

doi: 10.5862/MCE.52.5

Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков

*К.т.н., доцент А.С. Горшков,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
к.ф.-м.н., профессор П.П. Рымкевич,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
д.т.н., директор Инженерно-строительного института Н.И. Ватин,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Аннотация. В работе показано влияние растворных швов кладки на сопротивление теплопередаче стен из газобетонных блоков. В связи с тем, что теплопроводность цементных растворов и клеев значительно выше теплопроводности изделий из газобетона, их влияние следует учитывать при проектировании ограждающих конструкций.

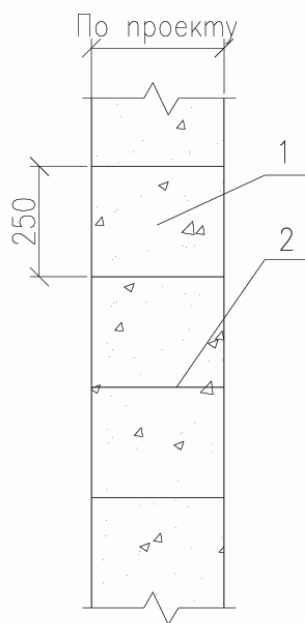
В статье представлена таблица коэффициентов теплотехнической однородности кладки стен из газобетонных блоков в зависимости от толщины и теплопроводности растворных швов. Рассмотрено моделирование процессов теплопередачи в стационарных и нестационарных условиях. В случае нестационарного теплообмена рассмотрено влияние швов кладки на теплоустойчивость ограждающей конструкции. Теплоустойчивость характеризуется нормируемой амплитудой колебаний температуры наружного воздуха и величиной затухания расчетной амплитуды колебаний температуры. Рассчитана величина поправки влияния растворных швов на комплексный коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры.

Ключевые слова: автоклавный газобетон; неармированные газобетонные изделия; клей для газобетона; стена мелкоблочная; кладочный раствор; растворные швы кладки; теплопроводность; теплопередача в стационарных условиях

Введение

В настоящее время свойства ячеистого бетона автоклавного твердения достаточно хорошо изучены [1–8], также подробно описаны свойства выпускаемых из автоклавного газобетона стеновых изделий и области их применения [9–13].

Значительное влияние на теплотехнические свойства ограждающих конструкций, выполненных кладкой из газобетонных блоков (рис. 1), оказывают швы кладки [14]. В практике современного строительства встречаются два основных варианта кладки стен из газобетонных блоков: на клею и на растворе. Для категории I блоков (допуск по высоте изделий не превышает ± 1 мм) кладка может выполняться на специальном цементном клею со средней толщиной швов 2 мм, для категории II блоков (допуск по высоте изделий не превышает ± 4 мм) кладка обычно выполняется на цементно-песчаном растворе с толщиной швов 8–10 мм. Таким образом, во всех случаях кладка выполняется на цементных составах, теплопроводность которых значительно превышает теплопроводность ячеистого бетона. Следовательно, термическое сопротивление ограждающих конструкций из газобетонных блоков должно определяться с учетом влияния швов кладки на теплотехническую однородность стен.



**Рисунок 1. Схема кладки из газобетонных блоков толщиной в один блок:
1 – газобетонный блок; 2 – горизонтальный шов кладки**

Наличие теплопроводных включений, или так называемых «мостиков холода», в ограждающих конструкциях приводит к дополнительным потерям тепловой энергии при эксплуатации зданий в отопительный период и, как следствие, к дополнительным эксплуатационным расходам [15]. Кроме того, неучет этих факторов может привести к необоснованному занижению проектных значений мощности отопительных приборов. Влияние швов кладки на теплотехническую однородность стеновых конструкций из газобетонных блоков может быть оценено при моделировании процессов теплопередачи в стационарных условиях. Однако реальные условия эксплуатации, нестационарные в силу постоянного изменения параметров наружной среды, накладывают для данной модели определенные ограничения. Эти ограничения могут быть оценены только при моделировании процессов теплопередачи в нестационарных условиях.

Моделирование процессов теплопередачи в стационарных условиях

В стационарном случае для многослойной ограждающей конструкции с однородными слоями или ограждающей конструкции в удалении от теплотехнических неоднородностей сопротивление теплопередаче рассчитывается по формуле:

$$R_o = R_{si} + R_k + R_{se} = R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{se}, \quad (1)$$

где $R_{si} = 1/\alpha_{int}$, α_{int} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций [Вт/(м²·°С)], принимаемый по таблице 7 СНиП 23–02 [16];

$R_{se} = 1/\alpha_{ext}$, α_{ext} – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода, Вт/(м²·°С), принимаемый по таблице 8 СП 23–101 [17];

R_k – термическое сопротивление ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями, (м²·°С)/Вт;

δ_i – толщина i-го слоя многослойной ограждающей конструкции, м;

λ_i – теплопроводность материала i-го слоя многослойной ограждающей конструкции, Вт/(м·°С), принимаемая для условий эксплуатации «А» или «Б» в зависимости от зоны влажности района проектирования и влажностного режима помещения.

В большинстве случаев при расчете сопротивления теплопередаче по формуле (1) для слоя кладки из газобетонных блоков в качестве λ_i принимаются значения теплопроводности газобетона без учета влияния швов кладки на ее теплотехническую однородность. Это приводит к необоснованному занижению потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции.

