассмотрения часть управляющих факторов, так как их оптимальные значения уже установлены.

Сокращение числа управляющих факторов проводилось также на *втором этапе* лабораторных исследований за счет проведения специальных мероприятий. Для этого все сырьевые компоненты предварительно термостатировались и входили в реакцию с постоянной температурой, а перемешивание осуществлялось в теплоизолированном смесителе. Поэтому вместо учета влияния температур всех сырьевых компонентов в качестве температурного фактора рассматривалась только температура воды затворения. Поскольку в производственных условиях температуры компонентов могут быть различны, для учета влияния изменяющихся технологических факторов в окончательную модель включено уравнение энергетического баланса с учетом температуры используемых материалов.

Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

Указанные мероприятия позволили сократить число независимых управляющих факторов до четырех, в качестве них выступали: дозировка портландцемента, дозировка полуводного гипса, В/Т-отношение и температура воды затворения. Другие управляющие факторы представлены как зависимые от названных независимых и включены в структуру мультипараметрической модели через соответствующие расчетные формулы.

Многие исследователи отмечают, что определяющее влияние на согласованность процессов газообразования и нарастания вязко-пластичных свойств силикатной смеси оказывают ее начальные характеристики. В работах [6, 30] указывается, что температура смеси в момент ее заливки в форму должна составлять 38°C. В случае превышения указанной температуры в смесителе начинается реакция газообразования, при этом бетон может не достигнуть расчетной плотности из-за потери газа на этапе перемешивания. Кроме того, завышенная температура способствует более быстрой гидратации извести, и, соответственно, изменению сроков схватывания формовочной массы. Если температура к моменту заливки окажется меньше требуемой, время вспучивания и сроки схватывания увеличатся, также возможны проседание смеси и потеря газа в смеси вследствие недостаточной ее вязкости.

Кроме начальной температуры, на качество ячеистой структуры оказывает влияние и вязкость ячеистобетонной смеси в момент заливки. В «Инструкции по изготовлению изделий из ячеистого бетона» СН 277-80 приводятся рекомендованные значения текучести смеси как величины, обратной вязкости, в виде диаметра расплыва смеси по Суттарду. В наших исследованиях эти рекомендации выполнялись.

На следующем этапе для каждой из исследуемых плотностей были поставлены факторные эксперименты вида 2^4 на основе ротатбельного центрального плана, дополненного звездными точками. Уровни варьирования факторов приведены в таблице 1. За отклик принимались значения начальных реологических характеристик (диаметр расплыва смеси по Суттарду) и температуры смеси. Начальная температура смеси определялась при помощи погружной термодпары, подключенной через систему сбора данных к ЭВМ. Это позволило вести непрерывное наблюдение и запись значений температуры в автоматическом режиме.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов для идентификации модели начальных реологических и температурных характеристик

Наименование фактора	Марка по плотности	Уровни факторов				
		-α	-1	0	+1	+α
В/Т-отношение	D500	0.50	0.54	0.58	0.62	0.66
	D400	0.57	0.61	0.65	0.69	0.73
	D300	0.62	0.68	0.74	0.80	0.86
	D100	0.78	0.82	0.86	0.90	0.94
Дозировка портландцемента, %	D500	10	15	20	25	30
	D400	10	15	20	25	30
	D300	10	15	20	25	30
	D100	10	15	20	25	30
Дозировка гипса, %	D500	0	2.5	5	7.5	10
	D400	0	2.5	5	7.5	10
	D300	0	2.5	5	7.5	10
	D100	0	2.5	5	7.5	10
Температура воды затворения, °C	D500	16	20	24	28	32
	D400	16	20	24	28	32
	D300	16	20	24	28	32
	D100	16	20	24	28	32

В результате проведенных экспериментов получены математические модели, позволяющие оптимизировать начальные реологические (D) и температурные (T) характеристики смеси. Например, для ячеистого бетона марки по плотности D500 они имеют вид:

$$D = -162.2530 + 386.1257 \cdot B / T + 3.8535 \cdot Ц - 4.6099 \cdot Г + 1.0381 \cdot Tв - 4.3938 \cdot B / T \cdot Ц + 8.4625 \cdot B / T \cdot Г + 0.0418 \cdot Ц \cdot Г - 0.0355 \cdot Ц \cdot Tв - 0.0963 \cdot Г \cdot Tв - 185.9561 \cdot B / T^2; \quad (1)$$

$$T = 326.7609 - 713.1882 \cdot B/T - 7.4005 \cdot Ц + 2.5122 \cdot Г + 0.5448 \cdot Tв + 9.4063 \cdot B/T \cdot Ц - 4.3125 \cdot B/T \cdot Г + 420.85193 \cdot B/T^2 + 0.02093 \cdot Ц^2 + 0.04774 \cdot Г^2, \quad (2)$$

где D – диаметр расплыва смеси по Суттарду, см; B/T – В/Т-отношение; $Ц$ – дозировка портландцемента, % по массе в составе сухих компонентов; $Г$ – дозировка гипса, % по массе в составе сухих компонентов; $Tв$ – температура воды затворения, °С; T – температура смеси в момент заливки, °С.

