

Расчет дополнительных тепловпотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса)

Аспирант Д.В. Крайнов*;
заведующий лабораторией «Строительная физика» И.Ш. Сафин,
ФГОУ ВПО Казанский Государственный Архитектурно-Строительный Университет (КазГАСУ);
инженер технической поддержки А.С. Любимцев,
ПК «ТОР»

В целях снижения потерь теплоты здания и удовлетворения требований нормативных документов [1, 2] в последние годы в строительстве широко применяются многослойные ограждающие конструкции, в том числе с размещением внутри конструкции слоя тепловой изоляции. Под влиянием экономических соображений одним из основных типов ограждающих конструкций зданий стала кладка из ячеистобетонных блоков, облицованная кирпичом, с эффективным утеплителем между слоями.

В виду модернизации существующих типов ограждающих конструкций и появления большого числа новых, встал вопрос корректного определения теплофизических свойств (главным образом теплозащиты) таких конструкций [3].

Ограждающие конструкции современных зданий, по причине определенных конструктивных особенностей, могут содержать внутри себя и/или на поверхности различные элементы, теплопроводность которых больше теплопроводности основных слоев. Также это могут быть элементы, усложняющие геометрию поверхности ограждающих конструкций (различные выступы и оребрения). Такие элементы называют теплопроводными включениями. К ним можно отнести:

- горизонтальный узел опирания перекрытия;
- вертикальное примыкание внутренних перегородок;
- внутренние и наружные оконные откосы (здесь же оконные перемычки);
- конструктивное решение «четвертей»;
- узел сопряжения стены с балконной плитой;
- узел сопряжения стены с ограждением лоджии;
- перевязка кладок, армирование и обычные растворные швы;
- вертикальные кладочные швы в стене из ячеистобетонных блоков;
- дюбели, крепящие утеплитель;
- кронштейны системы навесного фасада;
- ребра жесткости в трехслойных панелях;
- выступы и оребрения на поверхностях и др.

Основной особенностью теплопроводных включений является появление дополнительных потоков теплоты, проходящих через них. Эти дополнительные потоки приводят к увеличению тепловпотерь и снижению уровня теплозащиты здания.

Расчетами определяется основная теплофизическая характеристика ограждающей конструкции – приведенное сопротивление теплопередаче.

Для однородной многослойной строительной конструкции, в которой отсутствуют теплопроводные включения и слои которой расположены перпендикулярно направлению потока теплоты через конструкцию, сопротивление теплопередаче R_0 вычисляется по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (1)$$

где α_e – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°С);

α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С);

δ_i – толщина i-го материала, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности i-го материала, Вт/м·°С.

Приведенная выше формула справедлива для однородных конструкций. В реальных же конструкциях современных наружных ограждений сложно выделить однородную площадь, в пределах которой обеспечивалась бы одномерность температурного поля. И сопротивление теплопередаче, рассчитанное по формуле (1), характеризует скорее некую несуществующую конструкцию. Его ещё называют условным

Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных тепловпотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса)

сопротивлением теплопередаче ограждающей конструкции [4] ($R_0 \equiv R_0^{уст}$). Эту величину можно использовать в методических целях, но как характеристика теплозащиты она непригодна. В связи с этим, для определения теплозащиты ограждающей конструкции следует непосредственно рассчитывать **приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции** [4]¹. Оно определяется по формуле:

$$R_0^{np} = \frac{t_a - t_n}{q + \sum_i q_{\text{доп},i}}, \quad (2)$$

где t_a , t_n – температуры соответственно внутреннего и наружного воздуха, принятые для расчетов, °С;

q – плотность теплового потока по глади конструкции (через условную конструкцию), Вт/м²;

$q_{\text{доп},i}$ – дополнительная плотность теплового потока, обусловленная i -м теплопроводным включением, Вт/м².

$$q = \frac{Q}{F}, \quad q_{\text{доп},i} = \frac{Q_{\text{доп},i}}{F}, \quad (3)$$

где Q – мощность потока теплоты по глади конструкции (через условную конструкцию), Вт;

$Q_{\text{доп},i}$ – дополнительная мощность потока теплоты, обусловленная i -м теплопроводным включением, Вт;

F – площадь фрагмента ограждающей конструкции, м².