С целью учета влияния швов кладки на теплотехническую однородность ограждающих конструкций с применением стеновых изделий из автоклавного газобетона рассмотрим регулярный (повторяющийся) фрагмент кладки (рис. 2) и рассчитаем термическое сопротивление рассматриваемых на рисунке 2 фрагментов. Вдали от других теплопроводных включений площадь рассматриваемого регулярного фрагмента не оказывает влияния на результаты расчета.

На рисунке 2 показаны два фрагмента кладки из блоков на клею и на растворе со швами толщиной 2 (рис. 2, а) и 10 мм (рис. 2, б) соответственно. В качестве газобетонных блоков на рисунке 2 приняты стандартные, выпускаемые по ГОСТ 31360 [18] изделия стеновые неармированные из автоклавного газобетона, которые применяются для кладки наружных стен зданий и имеют следующие размеры: высота – $l_x = 250$ мм, длина – $l_y = 625$ мм, ширина – $l_z = 375$ мм.

В стационарном случае в силу линейности закона изменения температуры в параллельных горизонтальных сечениях кладки (газобетонных блоках и растворных швах) поперечные тепловые потоки между ними отсутствуют. Следовательно, перетоков тепла из одного параллельного сечения кладки в другое не происходит в силу равенства температур в точках, удаленных на одинаковое расстояние от поверхности стеновой конструкции. Тогда, с учетом электротепловой аналогии, общее термическое сопротивление кладки из газобетонных блоков на цементном растворе (клею) может быть рассчитано по формуле:

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{(F_{aac} + F_m)}{\frac{F_{aac}}{R_{aac}} + \frac{F_m}{R_m}} = \frac{R_{aac} \cdot R_m \cdot (F_{aac} + F_m)}{R_m \cdot F_{aac} + R_{aac} \cdot F_m} \quad (2)$$

В формуле (2) приняты следующие обозначения:

R_{aac} – термическое сопротивление газобетонной части фрагмента кладки сечением $L_x \times L_y$ и толщиной l_z (рис. 2);

$F_{aac} = [L_x - 2 \cdot b] \cdot [L_y - 2 \cdot b] = (l_x \cdot l_x + 2 \cdot b) \cdot (l_y \cdot l_y + 2 \cdot b) = 4 \cdot l_x \cdot l_y$ – площадь поперечного сечения газобетонной составляющей рассматриваемого на рисунке 2 фрагмента;

R_m – термическое сопротивление растворных швов кладки в рассматриваемом фрагменте;

$F_m = L_x \cdot L_y - F_{aac} = (l_x \cdot l_x + 2 \cdot b) \cdot (l_y \cdot l_y + 2 \cdot b) - 4 \cdot l_x \cdot l_y = 4 \cdot b \cdot (l_x + l_y)$ – площадь поперечного сечения швов регулярного фрагмента кладки, изображенного на рисунке 2.

Здесь и далее по тексту обозначение “aac” относится к газобетону (по первым буквам термина “autoclaved aerated concrete”), “m” – к строительному раствору кладки (англ. “mortar”).

Уравнение (2) позволяет в общем случае рассчитать термическое сопротивление слоя кладки из газобетонных блоков с учетом теплофизических и геометрических характеристик растворных швов.

Все геометрические размеры, принятые в формуле (2), относятся к фрагментам кладки, изображенным на рисунке 2. Большинство современных предприятий выпускают изделия с высотой блоков l_x 250 мм и длиной l_y 625 мм.

С учетом того, что теплопроводность изделий из автоклавного газобетона марки по плотности D400 λ_{aac} для условий эксплуатации «Б» составляет по ГОСТ 31359 [19] 0,117 Вт/(м·°C), а теплопроводность растворных швов плотностью 1800 кг/м³ λ_m в соответствии с Приложением Д СП 23-101 [17] составляет 0,93 Вт/(м·°C), получим следующие значения термических сопротивлений для соответствующих параллельных сечений рассматриваемого фрагмента кладки:

- по толще газобетонных изделий:

$$R_{aac} = \frac{\delta_{aac}}{\lambda_{aac}} = \frac{0,375}{0,117} = 3,21 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт};$$

- по толще швов кладки:

$$R_m = \frac{\delta_m}{\lambda_m} = \frac{0,375}{0,93} = 0,40 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}.$$

