

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей
международной научной конференции,
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2018

Редакционная коллегия:

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

УДК 666.973.2: 666.97.031

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АРБОЛИТ С НАПРАВЛЕННОЙ УКЛАДКОЙ ЗАПОЛНИТЕЛЯ КАК СТЕНОВОЙ ТЕПЛОВОЙ АККУМУЛЯТОР

А.Н. Ягубкин

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.yagubkin@psu.by

Приведено теоретическое обоснование снижения теплопроводности арболита с направленной укладкой заполнителя по сравнению с традиционным арболитом. Для этого использована электротепловая аналогия по теории Максвелла-Бургена и вытекающая из нее формула Рэлея-Оделевского. Результаты подтверждены экспериментальными исследованиями. Выполнены также теплотехнический расчет и расчет сопротивлению паропрооницанию, которые подтвердили эффективность направленной укладки заполнителя в арболите. Приведены данные подтверждающие способность арболита выполнять роль стенового теплового аккумулятора.

Ключевые слова: арболит, направленная укладка заполнителя, теплопроводность, теплоемкость, стеновой тепловой аккумулятор.

MODIFIED ARBOLITH WITH DIRECTED INSTALLATION FILLER AS A WALL HEAT ACCUMULATOR

A. Yagubkin

Polotsk state university, Belarus

email: a.yagubkin@psu.by

The theoretical basis for reducing the thermal conductivity of the arbolit with the directed packing of the aggregate in comparison with the traditional arbolit is given in the article. For this, an electrothermal analogy was used in the Maxwell-Burgen theory and the Rayleigh-Odelevsky formula derived from it. The results are confirmed by experimental studies. Thermotechnical calculation and calculation of the resistance to vapor permeation have also been performed, which confirmed the efficiency of the directed laying of the aggregate in the arbolit. The data confirming the ability of the arbolit to perform the role of a wall heat accumulator.

Keywords: arbolit, directional packing of aggregate, thermal conductivity, heat capacity, wall heat accumulator.

Введение. Для строительной отрасли Республики Беларусь одной из приоритетных является задача увеличения объёмов индивидуального жилищного строительства и обеспечения снижения его стоимости. Перспективным направлением в решении данной задачи может быть организация производства стеновых материалов из арболита с заданными свойствами, получаемого по новой технологии с использованием доступного местного сырья.

В условиях современного строительного производства при организации производства строительных материалов стоит задача совершенствования технологии их изготовле-

ния, обеспечения высоких темпов производства при низких энергозатратах, использования современных методов управления производством (самоактуализационный менеджмент), создания новых конкурентных преимуществ, использования новых методов продвижения товара на рынке (эмпирический маркетинг), использования только местного сырья и оборудования при производстве.

Изделия из арболита отличаются не только невысокой себестоимостью, но и обеспечивают сравнительно высокие темпы строительства с минимальным использованием грузоподъемной техники, при этом возможно обеспечить низкие теплотери через ограждающие конструкции.

Основная часть. При направленной укладке, благодаря анизотропным свойствам древесины, вертикальное расположение древесного заполнителя позволит снизить теплопроводность арболита.

Теоретически это можно обосновать, основываясь на электротепловой аналогии по теории Максвелла-Бургена и вытекающей из нее формулы Рэлея-Оделевского [1, 2]:

$$\lambda = K_1 \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2\phi(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\lambda_1 + \lambda_2 + \phi(\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (1)$$

где λ , λ_1 , λ_2 – соответственно коэффициенты теплопроводности дисперсной системы, дисперсной среды и дисперсной фазы ($\lambda_1 = 0,87$ Вт/м·°С – теплопроводность цементного камня с учетом открытых и закрытых пор [1]; $\lambda_2 = 0,18$ Вт/м·°С – древесный заполнитель при горизонтальной ориентации [3], $\lambda_1 = 0,09$ Вт/м·°С – древесный заполнитель при вертикальной ориентации [3]);

$\phi = 0,7$ – объемная концентрация заполнителя, определена в [3];

K_1 – поправочный коэффициент, позволяющий рассчитать теплопроводность системы с взаимопроникающими компонентами, к которым относится в частности цементный камень, в зависимости от отношения λ_2 / λ_1 и объемной концентрации заполнителя ϕ [1] ($K_1 = 0,41$ – при горизонтальной ориентации древесного заполнителя, $K_1 = 0,35$ – при вертикальной ориентации древесного заполнителя).

