

УДК 699.86

Технико-экономическое сравнение методов экономии энергии за счет утепления зданий

Кузьмин В. А., Шабанин Д.А., Цирлин А.М., Цыганков В.М., Ахременков Ан.А.

Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН
152021, Россия, Ярославская область, Переславский район, село Вельское, улица Петра I,
дом 4 «а», Тел./Факс: +7(48535)98-064 e-mail: psi@botik.ru

Ахременков Андрей Александрович (andrei@eco.botik.ru) (48535)98016

Изменение цен на энергоносители, развитие различных материалов для утепления и нормативное ужесточение к термическому сопротивлению привело к использованию многослойных ограждающих конструкций. В статье приведено технико-экономическое сравнение внутреннего и наружного утепления.

Внутреннее и внешнее утепление, влаgekонденсация, термическое сопротивление ограждающих конструкций

ВВЕДЕНИЕ

Изменение цен на энергоносители привело к повышению требований к термическому сопротивлению ограждающих конструкций. Норматив термического сопротивления увеличился в два – три раза. Здания, построенные 15 и более лет назад, требуют огромных затрат на отопление. Норма теплового сопротивления ограждения зданий до 1995 г. не превышала $R_{нр}=1\text{ м}^2\text{ С/Вт}$. В настоящее время $R_{нр}=3,13\text{ м}^2\text{ С/Вт}$. Чтобы обеспечить такое термическое сопротивление толщина ограждения из керамического кирпича должна составлять 1,75 м., а из силикатного 2,2 м. Для вновь строящихся зданий толщина стен, требуемая для достижения норматива по термическому сопротивлению, может достигать метра и более, если делать их однослойными из газобетонных блоков. Выход состоит в том, чтобы утеплять существующие ограждения дополнительной теплоизоляцией. Последняя может быть как наружной, так и внутренней.

Многослойные конструкции при том же коэффициенте теплопроводности могут вести себя по-разному в части влагопереноса в зависимости от теплопроводности отдельных слоев и их взаимного расположения. В неблагоприятном случае внутри таких конструкций возможна внутренняя конденсация влаги, что может приводить к разрушению ограждения.

В работе проведено технико-экономическое сравнение двух способов утепления зданий: наружного и внутреннего. Для каждого из них рассчитаны профили температуры и влажности по толщине ограждения, проанализирована возможность внутренней влажконденсации. Все цены, использованные для экономических расчетов, соответствуют текущим расценкам на материалы и работы по монтажу изоляции для условий России.

В первой части работы на качественном уровне рассказано о механизме тепло и влагопереноса в многослойных ограждениях. Вторая часть посвящена методам, характеристикам и экономическим показателям наружной, а третья – внутренней изоляции. В заключительной части проведено их сравнение.

МЕХАНИЗМ ТЕПЛО И ВЛАГОПЕРЕНОСА В МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДЕНИЯХ

Рассмотрим на качественном уровне механизм тепло и влагопереноса в однослойных и многослойных ограждениях (см. [1], [2]). Для краткости введем обозначения:

$t_{в}, t_{н}$ - температура воздуха в помещении и температура окружающего воздуха;

p_{+}, p_{0} - парциальные давления паров водяного пара в помещении и в окружающем воздухе. Они пропорциональны влажности (концентрации пара в воздухе в мольных долях). Перенос теплоты и влаги подчиняется уравнениям Онзагера

$$q = \lambda(t_{в} - t_{н}) + b_{qg}(p_{+} - p_{0}), \quad g = c_{qg}(t_{в} - t_{н}) + \mu(p_{+} - p_{0}). \quad (1)$$

Здесь λ и μ – коэффициенты тепло- и влагопроводности. Они обратны коэффициентам теплового сопротивления и влажсопротивления, b_{qg}

c_{qg} – коэффициенты взаимного влияния разности температур на поток влаги и разности давлений водяного пара на поток теплоты¹.

Все эти коэффициенты положительны, так что даже при равенстве температур по обеим сторонам ограждения влагоперенос сопровождается переносом теплоты. И

¹ Фактические, температуры на наружной и внутренней поверхности ограждения несколько отличаются от температур наружного и внутреннего воздуха за счет коэффициентов теплоотдачи, однако для качественного анализа далее мы этим отличием пренебрегаем.

обратно, если давление паров воды одинаково, влага движется через ограждение в ту сторону, где температура ниже (ограждение вымораживается)².