Проверка факторов на значимость осуществлялась по критерию Стьюдента. Адекватность моделей подтверждена их проверкой по критерию Фишера.

Следует заметить, что зависимости (1) и (2) получены для фиксированной температуры сырьевых компонентов. Если же температура сырьевых компонентов перед перемешиванием иная, то необходимо модели (1) и (2) дополнить уравнением энергетического баланса системы компонентов.

На практике такая система обладает инерционностью, связанной с особенностями теплообменных процессов. Однако продолжительность выравнивания температур достаточно мала по сравнению с продолжительностью перемешивания и вспучивания формовочной смеси, а в силу того, что компоненты тонко размолоты, частицы обладают большой удельной поверхностью и подвергаются интенсивному перемешиванию, скорость теплообменных процессов системы значительно увеличивается. Поэтому в работе для упрощения расчетов было сделано допущение, что температуры компонентов при их перемешивании выравниваются мгновенно, и этот идеализированный момент времени назван условным нулевым моментом.

Уравнение энергетического состояния системы компонентов газосиликатной смеси при перемешивании в условный нулевой момент времени для замкнутой системы без теплообмена с внешней средой и без учета тепловыделения от химических реакций имеет вид:

$$C_B \cdot m_B \cdot (T_{CM} - T_B) + C_H \cdot m_H \cdot (T_{CM} - T_H) + C_{II} \cdot m_{II} \cdot (T_{CM} - T_{II}) + C_{Ц} \cdot m_{Ц} \cdot (T_{CM} - T_{Ц}) + C_{Г} \cdot m_{Г} \cdot (T_{CM} - T_{Г}) + C_A \cdot m_A \cdot (T_{CM} - T_A) + C_C \cdot m_C \cdot (T_{CM} - T_C) = 0, \quad (3)$$

где $C_B, C_H, C_{II}, C_{Ц}, C_{Г}, C_A$ и C_C – удельные теплоемкости соответственно воды, извести, песка, цемента, гипса, алюминиевой пудры и смесителя, кДж/(кг·К);

$T_{CM}, T_B, T_H, T_{II}, T_{Ц}, T_{Г}, T_A, T_C$ – температуры в условный нулевой момент времени при перемешивании соответственно силикатной смеси, воды, извести, песка, цемента, гипса, алюминиевой пудры и смесителя, °С;

$m_B, m_H, m_{II}, m_{Ц}, m_{Г}, m_A, m_C$ – массы соответственно воды, извести, песка, цемента, гипса, алюминиевой пудры и смесителя, кг.

Уравнение (3) позволяет рассчитывать температуру силикатной смеси при известных температурах всех сырьевых компонентов, включив их как управляющие факторы в общую структуру разрабатываемой мультипараметрической модели.

На основе уравнений (1)–(3) и функциональных зависимостей, представленных в методике оптимизации количества цементирующего вещества [17], получены системы уравнений, которые описывают влияние управляющих параметров на температурное и реологическое состояния силикатной смеси в момент ее заливки в форму. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} T_{CM} = F_1(B/T, Ц, Г, Tв, T_{II}, T_{Ц}, T_{Г}, T_C, M_C, C_C, A_{II}, K_{осн.ц}), \\ D = F_2(B/T, Ц, Г, Tв, T_{CM}, A_{II}, K_{осн.ц}), \\ T = F_3(B/T, Ц, Г, Tв, T_{CM}, A_{II}, K_{осн.ц}), \end{cases} \quad (4)$$

где M_C и C_C – величина массы смесителя по отношению к массе компонентов, % и удельная теплоемкость смесителя соответственно, кДж/(кг·К); A_{II} – активность извести, %; $K_{осн.ц}$ – коэффициент основности цемента.

Из-за большого объема уравнений их конкретный вид не представлен.

Блок-схема мультипараметрической модели для оптимизации структуры ячеистого бетона приведена на рис. 1.

