

УДК 519.23:621.926.08:622.73

А. Д. Жуков, Н. В. Наумова, А. О. Химич, Р. М. Мустафаев

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ГАЗОБЕТОНА

Автоклавный газобетон соответствует всем техническим требованиям и нормам по несущей способности, тепло- и звукоизоляции, пожаробезопасности. Материал относится к категории EcoMaterial Absolut, т. е. является экологически чистым материалом. Основные особенности технологии автоклавного ячеистого бетона — это тепловая обработка сырца, предшествующая автоклавированию, и очень жесткие нормативы подбора сырьевого состава.

Ключевые слова: теплоизоляция, эффективность, пористость, долговечность, ячеистый бетон, технология, моделирование.

Aerated concrete meets all technical requirements and standards for bearing capacity, thermal and acoustic insulation and fire safety. Aerated concrete is high-tech material, which is the holder of the environmental declaration based on the international standard ISO 14025 and belongs to the category EcoMaterial Absolut — an environmentally friendly material. The main features of autoclaved aerated concrete technology are vibrational bloating gas concrete mixture and heat treatment of raw prior autoclaved and very strict standards of selection of raw material.

Key words: thermal insulation, efficiency, porosity, durability, cellular concrete, technology, simulation.

Экономия энергии, сокращение выбросов углекислого газа, защита окружающей среды — это одни из самых актуальных вопросов современного строительства. Строительный материал должен быть энергоэффективным, не должен содержать опасных для здоровья веществ, оставаясь при этом прочным и долговечным, должен обеспечивать звукоизоляцию помещений и быть пожаробезопасным [1]. Этим требованиям соответствуют изделия из автоклавного газобетона YTONG: стеновые блоки, блоки повышенной прочности, «тонкие решения», дугообразные блоки, U-образные блоки, армированные перемычки, перекрытия, балки перекрытий, T-образные блоки.

Изделия маркой по плотности D 400 и классом прочности B 2,5 обладают теплопроводностью не более 0,088 Вт/(м · К) с одновременной способностью выдерживать значительные нагрузки. Монолитная стена толщиной 37,5 см (обеспечивает термическое сопротивление $R = 3,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$) удовлетворяет всем нормативным требованиям в области энергоэффективности [2]. Хорошая звукоизоляция является в первую очередь необходимым требованием, предъявляемым к современным зданиям и в значительной мере определяет качество долгосрочного использования строений.

За основу технологии теплоизоляционного газобетона (D100—D200) принята технология YTONG, главными особенностями которой являются: вибрационное вспучивание газобетонной смеси без применения виброплощадок; тепловая обработка сырца, предшествующая автоклавированию; очень жесткие нормативы подбора сырьевого состава [3].

Сырьем являются портландцемент, известь негашеная кальциевая (содержание активных СаО и MgO не менее 85 %). В качестве воды для затворения и воды для приготовления песчаного шлама используется смесь воды из внешней сети с конденсатом, получаемым при автоклавной обработке изделий. В качестве газообразователя применяют алюминиевую пасту.

Помол сырьевых компонентов. Для приготовления песчаного шлама предусмотрена шаровая мельница мокрого помола (8×3 м), в которую из подготовительного отделения ленточным конвейером непрерывно подается песок с добавкой гипса. Перекачку песчаного шлама (плотностью 1600 кг/м^3) осуществляют насосами в шламовые емкости, которые являются смесителями непрерывного действия.

Приготовление газобетонной смеси производят в смесителе емкостью 5 м^3 . Компоненты загружают в следующем порядке: песчаный шлам, шламотходы, вода затворения, сухие компоненты и алюминиевая суспензия. Сухие компоненты — это предварительно перемешанные в заданной пропорции цемент, известь и молотые отходы.

При использовании алюминиевой пасты приготовление водно-алюминиевой суспензии производят путем ее смешения с водой, которое осуществляется в специальном суспензаторе. Приготовленная суспензия перекачивается в расходные баки с мешалками и дозируется в смеситель. Время дозирования компонентов и их перемешивания рассчитано таким образом, чтобы цикл заливки форм составлял 5 мин.

Формование массивов. Приготовленная смесь выгружается из смесителя в предварительно собранную и смазанную форму, стоящую под смесителем на конвейере. Далее происходит вспучивание и увеличение материала в объеме до пяти раз. Заполненная вспучившейся массой форма толкателями конвейера перемещается на посты созревания, где происходит схватывание и твердение смеси.

Разрезка массивов и комплектация автоклавных тележек. После прохождения всех постов выдержки формы с ячеистым бетоном, имеющим необходимую сырцовую прочность (не менее 400 г/см^2), поступают на последние пять постов, которые обслуживаются краном для переноски массивов. Кран оборудован вакуумным захватом, имеющим по контуру уплотнительные манжеты. До резки массива подрезается верхняя кромка «пирога» по периметру, затем после захвата массива краном выполняется очистка поддона, а массив идет на подрезку нижней горбушки.

Сначала выполняется поперечная вертикальная разрезка массива, затем — продольная вертикальная разрезка массива, обеспечивающая требуемую ширину блоков и обрезку боковой поверхности массива. Каждая автоклавная вагонетка загружается тремя массивами на решетках, располагаемых по высоте с помощью специальных стоек, закрепляемых на решетках.

Предварительная выдержка. Автоклавные тележки с массивами подаются в две камеры, в которых производится их выдержка перед подачей в автоклав. В камерах создается и поддерживается режим, исключающий остывание массива перед загрузкой в автоклав. Поскольку массив за счет тепла, выделяемого при гидратации извести и цемента, разогревается до $85 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$, это тепло необходимо максимально сохранить в массиве до автоклавной обработки.

Автоклавная обработка. Из камер выдержки массивы направляются в автоклавы. Автоклавная обработка производится при давлении $1,2 \text{ МПа}$, рабочая температура $190 \text{ }^\circ\text{C}$, продолжительность $12,25 \text{ ч}$. Автоклавные тележки с запаренными массивами по завершению автоклавной обработки с помощью передаточного моста и систем толкателей подаются на упаковочную машину.

В упаковочной машине на пакет изделий надевается полиэтиленовая пленка, которая нагревается кольцевой газовой горелкой, дает усадку и обжимает массив. Упакованные массивы на поддонах поступают на склад готовой продукции [4].

Область применения изделий маркой по плотности $D100—D200$ — теплоизоляция штукатурных фасадов и плоских кровель. В этих строительных системах изоляционный слой воспринимает значительные механические нагрузки (на отрыв слоев или на сжатие), должен быть паропроницаем и иметь низкую теплопроводность [5].

Изучение эксплуатационных характеристик и эксплуатационной стойкости изделий $D100—D200$ является необходимым и для оценки свойств изделий, и для определения времени сохранения этих характеристик в эксплуатационных условиях, а также оценки долговечности строительной системы в целом.

Условия проведения эксперимента представлены в табл. В качестве функций отклика приняты средняя плотность изделий ($\rho = Y_1$) и число циклов попеременного замораживания и оттаивания, при которых изделия еще сохраняют свои эксплуатационные характеристики на требуемом уровне ($z = Y_2$).

Условия проведения эксперимента

Фактор	Математический символ	Среднее значение фактора	Значения фактора на уровнях	
			-1	+1
Расход портландцемента, кг/м ³	X_1	60	40	90
Расход извести, кг/м ³	X_2	10	6	14
Расход песка, кг/м ³	X_3	50	30	70
Удельная поверхность песка, м ² /м ³	X_4	2000	1600	2400
Расход добавки, %	X_5	0,3	0,2	0,4
Расход алюминиевой пасты, г/м ³	X_6	400	380	420
Расход воды, дм ³ /м ³	X_7	50	40	60

Проведение эксперимента и обработка его результатов позволили получить следующие уравнения регрессии (при $\Delta b = 4,8$):

$$Y_1 = 132 + 29X_1 + 8X_2 + 20X_3 + 12X_5 - 10X_6 + 11X_7 - 12X_1X_7 - 10X_1X_3 - 8X_2X_6 - 6X_6^2;$$

$$Y_2 = 179 + 21X_1 + 18X_3 + 19X_4 + 12X_5 + 10X_7 + 6X_1X_7 + 12X_1X_3 + 8X_1X_5 + 14X_3X_4 - 12X_4^2 - 8X_5^2 - 6X_7^2.$$

Анализ коэффициентов квадратичных уравнений регрессии показывает, что средняя плотность изделий определяется в большей степени расходами компонентов. Зависимость плотности от расхода алюминиевой пасты носит экстремальный характер, т. е. на области определения $X_4 \in [-1; +1]$ значения функции Y_1 имеют экстремум.

Количество циклов замораживания — оттаивания — нагрева, которые выдерживает изделие в процессе климатических испытаний (Y_2), увеличивается при увеличении:

- расхода портландцемента;
- расхода и удельной поверхности песка;
- расхода добавки и воды с учетом расхода портландцемента [6].