В условиях России температура и влажность в помещении обычно выше, чем температура и влажность на улице, поэтому за исключением случая теплой и сырой погоды влагоперенос направлен в сторону наружной части ограждения. Конденсация влаги внутри ограждения возникает, если температура в том или ином сечении достигла температуры конденсации, которая, в свою очередь, зависит от парциального давления водяного пара.

На рис. 1 показаны профили температуры и давления водяного пара в двухслойном ограждении, состоящем из газобетона и пенополистирола. Видно, что независимо от расположения слоев в слое пенополистирола возникает конденсация влаги.

Расчеты проводились для условий, указанных в Табл. 1.

Таблица 1. Граничные условия и характеристики слоев ограждения.

Граничные условия					
Параметры наружного воздуха			Параметры внутреннего воздуха		
Температура, $t_n, ^\circ\text{C}$	Коэф. теплоотдачи, $\alpha_n, (\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Парциал. давление водяного пара, $E, \text{Па}$	Температура, $t_b, ^\circ\text{C}$	Коэф. теплоотдачи, $\alpha_b, (\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Парциал. давление водяного пара, $E, \text{Па}$
-12	23	217	22	8,7	2664
Параметры слоев (при условиях эксплуатации Б)					
Название	Плотность, $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Толщина, $\delta, \text{мм}$	Коэф. теплопровод.,	Коэф. паропрониц.,	

²Мы записали уравнения Онзагера в упрощенной форме, заменив разность термических и химических потенциалов разностью температур и парциальных давлений. В этом случае коэффициенты взаимности не равны друг другу, но положительны.

			λ , Вт/(м ² °С)	μ , мг/(м ч Па)
Газобетон (стандарт СТО [1], прил.3, п.1.Г.75)	600	120	0,19	0,17
Пенополистирол	90	80	0,035	0,05

Ограждение может включать пленку из материала, не пропускающего паров воды (алюминиевая фольга, пергамин). Такая пленка практически не создает теплового сопротивления. Но профиль давления паров водяного пара становится ступенчатым. С каждой стороны такой пленки давление паров постоянно и равно давлению на соответствующей границе ограждения.

Так, если бы между слоями ограждения, для которого проведен расчет рис. 1, была проложена алюминиевая фольга, то на правом рисунке точка влаgekонденсации сместилась бы влево, а для расположения слоев, показанного на левом рисунке, ее бы не было.

На рис. 2а показан результат расчета многослойного ограждения без, а на рис. 2б со слоем пароизоляции (пергамина) после внутренней облицовки. Конденсации влаги во втором случае не происходит.

На качественном уровне: влаgekонденсация возникает, если высокая концентрация влаги оказывается в сечении с достаточно низкими температурами. Поэтому слои с низкой паропроницаемостью должны быть смещены в зону высоких температур.

Паронепроницаемая прослойка, расположенная в зоне высоких температур, предохраняет ограждение от влаgekонденсации.

Если ограждение включает воздушную прослойку, то она не представляет собой сопротивления влаgekпереносу, но имеет значительное тепловое сопротивление. Влагонепроницаемый слой следует использовать на «теплой» стороне воздушной прослойки.

Наружное утепление

В работах В.Г. Гагарина [3]-[5] дана методика оценки окупаемости затрат на утепление ограждений. Эта оценка основана на том естественном соображении, что для окупаемости затрат на любое техническое нововведение годовая экономия от него должна быть больше годовых выплат по кредиту, взятому в банке и потраченному на реализацию этого нововведения. Расчеты, проведенные в этих работах, показывают, что для ставки по банковским кредитам порядка 13%, и средней стоимости тепловой энергии 0,6 руб/Квт.ч. утепление ограждений от $R_{нр}=1 \text{ м}^2 \text{ С/Вт}$, нормируемых до 1995 г., до $R_{нр}=2 \text{ м}^2 \text{ С/Вт}$, нормируемых сейчас, (при применении коэффициента 0,67) для условий центра европейской части России окупается за счет сокращения тепловых потерь при затратах, не превышающих приблизительно 700 руб/м². Однако целью дополнительной изоляции может быть не только экономия тепла, но и улучшение внешнего вида и защиты фасадов здания, предотвращение сырости в холодных зонах жилых помещений, предотвращение влажконденсации в ограждении и др.

Методы наружного утепления зданий можно разделить на два типа:

- навесные фасадные системы с вентилируемой воздушной прослойкой;
- системы фасадные теплоизоляционные с наружной штукатуркой.

Первый тип фасадных систем состоит из слоя теплоизоляции (минераловатных плит), прикрепляемой к стене дюбелями, и облицовки, которая держится на специальных направляющих. Они в свою очередь крепятся к стене при помощи кронштейнов с анкерами. Между теплоизоляцией и облицовкой имеется воздушная прослойка, шириной не менее 4 см, которая имеет внизу и вверху отверстия, обеспечивающие движение воздуха. Облицовка может состоять из плит асбоцемента или композитных материалов. При отсутствии вентилируемой воздушной прослойки на внутренней поверхности облицовки неизбежна конденсация влаги.

У фасадных систем утепления второго типа плиты теплоизоляционного материала (из минеральной ваты или пенополистирола) приклеивают к стене, затем дополнительно закрепляют дюбелями. К поверхности утеплителя приклеивается с использованием специальной грунтовки стеклосетка, на которую наносится слой штукатурки. Оштукатуренную поверхность покрывают финишной отделкой.

Каждый из этих типов наружной теплоизоляции имеет свои преимущества и недостатки. Так, первый из них существенно дороже, его нельзя использовать применительно к отдельной квартире многоэтажного дома.

Второй тип утепления требует проведения работ в теплое время года, так как связан с оштукатуриванием стен. Кроме того, грунтовка, стеклосетка и штукатурка обладают плохой паропроницаемостью, что при низких температурах наружного воздуха может вызывать конденсацию влаги и отслоение покрытия. В условиях России этот тип изоляции чаще всего используют для утепления отдельных квартир, что не улучшает внешнего вида многоэтажных зданий. Долговечность такого утепления очень сильно зависит от квалификации рабочих и качества материалов, работы можно проводить только в теплое время года.

Стоимость систем наружного утепления

Стоимость наружного утепления существенно зависит не только от типа утепления и используемых материалов, но и от технического оснащения исполнителя работ, от этажности здания и пр. Поэтому приведенные ниже цифры очень приближенные.

При расчете термического сопротивления утеплителя нужно принимать во внимание дюбели и металлические конструкции, обладающие большой теплопроводностью. На рис. 3 приведены результаты расчета трехслойной конструкции с утеплителем, состоящей из газобетона, слоя полистирола и штукатурного покрытия. Толщины слоев пенобетона 330мм., пенополистирола 70 мм и штукатурки 10 мм. Относительная влажность наружного воздуха 30%. Влажность внутри помещения определяется при расчете для заданной температуры. Термическое сопротивление до утепления $R=0,53 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$, после утепления $R=1,94 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Добавочное термическое сопротивление за счет утепления $R=1,41 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

По данным фирмы «Хенкель Баутехник», производящей и монтирующей такое утепление, его стоимость составляет порядка 2400 руб/м², что, как показано в [5], в 3,5 раза выше порога окупаемости. Требования к штукатурному покрытию противоречивы. Покрытие высокой плотности, стойкое к механическим повреждениям, обладает плохой

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

паропроницаемостью, что может привести к внутренней конденсации. Покрытие меньшей плотности как правило менее прочное.

Для наружного утепления первого типа нет опасности влаgekонденсации, но его стоимость существенно выше. Так, стоимость только подконструкций крепления утеплителя и облицовки, для толщины утеплителя в 100 мм. составляет порядка 1200 руб/м², без учета стоимости самого утеплителя, монтажа фасада и пр.

На рис. 4 показаны результаты расчета ограждения с воздушной прослойкой толщиной 50 мм. Оно состоит из пенобетона 330мм., утеплителя из минеральной ваты 100мм., воздушной прослойки и асбоцементной облицовки 10мм. Термическое сопротивление ограждения $R=2,74 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/вт.}$

Если в целях повышения термического сопротивления ограничить конвекцию в воздушной прослойке, возможна конденсация влаги на ее внутренней поверхности, вентиляция воздушной прослойки исключает конденсацию влаги, но снижает термическое сопротивление до $R=2,44 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/вт.}$ Добавочное сопротивление за счет утепления $R=1,9 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/вт.}$ Полная стоимость утепленного фасада такого типа составляет порядка 3200 руб/м², что в 4,5 раза больше порога окупаемости.

Внутреннее утепление

Внутреннее утепление ограждающих конструкций связано с существенно меньшими расходами на материалы и в особенности на монтажные работы, оно не требует штукатурных работ и может проводиться в любое время года, оно не влияет на внешний вид здания и при правильной конструкции ограждения не ведет к появлению внутренней влаgekонденсации. Недостатком внутреннего утепления является уменьшение полезной площади теплоизолируемых помещений. Оценить эти затраты можно по формуле

$$Ц = c \frac{D}{h},$$

где c - стоимость одного м² площади помещения, D - толщина утепления, h - высота помещения.

Так, при общей толщине внутреннего утепления 60 мм, высоте потолков 3м, стоимости квадратного метра помещения 30000 руб. дополнительные затраты, связанные с потерей площади помещения, составят 600 руб/м². Однако в отличие от затрат на материалы и монтаж, эта часть затрат не требует взятия банковского кредита и возврата его с процентами.

Рассмотрим типовую конструкцию внутреннего утепления:

На наружную стену утепляемого помещения вертикально закрепляют профиль оцинкованный стеновой ПС 50X50 с шагом 600 мм. В межпрофильное пространство вкладывается пенополистирол толщиной 30 мм. На полистирол накладывают "Пенофол" (алюминиевая фольга, наклеенная на слой пенополистерола) толщиной 3-5 мм фольгой во внутрь помещения и вместе с полистиролом фиксируют полиэтиленовыми крепежными дюбелями к стене. Поверх полученной конструкции в межпрофильное пространство устанавливаются поперек (заподлицо с краем профиля по всей ширине) перемычки с расстоянием между ними приблизительно 0,8м. По металлопрофилю закрепляется листовая гипсокартон толщиной 12,5 мм. Таким образом между фольгой и гипсокартонном образуется воздушная прослойка толщиной 10 --20мм. (см. рис. 5).

Пенофол играет в этой конструкции тройную роль: утеплителя, создания паронепроницаемой пленки и отражательной изоляции, увеличивающей примерно в 10 раз сопротивление воздушной прослойки теплопереносу за счет инфракрасного излучения [6]. Горизонтально расположенные перегородки препятствуют конвекции воздуха внутри воздушной прослойки, что наряду с отражательной изоляцией существенно увеличивает ее термическое сопротивление ($R=3,11 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$).

При использовании внутренней теплоизоляции особое внимание следует уделять углам, образуемым ограждением с полом и потолком. Чтобы не образовалось «мостиков холода», плинтусы на полу и потолке должны быть укреплены изнутри утеплительной конструкции.

Общая толщина воздушной прослойки, пенофола и защитного материала составляет примерно 70 мм. Толщина утеплителя примерно 30 мм. Стоимость утепления вместе с монтажными работами составляет не более 400 руб/м². Добавочное термическое

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

сопротивление составляет приблизительно $R_{\text{ут}} = 2,58 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Работы могут проводиться в индивидуальном порядке и в любое время года.

На рис. 5 показано распределение температуры и давления паров воды в ограждении с внутренним утеплением.

Профиль парциальных давлений пара имеет ступенчатый вид. Так как паронепроницаемая пленка находится в зоне высоких температур, влага на ней не конденсируется, а давление влаги после слоя пенофола равно ее парциальному давлению вне помещения, и даже при стопроцентной влажности на улице стена остается сухой за счет сопряженного с теплопереносом переноса влаги. Стена увлажняется снаружи только при совпадении двух условий: наружная температура выше температуры в комнате и при этом влажность близка к 100%. Для России такое совпадение маловероятно.

Наличие паронепроницаемой пленки уменьшает и воздухопроницаемость ограждения, однако мало влияет на вентиляцию помещений, так как большая часть наружного воздуха попадает в помещение через окна. Кроме того, в настоящее время для вентиляции помещений созданы специальные автоматизируемые энергосберегающие устройства, включающие вентиляцию через регенеративный теплообменник при превышении в помещении порога относительной влажности.

Заключительные замечания

Одним из факторов, препятствующих использованию внутреннего утепления называют промерзание стены, способствующее ее разрушению. Отметим, что температура наружного слоя ограждения зависит от температуры окружающего воздуха. При наружном утеплении в зоне низких температур оказывается утеплитель, а при внутреннем – несущая стена. Опасность разрушения связана с возможностью конденсации влаги внутри ограждения. Если такой конденсации нет, то несущая стена без всякого вреда переносит отрицательные температуры. При внутреннем утеплении с использованием отражательной изоляции конденсация влаги заведомо отсутствует и опасности разрушения не сущей стены нет.

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

В том случае, когда стоимость и сроки проведения работ по утеплению существующих зданий являются решающим фактором, использование внутреннего утепления помещений целесообразно даже с учетом уменьшения их полезной площади. При этом теплоизоляция должна включать влагонепроницаемый слой, расположенный на «теплой» стороне ограждения.

Energy price rise, heating saving materials development and normative rising of heat resistance coefficient brings to using of multilayer enclosure. In paper considered technological and economic comparison of inner and outer heating.

Inner and outer heating, moisture condensation, enclosure's heat resistance coefficient.

Литература

1. Богуславский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.
2. Богуславский В.Н. Тепловой режим зданий. М.: Стройиздат, 1979. 247 с.
3. Гагарин В. Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2010. №3.
4. Гагарин В. Г. Об окупаемости затрат на повышение тепло-защиты ограждающих конструкций зданий // Новости теплоснабжения, 2002. № 1.
5. Гагарин В.Г. Санация теплозащитной оболочки при реконструкции жилых зданий в городах России // Реконструкция, энергетическая модернизация жилых зданий и тепловой инфраструктуры в Российской Федерации. Материалы Российско-немецкого технического семинара 8-9 декабря 2011. Москва. 2012. с. 23-51.
6. Ан.А. Ахременков, В.А. Кузьмин, А.М. Цирлин, В.М. ЦЫГАНКОВ
Энергетическая эффективность покрытия внутренней поверхности помещений отражательной теплоизоляцией. Строительные материалы №12, Декабрь 2013г. Стр. 65-68
1. Bogoslavskiy V.N. Building thermal physics. M.: Visshaya shkola, 1982. 415 с.
2. Bogoslavskiy V.N. Build's heating rate. M.: Stroyizdat, 1979. 247 с.
3. Gagarin V.G. Macroeconomic aspects of the study of energy saving measures by increasing the thermal protection of building envelopes // Stroitelnie materiali. 2010. №3.

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

4. Gagarin V.G. About payback to increase thermal protection of building envelopes // Novosti teplosnabzheniya, 2002. № 1.

5. Gagarin V.G. Remediation heatproof shell during reconstruction of residential buildings in Russian cities // Reconstruction, modernization of residential buildings energy and thermal infrastructure in the Russian Federation

. Materiali Rossiysko-nemeckogo tehnikeskogo seminaru 8-9 December 2011. Moskva. 2012. с. 23-51.

6. An.A. Akhremenkov, V.A. Kuzmin, A.M. Tsirlin, V.M. Cigankov
Energy Efficiency Improvement inner surface reflective insulation. Stroitelnie materialy №12, Декабрь 2013г. Стр. 65-68

Кузьмин Василий Александрович

Kuzmin Vasiliy Aleksandrovich

lte@lit.botik.ru

ИПС РАН, инженер-программист, аспирант

Шабанин Дмитрий Алексеевич

Shabanin Dmitriy Alekseevich

kw1k92@yandex.ru

ЗАО «Завод «ЛИТ»

Цыганков Владимир Михайлович

Cigankov Vladimir Mihaylovich

tsvladimir@lit.botik.ru

ЗАО «Завод «ЛИТ», заместитель генерального директора по инновациям

Цирлин Анатолий Михайлович

Tsirlin Anatoliy Mihaylovich

tsirlin@sarc.botik.ru

ИПС РАН, заместитель директора, д.т.н., профессор

Ахременков Андрей Александрович

Akhremenkov Andrei Aleksandrovich

Andrei@eco.botik.ru

(903) 829 26 01

ИПС РАН, с.н.с., к.т.н

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

Институт Программных Систем им. А.К. Айламазяна РАН
152021, Россия, Ярославская область, Переславский район, село Веськово, улица Петра I,
дом 4 «а», Тел./Факс: +7(48535)98-064 e-mail: psi@botik.ru

Закрытое акционерное общество «Завод «ЛИТ»
152020, Россия, Ярославская обл., г.Переславль - Залесский, ул. Советская, д.1
Телефон +7 (48535) 3-06-50
Факс +7 (48535) 3-22-66
Электронная почта lit@lit.botik.ru