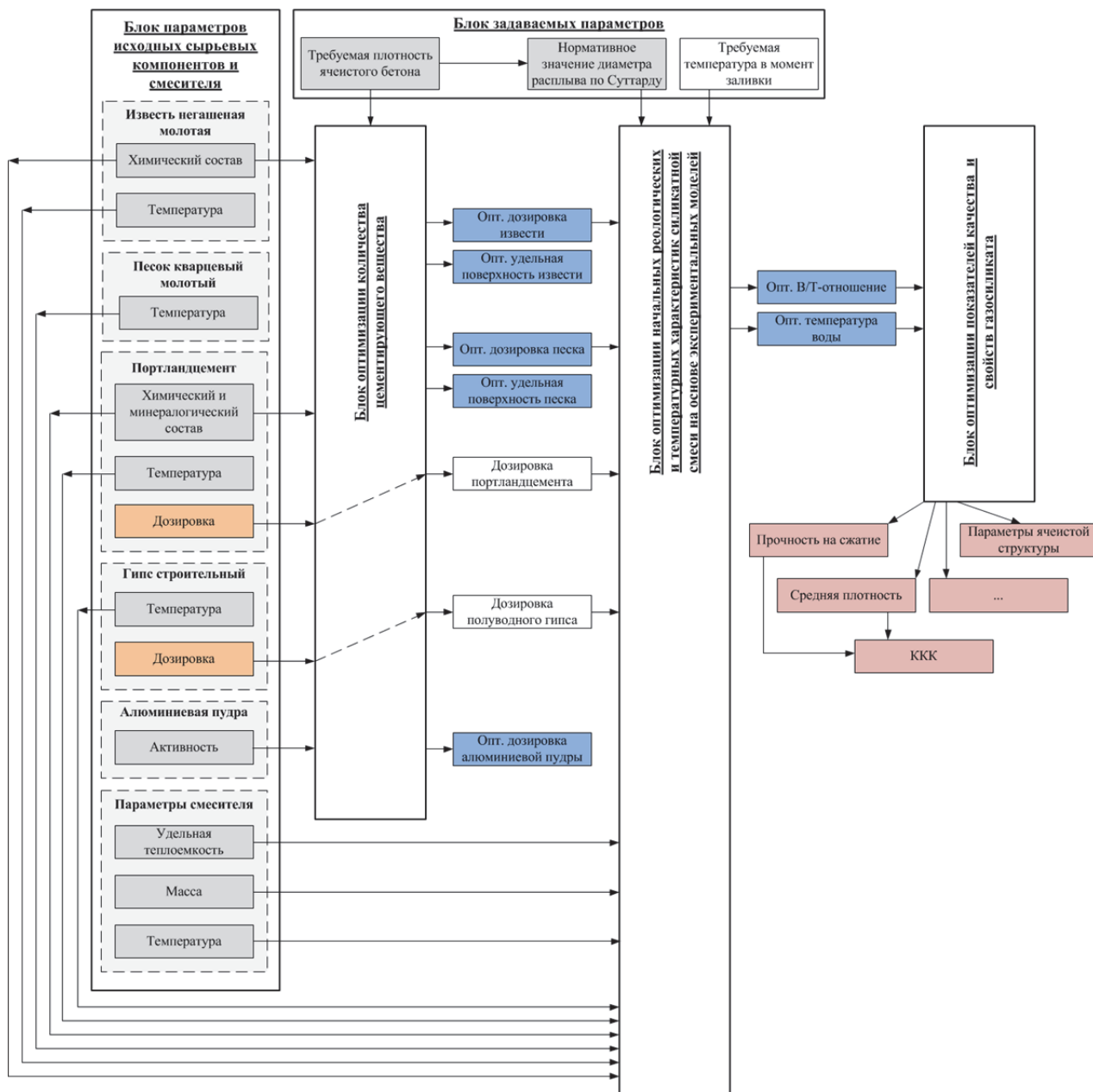


Рисунок 1. Блок-схема мультипараметрической модели для оптимизации структуры ячеистого бетона

Сущность представленной блок-схемы сводится к следующему. На основе данных о химическом составе компонентов по методике [29] определяются активность извести и коэффициент основности портландцемента, которые затем совместно с данными о дозировках портландцемента и гипса используются в оптимизационном блоке расчета количества цементирующего вещества.

На основе экспериментальных зависимостей и данных о требуемой плотности ячеистого бетона вычисляются оптимальные, с точки зрения получения максимально прочной межпоровой перегородки, дозировки и параметры сырьевых компонентов. Затем данные первого блока оптимизации совместно с информацией о температурах сырьевых компонентов, активности извести, коэффициенте основности портландцемента и общей исходной теплоемкости смесителя используются в блоке оптимизации начальных реологических и температурных характеристик силикатной смеси (4). Блок реализует решение систем уравнений вида (4) с определением оптимальных значений В/Т-отношения и температуры воды затворения. На этом оптимизация начальных характеристик силикатной смеси заканчивается.