Характер полученных полиномов позволяет утверждать, что в областях изменений факторов X_4 , X_5 , X_7 функция отклика Y_2 также имеет локальные экстремумы. Полученные данные являются основой для аналитической оптимизации:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_6} = -10 - 12X_6 = 0 \rightarrow X_6 = -0,83;$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_4} = 20 + 14X_3 - 24X_4 = 0 \rightarrow X_4 = 0,83 + 0,58X_3;$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_5} = 12 - 16X_5 + 8X_1 = 0 \rightarrow X_5 = 0,75 + 0,5X_1;$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_7} = 10 + 6X_1 - 12X_7 = 0 \rightarrow X_7 = 0,83 + 0,5X_1.$$

Для факторов X_4 , X_5 , X_7 локальные экстремумы являются скользящими, т. е. зависящими от значений других факторов, в частности от X_1 и X_3 . Фиксированный экстремум определяется только для X_6 . Оптимальный расход алюминиевой пасты составляет $\tilde{X}_6 = 400 - 0,83 \cdot 20 = (383 \pm 6) \text{ г/м}^3$.

Расчетным путем определяем характер оптимизированных функций отклика:

$$Y_1 = 142 + 42X_1 + 10X_2 + 20X_3 - 12X_1X_3;$$

$$Y_2 = 196 + 31X_1 + 17X_3 + 12X_1X_3.$$

Анализ оптимизированных функций показывает, что на величину средней плотности наибольшее влияние оказывают расходы портландцемента и песка. Графическая интерпретация зависимости $Y_1 = F(X_1, X_2, X_3)$ представлена на рис. 1. Эквипотенциальными приняты поверхности равной плотности, распределение которых в трехмерном графическом объеме (декартовой систем координат) позволяет оценить изменение этого параметра в зависимости от значений расхода песка, извести и портландцемента.

Графическая интерпретация полученных зависимостей представлена на рис. 2 в виде номограмм. Использование этих номограмм позволяет решать технологические задачи нескольких типов:

- 1) осуществлять предварительный подбор состава ячеистого бетона по его плотности (с последующей лабораторной проверкой);
- 2) во-вторых, оценивать эксплуатационную стойкость изделий в зависимости от характеристик сырья, его расходов и условий его переработки.

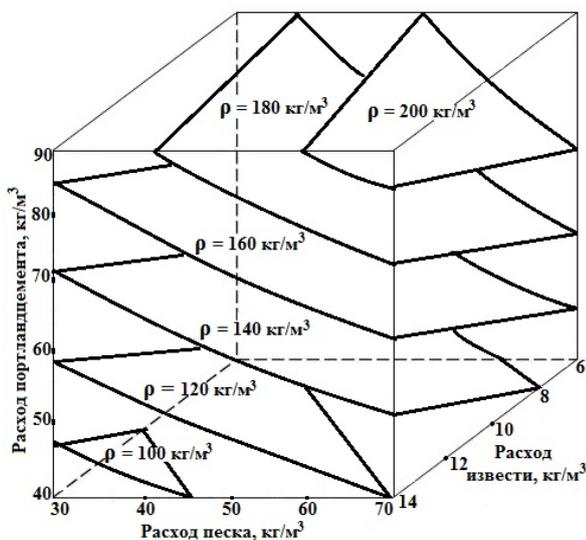


Рис. 1. Зависимость средней плотности автоклавного газобетона от расхода сырьевых компонентов

