

Определение оптимальной степени усиления элементов теплозащитной оболочки малоэтажных жилых домов

А.Н. Мальцев

Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета, Абакан

Аннотация: На протяжении отопительного периода во многих сибирских городах наблюдается низкое качество атмосферного воздуха. Одним из основных источников загрязнения воздуха является частный сектор, поскольку большинство индивидуальных жилых домов не соответствуют современным стандартам по тепловой защите зданий и отапливаются угольными печами. В статье, во-первых, были рассмотрены типовые решения по утеплению ограждающих конструкций малоэтажных домов; во-вторых, были определены сроки окупаемости этих решений в зависимости от толщины слоя теплоизоляции и с учётом затрат на отделочные материалы.

Ключевые слова: энергоэффективность зданий, энергоаудит зданий, теплопотери в малоэтажных домах, мероприятия по энергосбережению, реконструкция зданий, проблемы угольного отопления, снижение загрязнения воздуха, снижение эмиссии CO₂

Абакан, Минусинск, Красноярск в холодный период года регулярно возглавляют антирейтинг городов по качеству атмосферного воздуха. Значительный вклад в загрязнение воздушных бассейнов этих городов вносят неэффективные угольные печи и котлы, которые используются при отоплении в малоэтажных жилых домах [1-3]. Высокий объём выбросов загрязняющих веществ складывается из-за низкой тепловой защиты жилых домов [1,4,5], что требует значительного расхода бурого угля на нужды отопления. Для индивидуального дома советского периода постройки площадью 50 м² обыденным является потребление 4-5 тонн бурого угля за отопительный период, что эквивалентно 25000-30000 кВт·ч за год.

Загрязняющие вещества в зимнее время задерживаются в воздушном пространстве этих городов из-за негативных климатических факторов – местность представлена горными хребтами и холмами, которые блокируют свободное прохождение потоков воздуха, а также вызываемая частыми антициклонами температурная инверсия препятствует конвективному поднятию загрязненного воздуха от поверхности земли.

Одним из методов снижения выбросов загрязняющих веществ от индивидуальных жилых домов является повышение сопротивления теплопередаче элементов ограждающих конструкций, с учётом окупаемости мероприятий за счёт будущего снижения расхода энергии и денежных средств на нужды отопления [6,7]. Предполагается, что затраты на мероприятия по усилению тепловой защиты оболочки здания возьмут на себя собственники домов.

Далее определяются дисконтированные сроки окупаемости для некоторых видов ограждающих конструкций. В расчете учитываются затраты на теплоизоляционные материалы, отделочные материалы (если требуются) и энергии на отопление. Затраты на рабочую силу не учитывались, предполагается, что владельцы индивидуальных жилых домов самостоятельно будут производить работы по предварительной подготовке элемента ограждающей конструкции и монтажу на него теплоизоляционных и отделочных материалов.

Поскольку промежуточные доходы, образовавшиеся вследствие снижения годовых эксплуатационных издержек в результате применения ограждений с повышенной теплозащитой, участвуют в обороте денежных средств, величина суммарных дисконтированных затрат, СДЗ, руб., приведенная к концу расчетного срока T , лет, для каждого варианта ограждающей конструкции рассчитывается по формуле 1.

$$\text{СДЗ} = \sum K * \left(1 + \frac{p}{100}\right)^T + Э \left[\left(1 + \frac{p}{100}\right)^T - 1 \right] * \left(\frac{100}{p}\right) \quad (1)$$

где $\sum K = K_1 + K_2$ – суммарные капитальные затраты на мероприятия по усилению тепловой защиты фрагмента ограждающей конструкции, руб/м²;

$K_1 = C_{\text{ти}} * s_{\text{ти}}$ – затраты на обустройство теплоизоляционного слоя, руб/м²;

$C_{\text{ти}}$ – стоимость теплоизоляционного материала в деле, руб/м³;

$s_{\text{ти}}$ – толщина теплоизоляционного слоя, м;

K_2 – стоимость устройства облицовки на фрагмент конструкции, руб/м²;

$\Xi = Q_{\text{тп}}^{\text{г}} * C_{\text{тепл}}$ – суммарные годовые эксплуатационные издержки (потери теплоты через элемент конструкции в денежном выражении), руб./год, в ценах на момент начала эксплуатации здания;