Подставив все значения в формулу 4.3, получим коэффициент теплопроводности для арболита с горизонтальной ориентацией заполнителя:

$$\lambda = 0,41 \cdot 0,87 \cdot \frac{2 \cdot 0,87 + 0,18 - 2 \cdot 0,7 \cdot (0,87 - 0,18)}{2 \cdot 0,87 + 0,18 + 0,7 \cdot (0,87 - 0,18)} = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{С}.$$

Для арболита с вертикальной ориентацией заполнителя:

$$\lambda = 0,35 \cdot 0,87 \cdot \frac{2 \cdot 0,87 + 0,09 - 2 \cdot 0,7 \cdot (0,87 - 0,09)}{2 \cdot 0,87 + 0,09 + 0,7 \cdot (0,87 - 0,09)} = 0,09 \text{ Вт/м} \cdot \text{С}.$$

Нормативное значение коэффициента теплопроводности для арболита с беспорядочной ориентацией заполнителя составляет 0,12 Вт/м·°С [3]. Следовательно, при вертикальной ориентации древесного заполнителя возможно добиться снижения коэффициента теплопроводности на 25%.

Результаты определения теплопроводности представлены в таблице 1. Схема прохождения теплового потока через образец представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. – Схема прохождения теплового потока при определении теплопроводности арболита, полученного по технологии колебательного уплотнения:
а – горизонтальное расположение щепы; **б** – вертикальное расположение щепы

Таблица 1. – Результаты определения теплопроводности и прочности арболита, модифицированного добавками

№ состава	Способ уплотнения	Прочность арболита при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности арболита по экспериментальным данным, Вт/(м·°С)
1	Виброуплотнение	1,88	0,120
	Виброуплотнение с пригрузом	2,01	0,120
2	Виброуплотнение	1,89	0,120
	Виброуплотнение с пригрузом	2,00	0,120
	Колебательное уплотнение (вертикальное расположение щепы)	4,10	0,095

Из таблицы следует, что теплопроводность арболита с ориентировано уложенным заполнителем на 20,8 % меньше, чем при использовании виброуплотнения и виброуплотнения с пригрузом. Теоретическое обоснование приведено выше. Это также можно объяснить тем, что вектор теплового потока и градиент температуры в арболите с направленной укладкой заполнителя не совпадают, в отличие от традиционного арболита. Фотография арболитового блока в разрезе, изготовленного по технологии колебательного уплотнения представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. - Арболитовый блок в разрезе:
а – разрез по направлению укладки щепы; **б** – поперечный разрез

Полученные результаты использованы для теплотехнического расчёта толщины стены, с нормативным коэффициентом теплопроводности материала ограждающей конструкции в условиях эксплуатации и с прогнозируемым коэффициентом теплопроводности [2]. Схема наружной ограждающей конструкции представлена на рисунке 3.

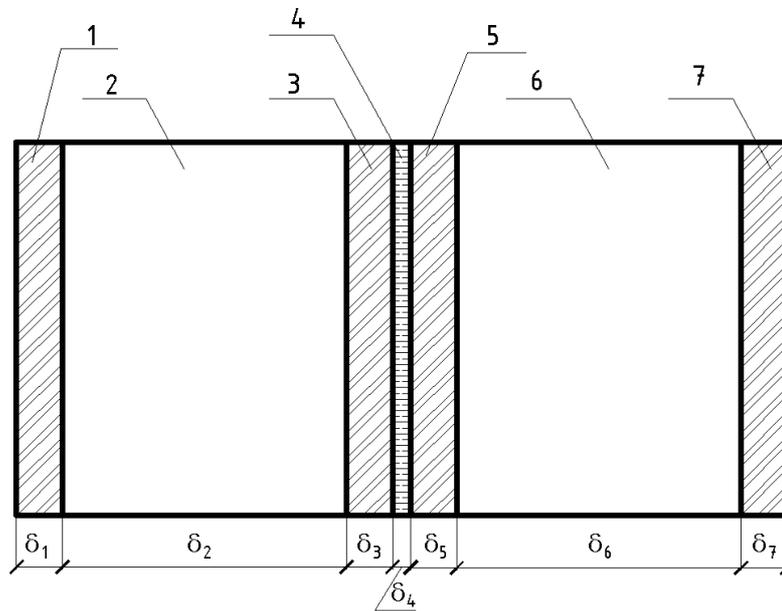


Рисунок 3. – Наружная ограждающая конструкция:
1, 3, 5, 7 – отделочный слой; 2, 6 – арболит; 4 – кладочный раствор

Характеристики материалов ограждающей конструкции:

1, 3, 5, 7 – керамзитобетон на керамзитовом песке: $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 0,025 \text{ м}$, $\lambda = 0,169 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; 4 – цементно-перлитовый раствор: $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 0,010 \text{ м}$, $\lambda = 0,260 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; 2, 6 – арболит: $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$, $\delta = x \text{ м}$, $\lambda = 0,230 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Сопrotивление теплопередаче R_T , $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, ограждающей конструкции определяется по формуле

$$R_T = \frac{1}{\alpha_{в}} + R_k + \frac{1}{\alpha_{н}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ [3];

R_k – термическое сопротивление ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$;

$\alpha_{н}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для зимних условий, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ [3].

Термическое сопротивление многослойной ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями R_k , $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ определяется по формуле

$$R_k = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (3)$$

где R_k – термическое сопротивление отдельных слоев конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$.

Термическое сопротивление слоя многослойной конструкции R , $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, определяется по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (4)$$

где δ – толщина слоя, м;
 λ – коэффициент теплопроводности материала ограждающей конструкции в условиях эксплуатации, Вт/(м²·°C).

Нормативное сопротивление теплопередаче наружных стен $R_{m,норм} = 3,2$ (м²·°C)/Вт [3].

Определяем толщину стены из арболитовых блоков из формулы (2):

$$R_T = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{\delta_6}{\lambda_6} + \frac{\delta_7}{\lambda_7} + \frac{1}{\alpha_H} = R_{T,норм}, \quad (5)$$

Для нормативного коэффициента теплопроводности:

$$3,2 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,230} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{0,010}{0,260} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,230} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{1}{23},$$

откуда $x = 0,28$ м.

Для прогнозируемого коэффициента теплопроводности ($\lambda = 0,12$ Вт/(м·°C)):

$$3,2 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,120} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{0,010}{0,260} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,120} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{1}{23},$$

откуда $x = 0,14$ м.

Из представленных выше расчётов следует, что толщина стены в первом случае будет равна 0,69 м, во втором 0,39 м.

Таким образом, для обеспечения стеной из арболитовых блоков нормативного сопротивления теплопередаче $R_{T,норм} = 3,2$ (м²·°C)/Вт достаточно толщины стены 690 мм из блоков, изготовленных по традиционной технологии уплотнения и 390 мм из блоков изготовленных по разработанной в данной работе технологии колебательного уплотнения.

Так как в блоках предусматривается отделочный слой, то необходимо проверить многослойную конструкцию на сопротивление паропроонианию. Исходной предпосылкой будет то, что плоскость возможной конденсации будет располагаться на границе отделочного слоя и блока.

Сопротивление паропроонианию ограждающей конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации R_p , м²ч Па/кг, должно быть не менее требуемого сопротивления паропроонианию $R_{п.тр}$, определяемого по формуле [3]:

$$R_{п.тр} = R_{п.н} \cdot \frac{e_B - e_K}{e_K - e_{н.от}} = 0,1092 \cdot \frac{1135,2 - 594,54}{594,54 - 423,94} = 0,346 \text{ м}^2\text{ч Па/кг}, \quad (6)$$

где $R_{п.н}$ – сопротивление паропроонианию ограждающей конструкции в пределах от плоскости возможной конденсации до наружной поверхности ограждающей конструкции, м²ч Па/кг;

e_B – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетных температуре и влажности воздуха, определяемое по формуле (7);

e_K – максимальное парциальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации, Па при температуре в плоскости возможной конденсации t_K , °C, определяемой по формуле (8);

$e_{н.от}$ – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре наружного воздуха за отопительный период, $t_{н.от}$, определяемое по формуле (9).

$$e_B = 0,01 \cdot \phi_B \cdot E_B = 0,01 \cdot 55 \cdot 2064 = 1135,2 \text{ Па}, \quad (7)$$

где ϕ_B – расчетная относительная влажность внутреннего воздуха, %;
 E_B – максимальное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетной температуре воздуха.

$$t_K = t_B - \frac{t_B - t_{н.от}}{R_m} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_B} + \sum R_{Ti} \right) = 18 - \frac{18 - (-2)}{3,2} \cdot \left(\frac{1}{8,7} + 2,82 \right) = 3,33^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где t_B – расчетная температура внутреннего воздуха, °С;
 $t_{н.от}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С;
 R_{Ti} – термическое сопротивление слоев ограждающей конструкции от внутренней поверхности конструкции до плоскости возможной конденсации, м²°С/Вт.

$$e_{н.от} = 0,01 \cdot \phi_{н.от} \cdot E_{н.от} = 0,01 \cdot 82 \cdot 517 = 423,94 \text{ Па}, \quad (9)$$

где $\phi_{н.от}$ – средняя относительная влажность наружного воздуха за отопительный период, %;
 $E_{н.от}$ – максимальное парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре за отопительный период $t_{н.от}$, °С.

Сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции $R_{п}$, м²ч Па/кг, следует определять по формуле:

$$R_{п} = \sum \frac{\delta}{\mu} = \frac{0,025}{0,2289} + \frac{0,14}{0,11} + \frac{0,025}{0,2289} + \frac{0,01}{0,53} + \frac{0,025}{0,2289} + \frac{0,14}{0,11} = 2,89 \text{ м}^2\text{ч Па/кг}, \quad (10)$$

где μ – расчетный коэффициент паропрооницаемости материала слоя ограждающей конструкции, мг/(мч Па).

Условие $R_{п} = 2,89 \text{ м}^2\text{ч Па/кг} \geq R_{п.тр} = 0,346 \text{ м}^2\text{ч Па/кг}$ выполняется, следовательно, на границе отделочного слоя и блока не будет происходить накопление влаги.

Кроме того, в работах [4, 5], приводятся данные об уникальных свойствах арболита, благодаря его высокой теплоемкости. Так например, для стены толщиной 40 см для нагрева до 18 °С требуются следующие расходы энергии:

- бетон тяжелый с утеплителем – 10 000 кДж;
- камни керамические с утеплителем – 9000 кДж;
- ячеистый бетон – 4000 кДж;
- арболит – 9000 кДж.

При сопоставимых расходах на нагрев с тяжелым бетоном и керамическими камнями арболит при этом удерживает (аккумулирует) теплоту в течение 27 ч. В то время как остальные материалы при отрицательной наружной температуре остывают до 0 °С через:

- бетон тяжелый с утеплителем – 6 ч;
- камни керамические с утеплителем – 9 ч;
- ячеистый бетон – 3 ч.

Таким образом, арболит является стеновым тепловым аккумулятором и требует значительно меньших энергетических затрат на создание и поддержание комфортных условий проживания. Т.е. остальные материалы при прочих равных условиях потребляют в течение суток больше энергии на:

- бетон тяжелый с утеплителем – 30 000 кДж;
- камни керамические с утеплителем – 15 000 кДж;
- ячеистый бетон – 25 000 кДж.

Заключение. Направленная укладка заполнителя в арболите позволяет получить уникальный по своим теплотехническим свойствам материал с низкой теплопроводностью и высокой теплоемкостью. Такой материал в стеновой конструкции является не только несущим элементом, но и тепловым аккумулятором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довжик, В.Г. Учет эксплуатационной влажности бетонов при расчете и нормировании их теплопроводности / В.Г. Довжик // Бетон и железобетон. – 2008. – № 3. – С. 6–10.
2. Ягубкин, А.Н. Инновационный конструкционно-теплоизоляционный арболит с заданными свойствами / А.Н. Ягубкин // Методология и принципы ценообразования в строительстве. Инновационные технологии в строительной отрасли и их внедрение BIM-технологии : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 мая 2017 г / РУП «РНТЦ» ; редкол.: Л.Ф. Кручанова [и др]. – Минск, 2017. – С. 68–70.
3. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 01.07.2007. – Минск : Минстройарх, 2007. – 35 с.
4. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Стройиздат, 1990. – 415 с.
5. Бужевич, Г.А. Арболит / Г.А. Бужевич. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1968. – 244 с.