Фрагментом ограждающей конструкции может являться, например, фасад здания.

Величины q и $q_{\text{доп},i}$ являются удобными с точки зрения сравнения вклада различных теплопроводных включений. Они характеризуют теплотери с 1 м² конструкции, обусловленные соответствующим теплопроводным включением. Поэтому они могут называться удельными теплотериями, соответственно, по глади конструкции и дополнительными [4].

Дополнительные мощности потоков теплоты через каждое теплопроводное включение определяются с помощью расчета температурных полей (ТП).

В связи с этим рассмотрим на небольшом примере последовательность расчетов дополнительной плотности теплового потока, обусловленной теплопроводным включением (эта последовательность сложилась после изучения материалов [4, 5, 6]). Расчет температурных полей будем производить с использованием программы ELCUT [7].

В качестве теплопроводного включения выбран узел оконного откоса. Рассмотрим два варианта его исполнения:

- 1) для стандартной кирпичной стены;
- 2) для конструкции стены, состоящей из слоя ячеистобетонных блоков, слоя эффективного утеплителя и облицовочного кирпича.

Расчет температурных полей

Схемы расчетных узлов представлены на рис. 1.

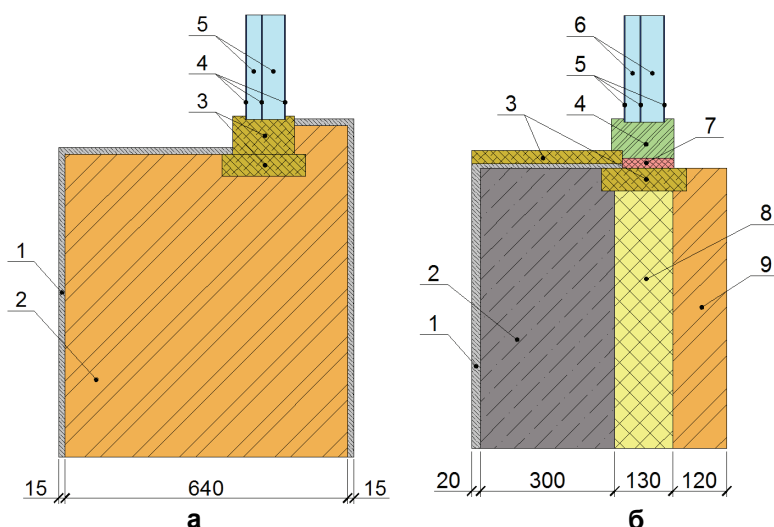


Рисунок 1. Схема расчетных узлов

а – 1 вариант исполнения (1 – штукатурка; 2 – кладка из керамического кирпича; 3 – дерево (сосна поперек волокон); 4 – стекло оконное; 5 – воздушная прослойка);

б – 2 вариант исполнения (1 – штукатурка; 2 – газобетон; 3 – дерево (сосна поперек волокон); 4 – утепленная оконная коробка; 5 – стекло оконное; 6 – воздушная прослойка; 7 – монтажная пена; 8 – изоляция Rockwool FASAD BATTS; 9 – облицовочный кирпич)

¹ в [4] даны определения (дефиниции) основных характеристик теплозащиты.

