

К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

К.т.н, зав. кафедрой А.Д. Кривошеин;
к.т.н., доцент С.В. Федоров,*

*Инженерно-строительный институт
Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*

Обращение к теме расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций обусловлено большим количеством вопросов, возникающих на стадии проектирования зданий при выполнении расчетов в соответствии с требованиями СНиП 23-02-2003 [1] и СП 23-101-2004 [2]. И, прежде всего, при выполнении расчетов с применением программ расчета (моделирования) температурных полей.

Ограждающие конструкции современных зданий характеризуются наличием утепляющих и конструктивных слоев, различного рода теплопроводных включений в виде плит перекрытий, перегородок, связей, конструктивных элементов фасадных систем и т.п.

Универсальный метод оценки теплозащитных качеств таких конструкций основан на применении программ расчета двумерных (плоских) или трехмерных (пространственных) температурных полей. Для его реализации разработан и применяется ряд компьютерных программ. В СНиП 23-02-2003 [1], СП 23-101-2004 [2] прописаны основные положения методики расчетов и приведены примеры их выполнения.

Однако, к сожалению, по ряду положений в [1, 2] допущены неточности; ряд методических вопросов, существенно влияющих на корректность результатов расчетов, не оговорен. Как следствие – возможность произвольной трактовки отдельных положений, большие расхождения в результатах расчетов даже при использовании одних и тех же программных средств.

Цель статьи – изложение точки зрения авторов по данному вопросу в дополнение к ранее опубликованным работам.

Из истории вопроса

Говоря о методике расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий, представляется целесообразным начать с уточнения физического смысла этого показателя и его увязки с конечной целью теплотехнических расчетов – проектированием систем отопления.

Именно для оценки теплопотерь помещений через ограждающие конструкции при проектировании систем отопления еще в незапамятные времена были предложены простые формулы [3, 4], которые с незначительными изменениями дошли и до нашего времени

$$Q_{\text{оэп}} = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot k \cdot F \cdot n \cdot (1 + \sum \beta), \quad (1)$$

или

$$Q_{\text{оэп}} = \frac{(t_{\text{int}} - t_{\text{ext}})}{R_0} \cdot F \cdot n \cdot (1 + \sum \beta), \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи конструкции, Вт/(м²·°С);

R_0 – сопротивление теплопередаче конструкции, (м²·°С)/Вт;

F – расчетная площадь конструкции, м²;

$t_{\text{int}}, t_{\text{ext}}$ – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °С;

n – коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху;

$(1 + \sum \beta)$ – добавки к основным потерям тепла, учитывающие ряд особенностей теплопередачи через отдельные конструкции.

Для определения расчетных площадей ограждающих конструкций были выработаны единые правила обмера поверхностей [3, 4]. В частности, расчетная площадь окон должна приниматься по наименьшим размерам «в свету» (соответственно потери тепла через оконные откосы, монтажные швы должны учитываться при расчете приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен), при определении

площади стен их длина должна приниматься от наружной кромки угла до оси промежуточной стены или перегородки, высота стен верхнего этажа – от уровня пола до верха утеплителя чердачного перекрытия и т.п.

Следует отметить, что эти правила действуют и в настоящее время при проектировании систем отопления.

Для однослойных или многослойных конструкций с последовательно расположенными слоями (теплотехнически однородные конструкции) величину сопротивления теплопередаче R_0 принято рассчитывать по формуле:

$$R_0 = 1/\alpha_{\text{int}} + \sum(\delta_i / \lambda_i) + 1/\alpha_{\text{ext}}, \quad (3)$$

где δ_i – толщина i -го слоя конструкции, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, Вт/(м·°С);

$\alpha_{\text{int}}, \alpha_{\text{ext}}$ – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности конструкции, Вт/(м²·°С).

Для многослойных конструкций с применением эффективных утеплителей и различного рода связями, как правило, ухудшающими теплозащитные качества этих конструкций (теплотехнически неоднородные конструкции), расчет R_0 по формуле (3) уже неправилен, поскольку влияние неоднородных включений («мостиков холода») может приводить к весьма существенному увеличению теплопотерь и, соответственно, снижению сопротивления теплопередаче конструкции в целом.