$Q_{\text{тп}}^{\text{г}} = 24 * R_0^{\text{пр}^{-1}} * \text{ГСОП} * 10^{-6}$ – годовые теплотери через фрагмент ограждающей конструкции, МВт·ч/год;

$\text{ГСОП} = z_{\text{от}} * (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) = 6653$ – градус-сутки отопительного периода для района реконструкции;

$z_{\text{от}} = 224$ – продолжительность отопительного периода года со средней суточной температурой воздуха $\leq 8^{\circ}\text{C}$, сут.;

$t_{\text{в}} = 21$ – температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{от}} = -8,7$ – средняя температура воздуха периода года со средней суточной температурой воздуха $\leq 8^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{C}$;

$R = R_0^{\text{пр}} + R_{\text{доп}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции после утепления, рассчитывается по приложению Е СП 50.13330.2012 индивидуально для каждого варианта утепления, м²· $^{\circ}\text{C}$ /Вт;

$R_0^{\text{пр}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции до утепления, рассчитывается по приложению Е СП 50.13330.2012 индивидуально для каждого варианта утепления, м²· $^{\circ}\text{C}$ /Вт;

$R_{\text{доп}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента дополнительного теплоизолирующего слоя, м²· $^{\circ}\text{C}$ /Вт;

$C_{\text{тепл}} = 840$ – стоимость тепловой энергии при печном отоплении с условной эффективностью сжигания угля (КПД) 50%, руб/кВт*ч. Для города Абакана наиболее распространённые способы получения теплоты на нужды отопления и их стоимость показаны в таблице №1.

Таблица № 1

Стоимость различных способов отопления в городе Абакане

Способ отопления	Котельное, КПД 80%	Печное, КПД 50%	Электрическое, одностарифное	Электрическое, двухтарифное (с 23:00 до 7:00)	Централизованное водяное
Стоимость руб/МВт*ч,	530	0,840	1590	650	1000
Формула преобразования в кВт*ч	1 т = 4,8 Гкал = 5582,4 кВт*ч (марка угля - ЗБР)		-	-	1 Гкал = 1 163 кВт*ч
Цена за 1 отпускаемую единицу	2342,3 руб/т		1,59 руб/кВт*ч	0,65 руб/кВт*ч	1166,28 руб/Гкал

$p = 5,5$ – норма дисконта, %, принимаемая в размере не менее действующей ключевой ставки Центрального банка Российской Федерации. Принимается равным 5,5%, поскольку эта величина соответствует среднему росту цен на энергоресурсы в год в Республике Хакасия за последние 10 лет.

Решение считается экономически обоснованным, если срок окупаемости мероприятий не превышает 12 лет, но каждый домовладелец может самостоятельно определиться с оптимальным для него сроком окупаемости. Для получения наглядной иллюстрации результатов технико-экономического обоснования приведены графики (в результатах исследования) зависимости СДЗ от года эксплуатации элемента ограждающих конструкций после мероприятий по усилению тепловой защиты.

Рассмотрим строение наиболее распространённых конструктивных решений элементов ограждающих конструкций старых малоэтажных жилых домов в городе Абакане и способы их утепления.

1. Чердачные перекрытия (рис.1) распространены в виде однопролётной балочной системы из составных Т-образных деревянных балок, на нижние пояса которых устанавливалась обшивка из деревянных досок. Иногда применялась пароизоляция из крафт-бумаги. Теплоизоляция обычно выполнялась из местных доступных насыпных материалов – котельный или металлургический шлак, керамзит, опилки, грунт, а толщина слоя не превышала 150 мм. Иногда, как дополнительный слой теплоизоляции, укладывались стекловатные плиты толщиной до 50 мм. Изнутри помещения потолки штукатурились по дранке или зашивались листовым материалом, таким как ДВП или фанера.