Расчетные характеристики материалов стеновых конструкций приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные характеристики материалов стеновых конструкций, принятые для расчетов

№ поз.	Слой, материал	Толщина слоя, м	Плотность материала, кг/м ³	Расчетный коэффициент теплопроводности*, Вт/(м·°C)
Однослойная кирпичная стена (рис. 1а)				
1	Штукатурка (цементно-песчаный раствор)	0.015	1800	0.93
2	Кладка из керамического кирпича	0.64	1800	0.81
3	Дерево (сосна поперек волокон)	-	500	0.18
4	Стекло оконное	-	2500	0.76
Многослойная современная конструкция (рис. 1б)				
1	Штукатурка (цементно-песчаный раствор)	-	1800	0.93
2	Газобетон	0.3	400	0.15
3	Дерево (сосна поперек волокон)	-	500	0.18
4	Утепленная оконная коробка	0.14	-	0.08
5	Стекло оконное	-	2500	0.76
7	Монтажная пена (пенополиуретан)	-	80	0.05
8	Изоляция Rockwool FASAD BATTS	0.13	145	0.048
9	Облицовочный кирпич	0.12	1800	0.81

Примечание: для условий эксплуатации Б.

Для выполнения расчета температурных полей в расчетной программе выполняем следующее:

- 1) создаем геометрию узлов;
- 2) создаем и назначаем материалы для блоков;
- 3) задаемся граничными условиями. В данном случае это будут граничные условия второго рода:
 - а) температуры окружающего воздуха: $t_в = 20^\circ\text{C}$ и $t_н = -32^\circ\text{C}$;
 - б) коэффициенты теплоотдачи соответственно внутренней поверхности:
 - для стены $\alpha_{в\text{ стeны}} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 - для окна $\alpha_{в\text{ окна}} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 - для наружной поверхности: $\alpha_н = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- 4) далее выполняется расчет температурных полей.

На рис. 2 и 3 представлены температурные поля узла оконного откоса, выполненного соответственно по вариантам 1 и 2.

Методика обработки результатов расчета температурных полей и определения дополнительной плотности теплового потока

После выполнения расчета температурных полей переходим к обработке результатов расчета и определению дополнительной плотности теплового потока в следующей последовательности:

1. Определяется условное сопротивление теплопередачи ограждающей конструкции по формуле (1).
2. Определяется температура на внутренней поверхности по глади стены (вдали от оконного откоса), $\tau_{вн}$, по формуле:

$$\tau_{вн} = t_в - (t_в - t_н) \frac{R_в}{R_0^{усл}}, \quad (4)$$

где $R_в$ – сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, рассчитанное по формуле:

$$R_в = \frac{1}{\alpha_в} \quad (5)$$

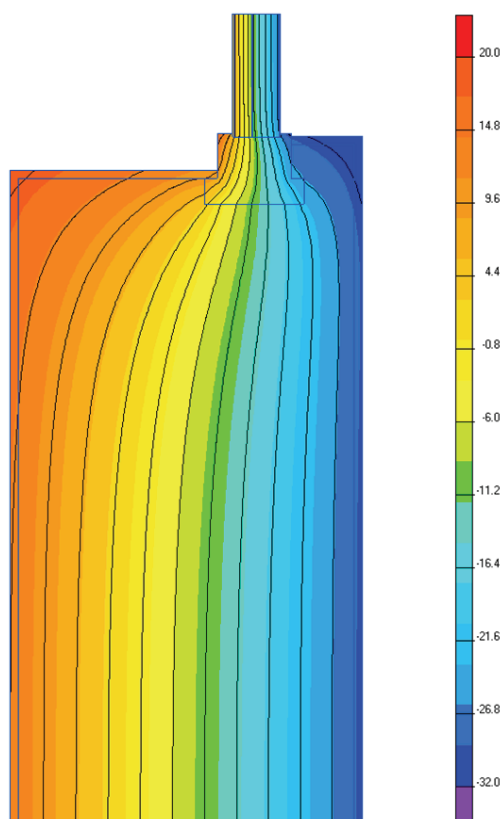


Рисунок 2. Температурные поля узла оконного откоса. 1 вариант исполнения

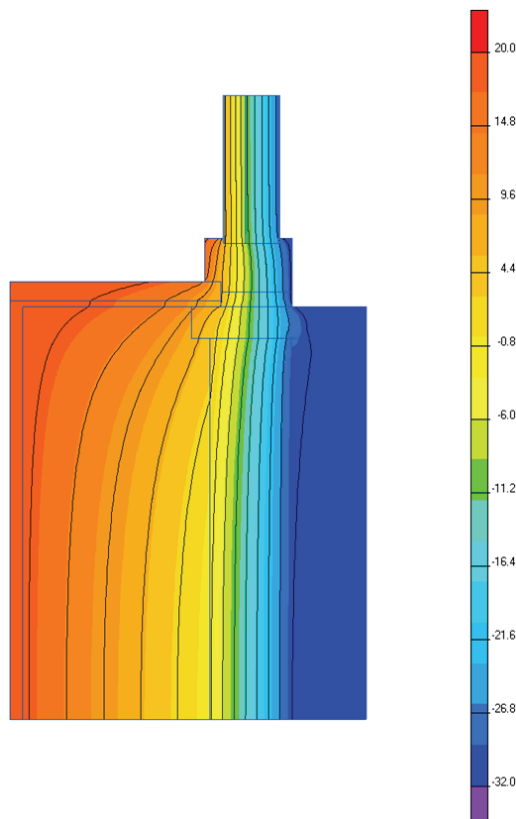


Рисунок 3. Температурные поля узла оконного откоса. 2 вариант исполнения

Серыми линиями на рисунках показаны линии равной температуры, проходящие через 4°C от -30°C до +18°C

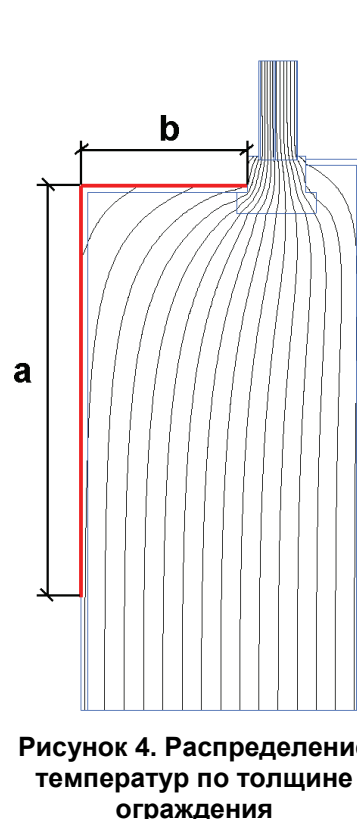


Рисунок 4. Распределение температур по толщине ограждения

a – ширина зоны влияния оконного откоса на температуру внутренней поверхности стены;
b – ширина внутреннего оконного откоса

3. По результатам расчета температурных полей на внутренней поверхности стены в области оконного откоса (участок **a**) наблюдается изменение (увеличение) температуры по сравнению с температурой, рассчитанной по глади стены, τ_{en} , (вдали от оконного откоса) по формуле (4) (рис. 4).

Область, в пределах которой происходит искажение температурного поля на внутренней поверхности ограждения, называется зоной влияния данного теплопроводного включения (размеры этой области зависят от конструктивного решения самого узла, условного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, а также от др. факторов).

4. Сравнивая температуру на внутренней поверхности стены в области оконного откоса, определенную в результате расчета температурных полей, τ_{en}^{mn} , с τ_{en} , найденную по формуле (4), находим ширину зоны влияния (участок **a**).

Изменение температуры на внутренней поверхности приводит к некоторому изменению теплового потока, проходящего через этот участок стены, по сравнению с тепловым потоком, проходящим через условную конструкцию (по глади стены).

5. Величина мощности потока теплоты через участок **a**, $Q_{стены} = Q_a$, приходящейся на 1 м периметра оконного проема, определяется по данным расчетной программы или по формуле, [Вт/м]:

$$Q_a = \alpha_s (t_s - \tau_{en}^{mn}) a, \quad (6)$$

где τ_{en}^{mn} – средняя температура внутренней поверхности стены в зоне влияния оконного откоса, определенная по результатам расчета температурных полей, °C;

a – ширина зоны влияния оконного откоса на температуру внутренней поверхности стены, м.