Для характеристики теплозащитных качеств таких неоднородных конструкций и было введено понятие приведенного сопротивления теплопередаче (далее в статье эта величина будет обозначаться R_0^f).

Следует отметить, что теплотехническая неоднородность конструкций может быть обусловлена как наличием теплопроводных включений (неоднородность первого типа), так и их формой (неоднородность второго типа – см. рис. 1). И, строго говоря, расчет R_0 даже однослойных наружных стен должен проводиться как для неоднородных конструкций с учетом потерь тепла через оконные и дверные откосы. Именно такой подход заложен в настоящее время в СНиП 23-02-2003 [1].

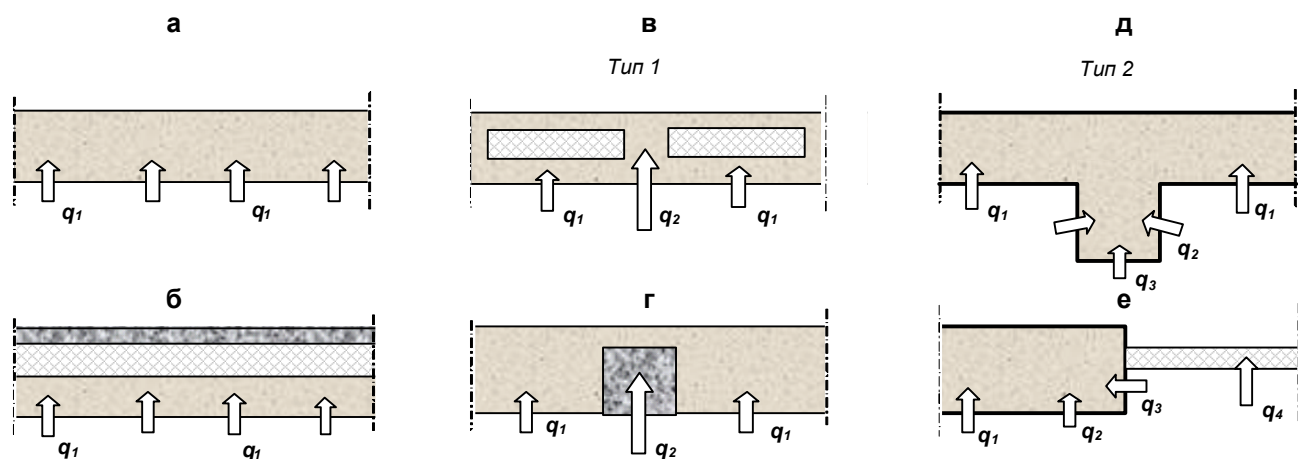


Рисунок 1. Примеры теплотехнически неоднородных ограждающих конструкций

Исходя из формулы (2), физический смысл приведенного сопротивления теплопередаче заключается в «приведении» фактических потерь тепла через теплотехнически неоднородную конструкцию к аналогичной по площади теплотехнически однородной конструкции с равными потерями тепла. При этом, если реальная конструкция отличается от пластины с плоскопараллельными поверхностями, то площадь приведения принимается равной проекции этой конструкции на параллельную поверхность (рис. 2).

Таким образом, реальная теплотехнически неоднородная конструкция «приводится» к условно однородной конструкции, потери тепла через которую равны суммарным потерям тепла исходной неоднородной конструкции. И обусловлено это «приведение» удобством расчета при проектировании систем отопления и расчете теплопотерь по формулам (1) или (2).