На следующем этапе получены математические модели, описывающие влияние дозровок портландцемента и полуводного гипса на процесс формирования ячеистой структуры. Поставлены факторные эксперименты вида 2^2 на основе ротatableльного центрального плана, дополненного звездными точками. Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2. В качестве выходной характеристики рассматривалась прочность на сжатие бетона. Для этого из одного отформованного массива вырезались 6 образцов-кубов со стороной 7 см, которые подвергались автоклавной обработке при давлении 0.8 МПа по режиму 1.5 ч (подъем давления) + 8 ч (выдержка) + естественное остывание.

Таблица 2. Уровни варьирования факторов для проведения экспериментов для получения математических моделей процесса формирования ячеистой структуры

Наименование фактора	Марка по плотности	Уровни факторов				
		- α	-1	0	+1	+ α
Дозировка портландцемента, %	D500	10	12.9	20	27.1	30
	D400	10	12.9	20	27.1	30
	D300	10	12.9	20	27.1	30
	D100	12.2	13	15	17	17.8
Дозировка гипса, %	D500	0	1.5	5	8.5	10
	D400	0	1.5	5	8.5	10
	D300	0	1.5	5	8.5	10
	D100	1.8	2	2.5	3	3.2

Получены полиномиальные модели влияния добавок портландцемента и полуводного гипса на прочностные характеристики ячеистого бетона в виде коэффициента конструктивного качества (ККК), равного отношению прочности на сжатие образцов к квадрату их средней плотности:

- для ячеистого бетона марки по плотности D500:

$$\begin{aligned}
 KKK_{D500} = & 0.000008031 + 1.9902 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Ц} + 0.000001095 \cdot \Gamma + \\
 & 1.1097 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Ц} \cdot \Gamma - 6.5055 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Ц}^2 - 1.0320 \cdot 10^{-7} \cdot \Gamma^2;
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

- для ячеистого бетона марки по плотности D400:

$$\begin{aligned}
 KKK_{D400} = & 0.000002120 + 4.9058 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Ц} + 0.000002276 \cdot \Gamma - \\
 & 4.2487 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Ц} \cdot \Gamma - 5.3009 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Ц}^2 - 8.6384 \cdot 10^{-8} \cdot \Gamma^2;
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

- для ячеистого бетона марки по плотности D300:

$$\begin{aligned}
 KKK_{D300} = & -0.000005983 + 0.000001112 \cdot \text{Ц} + 0.000001794 \cdot \Gamma - \\
 & 4.0589 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Ц} \cdot \Gamma - 1.8742 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Ц}^2 - 6.6770 \cdot 10^{-8} \cdot \Gamma^2;
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

- для ячеистого бетона марки по плотности D100:

$$\begin{aligned}
 KKK_{D100} = & 0.00002264 - 9.4416 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Ц} - 0.00000781 \cdot \Gamma + \\
 & 2.275 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Ц} \cdot \Gamma + 9.5 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Ц}^2 + 7.62 \cdot 10^{-7} \cdot \Gamma^2;
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

где Ц – дозировка портландцемента, % по массе в составе сухих компонентов; Г – дозировка гипса, % по массе в составе сухих компонентов.

Анализ зависимостей (5)–(8) позволяет установить оптимальные дозировки гипса и портландцемента.

В таблице 3 представлены значения прочности на сжатие образцов-кубов и обеспечивающие их оптимальные дозировки и параметры сырьевых компонентов, которые рассчитаны при помощи разработанной мультипараметрической модели.

Таблица 3. Прочность на сжатие образцов-кубов и оптимальные дозировки и параметры сырьевых компонентов, рассчитанные при помощи разработанной мультипараметрической модели (на 1 м³)

Марка по плотности	Известь молотая негашеная с активностью 85.6%		Песок молотый		Портландцемент	Гипс полуводный	Вода	Алюминиевая пудра	Прочность на сжатие, МПа
	Удельная поверхность, м ² /кг	Дозировка, кг	Удельная поверхность, м ² /кг	Дозировка, кг	Дозировка, кг	Дозировка, кг	В/Т	Дозировка, кг	
D500	560	76.64	290	269.16	98.80	30.40	0.617	0.480	4.2
D400	560	102.88	310	201.13	38.00	38.00	0.762	0.541	3.5
D300	560	43.95	320	158.12	64.13	18.81	0.704	0.608	1.6
D100	560	24.33	340	56.42	12.35	1.90	0.844	0.759	0.2

Полученные высокие показатели физико-механических характеристик подтверждены исследованиями макроструктуры (рис. 2). Все образцы имеют совершенную ячеистую структуру с минимальным количеством дефектов и высоким коэффициентом сферичности.