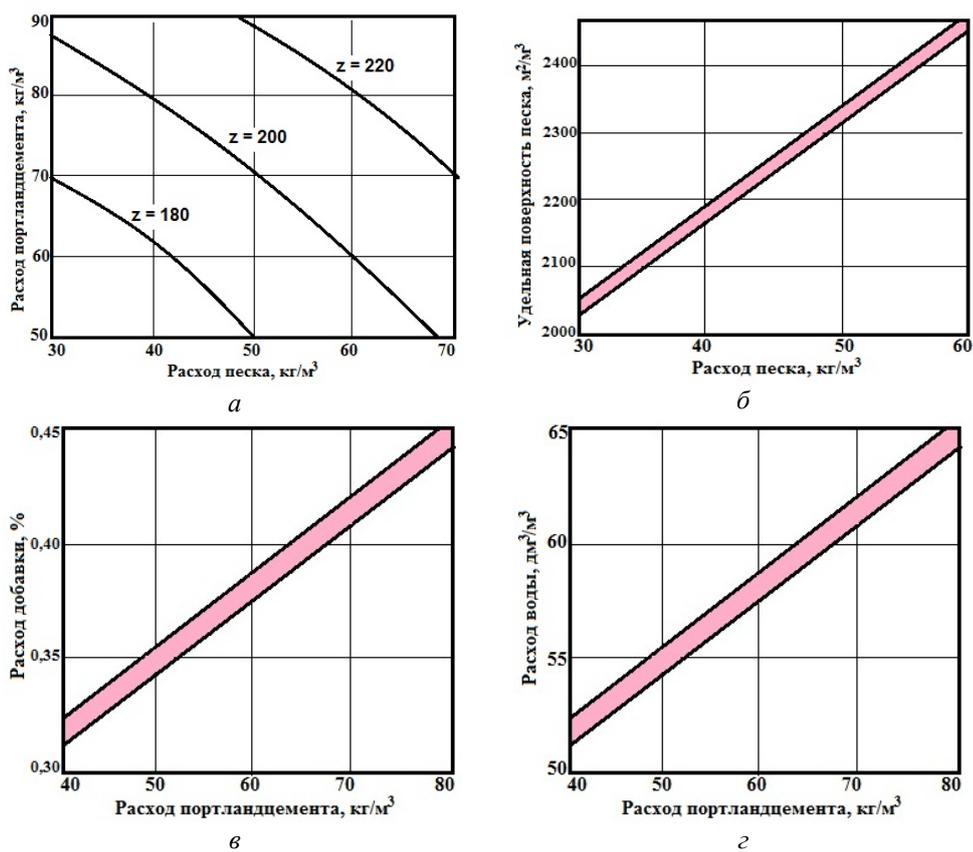


Рис. 2. Зависимость эксплуатационной стойкости изделий: *a* — от расхода основных компонентов; *б* — при оптимизированных характеристиках песка; *в* — от расхода добавки; *г* — от расхода воды

Оптимизация состава автоклавного газобетона позволяет получать материал с нормативными (по прочности и тепловой эффективности) свойствами и эксплуатационной стойкостью, соответствующей предъявляемым к тепловой изоляции требованиям. Оптимизация технологии и сокращение годового потребления первичной энергии на каждый 1 ГВт/ч приводит и к понижению уровня выбросов углекислого газа на 200 т. Этот результат может служить хорошим примером успешного сочетания экономики с экологией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бедарев А. А., Шмитько Е. И.* Оптимизация структуры газосиликата с применением мультипараметрической модели // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 89—93.
 2. *Жуков А. Д., Чугунков А. В., Химич А. О.* Неавтоклавный малоусадочный ячеистый бетон для монолитных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 3. С. 21—23.
 3. *Kouthý J., Borkovec L.* Linka na výrobu lamelevých, skružovatelný pásu // *Navinky pozemního stavitelství*. 1981. № 12. P. 25—28.
 4. Microstructure Changes in Hardened Cement Paste after Freezing — Thawing Cycles / G. Skripkunas, D. Nagrockiene, J. Keriene, E. Janavicius, G. Girskas, A. Špokauskas // *Materials Science*. 2013. Vol. 19. No. 1. P. 108—114.
 5. *Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р.* Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего, будущего // *Строительные материалы*. 2013. № 5. С. 57—59.
 6. *Сахаров Г. П., Стребицкий В. П., Воронин В. А.* Новая эффективная технология неавтоклавного поробетона // *Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века*. 2002. № 6. С. 28—29.
1. *Bedarev A. A., Shmit'ko E. I.* Optimizatsiya struktury gazosilikata s primeneniem mul'tiparametricheskoi modeli // *Stroitel'nye materialy*. 2013. № 4. S. 89—93.
 2. *Zhukov A. D., Chugunkov A. V., Khimich A. O.* Neavtoklavnyi malousadochnyi yacheisty beton dlya monolitnykh konstruksiy // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. № 3. S. 21—23.
 3. *Kouthý J., Borkovec L.* Linka na výrobu lamelevých, skružovatelný pásu // *Navinky pozemního stavitelství*. 1981. № 12. P. 25—28.
 4. Microstructure Changes in Hardened Cement Paste after Freezing — Thawing Cycles / G. Skripkunas, D. Nagrockiene, J. Keriene, E. Janavicius, G. Girskas, A. Špokauskas // *Materials Science*. 2013. Vol. 19. No. 1. P. 108—114.
 5. *Rakhimov R. Z., Rakhimova N. R.* Stroitel'stvo i mineral'nye vyazhushchie proshlogo, nastoyashchego, budushchego // *Stroitel'nye materialy*. 2013. № 5. S. 57—59.
 6. *Sakharov G. P., Strebitskiy V. P., Voronin V. A.* Novaya effektivnaya tekhnologiya neavtoklavnogo porobetona // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie i tekhnologii XXI veka*. 2002. № 6. S. 28—29.

© Жуков А. Д., Наумова Н. В., Химич А. О., Мустафаев Р. М., 2014

*Поступила в редакцию
в октябре 2014 г.*

Ссылка для цитирования:

Оптимизация технологии теплоизоляционного газобетона / А. Д. Жуков, Н. В. Наумова, А. О. Химич, Р. М. Мустафаев // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая*. 2014. Вып. 4(35). Ст. 7. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Zhukov A. D., Naumova N. V., Khimich A. O., Mustafaev R. M. [Optimization of heat insulating aerated concrete technology]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 4(35), paper 7. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>