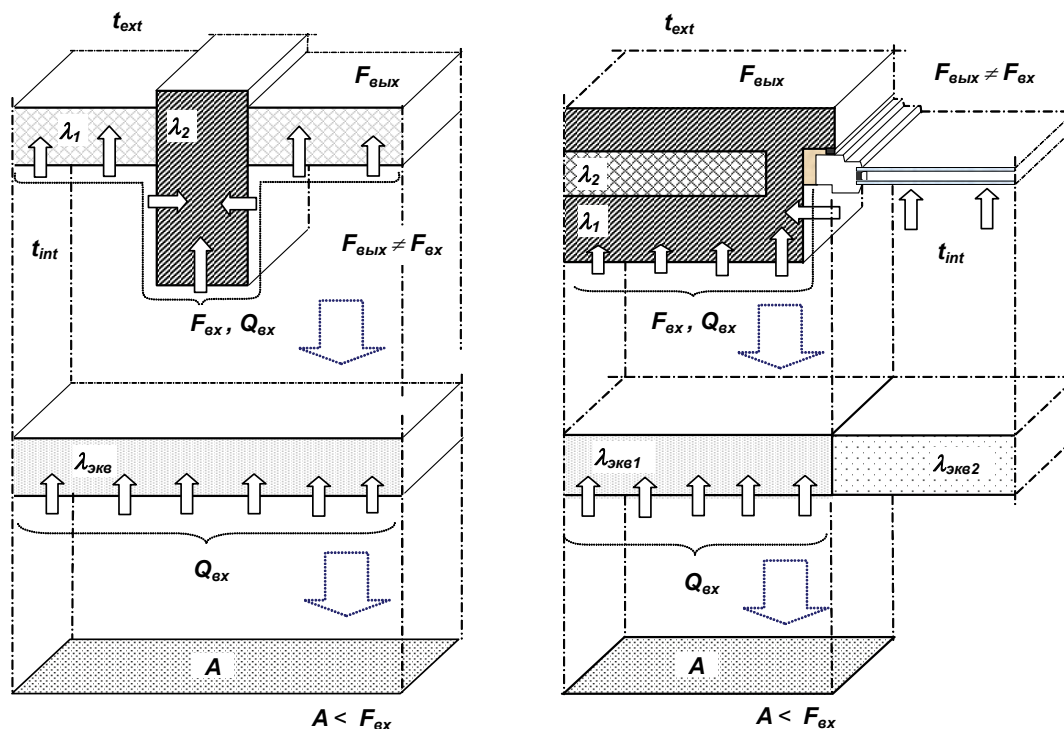


Рисунок 2. Схемы приведения теплотехнически неоднородных конструкций к однородным:
а – стена с теплопроводным включением; б – стена с окном

Особенности выбора расчетной области для оценки теплозащитных качеств ограждающих конструкций с применением компьютерных программ

Одним из первых вопросов, возникающих при расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с применением программ расчета температурных полей, является выбор расчетной области. Какой участок фасада здания, покрытия, цокольного перекрытия и т.п. принимать в качестве расчетного? К сожалению, ни в общих положениях [1], ни в примерах расчетов [2] методика решения этой задачи не раскрыта, хотя в соответствии с требованиями СНиП 23-02-2003 «*приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен следует рассчитывать для фасада здания либо для одного промежуточного этажа с учетом откосов проемов без учета их заполнений*».

Формально задача выбора расчетной области может быть сведена к следующим частным случаям:

- разбиение фасада здания или промежуточного этажа на отдельные фрагменты;
- выбор расчетной области фрагмента здания для расчета температурного поля;
- выбор расчетной области для оценки температурного режима отдельных узлов.

Подобная детализация обусловлена тем, что, несмотря на все расширяющиеся возможности программных средств, введение в расчет фасада здания в целом и, соответственно, получение величины приведенного сопротивления теплопередаче прямым расчетом представляется в большинстве случаев задачей малореальной. И обусловлено это как ограниченными возможностями программного обеспечения, так и необходимостью учета и соответствующей детализации отдельных конструктивных элементов.

Возможные варианты разбиения ограждающих конструкций здания на расчетные фрагменты приведены на рис. 3.

В качестве расчетных областей представляется целесообразным принимать повторяющиеся однотипные участки, например, участки фасада без оконных проемов, с оконными проемами, с балконными дверями и т.п. Для уменьшения объема вычислений эти участки далее могут быть разбиты на расчетные области по осям симметрии.