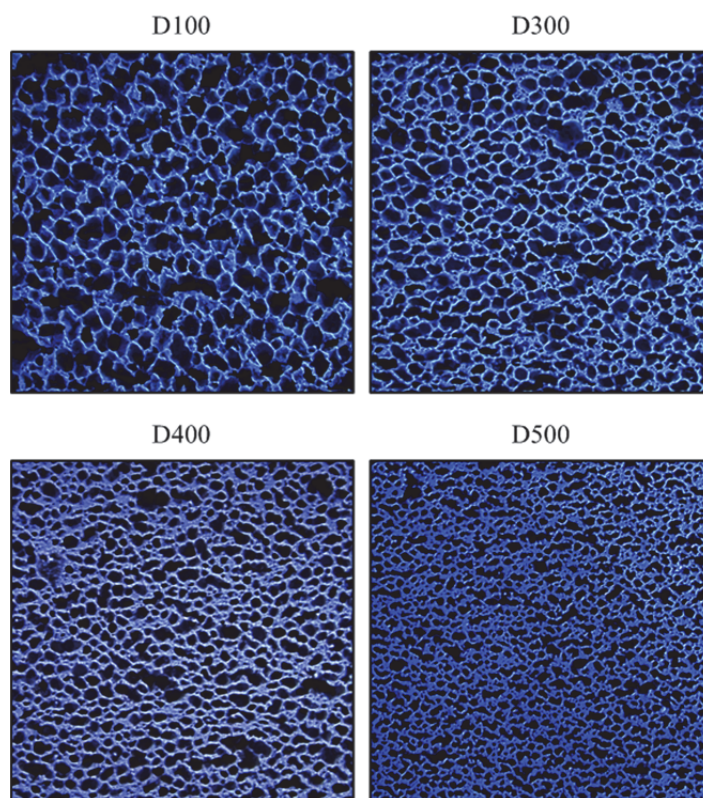


Рисунок 2. Фотографии шлифов ячеистого бетона, полученного на основе оптимизации с использованием мультипараметрической модели (показаны области 40 x 40 мм, масштаб 1:1)

Таким образом, разработка и применение мультипараметрической модели позволили согласованно провести оптимизацию на всех масштабных уровнях формирования структуры ячеистого бетона. Особенно наглядно это реализуется при получении ячеистого бетона марки по плотности D400, для которого средняя прочность на сжатие составила 3.5 МПа, что соответствует классу по прочности на сжатие В2.5 (по ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия» этот показатель не превышает значений, соответствующих классу по прочности на сжатие В1.5). Выполненные исследования представляют собой один из этапов большой работы, ориентированной на создание программно-вычислительного комплекса, позволяющего осуществлять комплексную оптимизацию состава ячеистого силикатного бетона пониженной плотности.

Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

Следует отметить, что полученная модель обладает большим потенциалом для реализации систем программного расчета оптимального состава. Разработка и применение таких систем крайне необходимы в заводской практике для нейтрализации негативного влияния нестабильного качества сырьевых материалов на технологию и свойства ячеистого бетона [5, 31, 32]. В ходе разработки одной из таких систем и успешной апробации в лабораторных условиях была доказана высокая эффективность оптимизации с использованием предложенной мультипараметрической модели [33, 34]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы «Cellular Concrete» для ЭВМ №2012613270.