6. Определяется мощность теплового потока, $Q_{усл}$, проходящего через условную конструкцию (по глади стены) тех же размеров, по формуле, [Вт/м]:

$$Q_{усл} = \frac{(t_s - t_n)}{R_0^{усл}} a. \quad (7)$$

Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных теплотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса)

7. Изменение мощности потока теплоты, проходящего через рассматриваемый участок стены (участок а), ΔQ_a , [Вт/м]:

$$\Delta Q_a = Q_a - Q_{\text{учл}} \quad (8)$$

8. Через внутренний откос (участок б) возникает дополнительная мощность потока теплоты (дополнительные теплопотери), Q_b , [Вт/м], которая определяется по результатам расчета температурных полей или по формуле:

$$Q_b = \alpha_{\text{в}} (t_{\text{в}} - \tau_{\text{вн}}^{\text{отк}}) b, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{вн}}^{\text{отк}}$ – средняя температура внутренней поверхности внутреннего откоса, определенная по результатам расчета температурных полей, °С;

b – ширина откоса, м.

9. Дополнительная мощность теплового потока через узел оконного откоса, приходящаяся на 1 м периметра оконного проема, $Q_{\text{дон}}$, [Вт/м]:

$$Q_{\text{дон}} = \Delta Q_a + Q_b \quad (10)$$

10. Вычисляется общее количество погонных метров расчетных участков оконных откосов, L , приходящееся на расчетную площадь, [м/м²]:

$$L = \frac{l}{F_p}, \quad (11)$$

где l – общая длина расчетных участков, м;

F_p – расчетная площадь, м².

В данном случае общей длиной расчетных участков будет сумма периметров всех оконных проемов:

$$l = P_{\text{окон}} = \sum P_i, \quad (12)$$

где P_i – периметр i -го вида окна, м.

В качестве расчетной площади берется площадь всей несветопрозрачной части фасада здания, F_p , [4]:

$$F_p = F_{\text{фасада}} - \sum F_i, \quad (13)$$

где $F_{\text{фасада}}$ – общая площадь фасада, м²;

F_i – площадь отдельных не стеновых элементов фасада (окна, двери, витражи и т.д.), м².

11. Определяется дополнительная плотность теплового потока, обусловленная данным теплопроводным включением, $q_{\text{дон}}$, [Вт/м²]:

$$q_{\text{дон}} = Q_{\text{дон}} L \quad (14)$$

Расчет дополнительной плотности теплового потока для узла оконного откоса

Значения определяемых величин, необходимых для расчета дополнительной плотности теплового потока, двух вариантов исполнения выбранного узла, сведены в табл. 2. Проанализируем полученные данные и определим, какую долю составляют теплопотери через рассмотренное теплопроводное включение от основных теплопотерь, рассчитанных по глади конструкции, и насколько рассмотренное теплопроводное включение влияет на величину $R_0^{\text{нп}}$. Результаты анализа сведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты расчета дополнительной плотности теплового потока, обусловленной узлом оконного откоса

Номер формулы / результат расчета ТП	Определяемая величина	1 вариант	2 вариант
(1)	Условное сопротивление теплопередаче данной конструкции $R_0^{\text{учл}}$, (м²·°С)/Вт	0.98	5.036
(4)	Температура на внутренней поверхности по глади стены (вдали от оконного откоса), $t_{\text{вн}}$, °С	13.9	18.8
ТП	Температура внутренней поверхности стены в зоне влияния оконного откоса, определенная в результате расчета температурных полей, $t_{\text{вн}}^{\text{отк}}$, °С	14.936	19.11

Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных теплопотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса)