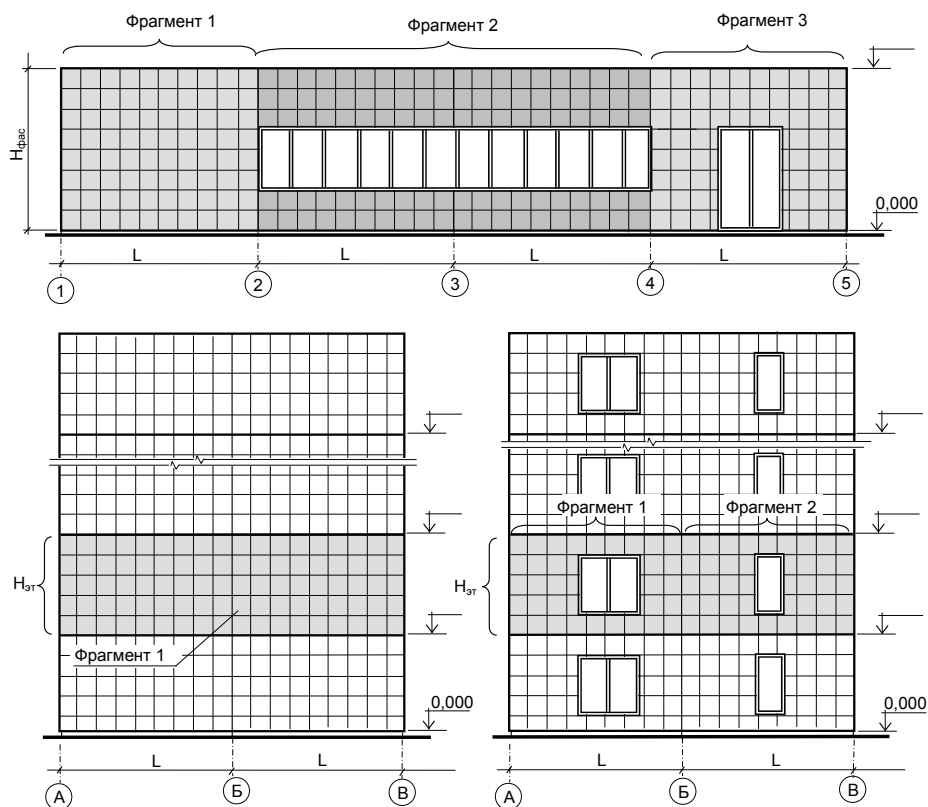


Рисунок 3. Возможные варианты разбиения фасада здания (а) или промежуточного этажа (б) на отдельные фрагменты

Второй вопрос, возникающий в этой связи, – определение размеров и площадей расчетных участков.

Если исходить из правил обмера поверхностей ограждающих конструкций, применяемых при расчете теплопотерь, то размеры следует принимать по внешним поверхностям.

Однако СНиП 23-02-2003 оговаривает, что площадь наружных ограждающих конструкций должна приниматься по внутренним размерам здания. И, соответственно, при проведении расчетов в настоящее время необходимо ориентироваться именно на эти требования, учитывая, что при проектировании системы отопления будут применяться иные правила обмера поверхностей. Соответственно, расчеты R_0^r должны вестись по входящим в конструкцию тепловым потокам. Примеры определения размеров расчетных участков (линейных размеров или площадей) для расчета тепловых потоков, входящих в расчетную область, приведены на рис. 4.

Третья задача – формализация расчетной области. Реальные конструкции, в отличие от примеров, приведенных в [2], как правило, включают оконные и дверные балконные блоки, входные двери, перекрытия, перегородки, выступающие углы и т.п. Соответственно, при подготовке расчетной области возникает вопрос о степени детализации и учете этих конструктивных элементов.

При решении данного вопроса представляется целесообразным руководствоваться следующими соображениями:

- для ограждающих конструкций, содержащих оконные или дверные проемы, расчеты следует проводить с учетом заполнения этих проемов; при этом оконные или дверные блоки могут быть представлены в виде пластин с заданными коэффициентами теплопроводности;
- участки конструкций с плитами перекрытий, внутренними стенами, перегородками и т.п. следует рассчитывать с учетом этих элементов, принимая в общем случае их длину не менее 5 толщин [5];
- для наружных стен, содержащих выступающие углы, длина стен должна приниматься по осям симметрии или не менее 5 толщин стены в каждую сторону от внутренней поверхности угла; при необходимости уменьшения размеров рассчитываемой области следует проводить проверку результатов расчета температурного поля путем сопоставления с расчетом по одномерному температурному полю [5];

- при необходимости оценки теплозащитных качеств светопрозрачных конструкций (оконных блоков или профильных систем), расчет R_0^r должен проводиться без учета наружных стен или покрытий, в которые эти конструкции встроены; в данном случае расчет должен проводиться с учетом реальной конфигурации и размеров рассчитываемых конструкций;
- криволинейные поверхности, например, наружные стены круглого в плане помещения, могут приводиться к условно прямолинейным очертаниям с равной площадью внутренней поверхности.