Литература

1. Чернышов Е.М., Федин А.А., Потамошнев Н.Д., Кухтин Ю.А. Газосиликат: современная гибкая технология материала и изделий // Строительные материалы. 2007. №4. С. 1–10.
2. Чернышов Е.М., Неупокоев Ю.А., Потамошнев Н.Д. Высокопоризованные ячеистые бетоны для эффективных теплоизоляционных плит // Вестник ТГАСУ. 2007. №1. С. 184–190.
3. Drochytka R., Zach J., Korjenic A., Hroudova J. Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste // Energy and Buildings. 2013. Vol. 58. Pp. 319–323.
4. Liana C., Zhugeb Y., Beechama S. The relationship between porosity and strength for porous concrete // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Issue 11. Pp. 4294–4298.
5. Сахаров Г.П. Ячеистые бетоны в посткризисный период // Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2011. №1. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.nso-journal.ru/images/stories/NSO/2011/01_8.pdf (Дата обращения: 25.03.2013).
6. Федин А.А. Научно-технические основы производства и применения силикатного ячеистого бетона. М.: ГАСИС, 2002. 264 с.
7. Бонеманн К., Дашнер П. Новые разработки в сфере производства автоклавного ячеистого бетона // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве: сб. науч. тр. Вып. 2. Днепрпетровск: ПГАСА, 2005. С. 124–134.
8. Горяйнов К.Э., Горяйнова С.К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М.: Стройиздат, 1982. 376 с.
9. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А. Технология теплоизоляционных материалов. М.: Стройиздат, 1980. 399 с.
10. Попов В.А. Условия управления кинетическими параметрами синтеза цементирующих веществ силикатных автоклавных материалов: Дисс. на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Воронеж, 1991. 248 с.
11. Шмицько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Изучение процесса структурообразования ячеистого силикатного бетона автоклавного твердения и роль внешнего давления окружающей среды в формировании бездефектных структур // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии. Материалы XV академических чтений РААСН – международной научно-технической конференции. Казань, 2010. Т. 1. С. 369–373.
12. Шмицько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Управление процессом порообразования ячеистого силикатного бетона за счет фактора давления внешней газовой фазы // Научный вестник ВГАСУ. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2012. №5. С. 110–115.
13. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 3. Pp. 457–464.
14. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review // Cement and Concrete Composites. 2000. Vol. 22. Issue 5. Pp. 321–329.
15. Чернов А.Н. Ячеистый бетон переменной плотности. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 128 с.
16. Вознесенский В.А. Статистические решения в технологических задачах. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1969. 232 с.
17. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1989. 328 с.

Шмицько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

18. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Иванов Я.П., Николов И.И. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов. Киев: Будивэльник, 1989. 240 с.
19. Шуйский А.И. Оптимизация процессов структурообразования и повышения качества газобетонных изделий: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1983. 22 с.
20. Шинкевич Е.С. Оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона по комплексу критериев качества на основе изопараметрического анализа: Дисс. ... канд. техн. наук. Красково, 1985. 235 с.
21. Amani J., Moeini R. Prediction of shear strength of reinforced concrete beams using adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural network // Scientia Iranica. 2012. Vol. 19. Issue 2. Pp. 242–248.
22. Kadashevich I., Schneider H.-J., Stoyan D. Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Issue 8. Pp. 1495–1502.
23. Kadashevich I., Stoyan D. A beam-network model for autoclaved aerated concrete and its use for the investigation of relationships between Young's modulus and microstructure // Computational Materials Science. 2008. Vol. 43. Issue 2. Pp. 293–300.
24. Галицков С.Я., Галицков К.С. Параметрическая идентификация гашения извести при производстве ячеисто-бетонной смеси // Современные проблемы науки и образования. 2009. №6–1. с. 22.
25. Шинкевич Е.С., Луцкин Е.С., Тымняк А.Б., Чернышов Е.М. Многокритериальная оптимизация состава и свойств активированных известково-кремнеземистых композитов // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: Сб. докладов VI международной конференции. СПбГАСУ. СПб., 2012. С. 71–79.
26. Бедарев А.А. Улучшение свойств газосиликата за счет оптимизации структуры межпоровых перегородок // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2012. №3. С. 75–85.
27. Coz Diaza J., Rabanala F., Nietob P., Hernandezc J., Soriac B., Perez-Bella J. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 40. Pp. 543–555.
28. Чернышов Е.М. Управление процессами структурообразования и качеством силикатных автоклавных материалов (вопросы методологии, структурное материаловедение, инженерно-технологические задачи): Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Л., 1988. 45 с.
29. Дьяченко Е.И. Структурные факторы управления вязкостью разрушения и прочностью силикатных автоклавных материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1994. 107 с.
30. Лаукайтис А.А. Влияние температуры воды на разогрев формовочной смеси // Строительные материалы. 2002. №3. С. 37–39.
31. Yeh I-C. Computer-aided design for optimum concrete mixtures // Cement and Concrete Composites. 2007. Vol. 29. Issue 3. Pp. 193–202.
32. Галицков К.С., Галицков С.Я., Шломов С.В. Алгоритм и система автоматической коррекции рецептуры ячеисто-бетонной смеси // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. 2011. №4. С. 219–221.
33. Бедарев А.А. Системы моделирования и оптимизации структуры ячеистого силикатного бетона «Cellular Concrete» и «Cellular MOD Concrete» // Сборник материалов IV Всероссийской заочной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь в современном мире: гражданский, творческий и инновационный потенциал». Старый Оскол, 2012. С. 327–334.
34. Бедарев А.А. Программный комплекс для оптимизации и управления технологией изготовления газосиликатных изделий // Материалы Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области информатики и информационных технологий: сб. науч. работ: в 3 т. Белгород: ИД «Белгород», 2012. Т. 1. С. 124–130.

