

Применение монолитного керамзитобетона в ограждающих конструкциях загородных коттеджей с прерывистым отоплением

Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарев, В.А. Голиков, М.В. Дымищ
Самарский государственный технический университет, Самара

Аннотация: Представлена методика определения оптимального значения сопротивления теплопередаче трехслойной наружной стены здания загородного коттеджа. В качестве критерия оптимизации выбран удельный расход тепловой энергии за недельный цикл эксплуатации здания. В результате исследования функции, описывающей суммарные удельные энергозатраты на компенсацию теплопотерь и нагрев 1 м^2 наружной стены, было получено аналитическое выражение для определения оптимального значения сопротивления теплопередаче. На основе полученного решения произведена оптимизация толщины монолитного керамзитобетона, используемого в качестве конструктивно-теплоизоляционного материала в наружной стене. Получена аналитическая зависимость для оценки энергосберегающего эффекта за счет дополнительного утепления наружной стены загородного коттеджа.

Ключевые слова: прерывистое отопление, сопротивление теплопередаче, ограждающая конструкция, энергозатраты, теплозащитные характеристики.

В настоящее время наблюдается увеличение объемов коттеджного строительства на территории Российской Федерации. При этом значительная часть приходится на загородные коттеджи, эксплуатируемые преимущественно в выходные дни и отпускной период. Строительство коттеджей ведется как в сельской местности, так и в пригородной зоне на территории садово-дачных товариществ. Для их отопления в настоящее время используется природный газ, электрическая энергия, дрова, каменный уголь и возобновляемые источники энергии, к которым относится тепло грунта, солнечная и ветровая энергия. В работах [1-3] подробно рассмотрены вопросы, связанные с использованием возобновляемых источников энергии для теплоснабжения малоэтажных зданий.

Рост цен на электрическую энергию и органическое топливо в последние годы делает задачу по определению экономически целесообразной толщины ограждающих конструкций зданий весьма актуальной. В работах

[4, 5] перечислены основные мероприятия по энергосбережению при эксплуатации жилого фонда. Для зданий с постоянным проживанием температура в отапливаемых помещениях поддерживается постоянной в процессе эксплуатации здания. Следовательно, в ограждающих конструкциях наблюдается стационарный тепловой режим. Согласно нормативным требованиям, приведенным в СП 50.13330 “Тепловая защита зданий”, сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций должно удовлетворять санитарно-гигиеническим и комфортным условиям, а также условию энергосбережения. При этом использование конструктивных решений наружных стен, покрытий и перекрытий, обладающих теплозащитными характеристиками, превышающими нормативные значения, всегда сопровождается снижением теплопотерь и, как следствие, экономией тепловой или электрической энергии.

В зданиях с прерывистым отоплением значительное энергопотребление наблюдается в период натопа помещения, продолжительность которого существенно повышается с увеличением толщины ограждающей конструкции. Поэтому возникает необходимость в определении оптимальной её толщины.

В зданиях и сооружениях, эксплуатируемых периодически, в целях экономии энергии используется дежурный режим отопления при отсутствии людей. Тепловой режим ограждающих конструкций зданий с переменным тепловым режимом рассмотрен в работах [6-8]. Характерный температурный график в отапливаемых помещениях загородного коттеджа приведен на рис.1.

Недельный цикл эксплуатации загородного коттеджа включает следующие четыре стадии. Первая стадия I ($0 \leq \tau \leq \tau_1$) характеризует период эксплуатации здания при использовании дежурного отопления. Температура внутреннего воздуха на этой стадии принимается равной $t_{в1} = 10 \div 12^\circ\text{C}$ для

предотвращения выпадения конденсата на внутренних поверхностях ограждающих конструкций.