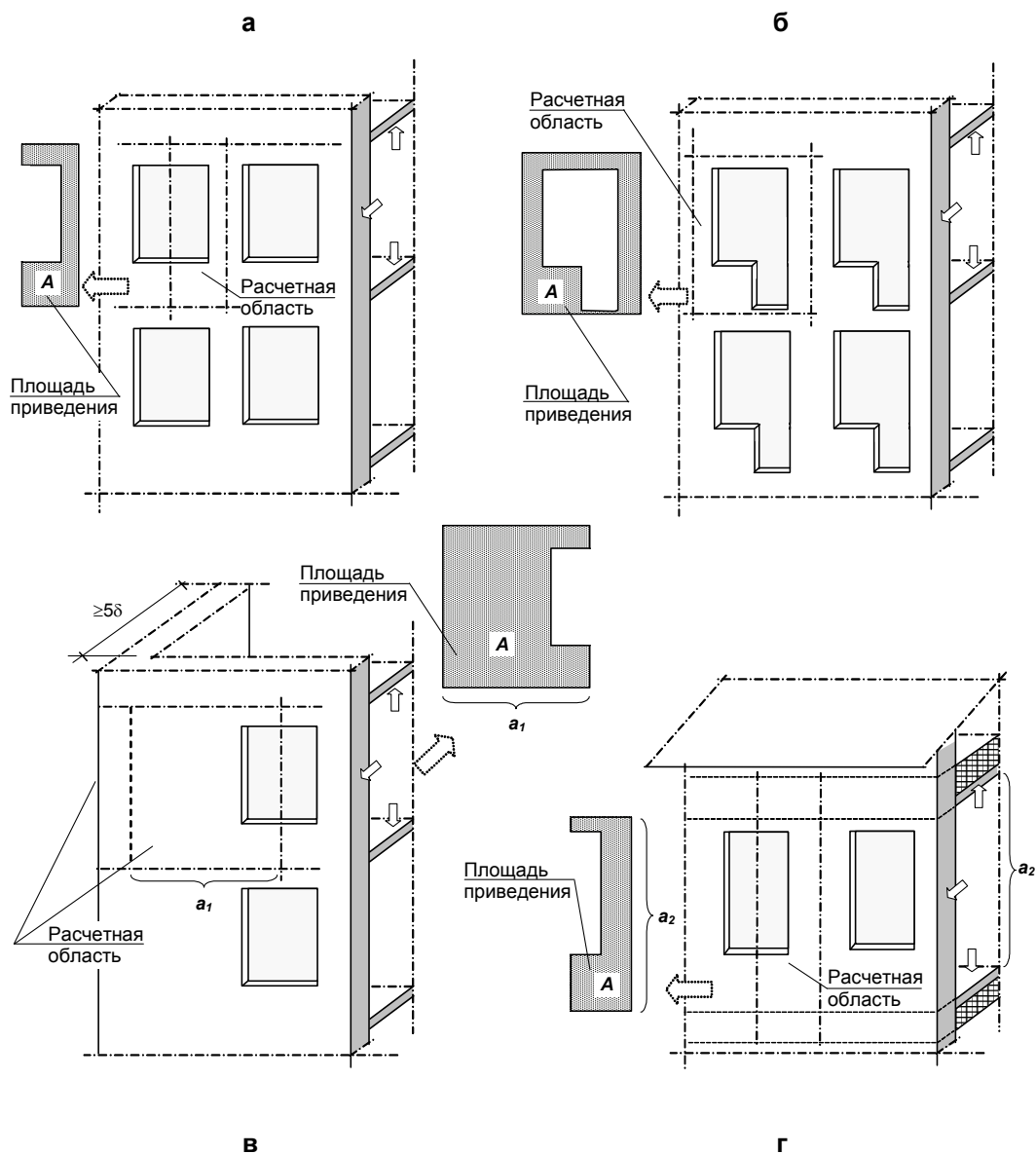


Рисунок 4. Примеры задания расчетной области для некоторых конструкций: а – стена с окнами; б – стена с балконными дверями; в – стена углового помещения; г – стена одноэтажного здания

Требования к программному обеспечению и степени детализации разбиения расчетной области

Говоря о требованиях к программному обеспечению, следует понимать, что выполняемые расчеты являются приближенными. В основе большинства расчетных программ лежит метод конечных элементов или метод конечных разностей. Соответственно, точность результатов расчетов в значительной мере зависит от степени разбиения расчетной области на элементарные участки или объемы, от допустимой погрешности итерационных вычислений.