**Анатолий Андреевич Бедарев, г. Воронеж, Россия*

Тел. раб.: +7(473)249-53-05; эл. почта: bedarev@ogent.net

© Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А., 2013

doi: 10.5862/MCE.38.2

Multiparameter structure optimization of the cellular silicate concrete

**E.I. Shmitko;
A.A. Rezanov;
A.A. Bedarev,**

*Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Voronezh, Russia
+7(473)249-53-05; e-mail: bedarev@ogent.net*

Key words

gas silicate; cellular concrete; multi-rich model; structure optimization

Abstract

Strengthening the concept of energy efficiency requires the development and implementation of high-performance wall materials. The most promising in this respect is the cellular silicate concrete (gas silicate), which properties are superior to other insulating building materials.

However, production of gas silicate insulation purpose with medium density less than 300 kg/m³ poses a number of difficulties due to the nature of its structure. In this regard, the current task is to maintain the specified quality of concrete porous silica with a decrease in its average density.

In the article this problem is solved by a multi-level optimization of the macro- and microstructure based on multi-rich (multiparameter) mathematical model. Algorithm and the general structure of the model and the results of laboratory studies are given.

References

1. Chernyshov E.M., Fedin A.A., Potamoshneva N.D., Kukhtin Yu.A. *Construction materials*. 2007. No.4. Pp. 1–10. (rus)
2. Chernyshov E.M., Neupokoev Yu.A., Potamoshneva N.D. *Vestnik TGASU*. 2007. No.1. Pp. 184–190. (rus)
3. Drochytka R., Zach J., Korjenic A., Hroudova J. Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 58. Pp. 319–323.
4. Liana C., Zhugeb Y., Beechama S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Issue 11. Pp. 4294–4298.
5. Sakharov G.P. *Construction: Science and Education*. 2011. No.1. [Online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.nso-journal.ru/images/stories/NSO/2011/01_8.pdf (Accessed: 25.03.2013).
6. Fedin A.A. *Nauchno-tekhnicheskiye osnovy proizvodstva i primeneniya silikatnogo yacheistogo betona* [Scientific and technical fundamentals of production and application of cellular silicate concrete]. Moscow: GASIS, 2002. 264 p.
7. Bonemann K., Dashner P. *Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona v stroitelstve: sb. nauch. tr. Vyp.2* [Theory and practice of production and application of cellular concrete in building: collected papers. Vol. 2]. Dnepropetrovsk: PGASA. 2005. Pp. 124–134. (rus)
8. Goryaynov K.E., Goryaynova S.K. *Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov i izdeliy* [Technology of heat-insulating materials and products]. Moscow: Stroyizdat, 1982. 376 p. (rus)
9. Gorlov Yu.P., Merkin A.P., Ustenko A.A. *Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov* [Technology of heat-insulating materials]. Moscow: Stroyizdat, 1980. 399 p. (rus)
10. Popov V.A. *Usloviya upravleniya kineticheskimi parametrami sinteza tsementiruyushchikh veshchestv silikatnykh avtoklavnykh materialov* [Conditions of control of kinetic parameters of synthetics of silicate steam-cured material's cements]. PhD dissertation. Voronezh, 1991. 248 p. (rus)
11. Shmitko E.I., Rezanov A.A., Bedarev A.A. *Dostizheniya i problemy materialovedeniya i modernizatsii stroitelnoi industrii. Materialy KHV akademicheskikh chtenii RAASN – mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Advances and problems of material science and modernization of building industry. Materials of XV an academic RAACS readings – international scientific and technical conference]. Kazan, 2010. Vol. 1. Pp. 369–373. (rus)
12. Shmitko E.I., Rezanov A.A., Bedarev A.A. *Scientific Herald of VSUACE. Physicochemical problems and high technology of building material science*. 2012. No.5. Pp. 110–115. (rus)

13. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30. Issue 3. Pp. 457–464.
14. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2000. Vol. 22. Issue 5. Pp. 321–329.
15. Chernov A.N. *Yacheisty beton peremennoy plotnosti* [Cellular concrete of nonuniform density]. Moscow: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1972. 128 p. (rus)
16. Voznesenskiy V.A. *Statisticheskiye resheniya v tekhnologicheskikh zadachakh* [Statistical solutions in process tasks]. Kishinev: Kartia Moldoveniaske, 1969. 232 p. (rus)
17. Voznesenskiy V.A., Liashenko T.V., Ogarkov B.L. *Chislennyye metody resheniya stroitelno-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods of solving building engineering problems with computer]. Kiev: Vyshcha shkola. Golovnoe izd-vo, 1989. 328 p. (rus)
18. Voznesenskiy V.A., Liashenko T.V., Ivanov I.A.P., Nikolov I.I. *EVM i optimizatsiya kompozitsionnykh materialov* [Computer and optimization of composite materials]. Kiev: Budivelnik, 1989. 240 p. (rus)
19. Shuyskiy A.I. *Optimizatsiya protsessov strukturoobrazovaniya i povysheniya kachestva gazobetonnykh izdeliy* [Optimization of structure formation process and improvement of aerated concrete items quality]. Abstract of a PhD thesis. Rostov-on-Don, 1983. 22 p. (rus)
20. Shinkevich E.S. *Optimizatsiya struktury iacheistogo silikatnogo betona po kompleksu kriteriyev kachestva na osnove izoparametricheskogo analiza* [Optimization of cellular silicate concrete structure by performance criterion complex based on isoparametric analysis]. PhD dissertation. Kraskovo, 1985. 235 p. (rus)
21. Amani J., Moeini R. Prediction of shear strength of reinforced concrete beams using adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural network. *Scientia Iranica*. 2012. Vol. 19. Issue 2. Pp. 242–248.
22. Kadashevich I., Schneider H.-J., Stoyan D. Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Issue 8. Pp. 1495–1502.
23. Kadashevich I., Stoyan D. A beam-network model for autoclaved aerated concrete and its use for the investigation of relationships between Young's modulus and microstructure. *Computational Materials Science*. 2008. Vol. 43. Issue 2. Pp. 293–300.
24. Galitskov S.I.A., Galitskov K.S. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2009. No.6–1. P. 22.
25. Shinkevich E.S., Lutskiy E.S., Tymnyak A.B., Chernyshov E.M. *Mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugikh stroitelnykh materialov: sb. dokladov VI mezhdunarodnoi konferentsii. SPbGASU* [Fracture mechanics of concrete, reinforced concrete and other building materials: collection of reports of VI SPSUACE international conference]. Saint-Petersburg, 2012. Pp. 71–79. (rus)
26. Bedarev A.A. *Scientific Herald of VSUACE. Construction and Architecture*. 2012. No.3. Pp. 75–85. (rus)
27. Coz Diaz J., Rabanala F., Nietob P., Hernandezc J., Soriac B., Perez-Bella J. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. *Construction and Building Materials. Special Section on Recycling Wastes for Use as Construction Materials*. 2013. Vol. 40. Pp. 543–555.
28. Chernyshov E.M. *Upravleniye protsessami strukturoobrazovaniya i kachestvom silikatnykh avtoklavnykh materialov (voprosy metodologii, strukturnoye materialovedeniye, inzhenerno-tekhnologicheskiye zadachi)* [Structure formation processes and silicate steam-cured material's quality control (issues of methodology, structural material science, engineering problems)]. Abstract of doctoral dissertation. Leningrad, 1988. 45 p. (rus)
29. Dyachenko E.I. *Strukturnyye faktory upravleniya viazkostyu razrusheniya i prochnostyu silikatnykh avtoklavnykh materialov* [Structure factors of control of fracture toughness and silicate steam-cured materials strength]. PhD dissertation. Voronezh, 1994. 107 p. (rus)
30. Laukaytis A.A. *Construction materials*. 2002. No.3. Pp. 37–39. (rus)
31. Yeh I-C. Computer-aided design for optimum concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*. 2007. Vol. 29. Issue 3. Pp. 193–202.
32. Galitskov K.S., Galitskov S.I.A., Shlomov S.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2011. No.4. Pp. 219–221. (rus)
33. Bedarev A.A. *Sbornik materialov IV Vserossiyskoy zaochnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Molodezh v sovremennom mire: grazhdanskiy, tvorcheskiy i innovatsionnyy potentsial»* [Collected papers of IV All-Russian Web scientific conference of students, postgraduate students and young scientists "Young people in modern world: civil, creative and innovative potential"]. Staryi Oskol, 2012. Pp. 327–334. (rus)
34. Bedarev A.A. *Materialy Vserossiyskogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov i aspirantov v oblasti informatiki i informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. rabot: v 3 t.* [Materials of All-Russian competition of students' and postgraduate students' scientific researches in informatics and information technology: collected scientific papers: in 3 volumes.]. Belgorod: ID «Belgorod», 2012. Vol. 1. Pp. 124–130. (rus)

Full text of this article in English: pp. 15–23

Shmitko E.I., Rezanov A.A., Bedarev A.A. Multiparameter structure optimization of the cellular silicate concrete