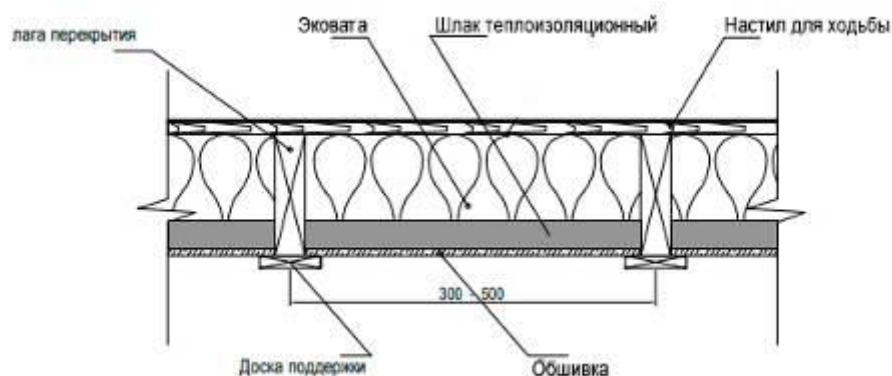


Рис. 1 – Принцип устройства дополнительного теплоизоляционного слоя из эковаты на чердачном перекрытии.

Фрагмент ограждающей конструкции состоит из двух слоёв – доска сосновая с толщиной $s = 0,05$ м, теплопроводностью $\lambda_A = 0,14$ Вт/(м × °С) и из шлакового наполнителя с толщиной $s = 0,10$ м, теплопроводностью $\lambda_A = 0,21$ Вт/(м × °С). Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции $R_0^{пр} = 0,99$ м² × °С/Вт. В качестве теплоизолирующего материала используется эковата с $C_{ти} = 2500$ руб/м³,

$\lambda_A = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{°С})$ с толщиной $s_{\text{ти}} = 0,05; 0,10; \dots; 0,40 \text{ м}$, что с каждым шагом увеличивает приведённое термическое сопротивление фрагмента ограждающей конструкции на $R_{\text{доп}} = 1,25 \text{ м}^2 \times \text{°С}/\text{Вт}$. Теплоизоляция устанавливается путём её монтажа поверх существующего слоя шлака. Сроки окупаемости в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя приведены на рис. 2.

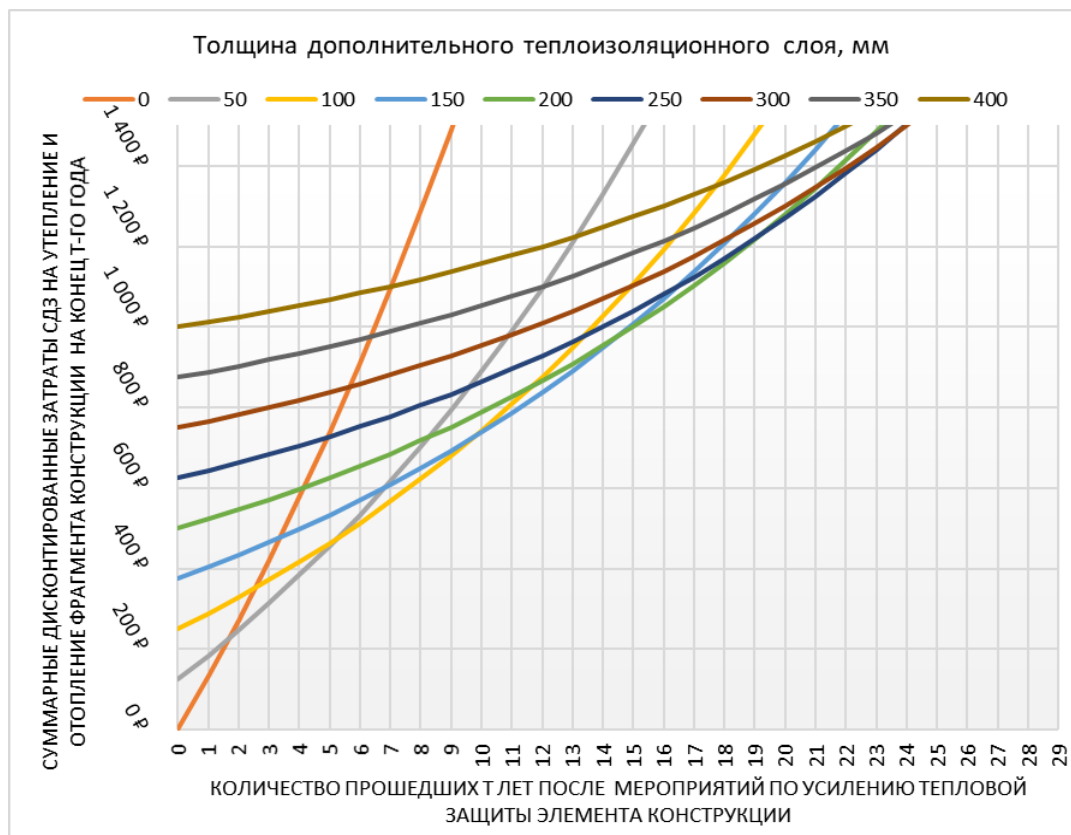


Рис. 2 – График зависимости СДЗ от года эксплуатации фрагмента чердачного перекрытия здания.

В Т-ный год эксплуатации фрагмента ограждающей конструкции, в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя, наиболее выгодным считается тот вариант, у которого линия графика ниже, чем у иных (т.е. с наименьшим объёмом СДЗ - суммарных дисконтированных затрат на мероприятия по утеплению и отоплению).

По графику можно наблюдать пересечение линии варианта без теплоизоляции с линиями теплоизолированных вариантов. Пересечение

обозначает, что в этот год общие затраты на компенсацию энергопотерь через фрагмент неутеплённой ограждающей конструкции превысили суммарные затраты на устройство теплоизоляционного слоя и энергопотери через фрагмент утеплённой ограждающей конструкции. Таким образом, устройство 50 мм теплоизоляции на чердачном перекрытии окупится за 1,5 года, 100 мм через 2,5 лет, 150 мм через 3,5 лет и так далее. За 7 лет окупится даже самый дорогой вариант с толщиной теплоизоляции в 400 мм.

2. Стены бывают бревенчатыми, брусовыми и каркасно-щитовыми с шлаковым, опилочным или грунтовым заполнителем, толщина конструкции стены варьируется в диапазоне 80-150 мм. Фасады покрыты деревянной вагонкой с вентилируемым зазором, а внутренняя отделка выполнена из штукатурки по дранке (деревянной обрешётке).

Рассмотрим утепление по внешней стороне стены с обустройством вентилируемого фасада (рис. 3). Брусовая стена обладает толщиной $s = 0,15$ м, теплопроводностью $\lambda_A = 0,14$ Вт/(м \times °С), отделочными слоями пренебрегаем. Приведённое сопротивление теплопередаче фрагмента конструкции $R_0^{пр} = 1,23$ м² \times °С/Вт. В качестве теплоизолирующего материала используются плиты минералватные с $C_{ти} = 3500$ руб/м³, $\lambda_A = 0,04$ Вт/(м \times °С) с толщиной $s_{ти} = 0,05; 0,10; \dots; 0,40$ м, что с каждым шагом увеличивает приведённое термическое сопротивление фрагмента ограждающей конструкции на $R_{доп} = 1,25$ м² \times °С/Вт. Также учитываются дополнительные затраты на обустройство вентилируемого фасада $K_2 = 500$ руб/м², независимо от толщины теплоизоляционного слоя.

Сроки окупаемости в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя приведены на рис. 4.



Рис. 3 – Принцип устройства теплоизоляционного слоя на внешней поверхности брусовой стены с вентилируемым фасадом.

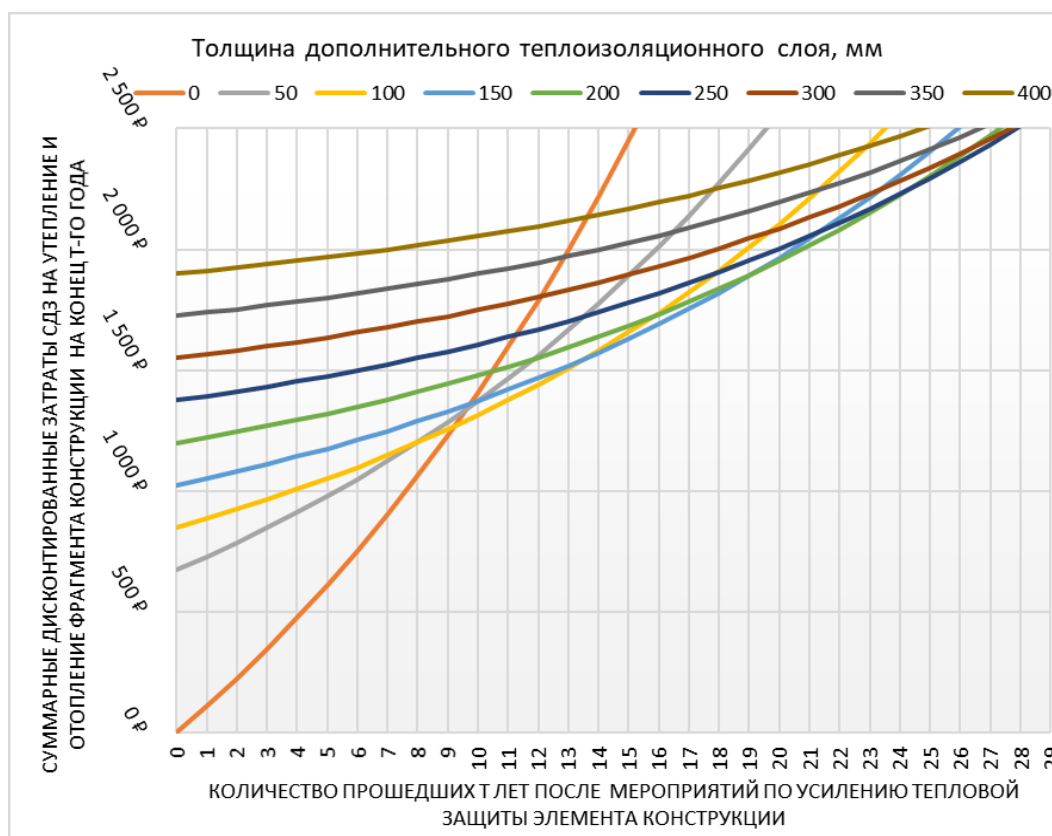


Рис. 4 – График зависимости СДЗ от года эксплуатации фрагмента внешней стены здания с устройством облицовочного слоя.

Устройство дополнительного слоя теплоизоляции с новой облицовкой окупается как минимум за 9 лет при толщине теплоизоляционного слоя в 100 мм. При этом варианте на теплоизоляционные материалы в деле тратится 350 руб/м², а на устройство облицовки 500 руб/м².

Графики на рис. 5 рассчитаны с такими же исходными условиями, как и на предыдущем, но из стоимости были исключены затраты на обустройство вентилируемого фасада. Условно принимаем $K_2 = 100$ руб/м², например, если есть возможность повторно использовать старую обшивку фасадов для организации защиты от атмосферного воздействия на теплоизоляционный слой.

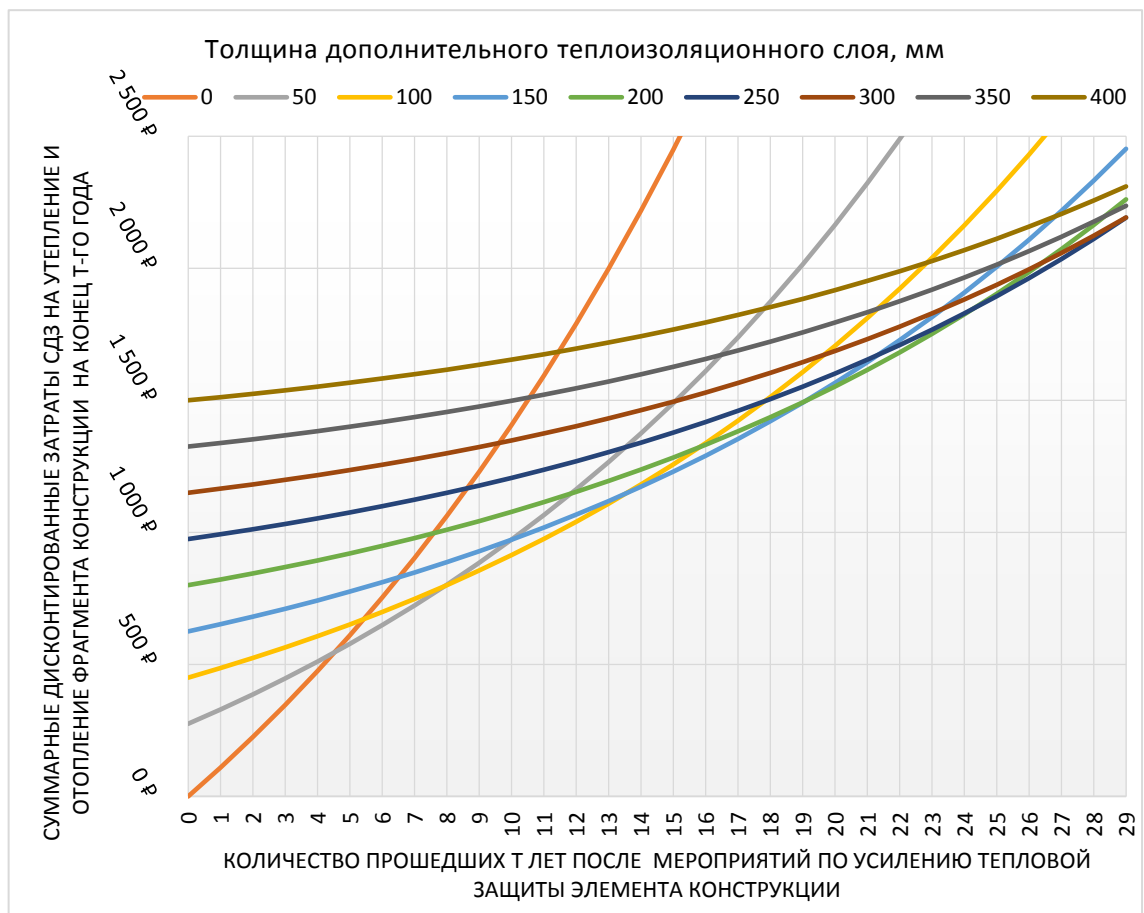


Рис. 5 – График зависимости СДЗ от года эксплуатации фрагмента внешней стены здания без устройства облицовочного слоя.

При сравнении двух графиков наблюдается, что затраты на облицовочный слой значительно отодвигают год, когда мероприятия по усилению тепловой защиты полностью окупаются за счёт энергосберегающего эффекта. Так, например, мероприятия по монтажу дополнительных 100 мм теплоизоляции с новой облицовкой окупаются за 9

лет, а при варианте без облицовки с такой же толщиной утеплителя в 100 мм за 5,5 лет.

3. Утепление бетонного цоколя как на рис. 6. Фундаментная стена из бетона обладает толщиной $s = 0,5$ м, теплопроводностью $\lambda_A = 1,74$ Вт/(м × °С), приведённое сопротивление теплопередаче фрагмента конструкции $R_0^{пр} = 0,28$ м² × °С/Вт. В качестве теплоизолирующего материала используется пенопласт ПСБ-25 с $C_{ти} = 2500$ руб/м³, $\lambda_A = 0,04$ Вт/(м × °С) с толщиной $s_{ти} = 0,05; 0,10; \dots; 0,40$ м, что с каждым шагом увеличивает приведённое сопротивление теплопередаче фрагмента конструкции на $R_{доп} = 1,25$ м² × °С/Вт. Также учитываются дополнительные затраты на обустройство штукатурного слоя с $K_2 = 300$ руб/м², независимо от толщины теплоизоляционного слоя. Сроки окупаемости в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя приведены на рис. 7.

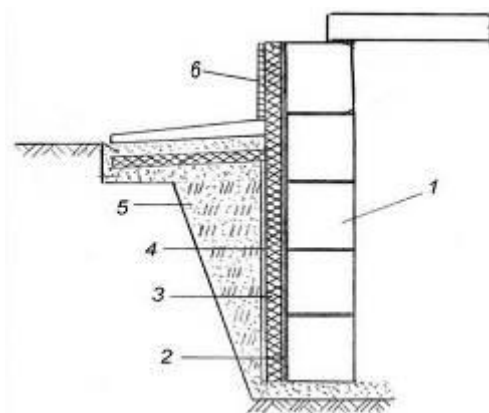


Рис. 6 – Принцип организации теплоизолирующего слоя на внешней поверхности ленточного фундамента. 1 – Тело фундамента, 2 – Клеевой состав, 3 – Теплоизоляция, 4 – Защитный слой, 5 – Обратная засыпка, 6 – Отделка цоколя.

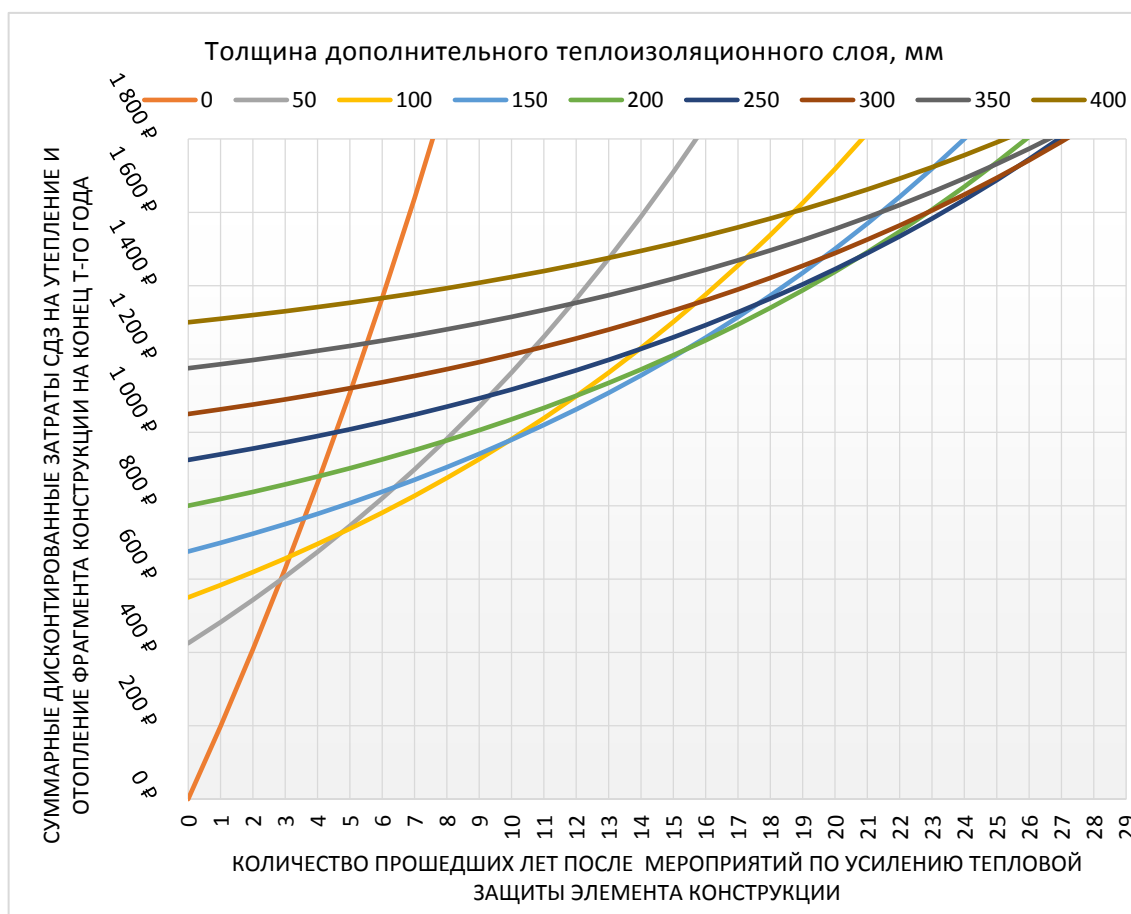


Рис. 7 – График зависимости СДЗ от года эксплуатации фрагмента выступающей над грунтом части фундамента.

Несмотря на наличие затрат в $K_2 = 300 \text{ руб/м}^2$ на устройство защитного штукатурного слоя, мероприятия по усилению тепловой защиты окупятся достаточно быстро, поскольку неутеплённая бетонная лента фундамента толщиной 500 мм обладает очень низким коэффициентом термического сопротивления.

Выводы: Первостепенно, в малоэтажных жилых домах, следует усиливать тепловую защиту чердачного перекрытия и подпольного пространства, поскольку при организации дополнительных теплоизоляционных слоёв не требуется демонтировать старую обшивку или откапывать грунт, как для фасадов или цоколя. Обычно новый теплоизоляционный слой возможно просто уложить поверх старого.

Следующий по эффективности вариант утепления – это наращивание теплоизоляционного слоя на цоколях. В большинстве старых домов цоколь утеплён завалинкой или насыпью из шлака или опилок, но такие конструкции фактически не выполняют свою функцию, поскольку теплоизолирующий материал насыщен влагой из грунта. Однако демонтаж старых завалинок и насыпей, а также рытьё грунта для заглубления теплоизоляции, затем обратная засыпка и послойное трамбование являются довольно трудоёмкими процессами.

Наименее эффективным способом (но не бесполезным) является утепление фасадов. Стены в старых деревянных домах являются элементом ограждающей конструкции с самым высоким коэффициентом термического сопротивления. Однако высокая стоимость облицовочных материалов значительно замедляют окупаемость мероприятий, поэтому к этому методу рационально обращаться при проведении косметического ремонта здания. Также возможно повторно использовать старую обшивку фасадов, тогда этот способ становится менее затратным и быстрее окупается.

В условиях нестабильной экономики мероприятия по усилению тепловой защиты ограждающих конструкций окупятся значительно быстрее из-за постоянного удорожания энергоресурсов от большой инфляции. Поэтому свободные денежные средства рационально инвестировать в энергосберегающие решения для здания, тем самым снизив затраты денежных средств на его отопление [8-10].

Литература

1. Халимов О. З. Исследование дефектов теплопотерь в индивидуальных жилых домах: отчёт о НИР. Абакан: ХТИ, 2020. 35 с.
 2. Ward T., Trost B., Conner J., Flanagan J., Jayanty R.K.M. Source Apportionment of PM_{2.5} in a Subarctic Airshed - Fairbanks, Alaska // Aerosol and Air Quality Research. №12. pp. 536–543.
-

3. Guariso G., Sangiorgio M. Integrating Economy, Energy, Air Pollution in Building Renovation Plans // IFAC-PapersOnLine. 2018. №. 5. С. 102-107.

4. Дерина М. А. Повышение тепловой эффективности малоэтажных гражданских зданий: диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.01. Пенза. 2016. 172 с.

5. Sesana M. M., Salvalai G. A review on Building Renovation Passport: Potentialities and barriers on current initiatives // Energy and Buildings. 2018. URL: doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.027.

6. Окунев А.Ю. Оптимизация утепления наружных стен на примере частных жилых домов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1. С. 126–139.

7. Крайнов Д. В. Относительное энергосбережение при изменении уровня тепловой защиты зданий // Жилищное строительство. 2016. № 7. С. 6-10.

8. Farahani A., Wallbaum H., Dalenbäck J. O. Optimized maintenance and renovation scheduling in multifamily buildings—a systematic approach based on condition state and life cycle cost of building components // Construction management and economics. 2019. №. 3. С. 139-155.

9. Farahani A., Wallbaum H., Dalenbäck J. O. The importance of life-cycle based planning in maintenance and energy renovation of multifamily buildings // Sustainable Cities and Society. 2019. URL: doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.033.

10. Bjerneboe M. G., Svendsen S., Heller A. Initiatives for the energy renovation of single-family houses in Denmark evaluated on the basis of barriers and motivators // Energy and Buildings. 2018. URL: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.065.

References

1. Halimov OZ Issledovanie defektov teplopoter' v individual'nyh zhilyh domah [Investigation of heat loss defects in individual houses]. Abakan: KhTI, 2020. 35 p.



2. Ward T., Trost B., Conner J., Flanagan J., Jayanty R.K.M. Aerosol and Air Quality Research. №. 12. pp. 536-543.
3. Guariso G., Sangiorgio M. IFAC-PapersOnLine. 2018. №. 5. pp. 102-107.
4. Derina M. A. Povyslenie teplovoj jeffektivnosti malojetazhnyh grazhdanskih zdaniy: dissertacija ... kandidata tehniceskikh nauk: 05.23.01 [Increasing the thermal efficiency of low-rise civil buildings: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.23.01]. Penza. 2016. 172 p.
5. Sesana M. M., Salvalai G. Energy and Buildings. 2018. URL: doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.027.
6. Okunев A.Yu. Vestnik of Tomsk state university of architecture and building. 2019. No. 1. pp. 126–139.
7. Krainov D.V. Zhilischnoe stroitel'stvo. 2016. №. 7. pp. 6-10.
8. Farahani A., Wallbaum H., Dalenbäck J. O. Construction management and economics. 2019. №. 3. pp.139-155.
9. Farahani A., Wallbaum H., Dalenbäck J. O. Sustainable Cities and Society. 2019. URL: doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.033.
10. Bjørneboe M. G., Svendsen S., Heller A. Energy and Buildings. 2018. URL: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.065.