Не вдаваясь в тонкости численных методов, представляется необходимым введение единых требований к программным продуктам, применяемым для решения подобного рода задач. В частности, введение требований по контролю качества разбиения расчетной области, допустимой погрешности расчета тестовых примеров, возможности задания переменных граничных условий по различным поверхностям

Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

рассчитываемой области, выводу информации в виде входящих и выходящих тепловых потоков, средних температур по различным поверхностям конструкции и др.

Лишь в этом случае можно говорить о соблюдении единства подходов и сопоставимости результатов расчетов.

В качестве примера можно привести ряд известных европейских нормативных документов – EN ISO 10211-2 [6], EN ISO 10077-2 [7], в которых поставленные вопросы в той или иной мере уже оговорены.

Обработка результатов расчета и определение приведенного сопротивления теплопередаче по результатам расчетов

Для расчета величины приведенного сопротивления теплопередаче неоднородных конструкций R_0^r по результатам расчета температурных полей в [2] предлагается формула:

$$R_0^r = \frac{(t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot n}{\sum Q_{\text{ex}}} \cdot A, \quad (4)$$

где $\sum Q_{\text{ex}}$ – суммарный тепловой поток, входящий в конструкцию или ее фрагмент, Вт, определяемый на основе расчета температурного поля;

A – площадь приведения рассчитываемой ограждающей конструкции, м².

Необходимо отметить, что в СП 23-101-2004 допущена неточность: величина A обозначена как «площадь неоднородной ограждающей конструкции или ее фрагмента, м², по размерам с внутренней стороны, включая откосы оконных проемов» [2].

Исходя из физического смысла приведенного сопротивления теплопередаче (см. выше) суммарный тепловой поток $\sum Q_{\text{ex}}$ должен определяться с учетом потерь тепла через оконные откосы, перегородки, плиты перекрытия и т.п. (то есть суммироваться), но фигурировать в формуле (4) должна именно площадь приведения, согласно которой в дальнейшем и будут вычисляться теплотери по формуле (2).

Отдельный вопрос в этой связи – расчет конструкций с углами. Подобного рода вопросы возникают при расчете угловых помещений, лоджий и т.п. В данном случае представляется правильным расчет проводить для всей конструкции (с углами), но при определении величины $\sum Q_{\text{ex}}$ учитывать входящие тепловые потоки по рассчитываемой стене до внутренней поверхности угла (см. рис. 4). При этом в качестве площади приведения A принимать проекцию этой стены на параллельную поверхность – до внутренней поверхности угла. Как показывают сопоставительные расчеты, данный подход обеспечивает наиболее корректные результаты с расчетами теплотери помещений по формуле (2).

Аналогично, при расчете конструкций с оконными или дверными проемами площадь приведения должна приниматься по размерам «в свету».

При известных значениях $R_{0,i}^r$ отдельных участков величина среднего приведенного сопротивления теплопередаче фасада здания или типового этажа может быть рассчитана по формуле [2]:

$$R_0^r = A_0 / \left(\sum A_i / R_{0,i}^r \right), \quad (5)$$

где A_0 – общая площадь конструкции, равная сумме площадей отдельных участков, м²;

$A_i, R_{0,i}^r$ – площадь, м², и приведенное сопротивление теплопередаче, м²·°C/Вт, i -го участка.

Особенности расчета температурного режима отдельных узлов

Оценка температурного режима отдельных узлов ограждающих конструкций, как правило, является самостоятельной задачей, причем зачастую даже более важной, чем расчет R_0^r .

Если погрешности расчета R_0^r в определенной мере нивелируются при проектировании системы отопления, то нарушение температурного режима вследствие ошибок конструирования может проявляться в выпадении конденсата, образовании плесени, повреждении отделки помещений (что зачастую и имеет место, особенно при повышенной влажности воздуха).

Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Расчет таких узлов требует, как правило, постановки и решения задачи моделирования трехмерного (пространственного) температурного поля [8].

В качестве примера на рис. 5 приведены результаты расчета наружного выступающего угла в зоне его сопряжения с плитой чердачного перекрытия. Как видно из представленного распределения температур, влияние особенностей теплопередачи в наружном углу может быть весьма существенным и требует соответствующего учета при проектировании.

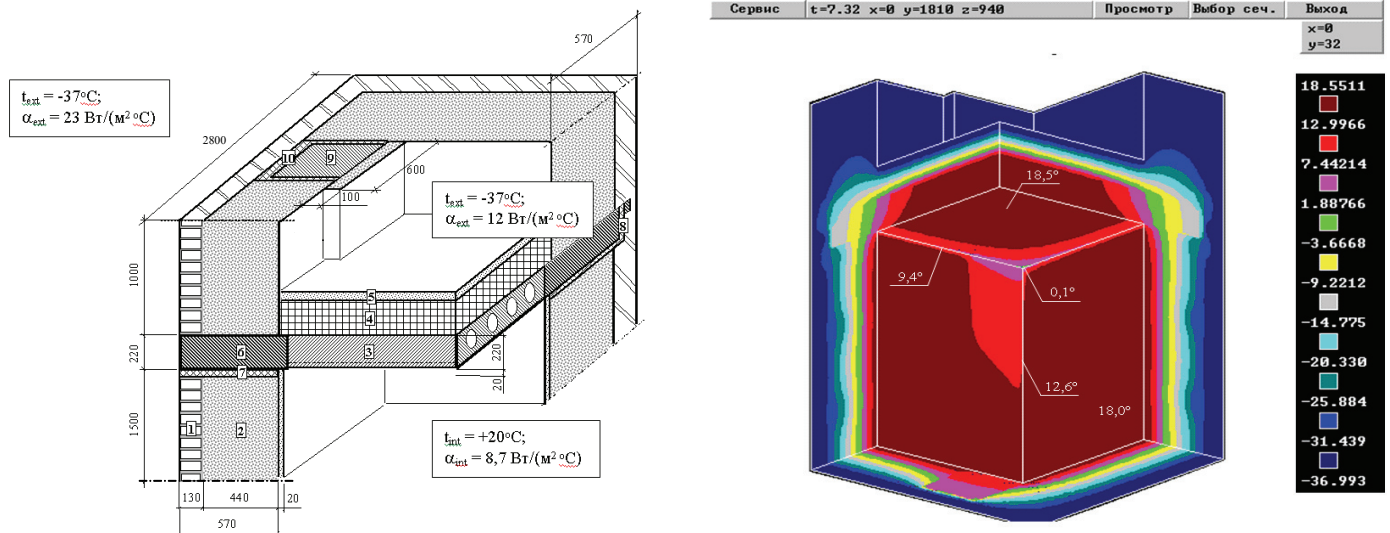


Рисунок 5. Пример расчета трехмерного температурного поля узла сопряжения наружных стен с чердачным перекрытием

Литература

1. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
2. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
3. Аше Б.М. Отопление и вентиляция. Том 1: Общие сведения. – М.-Л.: Госстройиздат, 1939. – 516 с.
4. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 1. Отопление, водопровод, канализация: Справочник проектировщика / Под ред. И.Г. Старовойта. – 4-е изд. – М.: Стройиздат, 1990. – 430 с.
5. Табунчиков Ю.А., Хромец Д.Ю., Матросов Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1986. – 382 с.
6. EN ISO 10211-2. Berechnung der Wärme-ströme und Oberflächentemperaturen. Teil 2: Linienformige Wärmebrücken.
7. EN ISO 10077-2. Berechnung des Wärme-durchgangskoeffizienten. Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen.
8. Кривошеин А.Д., Федоров С.В. Руководство пользователя программным комплексом «TEMPER» по расчету температурных полей ограждающих конструкций зданий / СибАДИ. – Омск, 1997. – 36 с.

* Александр Дмитриевич Кривошеин, г. Омск, Россия
Тел. раб.: +7(3812)24-36-91; эл. почта: gshomsk@mail.ru