

Д. А. Шабанин, В. А. Кузьмин

## Математическое и компьютерное моделирование температурного и влажностного режима ограждений в строительстве

Научный руководитель: д.т.н. А. М. Цирлин

Аннотация. В данной статье ставится задача по исследованию влияния на форму профилей влажности и температуры в ограждениях строительных конструкций взаимного влияния потоков тепло и массопереноса и предложена методика эксперимента, который позволяет это взаимное влияние оценить.

*Ключевые слова и фразы:* массоперенос, влагоперенос, температура.

### Введение

#### **Влияние на форму профилей температуры и влажности в ограждениях строительных конструкций коэффициентов взаимности**

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 силикатного кирпича должна составлять 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 влагопроводности 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 влагоненсации. 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.

## 1. Уравнения тепло и массопереноса

Введем следующие обозначения (рис. 1)

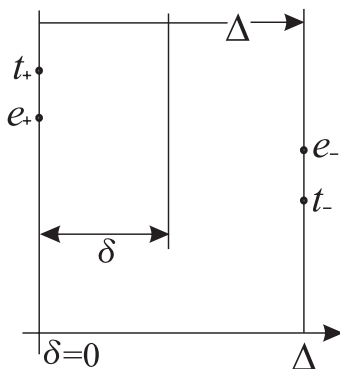


Рис. 1. Изменение температуры и давления водяного пара в двухслойном ограждении

$t_+, t(\delta), t_-$  — температуры внутри помещения, в сечении  $\delta$  ограждающей конструкции и снаружи;

$e_+, e(\delta), e_-$  — парциальные давления водяного пара, внутри, в сечении  $\delta$  и снаружи;

$q, g$  — потоки теплоты и влаги;

$R_\lambda(\delta)$  — термическое сопротивление ограждающей конструкции;

$R_\mu(\delta)$  — сопротивление влагонепроводности ограждающей конструкции;

$\alpha_\lambda(\delta), \alpha_\mu(\delta)$  — коэффициенты взаимного влияния разности парциальных давлений пара на поток теплоты и разности температур на поток влаги;

$R_{\alpha_\lambda}(\delta), R_{\alpha_\mu}(\delta)$  - сопротивления, обратные этим коэффициентам.

Для простоты записи, будем предполагать, что сопротивления теплоотдачи от внутреннего и наружного воздуха к поверхности ограждения столь малы, что температуры поверхности равны температурам  $t_+$  и  $t_-$ , которые считаем заданными. Учет коэффициентов теплоотдачи не представляет никакого труда.

Для многослойного ограждения перечисленные выше сопротивления представляют собой кусочно-линейные монотонно возрастающие функции, наклоны которых равны удельным сопротивлениям  $R^0$ , отнесенным к единице толщины материала. Для однослойной конструкции  $R_\lambda(\delta) = \delta R_\lambda^0(\delta)$ , как и остальные сопротивления.

### 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

$$q = \lambda(t_в - t_н) + b_{qg}(p_+ - p_0)g = c_{qg}(t_в - t_н) + \mu(p_+ - p_0). \quad (1)$$

$\lambda, \mu$  — коэффициенты тепло-влажнотеплопроводности.

ТАБЛИЦА 1. Граничные условия и характеристики слоев ограждения

Граничные условия					
Параметры наружного воздуха			Параметры внутреннего воздуха		
Температура $t_H, \text{ }^\circ\text{C}$	Кэфф. теплоот. $\alpha_H, (\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Парциал. давление водяного пара, $E, \text{ Па}$	Температура, $t_B, \text{ }^\circ\text{C}$	Кэфф. теплоотдачи $\alpha, (\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Парциал. давление водяного пара $E, \text{ Па}$
-12	23	217	22	8,7	2664

Они обратны коэффициентам теплового сопротивления и влагосопротивления,  $b_{qg}$  и  $c_{qg}$  – коэффициенты взаимного влияния разности температур на поток влаги и разности давлений водяного пара на поток теплоты <sup>1</sup>.