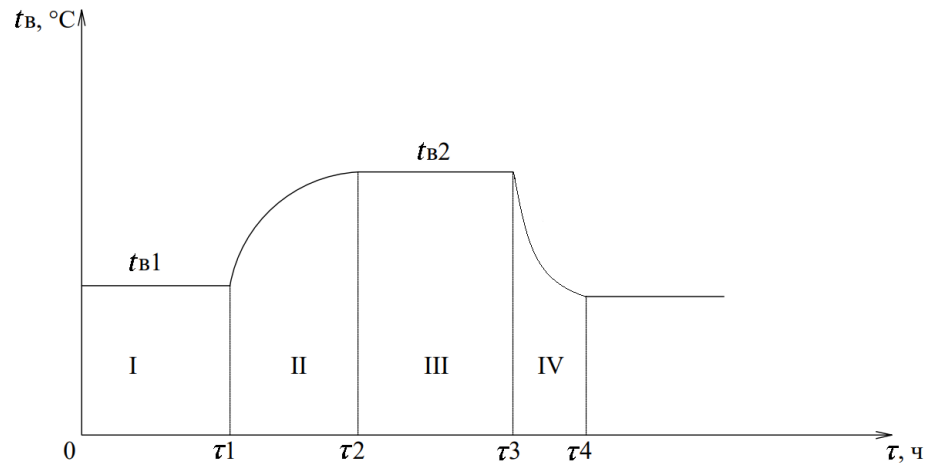


Рис. 1. – График изменения температуры внутреннего воздуха в помещениях загородного коттеджа

Следующая, вторая стадия II ($\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$), представляет собой натоп помещения, в процессе которого подводимая тепловая энергия затрачивается на нагрев ограждающих конструкций и компенсацию тепловых потерь.

Результаты исследований, представленные в работах [9-11] показали, что в однослойных ограждающих конструкциях с прерывистым отоплением рекомендуется использовать легкие бетоны и деревянный брус, в многослойных – внутреннее утепление с применением высокоэффективных полимерных материалов, обладающих низкой паропроницаемостью.

Третья стадия III ($\tau_2 \leq \tau \leq \tau_3$) осуществляется при наличии людей в коттедже. Минимальный уровень теплозащиты ограждающих конструкций зданий с периодическим пребыванием людей должен обеспечить выполнение лишь санитарно-гигиенических требований, включающих выполнение первого и второго условий комфортности.

Последняя, четвертая стадия IV ($\tau_3 \leq \tau \leq \tau_4$), происходит после отключения отопительного котла, продолжительность которой, как показано

в работе [12], существенно зависит от теплоаккумулирующей способности помещений и кратности воздухообмена.

При проектировании энергоэффективных коттеджей стремятся применять ограждающие конструкции с повышенными теплозащитными характеристиками. В качестве примера рассмотрим определение оптимального значения сопротивления теплопередаче наружной стены с использованием монолитного керамзитобетона в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала.

При выполнении расчета использовались следующие исходные данные:

1. Район строительства – Самарская область.
2. Температура внутреннего воздуха в коттедже при дежурном режиме отопления $t_{в1}=12^{\circ}\text{C}$, при расчетном режиме $t_{в2}=22^{\circ}\text{C}$.
3. Средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{н}=t_{оп}=-4,7^{\circ}\text{C}$.
4. Продолжительность работы дежурного отопления $\tau_{I}=3$ сут, на расчетном режиме $\tau_{III}=2$ сут.
5. Конструкция наружной стены представлена на рис.2.
6. Коэффициент теплотехнической однородности наружной стены принят равным $r=0,9$ согласно СТО 00044807-001-2006 “Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий” Российского общества инженеров строительства.

В качестве утеплителя рассмотрено применение беспесчаного керамзитобетона плотностью $\rho_2=300, 400, 500, 600$ и 700 кг/м^3 , а также керамзитобетона с использованием керамзитового песка плотностью $\rho_2=500, 600, 800, 1000 \text{ кг/м}^3$.

Теплофизические характеристики керамзитобетона и других материалов были приняты из СП 50.13330 “Тепловая защита зданий”.