Номер формулы / результат расчета ТП	Определяемая величина	1 вариант	2 вариант
ТП	Длина участка стены (ширина зоны влияния оконного откоса), а, м, (1п.м.)	1.25	0.7
(6)/ТП	Мощность теплового потока, проходящего через 1п.м. участка стены в зоне оконного проема, на 1м периметра проема, Q_a , Вт/м	55.077	5.419
(7)	Мощность теплового потока, Q_{ysl} , проходящего через условную конструкцию (по глади стены) тех же размеров, Вт/м	66.327	7.228
(8)	Уменьшение мощности потока теплоты, проходящего через рассматриваемый участок стены (участок а), ΔQ_a , на 1м периметра проема, Вт/м	-11.25	-1.809
-	Длина внутреннего откоса, b, м, (1п.м.)	0.395	0.312
(9)/ТП	Дополнительные теплопотери через внутренний откос, Q_b , на 1м периметра проема, Вт/м	17.255	4.107
(10)	Дополнительная мощность теплового потока через узел оконного откоса, приходящаяся на 1 м периметра оконного проема, $Q_{доп}$, Вт/м	6.005	2.298
-	Количество погонных метров расчетных участков оконных откосов, L, приходящееся на расчетную площадь*, м/м ²	1.041*	1.041*
(14)	Дополнительная плотность теплового потока, обусловленная данным теплопроводным включением, $q_{доп}$, Вт/м ²	6.251	2.392

Примечание: количество погонных метров расчетных участков оконных откосов, L, рассчитано для несветопрозрачной части фасада конкретного здания. Для других проектов зданий значение $q_{доп}$ зависит не только от конструктивного решения узлов, но и от архитектурного проекта здания.

Таблица 3. Сравнение вклада теплопроводного включения – оконный откос при расчете R_0^{np}

Номер формулы / результат расчета ТП	Определяемая величина	1 вариант	2 вариант
(15)	Плотность теплового потока однородного участка стены (по глади стены)*, q, Вт/м ²	53.061*	10.326*
-	Доля теплопотерь, обусловленных соответствующими теплопроводными включениями, от теплопотерь по глади конструкции (относительные дополнительные удельные теплопотери), $q_{доп}/q$, доли ед.	0.118 (11.8%)	0.232 (23.2%)
(2)	Приведенное сопротивление теплопередаче рассматриваемого фасада здания с учетом ТОЛЬКО оконных откосов, R_0^{np} , (м ² ·°С)/Вт	0.877	4.089
(1)	Условное сопротивление теплопередаче данной конструкции R_0^{ysl} , (м ² ·°С)/Вт	0.98	5.036
-	Расхождение R_0^{ysl} и R_0^{np} , %	10.5	18.8

Примечание: плотность теплового потока однородного участка стены (по глади стены), q, Вт/м², определяется по формуле:

$$q = \frac{(t_s - t_n)}{R_0^{ysl}} \quad (15)$$

Остается выполнить подобные расчеты для всех имеющихся теплопроводных включений и найти в итоге приведенное сопротивление теплопередаче рассматриваемого фасада здания по формуле (2).

Литература

1. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М. : Госстрой России, 2004.
2. СП 23-101-2000 «Проектирование тепловой защиты зданий». – М. : Госстрой России, 2001.
3. Малявина Е. Г. Строительная теплофизика и проблемы утепления современных зданий // АВОК, №1, 2009г. С. 4-10.
4. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Крышов С. И, Пономарев О. И. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки // АВОК, №5, 2009. С. 48-60.
5. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М. : Стройиздат, 1973. 287 с.
6. Каталог температурных полей узлов типовых ограждающих конструкций. Ч. I. Жилые здания: (Пособие для проектирования) / Госстрой СССР, НИИ строительной физики. М. : Стройиздат, 1980. 111 с.
7. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. СПб. : ПК TOP, 2009. 339 с.

* Дмитрий Владимирович Крайнов, г. Казань

Тел. моб.: +7(927) 675-25-26; эл. почта: dimaself@mail.ru

Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных теплопотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса)