

Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность.

Центр ячеистых бетонов:

В.П. Вылегжанин, к.т.н., директор

Пинскер В.А., к.т.н. научный руководитель

Аннотация к статье.

Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность.

В статье предложена модель пористой структуры ячеистого бетона, позволяющая представить его в виде макропор, окруженных пористым цементным камнем, состоящим из микропор и цементно-силикатного камня. Такая модель позволила установить в ячеистом бетоне зависимость между коэффициентами плотности, пористости, диаметрами макро- и микропор и расстояния между ними, а также определить зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона от коэффициентов его плотности, пористости цементно-силикатного камня. Установлена и обоснована зависимость между размерами макропор и микропор и коэффициентом теплопроводности ячеистого бетона.

Ключевые слова: ячеистый бетон, газобетон, макро- и микропоры, цементный камень, додекаэдр, коэффициенты пористости, плотности, теплопроводности.

В статье [1] были предложены формулы для вычисления коэффициента теплопроводности ячеистого бетона (далее газобетона), полученные на основании математической модели, представляющей газобетон, внутреннее пространство которого разделено на одинаковые плотно упакованные ячейки, имеющие форму ромбического додекаэдра, в центре которого расположена одна сферическая пора диаметром d_n , окруженная оболочкой из цементно-силикатного камня, заполняющая межпоровое пространство. Предложенные формулы не учитывали зависимость коэффициента теплопроводности газобетона от размера пор, что подтверждалось экспериментальными данными.

Для совершенствования предложенных формул при прежнем подходе деления пространства газобетона на ячейки, имеющие форму ромбических додекаэдров, в дополнение к прежним допущениям, рассматривается, что межпоровое пространство заполнено микропористым цементным камнем (далее мкц камень), который состоит из микропор, окруженных цементно-силикатным камнем (далее цск камень). Эти микропоры состоят из гелевых и капиллярных пор. Гелевые поры возникают на месте воды, ушедшей на гидратацию силикатов, а капиллярные поры образуются в результате испарения избыточной воды затворения [2],[3]. Показатели, характеризующие пористую структуру газобетона, такие, как его плотность, пористость, размеры пор, их количество, расстояние между порами, связаны между собой определенными зависимостями. Перечисленные показатели влияют на его физико-технические (теплопроводность, паропроницаемость и др.) и физико-механические (прочность при сжатии, растяжении, модуль упругости и др.) свойства [4].

При определении этих показателей пористой структуры газобетона условно принимаются следующие допущения:

- 1) макро и микро поры имеют форму в виде сфер диаметром d_n и $d_{пм}$, соответственно;
- 2) диаметры макро- и микропор относительно друг друга одинаковые;
- 3) внутренне пространство ячеистого бетона (газобетона) разделено на одинаковые плотно упакованные макро- и микро ячейки;

4) каждая макро- и микро- ячейка газобетона состоит из одной поры, расположенной в ее центре, окруженные оболочками, заполняющими межпоровое пространство газобетона, состоящими из мкц камня вокруг макроячек и из цск камня вокруг микроячек.

Равномерное заполнение пространства макро- и микроячейками с абсолютно плотной упаковкой можно получить, если ячейки имеют форму ромбических додекаэдров [5]. Ромбический додекаэдр – это двенадцатигранник, все грани которого попарно параллельны и имеют вид одинаковых ромбов. Объем ромбического додекаэдра V_d равен:

$$V_d = 0.592d_d^3 \quad (1),$$

где: d_d – поперечный размер додекаэдра, равный расстоянию между его попарно параллельными гранями, (размер ячейки), [6,7].

Плотность газобетона P_r , ($\text{кг}/\text{м}^3$), определяет количество цск камня без микропор в единице объема газобетона.

Плотность цск камня в газобетоне $P_{ц}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Плотность мкц камня в газобетоне P_k , состоит из цск камня и микропор, ($P_k < P_{ц}$)($\text{кг}/\text{м}^3$).

Коэффициент плотности газобетона $K_{ц} = P_r/P_{ц}$ - определяет долю объема цск камня в единице объема газобетона.

Коэффициент плотности мкц камня $K_c = P_k/P_{ц}$ – определяет долю объема мкц камня в единице объема газобетона.

В единице объема газобетона коэффициенты пористости определяют: $\Pi_r = (1 - K_{ц})$ - его общую пористость, состоящую из макропор и микропор; $\Pi_{мк} = (K_c - K_{ц})$ - долю макропор; $\Pi_{мп} = (1 - K_c)$ долю микропор.

Объемы макропоры V_p и микропоры $V_{пм}$ с диаметрами d_p и $d_{пм}$, имеющие шарообразную форму, равны: $V_p = 0.523 \cdot d_p^3$ и $V_{пм} = 0.523 \cdot d_{пм}^3$.

Макропоры в газобетоне окружены оболочками из мкц камня. Их количество в единице объема газобетона вычисляется по формуле $n_{мк} = (K_c - K_{ц}) / 0.523d_p^3$.

Микропоры окружены оболочками из цск камня. Их количество в единице объема газобетона $n_{мп} = (1 - K_c) / 0.523d_{пм}^3$.

Объем газобетона, в этой единице объема, приходящийся на одну макропору, который включает кроме макропоры, окружающую ее оболочку из мкц камня, равен $V_n = 0.523d_n^3 / (K_c - K_{ц})$.

Объем газобетона, приходящийся на одну микропору, окруженную оболочкой из цск камня, $V_{пм} = 0.523d_{пм}^3 / (1 - K_c)$.

Приравняв полученные объемы додекаэдров V_d и $V_{дм}$ к объемам V_n и $V_{пм}$ в формуле (1), получим :

$$\begin{aligned} 0.592 d_d^3 &= 0.523 d_n^3 / (K_c - K_{ц}) \\ 0.592 d_{дм}^3 &= 0.523 d_{пм}^3 / (1 - K_c) \end{aligned} \quad (2).$$

Из формул (2) следует :

$$(K_c - K_{ц}) = 0,883 (d_n^3 / d_d^3) \quad (3),$$

$$(1 - K_c) = 0,883 (d_{пм}^3 / d_{дм}^3). \quad (4).$$

Додекаэдр в газобетоне представляют собой порочейку, с поперечным размером d_d и $d_{дм}$, состоящую из поры диаметрами d_n или $d_{пм}$ и слоя мкц или цск камня, ее окружающего, толщиной $\Delta d_n / 2$ и $\Delta d_{пм} / 2$, удвоенная величина которых есть расстояние между порами. В результате поперечные размеры порочеек $d_d = d_n + \Delta d_n$ и $d_{дм} = d_{пм} + \Delta d_{пм}$, а формулы (3), (4) примут вид:

$$(K_c - K_{ц}) = 0.883 (d_n^3 / (d_n + \Delta d_n)^3), \quad (5),$$

$$(1 - K_c) = 0.883 (d_{пм}^3 / (d_{пм} + \Delta d_{пм})^3). \quad (6).$$

Из формул (5), (6), следует, что коэффициенты плотности газобетона $K_{ц}$ и мкц камня K_c определяют величины соотношений между объемами макро-, микропор и макро-, микро порочеек и величины произведения этих соотношений независимы от размера диаметра этих пор. С изменением толщины оболочек порочеек диаметры пор пропорционально меняются.

После преобразования (5), (6) получаются формулы для вычисления диаметра макро- и микропор:

$$d_n = \Delta d_n / C_n, \quad (7),$$

$$d_{\text{пм}} = \Delta d_{\text{пм}} / C_{\text{пм}}, \quad (8),$$

где: $C_{\text{п}} = (1 / (1.04 (K_{\text{с}} - K_{\text{ц}})^{1/3}) - 1$; $K_{\text{ц}} = P_{\text{г}} / P_{\text{ц}}$, $P_{\text{к}} < P_{\text{ц}}$,

$$C_{\text{пм}} = (1 / (1.04 (1 - K_{\text{с}})^{1/3}) - 1 \quad K_{\text{с}} = P_{\text{к}} / P_{\text{ц}}.$$

Коэффициенты $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{пм}}$ определяют влияние плотности газобетона, цск и мкц камня на пористость и прочность газобетона. Расстояние между макропорами $\Delta d_{\text{п}} = \Delta d_{\text{пм}} + d_{\text{пм}}$, где величина $\Delta d_{\text{пм}}$ зависит от размеров зерен помола исходных компонентов, применяемых при изготовлении газобетона. В среднем, размер зерен можно принять равным 0.020 мм.

Из формул (7, 8) следует, что с увеличением объема мкц камня его плотность (коэффициент $K_{\text{с}}$) уменьшается и, как следствие, коэффициент $C_{\text{п}}$ увеличивается, а $C_{\text{пм}}$, уменьшается. В результате, диаметры макропор ($d_{\text{п}}$), уменьшаются, а диаметры микропор ($d_{\text{пм}}$) увеличиваются. Из чего следует, что диаметры макропор уменьшаются за счет увеличения диаметров микропор и также меняются толщины слоя мкц камня, так как общие плотность и пористость газобетона, при этом, не меняются.

На изменения плотности мкц камня $P_{\text{к}}$ влияет количество и размер микропор, образование которых зависит от количества свободной воды при затворении газобетонной смеси. Чем больше воды в смеси, тем больше образуется в мкц камне микропор [2], заполненных свободной водой, которая в последствие испаряется, что и приводит к образованию микропор. В результате, объем мкц камня увеличивается, а плотность его снижается. Следует отметить, что плотность мкц камня $P_{\text{к}}$ может быть равной $P_{\text{ц}}$ только теоретически, в действительности, $P_{\text{к}}$ всегда будет меньше $P_{\text{ц}}$, так как в газобетонной смеси всегда есть свободная вода, следовательно, всегда будут микропоры и, в результате, всегда будет $P_{\text{к}} < P_{\text{ц}}$.

Коэффициент теплопроводности газобетона зависит от теплопроводности мкц камня и от теплопроводности воздуха, находящегося в порах.

В газобетоне плотностью $P_{\text{г}}$ доля объема цск камня увеличивается за счет образования в нем микропор до объема мкц

камня плотностью P_k . Так как при этом, количество цск камня в газобетоне не меняется, следовательно, его плотность с увеличением объема уменьшается и это уменьшение плотности учитывается коэффициентом $K_M = 1/(2 - (P_k/P_c))$.

С уменьшением плотности цск камня его коэффициент теплопроводности λ_k уменьшается пропорционально K_M . В результате, теплопроводность цск камня с микро порами (мкц камня) $\lambda_{кц} = K_M \lambda_k$. В газобетоне с уменьшением плотности цск камня его количество, определяемое коэффициентом $K_c = P_r/P_c$, не меняется. Следовательно, коэффициент теплопроводности цск камня с микро порами в газобетоне $\lambda_{кц} = K_c K_M \lambda_k$, Вт/(м⁰С).

Коэффициент пористости газобетона $(1 - P_r/P_c)$ учитывает долю макро-и микропор в его единице объема. Коэффициент теплопроводности всех пор вычисляется по формуле:

$$\lambda_{вг} = (1 - P_r/P_c) \lambda_v, \text{ Вт/(м}^0\text{С)},$$

где $\lambda_v = 0.0259$ Вт/(м⁰С) - коэффициент теплопроводности воздуха при $t=20^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопроводности газобетона λ_r есть сумма коэффициентов теплопроводности слоя мкц камня и слоя воздуха. В результате, формула для вычисления теплопроводности газобетона принимает вид :

$$\lambda_r = \lambda_{кц} + \lambda_{вг} = K_c K_M \lambda_{кц} + (1 - K_c) \lambda_v, \text{ Вт/(м}^0\text{С)}, \quad (9),$$

$$\text{где: } K_M = 1/(2 - K_c) = 1/(2 - (P_k/P_c)), \quad K_c = P_r/P_c.$$

Для более точного экспериментального определения и расчета коэффициента теплопроводности газобетона по ГОСТ 7076-99, необходимо предварительно определить количество макропор, микропор, плотность и теплопроводность цск камня по ГОСТ 12730.4-78, а также плотность газобетона по ГОСТ 12730-78. Плотность и теплопроводность цск камня необходимо знать, так как его теплопроводность зависит от количества применяемых при изготовлении газобетона исходных компонентов и их минералогических составов.

На приведенном примере расчета показано изменение коэффициента теплопроводности газобетона в зависимости от выше перечисленных показателей.

Расчет выполнялся с использованием формул (7),(8),(9).

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Исходные данные:

Плотность цск камня $P_{ц} = 2200 \text{ кг/м}^3$ и его коэффициент теплопроводности $\lambda_{ц} = 0.5 \text{ Вт/м}^0\text{С}$. (Принимается по [8] с учетом плотностей и коэффициентов теплопроводности цементно-известково-гипсово-песчаных растворов и гидратированной воды в силикатах).

Плотность газобетона $P_{г}=500 \text{ кг/м}^3$;

Плотность мкц камня $P_{к} < P_{ц} \text{ кг/м}^3$.

Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_{в}= 0.0259 \text{ Вт/м}^0\text{С}$

Результаты расчета: $K_{ц}=P_{г}/P_{ц}= 500/2200 = 0.227$

Таблица 1

$P_{к}$	$K_{с}$	$K_{м}$	$\lambda_{г}$	$d_{п}$ мм	$d_{пм}$ мм	$\Delta d_{п}$
2200	1.000	1.000	0.133	1.00	0	0.048
2100	0.954	0.956	0.128	1.10	0.028	0.076
2000	0.910	0.917	0.124	0.99	0.042	0.090
1900	0.864	0.880	0.120	0.88	0.055	0.103
1800	0.818	0.846	0.116	0.83	0.072	0.120
1700	0.773	0.815	0.112	0.74	0.083	0.130
1600	0.727	0.785	0.109	0.70	0.100	0.148
1500	0.680	0.757	0.106	0.65	0.117	0.165

Из приведенного примера следует, что коэффициент теплопроводности газобетона уменьшается с уменьшением плотности мкц камня и при $P_{к}=1900 \text{ кг/м}^3$ его величина $\lambda_{г} = 0.12 \text{ Вт/м}^0\text{С}$ равна значению, приведенного в ГОСТ 31359-2007.

При этом, диаметры макропор уменьшаются, а диаметры микропор увеличиваются, в результате, расстояние между ними уменьшается и это приводит к снижению плотности мкц камня, а следовательно, и к снижению его теплопроводности.

Из формул (8), (9) также следует, что при уменьшении плотности мкц камня $P_{к}$ и не изменяемой величине коэффициента плотности газобетона $P_{г}/P_{ц}$, величина коэффициента $K_{м}$ и, следовательно, расчетный коэффициент теплопроводности газобетона $\lambda_{г}$, уменьшаются.

При экспериментальном определении коэффициента теплопроводности ячеистого бетона подтверждается зависимость между размерами макропор и его коэффициентом теплопроводности. Например, в приведенных данных в статье [9]:

$$P_r = 370 \text{ кг/м}^3 \text{ средний, } d_n = 1.17 \text{ мм, } \lambda_r = 0.102 \text{ Вт/м}^0\text{С.}$$

$$P_r = 366 \text{ кг/м}^3, \quad \text{---} \quad d_n = 0.97 \text{ мм, } \lambda_r = 0.098 \text{ Вт/м}^0\text{С,}$$

$$P_r = 368 \text{ кг/м}^3, \quad \text{----} \quad d_n = 0.64 \text{ мм, } \lambda_r = 0.088 \text{ Вт/м}^0\text{С,}$$

Для сопоставления с этими экспериментальными данными был выполнен расчет по формулам (7),(8),(9) коэффициентов теплопроводности и определены соответствующие им диаметры пор. При расчете принимался $P_{ц} = 2200 \text{ кг/м}^3$. За начальную величину расчета принимались следующие исходные данные: $P_{ц} = 2200 \text{ кг/м}^3$, $P_r = 370 \text{ кг/м}^3$, $d_n = 1.17 \text{ мм}$, $\lambda_r = 0.102 \text{ Вт/м}^0\text{С}$. $\lambda_k = 0.5 \text{ Вт/м}^2\text{С}$. Полученные результаты расчета приведены в таблице 2:

Таблица 2.

P_r	P_k	K_m	$K_{ц}$	λ_r	d_n	$d_{пм}$
370	2200	0.545	0.168	0.105	1.17	0
366	2100	0.548	0.168	0.101	0.95	0.015
368	1900	0.553	0.166	0.095	0.67	0.03

Из приведенных в таблице 2 результатов расчета следует, что с уменьшением плотности мкц камня P_k коэффициент теплопроводности и диаметры макропор (d_n) ячеистого бетона уменьшаются, а диаметры микропор $d_{пм}$ увеличиваются. Полученные результаты расчета хорошо коррелируются с экспериментальными данными: отклонение по диаметрам пор составляет 2.5%, по коэффициентам теплопроводности – 2.2%.

Выводы:

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

2. Обоснована зависимость и приведена упрощенная формула для вычисления коэффициента теплопроводности газобетона в зависимости от плотности мкц камня, а также от теплопроводности цементно-силикатного камня (цск камня) и воздуха.

3. Показано, что при неизменяемой плотности газобетона его расчетный коэффициент теплопроводности снижается с уменьшением плотности мкц, за счет образования в нем микропор.

4. Предложено, при экспериментальном определении коэффициента теплопроводности газобетона, для более точного получения результата, предварительно определять по ГОСТ 12730.1-78 объем крупных пор, полный объем пор, плотность и коэффициент теплопроводности цск камня.

5. Показано, что на минимальное расстояние между порами влияет размер зерен полученных в результате помола исходных компонентов ячеистого бетона.

6. Приведены формулы, из которых следует, что расстояние между порами находится в прямо пропорциональной зависимости от размеров диаметров макропор и чем меньше их диаметр, тем меньше расстояние между порами и тем меньше коэффициент теплопроводности ячеистого бетона.

7. Установлено, что коэффициент теплопроводности ячеистого бетона и размеры его макропор зависят от плотности мкц камня, например, со снижением его плотности, размер макропор тоже уменьшается.

8. Получено, что увеличение количества воды затворения (коэффициента в/т) ячеистого бетона, может способствовать увеличению пористости мкц камня и, как следствие, снижению его коэффициента теплопроводности.

9. Следует отметить, что в действительности макропоры и микропоры имеют различные формы, по сравнению с принимаемыми в модели, но тенденция влияния пористости мкц камня на теплопроводность ячеистого бетона сохранится.

10. В продолжении настоящей работы, используя предложенную модель пористой структуры газобетона и полученные формулы, можно составить числовые зависимости оптимальных размеров пор и расстояния между ними с учетом крупности зерен помола сырьевых компонентов газобетона,

оценить влияние плотности цск камня на теплопроводность газобетона в зависимости от его минералогических составов, а также определить влияние пористости на прочностные свойства газобетона.

Литература:

1. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Влияние пористости автоклавного газобетона на его теплопроводность и пути ее изменения за счет совершенствования подбора сырьевых материалов.// Строительные материалы . 2019. №8. С. 36-38.
2. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Структура и механические свойства цементных дисперсных систем. ПГАУС, Пенза, 2013, 340с
3. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П. Теория прочности и подбора состава газобетона. Сборник статей “Ячеистые бетоны в современном строительстве”, 2- я Международная научно-практическая конференция. С.П. г. Санкт-Петербург, 2005.
4. СТО 501 - 52-01-2007 Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. Москва. 2008.
5. Федоров Е.С. Начало учения о фигурах. М. Издательство Академия Наук, СССР, 1953, 420с.
6. Вылегжанин В.П., Романов В.П. Структура армирования фибробетона и ее влияние на предельные значения разрушающих нагрузок. ЛенЗНИИЭП, Сборник научных трудов, Расчет и проектирование пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений, Л. 1975.
7. Пинскер В.А. Некоторые вопросы физики ячеистых бетонов. Сборник статей “Жилые дома из ячеистых бетонов.” М. Госстройиздат, 1963.
8. СТО 00044807-001-2006. Теплотехнические свойства ограждающих конструкций. Стандартиформ, 2006.
9. Авдеев Е. От чего зависит коэффициент теплопроводности бетона: Влияние плотности и заполнителей, классификация бетонов, строительство. www.Masterabetona.ru. 2015.