Все эти коэффициенты положительны, так что даже при равенстве температур по обеим сторонам ограждения влагоперенос сопровождается переносом теплоты. И наоборот, если давление паров воды одинаково, влага движется через ограждение в ту сторону, где температура ниже (ограждение вымораживается) <sup>2</sup>.

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. 2 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.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Уравнение 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.

Параметры слоев(при условиях эксплуатации Б)				
Название	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Толщина $\delta$ , мм	Кэфф. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> )	Кэфф. Паропрониц. $\mu$ , 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

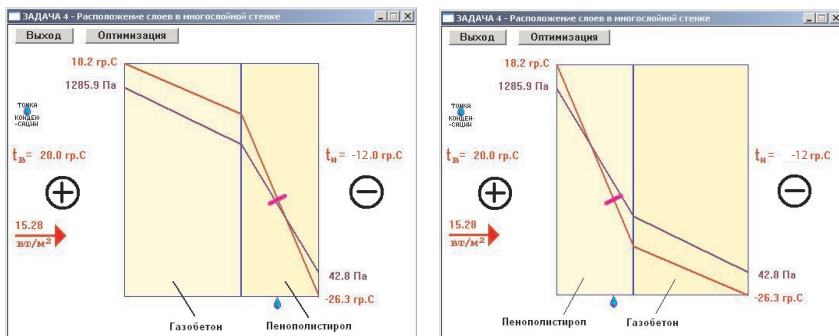


Рис. 2. Изменение температуры и давления водяного пара в двухслойном ограждении

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. 2, была проложена алюминиевая фольга, то на правом рисунке точка влагоконденсации сместилась бы влево, а для расположения слоев, показанного на левом рисунке, ее бы не было.

На рис. 3а показан результат расчета многослойного ограждения без, а на рис. 3б со слоем пароизоляции (пергамина) после внутренней облицовки. Конденсации влаги во втором случае не происходит.

На качественном уровне: влагоконденсация возникает, если высокая концентрация влаги оказывается в сечении с достаточно низкими

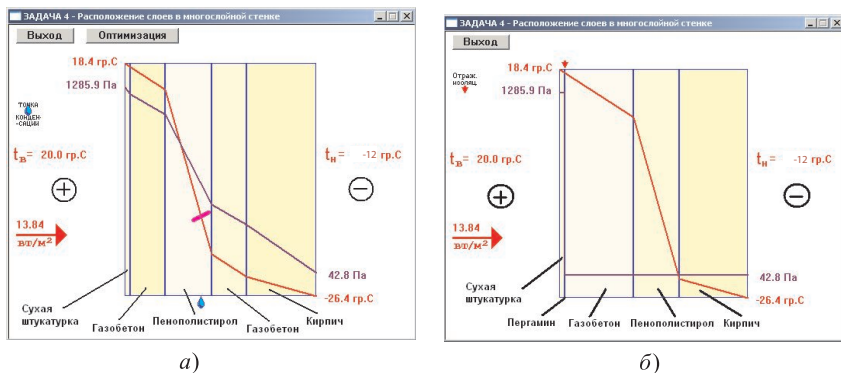


Рис. 3. Ограждающая конструкция без и со слоем пароизоляции после слоя внутренней облицовки

температурами. Поэтому слои с низкой паропроницаемостью должны быть смещены в зону высоких температур.

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

Если ограждение включает воздушную прослойку, то она не представляет собой сопротивления влагопереносу, 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/м<sup>2</sup>. 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 влаgekонденсации 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 стеклосетки, 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. 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.

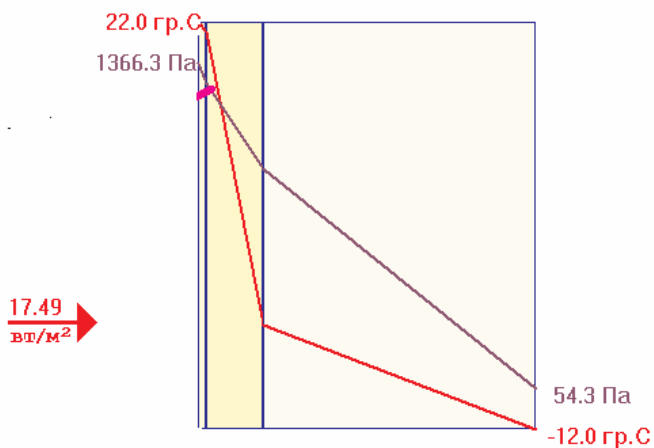


Рис. 4. Профили температуры и давления водяного пара в трехслойном ограждении со штукатурным покрытием

При расчете термического сопротивления утеплителя нужно принимать во внимание дубели и металлические конструкции, обладающие большой теплопроводностью. На рис. 4 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

$R = 0,53 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ , после утепления  $R = 1,94 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ . Добавочное термическое сопротивление за счет утепления  $R = 1,41 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ .

По данным фирмы “Хенкель Баутехник”, производящей и монтирующей такое утепление, его стоимость составляет порядка 2400 руб/м<sup>2</sup>, 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 паропроницаемостью, что может привести к внутренней конденсации. Покрытие меньшей плотности как правило менее прочное.

Для наружного утепления первого типа нет опасности влагоненасыщения, но его стоимость существенно выше. Так, стоимость только под конструкций крепления утеплителя и облицовки, для толщины утеплителя в 100 мм составляет порядка 1200 руб/м<sup>2</sup>, без учета стоимости самого утеплителя, монтажа фасада и пр.

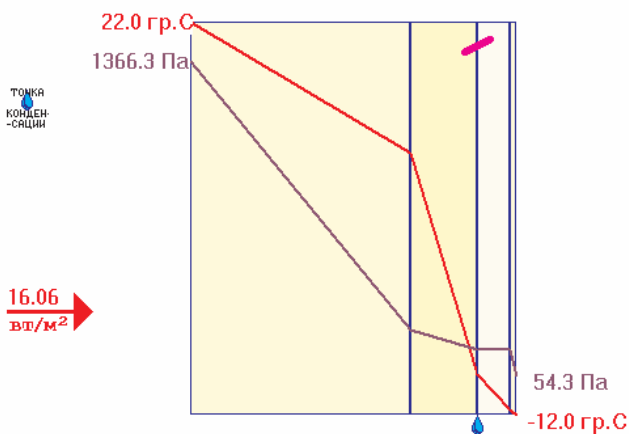


Рис. 5. Профили температуры и давления водяного пара в четырехслойном ограждении с воздушной прослойкой

На рис. 5 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  $R = 2,74 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$ .

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  $R = 2,44 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$ . Добавочное сопротивление за счет утепления  $R = 1,9 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$ . Полная стоимость утепленного фасада такого типа составляет порядка 3200 руб/м<sup>2</sup>, 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 влагоненасыщенности. Недостатком внутреннего утепления является уменьшение полезной площади теплоизолируемых помещений.

Оценить эти затраты можно по формуле

$$Ц = c \frac{D}{h},$$

где  $c$  - стоимость одного м<sup>2</sup> 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/м<sup>2</sup>. 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 50Х50 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 пенополиэтиленом фиксируются 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 листовой гипсокартон толщиной 12,5 мм. Таким образом между фольгой и гипсокартонном образуется воздушная прослойка толщиной 10-20мм. (см. рис. 6).

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. Горизонтально расположенные перегородки препятствуют конвекции воздуха внутри воздушной прослойки, что наряду с отражательной изоляцией существенно увеличивает ее термическое сопротивление ( $R = 3,11 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ ).

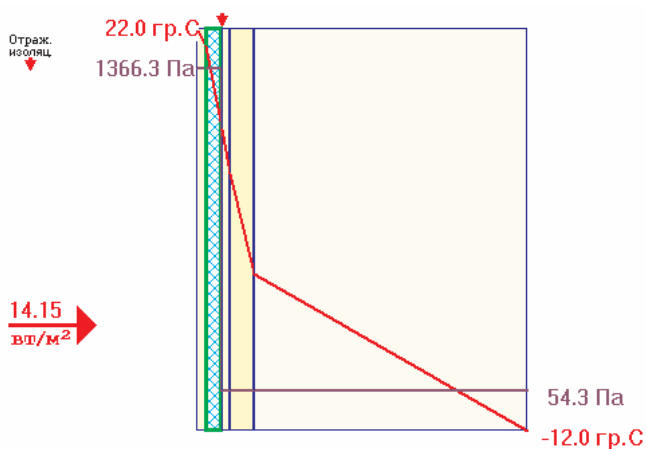


Рис. 6. Профили температуры и влажности при использовании внутреннего утепления с воздушной прослойкой и отражающей изоляцией.

При использовании внутренней теплоизоляции особое внимание следует уделять углам, образуемым ограждением с полом и потолком.

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

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 несущей стены нет.

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.

$$(1) \quad q = \frac{1}{R_{\lambda}(\Delta)}(t_{+} - t_{-}) + \frac{1}{R_{\alpha\lambda}(\Delta)}(e_{+} - e_{-}),$$

$$(2) \quad g = \frac{1}{R_{\alpha\mu}(\Delta)}(t_{+} - t_{-}) + \frac{1}{R_{\mu}(\Delta)}(e_{+} - e_{-}),$$

Здесь  $\Delta$  – полная толщина конструкции.

## 2. Расчет профилей температуры и влажности $t(\delta)$ и $e(\delta)$

Для  $t(\delta)$  и  $e(\delta)$  из (1), (2) получим приведенную ниже систему уравнений, введя обозначения

$$t_{+} - t(\delta) = \Delta t(\delta), \quad e_{+} - e(\delta) = \Delta e(\delta),$$

$$(3) \quad q = \frac{1}{R_{\alpha\lambda}(\delta)}\Delta e(\delta) + \frac{1}{R_{\lambda}(\delta)}\Delta t(\delta),$$

$$(4) \quad g = \frac{1}{R_{\alpha\mu}(\delta)}\Delta t(\delta) + \frac{1}{R_{\mu}(\delta)}\Delta e(\delta).$$

Чтобы найти из этих уравнений  $\Delta e$  и  $\Delta t$ , умножим (3) на  $\frac{1}{R_{\mu}(\delta)}$ , а (4) на  $\frac{1}{R_{\alpha\lambda}}$  и вычтем друг из друга (аргумент  $\delta$  опускаем)

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\mu}}q &= \frac{1}{R_{\alpha\lambda}R_{\mu}}\Delta e + \frac{1}{R_{\lambda}R_{\mu}}\Delta t, \\ \frac{1}{R_{\alpha\lambda}}g &= \frac{1}{R_{\alpha\mu}R_{\alpha\lambda}}\Delta t + \frac{1}{R_{\alpha\lambda}R_{\mu}}\Delta e. \end{aligned}$$

Получим

$$\Delta t \left( \frac{1}{R_{\lambda}R_{\mu}} - \frac{1}{R_{\alpha\mu}R_{\alpha\lambda}} \right) = \frac{1}{R_{\mu}}q - \frac{1}{R_{\alpha\lambda}}g.$$

Или

$$(5) \quad t(\delta) = t_+ - \left( \frac{q}{R_\mu(\delta)} - \frac{g}{R_{\alpha\lambda}(\delta)} \right) \frac{R_{\alpha\lambda}(\delta)R_{\alpha\mu}(\delta)R_\lambda(\delta)R_\mu(\delta)}{R_{\alpha\lambda}(\delta)R_{\alpha\mu}(\delta) - R_\lambda(\delta)R_\mu(\delta)}.$$

