

В.П. ВЫЛЕГЖАНИН, канд. техн. наук, директор (info@stroypalata.ru),

В.А. ПИНСКИН, канд. техн. наук, научный руководитель

Центр ячеистых бетонов (191023, Санкт-Петербург, ул. Зодчего Росси, 1/3, оф. 308)

## Влияние пористости автоклавного газобетона на его теплопроводность и пути ее изменения за счет совершенствования подбора сырьевых компонентов

Предложена модель автоклавного газобетона, позволяющая учитывать характерные показатели его пористой структуры (коэффициенты плотности, пористости, диаметры пор и расстояния между ними), а также зависимость этих показателей от коэффициента плотности газобетона. Обоснована зависимость коэффициента теплопроводности только от плотности газобетона. Установлена связь между показателями пористости газобетона (диаметром пор и расстоянием между ними) и его теплопроводностью. Установлено, что с увеличением плотности микропористого цементного камня (мкц камня), которое достигается благодаря подбору состава сырьевых компонентов, объем в газобетоне уменьшается. Показано, что при увеличении или уменьшении диаметра пор в газобетоне, например за счет подбора зернистости алюминиевой пудры, при постоянной пористости газобетона, коэффициент его теплопроводности не изменяется. Предложен способ определения минимального диаметра пор в газобетоне исходя из допустимого расстояния между ними, определяющим параметром которого является крупность зерен, полученных при помоле сырьевых компонентов.

**Ключевые слова:** ресурсосбережение, оптимизация свойств, энергосбережение, автоклавный газобетон, поровая структура, пористость, теплопроводность, коэффициент теплопроводности, алюминиевая пудра, зерновой состав.

**Для цитирования:** Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Влияние пористости автоклавного газобетона на его теплопроводность и пути ее изменения за счет совершенствования подбора сырьевых компонентов // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 36–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-36-38>

V.P. VYLEGZHANIN, Candidate of Sciences (Engineering) (info@stroypalata.ru), V.A. PINSKER, Candidate of Sciences (Engineering) Center of Cellular Concrete (1/3, office 308, Zodchego Rossi Street, Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation)

### Influence of Porosity of Autoclaved Gas Concrete on Its Thermal Conductivity and Ways of Its Change Due To Improvement in Selection of Raw Components

A model of autoclaved gas concrete, which makes it possible to take into account the characteristic parameters of its porous structure (coefficients of density and porosity, pore diameters and distances between them), as well as the dependence of these parameters on the density coefficient of gas concrete, is proposed. The dependence of the thermal conductivity coefficient on the density of gas concrete only is justified. It is established that with the increase in the density of microporous cement stone, which is achieved due to the selection of the composition of raw components, the volume of microporous cement stone in the gas concrete decreases. It is shown that the increase or decrease in the diameter of the pores in the gas concrete, for example, due to selection of the grain size of the aluminum powder, at a constant porosity of gas concrete, its coefficient of thermal conductivity does not change. A method for determining the minimum pore diameter in the gas concrete based on the permissible distance between them, the determining parameter of which is the grain size obtained by grinding raw components, is proposed.

**Keywords:** resource saving, optimization of properties, energy saving, autoclaved gas concrete, porous structure, porosity, thermal conductivity, thermal conductivity coefficient, aluminum powder, grain composition.

**For citation:** Vylegzhaniin V.P., Pinskiker V.A. Influence of porosity of autoclaved gas concrete on its thermal conductivity and ways of its change due to improvement in selection of raw components. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 36–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-36-38>

Ячеистый бетон имеет определенную структуру, состоящую из пор и межпорового пространства, заполненного микропористым цементным камнем (мкц камень). Плотность ячеистого бетона, его пористость, размеры пор, их количество, расстояние между порами характеризуют структуру газобетона и влияют на его физико-технические (теплопроводность, паропроницаемость и др.) и физико-механические (прочность при сжатии, растяжении, модуль упругости и др.) свойства [1]. Они связаны между собой определенной зависимостью, при рассмотрении которой принимаются следующие допущения:

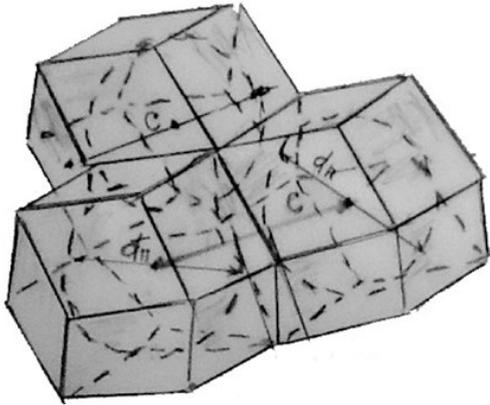
- поры имеют форму сфер диаметром  $d_n$ ;
- диаметр всех пор одинаковый;

в) внутреннее пространство материала (газобетона) разделено на одинаковые плотно упакованные ячейки;

г) каждая ячейка состоит из одной поры, расположенной в ее центре, окруженной оболочкой из мкц камня, заполняющего межпоровое пространство газобетона.

Равномерное заполнение пространства с абсолютно плотной упаковкой можно получить, если ячейки имеют форму ромбических додекаэдров [2] (см. рисунок). Ромбический додекаэдр — это двенадцатигранник, все грани которого попарно параллельны и имеют вид одинаковых ромбов. Объем ромбического додекаэдра  $V_d$  равен:

$$V_d = 0,592 \cdot d_n^3, \quad (1)$$



Ячейки из газобетона в виде ромбических додекаэдров, внутри которых находятся поры [1]

где  $d_d$  – поперечный размер додекаэдра, равный расстоянию между его попарно параллельными гранями (размер ячейки) [3, 4], (см. рисунок).

Плотность газобетона  $P_r$  определяет содержание мкц камня в единице объема. Отношение  $P_r/P_k$  – коэффициент плотности газобетона, определяющий долю мкц камня в единице объема газобетона, где  $P_k$  – плотность мкц камня. Пористость газобетона  $\Pi = 1 - P_r/P_k$  определяет долю пор в единице объема газобетона.

Объем поры  $V_n$  с диаметром  $d_n$ , имеющей шарообразную форму, равен  $V_n = 0,523 \cdot d_n^3$ . Объем газобетона, приходящийся на объем додекаэдра определяется исходя из учета пористости объема и количества этих пор  $V_d = 0,523 \cdot d_n^3 / (1 - P_r/P_k)$ . Приравняв полученный объем додекаэдра  $V_d$  к объему  $V_d$  в формуле (1), получим:

$$0,592 \cdot d_d^3 = 0,523 \cdot d_n^3 / (1 - P_r/P_k) \quad (2)$$

Преобразуем ячейку додекаэдра в условную шарообразную ячейку газобетона (далее – условная пора) с условным диаметром  $d_y$ . Такая ячейка газобетона состоит из одной поры диаметром  $d_n$  и оболочки из мкц камня усредненной толщины, удвоенная величина которой определяется как расстояние между порами,  $\Delta d = d_y - d_n$ .

Размер  $d_y$  находится из равенства:

$$0,523 \cdot d_y^3 = 0,592 d_g^3 \quad (3)$$

После подстановки в (3) значения  $0,592 d_g^3$  из формулы (2) получается:

$$d_n^3 / d_y^3 = (1 - P_r/P_k), \quad (4)$$

а после преобразования (4):

$$\Delta d / d_n = (1 / \sqrt[3]{(1 - P_r/P_k)}) - 1. \quad (5)$$

В формуле (5) объемная пористая структура газобетона выражается через линейные размеры (диаметр) пор и расстояние между ними.

На основании формул (4), (5) можно сделать следующие выводы.

1. Основные характеристики газобетона как пористого материала зависят от размера пор и расстояния между ними в виде соотношений  $d_n^3/d_y^3$  и  $\Delta d/d_n$ , являющихся коэффициентом пористости газобетона.

2. С увеличением плотности мкц камня  $P_k$  при неизменяемой плотности газобетона  $P_r$  уменьшается величина  $\Delta d/d_n$  и, как следствие, уменьшается и расстояние между порами  $\Delta d$ ; в результате снижается расход мкц камня, или наоборот, с уменьшением  $P_k$ , расход мкц камня увеличивается.

3. Минимальное допустимое расстояние между порами определяется размерами зерен, полученных при помоле сырьевых компонентов газобетона, и их количеством, приходящимся на толщину  $\Delta d$ . Этот показатель определяет минимально допустимый размер пор при данной пористости газобетона. Например, при размере зерен 0,02 мм их количество в толщине  $\Delta d$  принимается равным 4, тогда  $\Delta d = 0,08$  мм, из формулы (5) следует, что при  $P_r/P_k = 0,4$  допустимый минимальный диаметр поры  $d_n = 0,08/0,185 \geq 0,43$  мм.

4. При получении газобетонов малой плотности (например, D100–D300) необходимо применять мкц камень плотностью  $P_k$  менее 800 кг/м<sup>3</sup>, чтобы обеспечить допустимое расстояние между порами  $\Delta d$  (толщину оболочки из мкц камня) в несколько размеров крупности зерен помола сырьевых компонентов газобетона, при этом рекомендуется для получения большей величины  $\Delta d$  увеличивать диаметр пор путем подбора зернового состава алюминиевой пудры или пасты. Эта рекомендация следует из анализа формулы (5), согласно которому при постоянном значении коэффициента пористости газобетона и отношении  $\Delta d/d_n$  с уменьшением или увеличением диаметра пор уменьшается или увеличивается расстояние между ними.

Для оценки влияния на теплопроводность газобетона пористости, диаметра пор и расстояния между ними также допустим, что тепловой поток, проходящий через единицу объема газобетона, складывается из потока тепла, проходящего через слой мкц камня толщиной  $P_r/P_k$  (м), и слой воздуха, находящийся в порах, толщиной  $(1 - P_r/P_k)$ , м, [5]. По ГОСТ 7076–99 [6] теплопроводность материала вычисляется по формуле  $\lambda = h/R$  (Вт/(м·°C)), где  $h$  – толщина слоя в единице объема испытуемого материала, м;  $R$  – термическое сопротивление этого слоя, м<sup>2</sup>·°C/Вт. Для газобетона толщина слоя мкц камня в единице объема  $h = P_r/P_k$ , м. Термическое сопротивление мкц камня получается из формулы  $\lambda_k = h_k/R_k$ , где в единице объема мкц камня  $h_k = 1$  м, тогда  $R_k = 1/\lambda_k$ , м<sup>2</sup>·°C/Вт. В результате  $\lambda_r = (P_r/P_k)\lambda_k$ ; Вт/(м·°C). Аналогично определяется доля коэффициента теплопроводности слоя воздуха в газобетоне толщиной  $(1 - P_r/P_k)$ , м.

Сложив доли теплопроводности, приходящиеся на мкц камень, и доли, приходящиеся на воздух в порах, получим известную формулу для вычисления теплопроводности газобетона  $\lambda_r$ :

$$\lambda_r = (P_r/P_k) \lambda_k + (1 - P_r/P_k) \lambda_b, \quad (6)$$

где  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности мкц камня, Вт/(м·°C);  $\lambda_b$  – коэффициент теплопроводности воздуха, принимается при температуре 20°C  $\lambda_b = 0,02$  Вт/(м·°C).

Слагаемые формулы (6) соответствуют формулам, используемым при вычислении коэффициента теп-

лопроводности газобетона в соответствии с ГОСТ 7076–99 [6]. Задаваясь значениями  $\lambda_T$ , приведенными в ГОСТ 31359–2007 [7], вычисляем коэффициент  $\lambda_K$  по формуле, полученной после преобразования формулы (6):

$$\lambda_K = (\lambda_T - \lambda_B) (P_K/P_T) + \lambda_B. \quad (7)$$

Численный анализ этой формулы показал, что  $\lambda_K$  не зависит от величины плотности газобетона  $P_T$ . Например, для  $P_T = 200, 400, 500, 600$  кг/м<sup>3</sup>, при  $P_K = 1000$  кг/м<sup>3</sup>  $\lambda_K = 0,22$  Вт/(м·°С).

Из формул (4), (5), (6) следует, что коэффициенты пористости и плотности в формуле (6) могут быть заменены на соотношение диаметров пор  $d_n^3/d_y^3$ , вычисленными по формуле (4) при заданном  $P_T/P_K$ , следовательно, коэффициент теплопроводности будет определяться этим соотношением. Из формул (6) следует, что изменение размеров пор при неизменяемом соотношении  $d_n^3/d_y^3$  не приводит к изменению величины коэффициента теплопроводности газобетона.

Из формулы (6) также следует, что коэффициент теплопроводности газобетона зависит только от его плотности  $P_T$ .

Если коэффициент плотности газобетона  $P_T/P_K$  остается постоянным при изменяемых  $P_T$  и  $P_K$ , (например,  $P_T/P_K = 400/800 = 0,5$ – $600/1200 = 0,5$ ), величины соотношений  $d_n^3/d_y^3$  и  $\Delta d/d_n$  соответственно не изменяются, а изменение только плотности газобетона приводит, согласно формуле (6), к изменению его теплопроводности.

Необходимо отметить, что величина  $\Delta d/d_n$  для данного коэффициента плотности газобетона есть

усредненная величина, так как на практике размеры диаметра пор и расстояния между ними будут колебаться в меньшую или большую сторону, но эти изменения не оказывают существенного влияния на свойства газобетона, если величина коэффициента плотности  $P_T/P_K$  не меняется.

#### Выводы:

1. Предложена модель газобетона, позволяющая учитывать характерные показатели его пористой структуры (коэффициенты плотности, пористости, диаметр пор и расстояние между ними), а также зависимость этих показателей от коэффициента плотности газобетона.

2. Обоснована зависимость коэффициента теплопроводности только от плотности газобетона.

3. Установлена связь между показателями пористости газобетона (диаметром пор и расстоянием между ними) и его теплопроводностью.

4. Установлено, что с увеличением плотности мкц камня, которое достигается благодаря подбору состава сырьевых компонентов, объем мкц камня в газобетоне уменьшается.

5. Показано, что при увеличении или уменьшении диаметра пор в газобетоне, например за счет подбора зернистости алюминиевой пудры, при постоянной пористости газобетона коэффициент его теплопроводности не изменяется.

6. Предложен способ определения минимального диаметра пор в газобетоне исходя из допустимого расстояния между ними, определяющим параметром которого является крупность зерен, полученных при помоле сырьевых компонентов.

#### Список литературы

1. СТО 501-52-01-2007 Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. Москва. 2008.
2. Федоров Е.С. Начало учения о фигурах. М.: Издательство Академии Наук СССР, 1953. 420 с.
3. Вылегжанин В.П., Романов В.П. Структура армирования фибробетона и ее влияние на предельные значения разрушающих нагрузок. *Расчет и проектирование пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений: Сборник научн. тр.* Л.: ЛенЗНИИЭП, 1975.
4. Пинскер В.А. Некоторые вопросы физики ячеистого бетона. Сборник статей «Жилые дома из ячеистого бетона». М.: Госстройиздат, 1963.
5. Жуков А.Д., Чкунин А.С., Карпова А.О. Вариатропия давлений в технологии высокопористых материалов. М.: НИУ МГСУ, 2015. 176 с.
6. ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарно тепловом режиме. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000.
7. ГОСТ 31359–2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. М.: Стандартинформ, 2008.

#### References

1. STO 501-52-01-2007 Design and construction of building envelopes for residential and public buildings using cellular concrete in the Russian Federation. Moscow. 2008. (In Russian).
2. Fedorov E.S. Nachalo ucheniya o figurakh [Beginning of the doctrine of the figures]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 1953. 420 p.
3. Vylegzhanin V.P., Romanov V.P. Fiber-concrete reinforcement structure and its influence on ultimate values of breaking loads. *Calculation and design of spatial structures of civil buildings and structures: Collection of scientific papers.* Leningrad: LenZNIIEP. 1975. (In Russian).
4. Pinsker V.A. Some questions of the physics of cellular concrete. *Collection of articles "Residential buildings made of cellular concrete"*. Moscow: Gosstroyizdat, 1963.
5. Zhukov A.D., Chkunin A.S., Karpova A.O. Variatropiya davlenii v tekhnologii vysokoporistykh materialov [Variatropia of pressure in the technology of highly porous materials]. Moscow: NIU MGSU. 2015. 176 p.
6. GOST 7076–99. Building materials and products. Method for determination of thermal conductivity and thermal resistance under stationary thermal conditions. Moscow: Gosstroy of Russia. 2000. (In Russian).
7. GOST 31359–2007. Autoclaved cellular concrete. Moscow: Standartinform. 2008. (In Russian).