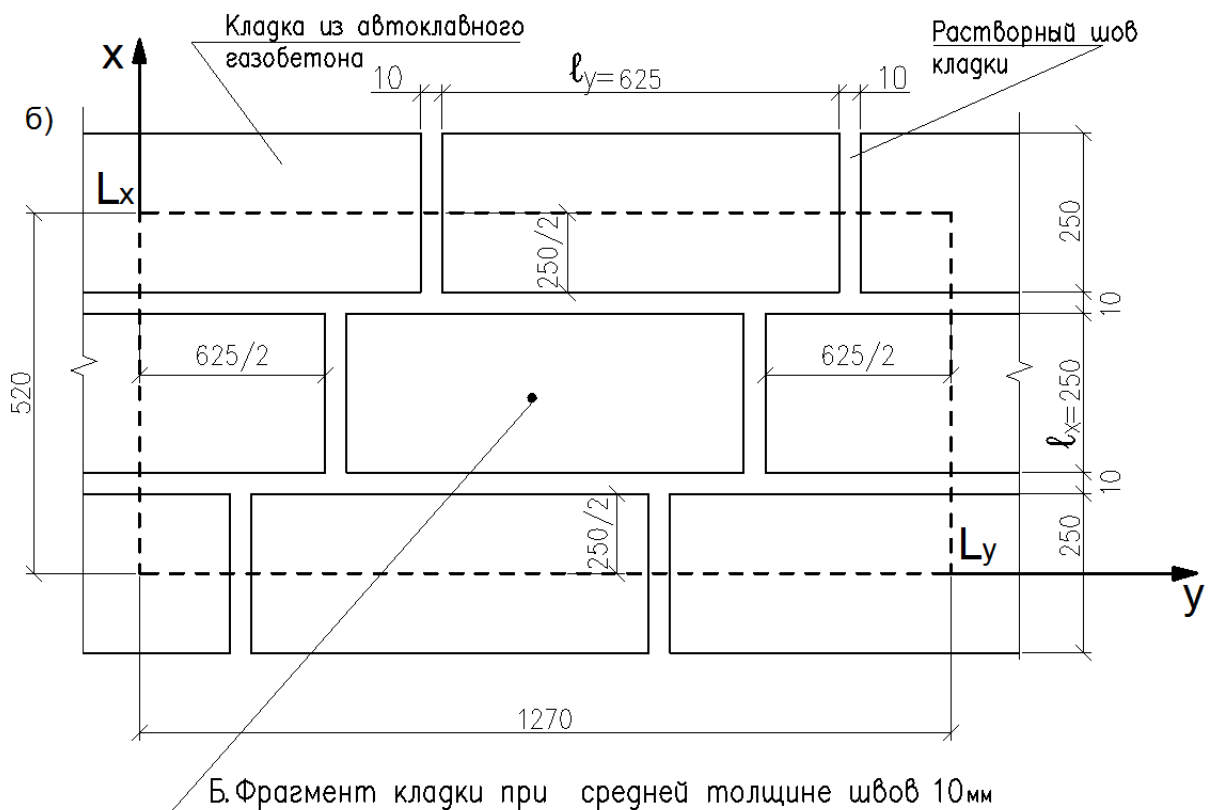
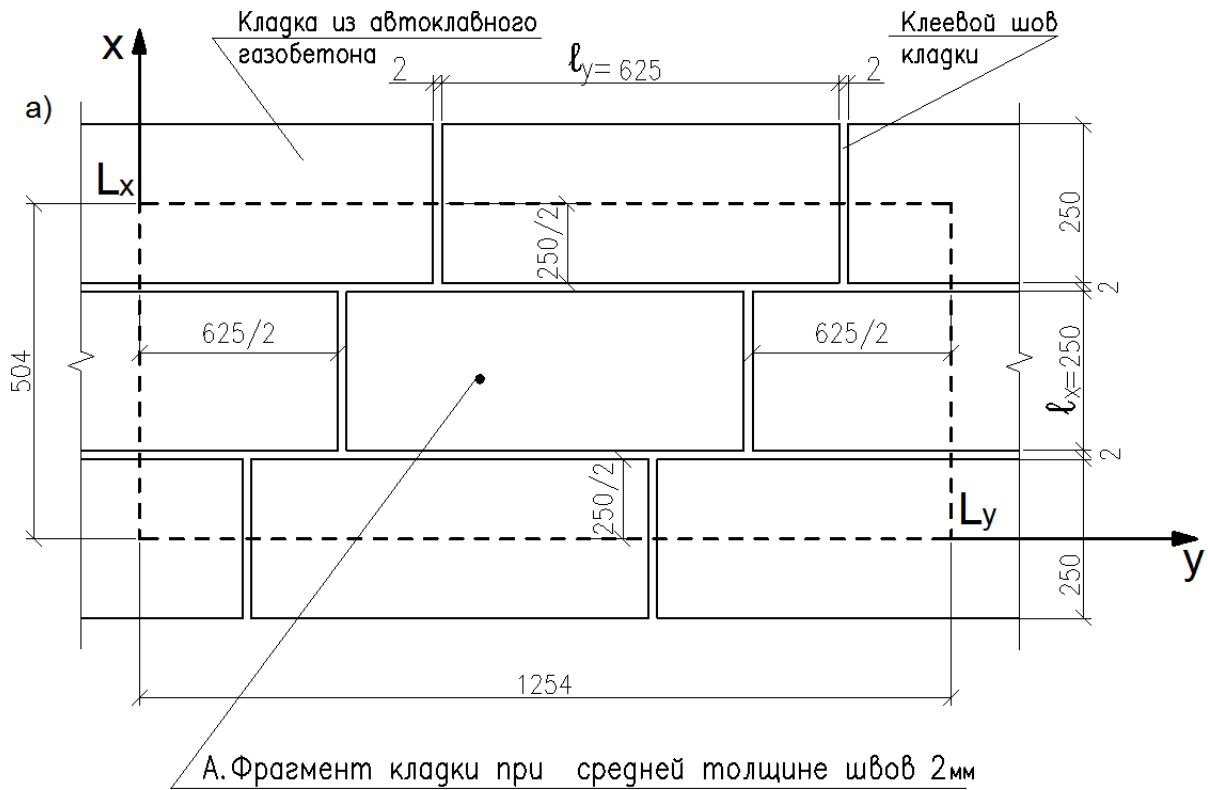


Рисунок 2. Схема рассматриваемого фрагмента кладки:
 а – фрагмент кладки со средней толщиной швов 2 мм;
 б – фрагмент кладки со средней толщиной швов 10 мм

Расчет по формуле (2) для кладки стен с учетом швов кладки толщиной 2 мм дает $R_{k(2mm)} = 2,98 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

Таким образом, поправка на учет влияния швов составляет примерно 7 %.

Если толщина швов в кладке составит 10 мм, то $R_{k(10mm)} = 2,34 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$, т. е. величина поправки составит уже 27 %.

В терминах строительной теплотехники применительно к представленным моделям это означает, что коэффициент теплотехнической однородности γ рассматриваемых фрагментов кладки, рассчитанный без учета иных типов теплопроводных включений, составляет:

- для кладки на клею с толщиной швов 2 мм:

$$\gamma = \frac{R_{k(2mm)}}{R_{aac}} = \frac{2,98}{3,21} = 0,93;$$

- для кладки на растворе с толщиной швов 10 мм:

$$\gamma = \frac{R_{k(10mm)}}{R_{aac}} = \frac{2,34}{3,21} = 0,73.$$

Результаты расчета коэффициента теплотехнической однородности кладки стен для различных марок по плотности (D) выпускаемых стеновых изделий из автоклавного газобетона в зависимости от теплопроводности применяемых в кладке растворов (клеевых) составов при различных толщинах швов кладки (2 и 10 мм) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента теплотехнической однородности γ

Марка блоков по плотности	Толщина швов кладки	Коэффициент теплотехнической однородности кладки γ при расчетном коэффициенте теплопроводности раствора λ_m								
		[Вт/м·°C]								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
D300	2 мм	0,99	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
	10 мм	0,94	0,88	0,84	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64
D400	2 мм	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
	10 мм	0,96	0,92	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,71
D500	2 мм	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94
	10 мм	0,98	0,95	0,91	0,88	0,86	0,83	0,80	0,78	0,76
D600	2 мм	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95
	10 мм	0,99	0,97	0,94	0,91	0,89	0,87	0,84	0,82	0,80
D700	2 мм	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
	10 мм	1,00	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83

Примечание: значения коэффициента теплотехнической однородности γ при промежуточных значениях толщины швов и коэффициента теплопроводности кладочного раствора допускается принимать по интерполяции.

Представленные выше расчеты справедливы для стационарных условий теплопередачи. В этом случае фрагменты кладки, представленные на рисунке 2, можно рассматривать как систему с параллельными сопротивлениями и применять зависимости, полученные выше. Более точные зависимости в стационарных условиях теплопередачи могут быть получены при использовании специализированных программно-вычислительных комплексов [20–22]. Однако в реальных условиях эксплуатации стационарные процессы наблюдаются крайне редко и устанавливаются в течение очень непродолжительного времени.

Моделирование процессов теплопередачи в нестационарных условиях

В случае нестационарного теплообмена следует учитывать влияние швов кладки на теплоустойчивость ограждающей конструкции, которая характеризуется нормируемой амплитудой колебаний и величиной затухания расчетной амплитуды колебаний температуры ν .

Решение задачи о затухании температурных колебаний в ограждениях (одномерная задача) широко известно и описано в монографиях [23, 24]. Данное решение также отражено в нормативной документации [16] для расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций.

Учет влияния швов в этом случае требует решения трехмерного уравнения теплопроводности. Рассмотрим общую постановку задачи. Уравнение теплопроводности в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T \left(x, y, z \right) \Delta T, \quad (3)$$

где $a_T \left(x, y, z \right)$ – коэффициент температуропроводности материала или изделия стенового ограждения.

Сечение регулярного участка фрагмента газобетонной кладки изображено на рисунке 2. Ось z направлена внутрь ограждения параллельно направлению теплового потока.

Примем следующие допущения:

1) температура наружного воздуха (T^e) при $z = 0$ меняется по закону

$$T^e = T_0 + \delta T \cdot \cos \omega t;$$

2) внутри стеновой конструкции (при $z = \ell_z$) тепловой поток

$$q_i = \text{const} \text{ (фиксированные источники тепла)}.$$

Решение задачи представим в виде:

$$T \left(x, y, z, t \right) = T_0(z) + T_H \left(x, t \right) + T_1 \left(x, y, z, t \right), \quad (4)$$

где $T_0(z)$ – стационарное решение, определяемое по формуле (2) с учетом швов кладки;

$T_H \left(x, t \right)$ – решение задачи (3), если бы вся конструкция состояла исключительно из сплошного слоя газобетона, при условии, что внутри действует некий дополнительный тепловой поток q_{add} ;

$T_1 \left(x, y, z, t \right)$ – поправка к полю температур, обусловленная наличием растворных швов в составе газобетонной кладки.

Определим $T_H \left(x, t \right)$ при установившемся режиме. Рассмотрим частное решение уравнения (4):

$$\frac{\partial T_H}{\partial t} = a_{T(aac)} \left(x, y \right) \frac{\partial^2 T_H}{\partial z^2}, \quad (5)$$

где $a_{T(aac)}$ – коэффициент температуропроводности однородной стеновой конструкции из газобетона.

Пусть $\psi^2 = \frac{i \omega}{a_{T(aac)}}$, тогда уравнение (5) примет вид:

$$\frac{d^2 \Theta_{(aac)}}{dz^2} - \psi^2 \cdot \Theta_{(aac)} = 0, \quad (6)$$

Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков

решение которого есть функция вида:

$$\Theta_{(aac)} = C_1 \cdot \text{ch} \psi z + C_2 \cdot \text{sh} \psi z. \quad (7)$$

Комплексное решение уравнения (3) есть функция вида:

$$\tilde{\Theta}_{aac}(z, t) = \Theta_{(aac)} \cdot e^{i\omega t}.$$

Граничные условия положим:

- при $z = 0$: $\tilde{q} = \alpha_H \cdot \Theta_{(aac)} - \lambda \cdot \Theta'_{(aac)}|_{z=0}$;
- при $z = l_z$: $\tilde{q}_\Phi = -\lambda \cdot \Theta'_{(aac)}|_{z=l_z}$.

С учетом данных граничных условий, коэффициенты C_1 и C_2 имеют вид:

$$C_1 = \frac{\alpha_H \cdot \delta t \cdot \text{ch} \psi l_z - q_{add}}{\alpha_H \cdot \text{ch} \psi l_z + \lambda \psi \text{sh} \psi l_z};$$

$$C_2 = \frac{\alpha_H \cdot \left[\frac{q_{add}}{\psi} + \delta t \cdot \text{sh} \psi l_z \right]}{\alpha_H \cdot \text{ch} \psi l_z + \lambda \psi \text{sh} \psi l_z}. \quad (8)$$

Рассмотрим частное решение уравнения (3) с поправкой Θ_1 на наличие растворных швов в кладке, т. е. $\Theta = \Theta_{(aac)} + \Theta_1$:

$$i \omega \Theta_1 = a_{T(aac)} \cdot \Delta \Theta_1 + \delta a_T \cdot \Theta_1 + \delta a_T \cdot \Theta_{aac}, \quad (9)$$

где $\delta a_T = a_{T(m)} - a_{T(aac)}$.

Интерес представляет интегральный показатель влияния растворных швов кладки на теплоустойчивость. Поэтому определим:

$$\bar{\Theta}_1 = \frac{1}{F_0} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Theta_1(x, y, z) dx \cdot dy, \quad (10)$$

где F_0 – площадь регулярного фрагмента кладки, выделенного на рисунке 2.

Учитывая соотношение (6) и то, что поправка Θ_1 мала по сравнению с Θ_{aac} , уравнение (9) можно переписать следующим образом:

$$i \omega \bar{\Theta}_1 = a_{T(aac)} \cdot \bar{\Theta}_1'' + \frac{\delta a_T \cdot F_m}{a_{T(aac)} \cdot F_0} \cdot \Theta_{aac}. \quad (11)$$

В уравнении (11) учтено, что поперечные потоки вдоль контура на рисунке 2 ничтожно малы (первое слагаемое правой части уравнения (9)), вторым слагаемым можно пренебречь из-за наличия малого параметра F_m / F_0 . Неоднородное уравнение (11) удобно переписать в виде:

$$\bar{\Theta}_1'' - \psi^2 \cdot \bar{\Theta}_1 = -k \psi^2 \cdot \Theta_{aac}, \quad (12)$$

где $k = \frac{\delta a_T \cdot F_m}{a_{T(aac)} \cdot F_0}$.

Частное решение уравнения (12) имеет вид:

$$\bar{\Theta}_{1q} = -\frac{k\psi}{2} \left[e^{\psi z} \int_0^z e^{-\psi x} \cdot \Theta_{aac}(x) \cdot dx - e^{-\psi z} \int_0^z e^{\psi x} \cdot \Theta_{aac}(x) \cdot dx \right]. \quad (13)$$

Общее решение уравнения (12) можно записать следующим образом:

$$\bar{\Theta}_1 = A \operatorname{sh} \psi z - \bar{\Theta}_{1q}. \quad (14)$$

Очевидно, что при $z = 0$: $\bar{\Theta}_1 = 0$.

Потребуем, чтобы тепловой поток на границе $z = l_z$ равнялся нулю, т. е.

$$q = -\lambda A \psi \operatorname{ch} \psi l_z + \frac{k\psi^2 \lambda}{2} \left[e^{\psi l_z} \int_0^{l_z} e^{-\psi z} \Theta_{aac}(z) dz + e^{-\psi l_z} \int_0^{l_z} e^{\psi z} \Theta_{aac}(z) dz \right] = 0. \quad (15)$$

Отсюда константа A равна:

$$A = \frac{k\psi}{2} \left(C_1 \cdot \left[l_z + \frac{1}{\psi} \cdot \operatorname{th} \psi l_z \right] + C_2 \cdot l_z \cdot \operatorname{th} \psi l_z \right) = 0. \quad (16)$$

Таким образом, дополнительная комплексная температура на внутренней поверхности равна:

$$\bar{\Theta}_1^i = A \operatorname{sh} \psi l_z - \frac{k\psi}{2} \left[C_1 \cdot l_z \cdot \operatorname{sh} \psi l_z + C_2 \cdot \left(l_z \cdot \operatorname{ch} \psi l_z - \frac{1}{\psi} \cdot \operatorname{sh} \psi l_z \right) \right] = 0. \quad (17)$$

С учетом формулы (17) выражение для дополнительной комплексной температуры можно переписать следующим образом:

$$\bar{\Theta}_1^i = \frac{k}{2} \left[C_1 \cdot \frac{\operatorname{sh}^2 \psi l_z}{\operatorname{ch} \psi l_z} + C_2 \cdot \left(\operatorname{sh} \psi l_z - \frac{\psi \cdot l_z}{\operatorname{ch} \psi l_z} \right) \right] = 0. \quad (18)$$

В отсутствие дополнительных потоков изнутри ($q_{add} = 0$):

$$\bar{\Theta}_{add} = \frac{\delta T}{\operatorname{ch} \psi l_z + \frac{\lambda \psi}{\alpha_H} \operatorname{sh} \psi l_z}. \quad (19)$$

Комплексный коэффициент затухания для кладки:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\operatorname{ch} \psi l_z + \frac{\lambda \psi}{\alpha_H} \operatorname{sh} \psi l_z}. \quad (20)$$

Тогда коэффициент затухания, соответствующий градиентному условию $T^e = T_0 + \delta \cdot T \cdot \cos \omega t$, определяется как:

$$\nu = \frac{\tilde{\nu} + \tilde{\nu}^*}{2}. \quad (21)$$

Величина $\bar{\Theta}_1^i$ согласно (18) после упрощений примет вид:

$$\bar{\Theta}_1^i = \frac{k}{2} \cdot \frac{\delta T \cdot \psi l_z}{\text{ch} \psi l_z + \frac{\lambda \psi}{\alpha_H} \text{sh} \psi l_z} = \frac{k}{2} \cdot \psi l_z \cdot \Theta_{\text{aac}} \quad (22)$$

Поэтому поправка на швы приводит к дополнительному значению $\delta \tilde{v}$:

$$\delta \tilde{v} = \frac{k}{2} \cdot (\psi l_z) \cdot \tilde{v} = \frac{k}{2} \cdot F \cdot R_{\text{aac}} \cdot \tilde{v} \cdot \sqrt{i} = \frac{k}{2} \cdot D_{\text{aac}} \cdot \tilde{v} \cdot \sqrt{i} \quad (23)$$

где D_{aac} – показатель тепловой инерции стеновой конструкции из газобетона.

Для показательной формы записи поправка на учет швов имеет вид:

$$\delta = \frac{\delta \tilde{v}}{\tilde{v} \sqrt{i}} = \frac{k}{2} \cdot D_{\text{aac}} = \frac{\delta a_T}{a_{T(\text{aac})}} \cdot \frac{F_m}{2F_0} \cdot D_{\text{aac}} \quad (24)$$

Для рассматриваемого на рисунке 2а фрагмента кладки: $\frac{F_m}{2F_0} = 0,0055$.

Коэффициент теплоусвоения (при периоде 24 ч): $S = 0,27 \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_V} = 1,89$.

Термическое сопротивление однородного слоя кладки (с учетом влияния растворных швов на теплотехническую однородность): $R_{\text{aac}} = 2,98 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

Тепловая инерция: $D_{\text{aac}} = R_{\text{aac}} \cdot S = 5,63$.

Удельная теплоемкость: $c_V = 1,05 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$.

Плотности материалов (газобетонных блоков и кладочных составов): $\rho_{\text{aac}} = 400 \text{ кг/м}^3$; $\rho_m = 1600 \text{ кг/м}^3$.

Тогда при толщине швов кладки $b = 2 \text{ мм}$:

$$\frac{\delta a_T}{a_{T(\text{aac})}} = \frac{a_{T(\text{ш})}}{a_{T(\text{aac})}} - 1 = \frac{\lambda_m}{\lambda_{\text{aac}}} \cdot \frac{\rho_{\text{aac}}}{\rho_m} - 1 = 1,06.$$

Отсюда величина относительной поправки δ составит (см. уравнение (24)):

$$\delta = 1,06 \cdot 5,63 \cdot 0,0055 = 3,3 \%$$

Таким образом, вклад швов толщиной 2 мм в комплексный коэффициент затухания составляет 3,3 %. При таком численном значении величиной поправки можно пренебречь и считать сопротивления газобетонных блоков и швов в кладке как параллельные.

При толщине швов кладки $b = 10 \text{ мм}$:

$$\frac{F_m}{2F_0} = 0,027.$$

Величина относительной поправки δ в этом случае составит:

$$\delta = 1,06 \cdot 4,42 \cdot 0,027 = 12,7 \%$$

Таким образом, при толщине швов кладки 10 мм их вклад в комплексный коэффициент затухания составляет 12,7 %. Данное обстоятельство накладывает определенные ограничения на оценку термического сопротивления кладки стен из газобетонных блоков по формуле (2).

Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков

Заклучение

Из представленного в статье анализа можно сделать вывод о том, что при проектировании наружных стен из газобетонных блоков следует учитывать влияние швов кладки как при расчете термического сопротивления фрагментов кладки, так и при учете теплоустойчивости проектируемых из газобетонных блоков наружных ограждающих конструкций.

В работе получено общее уравнение, позволяющее оценить в стационарных условиях теплопередачи термическое сопротивление кладки, состоящей из двух параллельных сечений: газобетонных блоков и растворных швов кладки. В уравнении учтены геометрические и теплотехнические параметры материалов, используемых в кладке. Показано, что влияние относительной поправки учета швов кладки толщиной 2 мм на комплексный коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры составляет 3,3 %. Следовательно, при расчете термического сопротивления кладки стен из газобетонных блоков на цементном клею с толщиной швов 2 мм сечения из разнородных материалов (газобетона и растворных швов), параллельные тепловому потоку, можно рассматривать как параллельные сопротивления и применять для расчета формулу (2). При толщине швов кладки 10 мм влияние относительной поправки учета швов кладки толщиной 2 мм на комплексный коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры составляет 12,7 %, поэтому формулу (2) и данные, представленные в таблице 1, допускается использовать только как оценочные.

Следует отметить, что в настоящей работе исследовано влияние только одного вида теплопроводных включений (горизонтальных и вертикальных швов кладки) на теплотехнические свойства наружных стен из газобетонных блоков. Наличие других видов теплопроводных включений (дисков плит перекрытий, армированных поясов, гибких и жестких связей, «краевых зон», оконных и дверных проемов и пр.) в составе ограждающих конструкций приводит к еще большему росту дополнительных потерь тепловой энергии за отопительный период [15, 25, 26].

Для уменьшения влияния роли кладочных составов на теплотехническую однородность стеновых конструкций из газобетонных блоков следует использовать кладочные составы с низкой теплопроводностью. В ряде работ [27–29] для несущих стеновых конструкций из газобетонных блоков с целью повышения коэффициента теплотехнической однородности предлагается использовать клеи из пенополиуретана.

Литература

1. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Špokauskas A., Aleknevičius M., Yakovlev G. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes // *Construction and Building Materials*. 2013. No. 49. Pp. 527–535.
2. Kus H., Carlsson T. Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete // *Cement and Concrete Research*. 2003. No. 9. Pp. 1423–1432.
3. Matsushita F., Aono Y., Shibata S. Carbonation degree of autoclaved aerated concrete // *Cement and Concrete Research*. 2000. No. 11. Pp. 1741–1745.
4. 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. No. 2. Pp. 293–300.
5. Laukaitis A., Fiks B. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete // *Applied Acoustics*. 2006. No. 3. Pp. 284–296.
6. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete // *Cement and Concrete Research*. 2000. No. 3. Pp. 457–464.
7. Kurama H., Topçu I.B., Karakurt C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. No. 2. Pp. 767–773.
8. Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R. Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. No. 41. Pp. 352–359.
9. Chen G., Liu X., Chen Y., Guo X., Tan Y. Coupled heat and moisture transfer in two common walls // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2014. Vol. 3. Pp. 335–342.
10. Ropelewski L., Neufeld R.D. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete // *Journal of Energy Engineering*. 1999. No. 125(2). Pp. 59–75.

Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков

11. Levchenko V. Production of AAC in Russia: History, present stage, perspectives // Cement, Wapno, Beton. 2011. Spec. issue. Pp. 125–127.
12. Немова Д.В., Спиридонова Т.И., Куражова В.Г. Неизвестные свойства известного материала // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №1. С. 36–46.
13. Miao J.K., Bing Q.D. Study on energy efficiency design of self-insulation system with autoclaved aerated concrete block in cold regions // Applied Mechanics and Materials. 2014. No. 507. Pp. 515–520.
14. Горшков А.С., Гладких А.А. Влияние растворных швов кладки на параметры теплотехнической однородности стен из газобетона // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3(13). С. 39–42.
15. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2009. №5. С. 297–305.
16. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
17. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
18. ГОСТ 31360-2007. Изделия стеновые неармированные из автоклавного газобетона. Технические условия.
19. ГОСТ 31359-2007 Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия.
20. Корниенко С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №2(28). С. 18–23.
21. Корниенко С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 43–49.
22. Корниенко С.В. Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения здания // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 24–30.
23. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.
24. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.
25. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. О теплотехнической однородности двухслойной стеновой конструкции // Энергосбережение. 2014. №7. С. 58–63.
26. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 348–351.
27. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 5–19.
28. Горшков А.С., Гринфельд Г.И., Мишин В.Е., Никифоров Е.С., Ватин Н.И. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеисто-бетонных за счет использования в кладке полиуретанового клея // Строительные материалы. 2014. №5. С. 57–64.
29. Grinfeld G., Gorshkov A., Vatin N. Tests results strength and thermophysical properties of aerated concrete block wall samples with the use of polyurethane adhesive // Advanced Materials Research. 2014. No. 941–944. Pp. 786–799.

*Александр Сергеевич Горшков, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)3884315; эл. почта: alsgor@yandex.ru*

*Павел Павлович Рымкевич, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +79112245913; эл. почта: rymkewitch@yandex.ru*

*Николай Иванович Ватин, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)9643762; эл. почта: vatin@mail.ru*

© Горшков А. С., Рымкевич П. П., Ватин Н. И., 2014

doi: 10.5862/MCE.52.5

Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls

A.S. Gorshkov*St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
+79213884315; e-mail: alsgor@yandex.ru***P.P. Rymkevich***Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia
+79112245913; e-mail: rymkewitch@yandex.ru***N.I. Vatin***St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
+79219643762; e-mail: vatin@mail.ru*

Key words

autoclaved aerated concrete (AAC); unreinforced autoclaved aerated concrete products; adhesive for aerated concrete; small-block wall; masonry mortar; mortar joints; thermal conductivity; stationary heat transfer

Abstract

This paper shows the influence of mortar joints on the thermal resistance of external walls made of autoclaved aerated concrete blocks. Due to the fact that the thermal conductivity of cement mortars and adhesives is significantly higher than the thermal conductivity of autoclaved aerated concrete products, their effect must be considered when designing the walling.

The article contains a table of thermotechnical uniformity coefficients of aerated concrete walls depending on the thickness and thermal conductivity of mortar joints. The work describes the simulation of heat transfer in stationary and non-stationary conditions. In the case of unsteady heat transfer, the influence of masonry joints on the thermal resistance of the enclosing structure was considered. Thermal resistance was characterized by the range of temperatures and the estimated damping of range of temperatures. There was calculated a correction value for the effect of mortar joints on the complex damping coefficient of estimated range of temperatures.

References

1. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Špokauskas A., Aleknevičius M., Yakovlev G. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 49. Pp. 527–535.
2. Kus H., Carlsson T. Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. No. 9. Pp. 1423–1432.
3. Matsushita F., Aono Y., Shibata S. Carbonation degree of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000. No. 11. Pp. 1741–1745.
4. 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. No. 2. Pp. 293–300.
5. Laukaitis A., Fiks B. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*. 2006. No. 3. Pp. 284–296.
6. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000. No. 3. Pp. 457–464.
7. Kurama H., Topçu I.B., Karakurt C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. No. 2. Pp. 767–773.
8. Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R. Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 41. Pp. 352–359.
9. Chen, G., Liu, X., Chen, Y., Guo, X., Tan, Y. Coupled heat and moisture transfer in two common walls. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2014. Vol. 3. Pp. 335–342.
10. Ropelewski, L., Neufeld, R.D. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete. *Journal of Energy Engineering*. 1999. No. 125 (2). Pp. 59–75.

Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls

11. Levchenko V. Production of AAC in Russia: History, present stage, perspectives. *Cement, Wapno, Beton*. 2011. SPEC.ISSUE. Pp. 125–127.
12. Nemova D.V., Spiridonova T.I., Kurazhova V.G. Neizvestnyye svoystva izvestnogo materiala [Unknown properties of the well-known material]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2012. No. 1. Pp. 36–46. (rus)
13. Miao, J.K., Bing, Q.D. Study on energy efficiency design of self-insulation system with autoclaved aerated concrete block in cold regions. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 507. Pp. 515–520.
14. Gorshkov A.S., Gladkikh A.A. Vliyaniye rastvornykh shvov kladki na parametry teplotekhnicheskoy odnorodnosti sten iz gazobetona [Influence of mortar joints in aerocrete-work on the thermotechnical homogeneity of walls]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 3 (13). Pp. 39–42. (rus)
15. Gagarin V.G. Teplofizicheskiye problemy sovremennykh stenovykh ograzhdayushchikh konstruksiy mnogoetaznykh zdaniy [Thermophysical problems of modern wall enclosures multi-storey buildings]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2009. No. 5. Pp. 297–305. (rus)
16. SNiP 23-02-2003 *Teplovaya zashchita zdaniy* [Building code 23-02-2003 Thermal protection of buildings]. (rus)
17. SP 23-101-2004 *Proyektirovaniye teplovoy zashchity zdaniy* [Set of rules 23-101-2004 Design of thermal protection of buildings]. (rus)
18. GOST 31360-2007 *Izdeliya stenovyye nearmirovannyye iz avtoklavnogo gazobetona. Tekhnicheskiye usloviya* [Building walling of reinforced autoclaved aerated concrete. Specifications]. (rus)
19. GOST 31359-2007 *Betony yacheistyye avtoklavnogo tverdeniya. Tekhnicheskiye usloviya* [Autoclaved aerated concrete. Specifications]. (rus)
20. Korniyenko S.V. Testirovaniye metoda rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksiy na rezultatakh naturnykh izmereniy parametrov mikroklimata pomeshcheniy [Testing of calculation method of the enclosing structures temperature-humidity conditions on the results of indoor climate in-situ measurements]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 2(28). Pp. 18–23. (rus)
21. Korniyenko S.V. Kompleksnaya otsenka teplozashchity ograzhdayushchikh konstruksiy obolochki zdaniya [The complex assessment of a thermal performance of the building envelope]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 7(33). Pp. 43–49. (rus)
22. Korniyenko S.V. Raschetno-eksperimentalnyy kontrol energosberezheniya zdaniya [Settlement and experimental control of energy saving for buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8(43). Pp. 24–30. (rus)
23. Bogoslovskiy V.N. *Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskiye osnovy otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh)*. [Building Thermal Physics (thermal basics of heating, ventilation and air conditioning)]. Tutorial for High school. 2nd edition. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p. (rus)
24. Aleksandrovskiy S.V. *Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy na izmeneniya temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti* [Calculation of concrete and reinforced concrete structures to changes in temperature and humidity with the creep]. 2nd edition. Moscow: Stroyizdat, 1973. 432 p. (rus)
25. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. O teplotekhnicheskoy odnorodnosti dvukhsloynoy stenovoy konstruksii [About two-layer heat engineering uniformity of wall construction]. *Energosberezheniye*. 2014. No. 7. Pp. 58–63. (rus)
26. Korniyenko S.V. Povysheniye energoeffektivnosti zdaniy za schet snizheniya teplopoter cherez krayevyye zony ograzhdayushchikh konstruksiy [Improving building energy efficiency by reducing heat loss through the boundary zone walling]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2010. No. 3. Pp. 348–351. (rus)
27. Gorshkov A.S., Vatin N.I. Svoystva stenovykh konstruksiy iz yacheistobetonnykh izdeliy avtoklavnogo tverdeniya na poliuretanovom kleyu [Properties of the wall structures made of autoclaved cellular concrete products on the polyurethane foam adhesive]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 5(40). Pp. 5–19. (rus)
28. Gorshkov A.S., Grinfeld G.I., Mishin V.Ye., Nikiforov Ye.S., Vatin N.I. Povysheniye teplotekhnicheskoy odnorodnosti sten iz yacheisto-betonnykh za schet ispolzovaniya v kladke poliuretanovogo kleya [Cellular Concrete Products Through the Use of Polyuretane Glue in Masonry]. *Construction materials*. 2014. No. 5. Pp. 57–64. (rus)
29. Grinfeld G., Gorshkov A., Vatin N. Tests results strength and thermophysical properties of aerated concrete block wall samples with the use of polyurethane adhesive. *Advanced Materials Research*. 2014. No. 941–944. Pp. 786–799.

Full text of this article in Russian: pp. 38–48