Аналогичные выкладки приводят к тому, что

$$(6) \quad e(\delta) = \epsilon_+ - \left( \frac{g}{R_\lambda(\delta)} - \frac{q}{R_{\alpha\mu}(\delta)} \right) \frac{R_{\alpha\lambda}(\delta)R_{\alpha\mu}(\delta)R_\lambda(\delta)R_\mu(\delta)}{R_{\alpha\lambda}(\delta)R_{\alpha\mu}(\delta) - R_\lambda(\delta)R_\mu(\delta)}.$$

При отсутствии взаимного влияния потоков  $R_{\alpha\lambda}(\delta), R_{\alpha\mu}(\delta) \rightarrow \infty$  и выражения (5), (6) переходят в известные формулы, по которым в настоящее время производят расчет профилей температуры и влажности

$$(7) \quad t^0(\delta) = t_+ - qR_\lambda(\delta),$$

$$(8) \quad e^0(\delta) = \epsilon_+ - gR_\mu(\delta).$$

### 3. Вид профилей влажности и температуры с учетом и без учета взаимного влияния тепло- и влагопереноса

Ясно, что для однослойного ограждения, когда все сопротивления в формулах (5) и (6) пропорциональны  $\delta$ , зависимости  $t(\delta)$  и  $e(\delta)$  линейны, а значит при фиксированных температурах и парциальных давлениях на границах совпадают с профилями, найденными по формулам (7) и (8) (при этом снизятся потоки). Для многослойного ограждения влияние переноса теплоты на влагоперенос и обратно изменяет и форму профиля, что позволяет по результатам измерений оценить величины коэффициентов взаимности. Особенно простые расчетные соотношения получаются в том случае, когда один из слоев не проводит влаги, но хорошо проводит теплоту. Таким материалом является, например, алюминиевая фольга.

При наличии фольги поток влаги равен нулю. Если пренебречь взаимным влиянием потоков, то профиль парциальных давлений имеет скачкообразный характер, при учете взаимного влияния профиль влажности до и после слоя фольги таков, что изменение влажности компенсирует влияние теплового потока. Так что перед слоем фольги влажность выше, а за этим слоем она ниже, чем на границе ограждения.

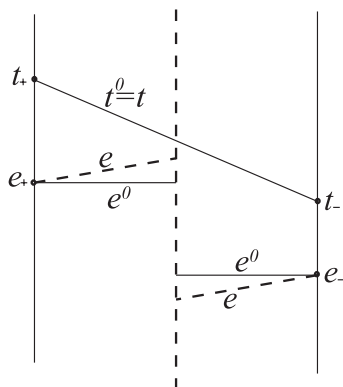


Рис. 7. Профили температуры и влажности с учетом  $(t, e)$  и без учета взаимности  $(t^0, e^0)$ .

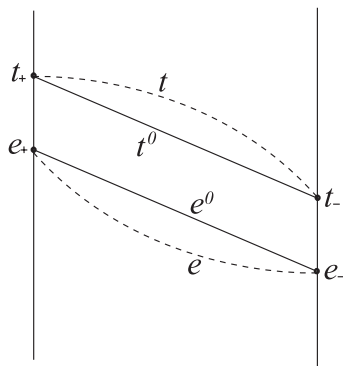


Рис. 8. Изменение температурного профиля с учетом коэф. взаимности в ограждающих конструкциях без пароизоляционного слоя.

### 3.1. Экспериментальное определение значений $R_{\alpha\mu}, R_{\alpha\lambda}$

Для определения значений коэффициентов взаимности  $R_{\alpha\mu}, R_{\alpha\lambda}$  проведем два эксперимента, с однослойным материалом, оклеенным в первом эксперименте с одной (для определенности с теплой) стороны фольгой, а во втором без фольги. Через  $i$  обозначим номер эксперимента. Будем измерять

разницу температур на границах конструкции  $\Delta t = t_+ - t_-$ , поток теплоты  $q_i$  и во втором эксперименте разность парциальных давлений  $\Delta e_2 = e_+ - e_-$ . Сопротивления теплопроводности и влагопроводности считаем известными.

Уравнения (1), (2) примут вид

$$(9) \quad q_i = \frac{1}{R_\lambda}(t_+ - t_-) + \frac{1}{R_{\alpha\lambda}}\Delta e_i,$$

$$(10) \quad g_i = \frac{1}{R_{\alpha\mu}}(t_+ - t_-) + \frac{1}{R_\mu}\Delta e_i, \quad i = 1; 2.$$

При этом в первом эксперименте  $\Delta e_1$  равна разности парциального давления позади пленки  $e_0$  и парциального давления  $e_-$ . Эта разность меньше нуля. Так как  $e_0$  трудно измерить, исключим  $\Delta e_1$  из расчетных соотношений.

В первом эксперименте поток влаги  $g_1$  будет равен нулю. Уравнение (2) примет следующий вид

$$(11) \quad 0 = \frac{\Delta t}{R_{\alpha\mu}} + \frac{\Delta e_1}{R_\mu}.$$

Исключим  $\Delta e_1$ , подставим полученное выражение в (9) и найдем значение  $R_{\alpha\mu}R_{\alpha\lambda}$ .

$$(12) \quad R_{\alpha\mu}R_{\alpha\lambda} = R_\mu \left( \frac{1}{R_\lambda} - \frac{q_1}{\Delta t} \right)^{-1}.$$

Во втором эксперименте для измеренных значений  $q_2, \Delta t, \Delta e_2$  выразим  $R_{\alpha\lambda}$  из выражения (9) и найдем его значение

$$(13) \quad R_{\alpha\lambda} = \Delta e_2 \left( q_2 - \frac{\Delta t}{R_\lambda} \right)^{-1}.$$

Найдем  $R_{\alpha\mu}$  из (12)

$$(14) \quad R_{\alpha\mu} = \frac{R_\mu}{\Delta e_2} \left( q_2 - \frac{\Delta t}{R_\lambda} \right) \left( \frac{1}{R_\lambda} - \frac{q_1}{\Delta t} \right)^{-1}.$$



## Список литературы

- [1] Богуславский В.Н. Строительная теплофизика. Москва, 1982. — 415 с. ↑
- [2] Богуславский В.Н. Тепловой режим зданий. Москва : Стройиздат, 1979. — 247с с. ↑
- [3] Гагарин В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий : Строительные материалы Строительные материалы. №3, 2010. ↑
- [4] Гагарин В.Г. *Об окупаемости затрат на повышение тепло-защиты ограждающих конструкций зданий* : Новости тепло-снабжения. № 1., 2002 ↑
- [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 декабря 2011. Москва. 2012, с. 23-51 ↑
- [6] Андреев Д.А., Могутов В.А., Цирлин А.М. Выбор расположения слоев ограждающей конструкции с учетом предотвращения внутренней конденсации. : Строительные материалы, №12., 2001. ↑

### Сведения об авторах:

*Василий Александрович Кузьмин* – Ведущий инженер по инновациям ЗАО «Завод «ЛИТ» E-mail: kuba@kuba.pereslavl.ru

*Шабанин Дмитрий Андреевич* – студент УГП имени А.К.Айламазяна, 5И91 E-mail: kw1k92@yandex.ru

УГП имени А.К.Айламазяна, 5И91

Завод ЛИТ, ОТДЕЛ ИННОВАЦИЙ

D. A. Shabanin, V. A. Kuzmin. *Mathematical and computer modeling of a temperature and moist mode of protections in construction* // Proceedings of Junior research and development conference of Ailamazyan Pereslavl university. — Pereslavl, 2014. — p. . (in Russian).

ABSTRACT. This article seeks to isledovaniyu influence on the shape of the profiles of humidity and temperature in enclosures constructions mutual influence of heat and mass flows and proposed experimental technique that allows it to evaluate the mutual influence.

*Key Words and Phrases:* mass transfer, water transfer, the temperature.