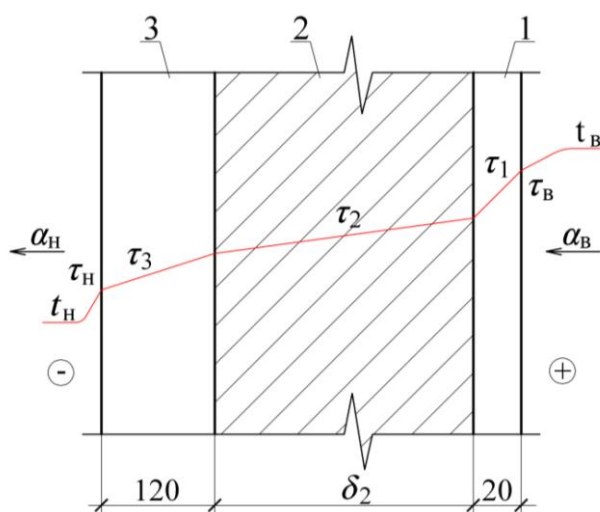


Рис. 2. – Фрагмент наружной стены: 1 слой – цементно-песчаный раствор $\delta_1=0,02$ м; $\rho_1=1800$ кг/м³; $c_1=0,92$ кДж/(кг·°С); $\lambda_1=0,76$ Вт/(м·°С); 2 слой – беспесчаный керамзитобетон, керамзитобетон на керамзитовом песке; 3 слой – кладка из керамического кирпича на цементно-песчаном растворе $\delta_3=0,12$ м; $\rho_3=1800$ кг/м³; $c_3=0,92$ кДж/(кг·°С); $\lambda_3=0,7$ Вт/(м·°С)

Осуществим поиск оптимальных значений сопротивления теплопередаче трехслойной наружной стены, представленной на рис. 2. Для этого исследуем зависимость удельных энергозатрат за недельный цикл эксплуатации здания загородного коттеджа на экстремум.

Суммарные энергозатраты за недельный цикл эксплуатации здания здания находим по формуле:

$$Q_{\tau} = Q_I + Q_{II} + Q_{III}, \text{ кДж/м}^2 \quad (1)$$

где Q_I , Q_{II} , Q_{III} – удельные энергозатраты при работе дежурного отопления при натопе помещений коттеджа и расчетном режиме эксплуатации здания соответственно.

Удельные энергозатраты на стационарных режимах эксплуатации коттеджа находятся по формулам:

$$Q_I = \frac{t_{e1} - t_H}{R_0^{np}} \cdot \tau_I, \text{ кДж/м}^2, \quad (2)$$

$$Q_{III} = \frac{t_{e1} - t_n}{R_0^{np}} \cdot \tau_{III}, \text{ кДж/м}^2, \quad (3)$$

где R_0^{np} – приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$; τ_I, τ_{III} – продолжительность первого и третьего периода эксплуатации здания соответственно, с.

Удельные энергозатраты при натопе помещения согласно [10] находятся по формуле:

$$Q_{II} = Q_n m, \text{ кДж/м}^2, \quad (4)$$

где Q_n – удельные энергозатраты на нагрев наружной стены, кДж/м^2 ; $m = (1 + 2\varphi)/(1 + \varphi)$ – поправочный коэффициент, учитывающий теплопотери наружной стены в процессе её нагрева; $\varphi = \frac{1}{\alpha_n (R_0^{ycl} - 1/\alpha_e)}$ – критерий граничных условий; R_0^{ycl} – сопротивление теплопередаче глади наружной стены, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$; α_e, α_n – коэффициенты теплоотдачи со стороны внутренней и наружной поверхностей стены, соответственно, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Удельные энергозатраты определяются согласно [10] по формуле:

$$Q_n = \sum_{i=1}^3 c_i \rho_i \delta_i \Delta \tau_i, \text{ кДж/м}^2, \quad (5)$$

где c_i – удельная теплоемкость материала i -го слоя, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$; ρ_i – плотность i -го слоя материала, кг/м^3 ; δ_i – толщина i -го слоя материала, м; $\Delta \tau_i$ – изменение температуры i -го слоя в процессе натопа помещения, °C .

Величина $\Delta \tau_i$ согласно [10] определяется по формуле:

$$\Delta \tau_i = t_{e2} - t_{e1} - \frac{t_{e2} - t_{e1}}{2R_0^{ycl}} \left(\frac{2}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^{i-1} R_i + \sum_{i=1}^i R_i \right), \text{ °C}, \quad (6)$$

где $R_i = \delta_i / \lambda_i$ – термическое сопротивление i -го слоя, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

После преобразований получим выражение для определения Q_n вида:

$$Q_n = c_1 \rho_1 \delta_1 (t_{e2} - t_{e1}) \left(1 - \frac{\frac{2}{\alpha_e} + R_1}{2R_0^{ysel}} \right) + c_2 \rho_2 x_2 (t_{e2} - t_{e1}) (R_0^{ysel} - a) \times, \text{кДж/м}^2, \quad (7)$$

$$\times \left(0,5 - \frac{b}{2R_0^{ysel}} \right) + c_3 \rho_3 \delta_3 (t_{e2} - t_{e1}) \frac{d}{2R_0^{ysel}}$$

где $a = 1/\alpha_e + 1/\alpha_n + R_1 + R_3$; $b = R_1 - R_3 + 1/\alpha_e - 1/\alpha_n$; $d = 2/\alpha_n + R_3 - R_1$.

Уравнение (1) после подстановки в него выражений (2), (3), (7) примет вид:

$$Q_\Sigma = \frac{t_{e1} - t_n}{2R_0^{ysel}} \tau_I + \frac{t_{e1} - t_n}{2R_0^{ysel}} \tau_{III} + m \left(c_1 \rho_1 \delta_1 (t_{e2} - t_{e1}) \left(1 - \frac{\frac{2}{\alpha_e} + R_1}{2R_0^{ysel}} \right) + c_2 \rho_2 x_2 (t_{e2} - t_{e1}) (R_0^{ysel} - a) \times \left(0,5 - \frac{b}{2R_0^{ysel}} \right) + c_3 \rho_3 \delta_3 (t_{e2} - t_{e1}) \frac{d}{2R_0^{ysel}} \right), \text{кДж/м}^2. \quad (8)$$

Исследуем зависимость для определения Q_Σ на экстремум. Для этого получим выражение первой производной dQ_Σ/dR_0^{ysel} и приравняем его к нулю.

После преобразований выражение для определения R_0^{ysel} примет вид:

$$(R_0^{ysel})^{opt} = \sqrt{ab + \frac{c_3 \rho_3 \delta_3 d}{c_2 \rho_2 \lambda_2} - \frac{c_1 \rho_1 \delta_1 \left(\frac{2}{\alpha_e} + R_1 \right)}{0,5 c_2 \rho_2 \lambda_2} + \frac{(t_{e1} - t_n) \tau_I + (t_{e1} - t_n) \tau_{III}}{rm 0,5 (t_{e2} - t_{e1}) c_2 \rho_2 \lambda_2}}, \text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (9)$$

Величина поправочного коэффициента m может быть определена по рис.3 в зависимости от величины R_0^{ysel} .

Преобразуем выражение (9), используя формулу для коэффициента теплоусвоения при периоде 24 часа:

$$S_2 = 0,27 \sqrt{c_2 \rho_2 \lambda_2}, \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (10)$$

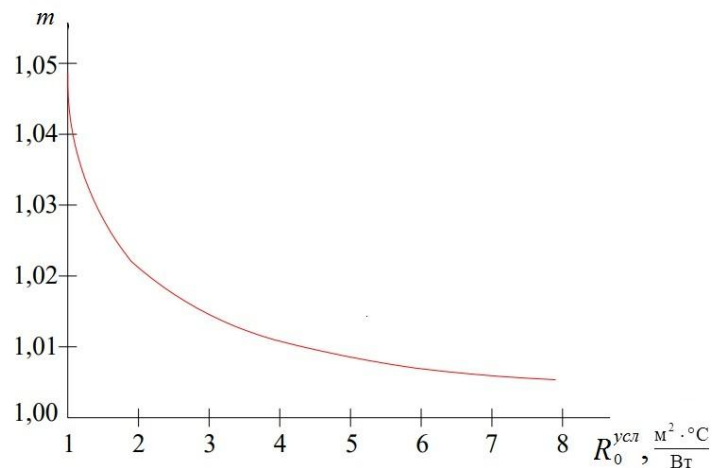


Рис. 3. – Зависимость поправочного коэффициента m от сопротивления теплопередаче наружной стены R_0^{ysl}

После подстановки выражения для S_2 получим

$$(R_0^{ysl})^{opt} = \sqrt{ab + \frac{1}{S_2^2} \left(0,073c_3\rho_3\delta_3d - 0,146c_1\rho_1\delta_1 \left(\frac{2}{\alpha_6} + R_1 \right) + 0,146 \frac{(t_{e1} - t_n)\tau_I + (t_{e1} - t_n)\tau_{III}}{rm0,5(t_{e2} - t_{e1})} \right)}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}. \quad (11)$$

Анализируя зависимость для определения оптимального значения $(R_0^{ysl})^{opt}$, можно сделать вывод о том, что его величина существенно зависит от коэффициента теплоусвоения монолитного керамзитобетона.

Используя формулу (11), был выполнен расчет определения оптимального значения сопротивления теплопередаче наружной стены, исходя из обеспечения минимальных энергозатрат при эксплуатации загородного коттеджа для различных значений плотности монолитного керамзитобетона.

Результаты расчета представлены в таблице № 1.

На рис. 4 представлена зависимость оптимального значения сопротивления теплопередаче гряды наружной стены от коэффициента теплоусвоения монолитного керамзитобетона.

Таблица № 1

Результаты определения оптимальной толщины
монолитного керамзитобетона

Вид керамзитобетона	Плотность в сухом состоянии, ρ_2 , кг/м ³	Коэффициент теплоусвоения, s_2 , Вт/(м ² ·°С)	Оптимальное значение сопротивления теплопередаче, $(R_0^{ysel})^{opt}$, м ² ·°С/Вт	Оптимальная толщина монолитного керамзитобетона, $(\delta_2)^{opt}$, м
Беспесчаный	300	1,51	8,67	0,873
Беспесчаный	400	1,82	7,19	0,785
Беспесчаный	500	2,16	6,06	0,741
Беспесчаный	600	2,46	5,34	0,697
Беспесчаный	700	2,70	4,87	0,654
На керамзитовом песке	500	2,55	5,31	0,842
На керамзитовом песке	600	3,03	4,49	0,826
На керамзитовом песке	800	3,83	3,58	0,773
На керамзитовом песке	1000	5,03	2,78	0,749

На рис. 4 представлена зависимость оптимального значения сопротивления теплопередаче глади наружной стены от коэффициента теплоусвоения монолитного керамзитобетона.

Из представленных на рис. 4 данных, видно, что выбор уровня теплозащиты наружной стены следует осуществлять, руководствуясь выполнением неравенства:

$$(R_0^{ysel})^{mp} \leq R_0^{ysel} \leq (R_0^{ysel})^{opt}, \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}. \quad (12)$$

На рис. 5 представлена зависимость суммарных удельных затрат тепловой энергии при эксплуатации загородного коттеджа для рассматриваемой наружной стены. Плотность беспесчаного керамзитобетона была принята равной 600 кг/м³.

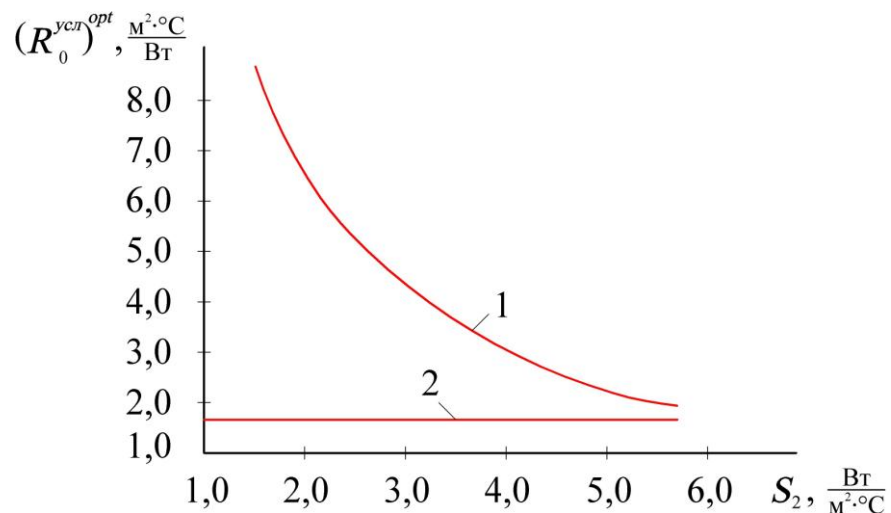


Рис. 4. – Зависимость оптимального значения сопротивления теплопередаче наружной стены от коэффициента теплоусвоения монолитного керамзитобетона: 1 – оптимальное значение $(R_0^{ysl})^{opt}$; 2 – нормативное значение $(R_0^{ysl})^{np} = 1,66 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$

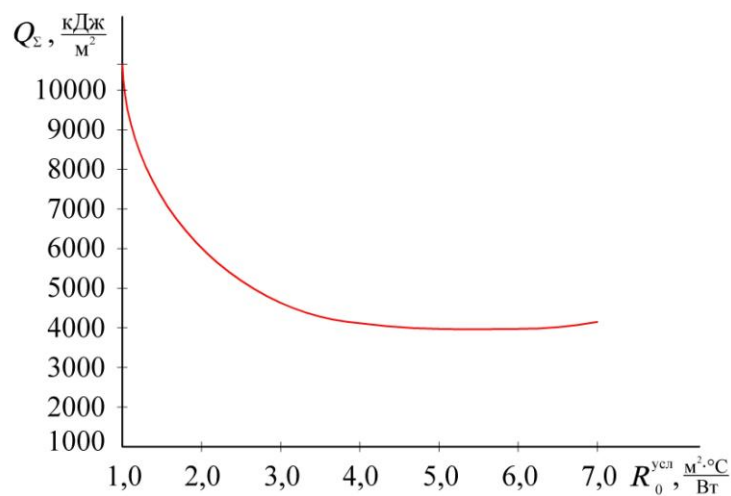


Рис. 5. – Зависимость суммарных удельных затрат тепловой энергии от сопротивления теплопередаче

Для оценки экономии тепловой энергии при повышении теплозащитных характеристик наружной стены на рис. 6 представлена в графическом виде зависимость относительного снижения энергопотребления при различных значениях сопротивления теплопередаче.

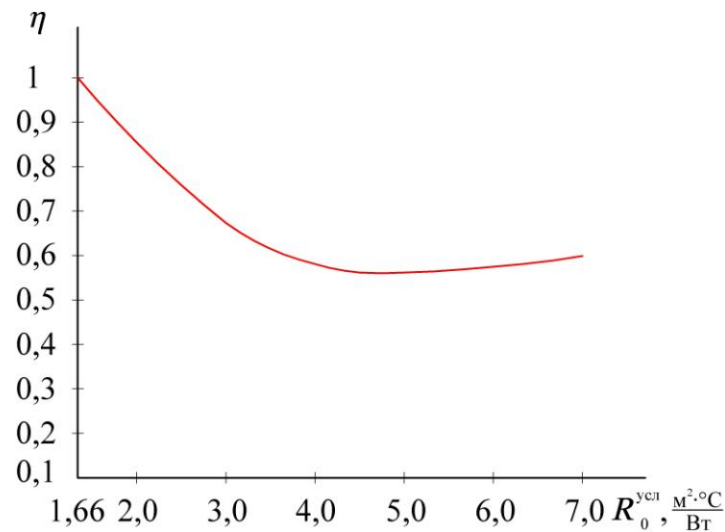


Рис. 6. – Зависимость относительного энергопотребления наружной стены от сопротивления теплопередаче

Относительное снижение энергопотребления η определяется по формуле:

$$\eta = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{норм}}, \quad (13)$$

где $Q_{норм}$ - удельные энергозатраты при нормативном значении сопротивления теплопередаче наружной стены, равно $(R_0^{ysl})^{нп} = 1,66 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Окончательное решение по выбору уровня теплозащиты наружной стены необходимо принять после оценки ее несущей способности и технико-экономического обоснования.

Выводы

1. Разработана инженерная методика оптимального значения толщины конструкционно-теплоизоляционного материала, используемого при монолитном возведении загородных коттеджей.

2. Представлены результаты определения оптимальных значений сопротивления теплопередаче трехслойной наружной стены с использованием беспесчаного керамзитобетона и керамзитобетона на керамзитовом песке различной плотности.

3. Произведена оценка экономии тепловой энергии за счет дополнительного утепления наружной стены.

Литература

1. Бутузов В.А., Шетов В.Х. Возобновляемые источники энергии // Энергосбережение. 2008. №8. С. 81-83.

2. Береговой А.М., Береговой В.А., Гречишкин А.В., Викторова О.Л. Эффективность использования тепла земли подземным пространством здания // Жилищное строительство. 2011. №1. С. 30-31.

3. Бродач М.М. Здания с нулевым энергетическим балансом – миф или реальность? // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2010. №8. С. 4-9.

4. Зильберова И.Ю. Петрова Н.Н. Модернизация зданий с целью повышения энергоэффективности, комфорта и безопасности проживания, а также продления срока эксплуатации жилых зданий // Инженерный вестник Дона. 2012. №4-1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1120

5. Иванчук Е.В. К вопросу повышения энергетической эффективности жилых домов // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2151

6. Vytchikov Yu.S., Belyakov I.G., Saparev M.E. Investigation of the thermal effect of building envelopes of individual building under intermittent heating // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.186

7. Vytchikov Yu., Saparev M., Chulkov A. Analyzing screen heat insulation and its effect on energy consumption while heating building envelopes in conditions of intermittent heating // MATEC Web of Conferences: IPICSE-2016. 2016. Vol. 86. doi: 10.1051/matecconf/20168604019

8. Дацюк Т.А. Ивлев Ю.П., Пухкал В.А. Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении // Современные проблемы науки и образования. 2014. №5. С. 69-70.

9. Вытчиков Ю.С. Сапарёв М.Е., Чулков А.А. Оптимизация выбора теплозащиты ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №3. С. 90-93.

10. Семенов Б.А. Нестационарная теплопередача и эффективность теплозащиты ограждающих конструкций зданий. – Саратов: Сарат. гос. тех. ун-т, 1996. 176 с.

11. Малявина Е.Г., Цыганов А.В. Влияние различных факторов на темп остывания помещения после отключения теплоснабжения // Известия вузов. Строительство. 2015. №1. С. 53-59.

12. Кононович Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки. – М.: Стройиздат, 1986. 160 с.

References

1. Butuzov V.A., Shetov V.H. Jenergosberezhenie. 2008. №8. Pp. 81-83.
2. Beregovoj A.M., Beregovoj V.A., Grechishkin A.V., Viktorova O.L. Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2011. №1. Pp. 30-31.
3. Brodach M.M. AVOK: Ventiljacija, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naja teplofizika. 2010. №8. Pp. 4-9.
4. Zil'berova I.Ju. Petrova N.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №4-1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1120
5. Ivanchuk E.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2151
6. Vytchikov Yu.S., Belyakov I.G., Saparev M.E. Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.186



7. Vytychikov Yu., Saparev M., Chulkov A. MATEC Web of Conferences: IPIECE-2016. 2016. Vol. 86. doi: 10.1051/matecconf/20168604019

8. Dacjuk T.A. Ivlev Ju.P., Puhkal V.A. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2014. №5. Pp. 69-70.

9. Vytychikov Ju.S. Saparjov M.E., Chulkov A.A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. №3. Pp. 90-93.

10. Semenov B.A. Nestacionarnaja teploperedacha i jeffektivnost' teplozashhity ograzhdajushhih konstrukcij zdaniy [Unsteady heat transfer and efficiency of thermal protection of building envelopes]. Saratov: Sarat. gos. teh. un-t, 1996. 176 p.

11. Maljavina E.G., Cyganov A.V. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2015. №1. Pp. 53-59.

12. Kononovich Ju.V. Teplovoj rezhim zdaniy massovoj zastrojki [Thermal regime of buildings of mass development]. M.: Strojizdat, 1986. 160 p.