

Козлов В.В.

НИИСФ РААСН, г. Москва

## **ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ.**

Аннотация: рассматривается взаимовлияние теплотехнических неоднородностей и его учет при расчете приведенного сопротивления теплопередаче.

Ключевые слова: теплоперенос, приведенное сопротивление теплопередаче, распределение температуры, теплотехническая неоднородность, удельные потери теплоты.

### **Введение**

Уже практически год действует СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» [1]. Одним из важнейших нововведений данного СП стало изменение методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче. Авторы СП получают много вопросов посвященных техническим деталям расчета приведенного сопротивления теплопередаче в соответствии с новыми правилами. На эту тему активно пишутся статьи, ведется обсуждение на конференциях. При этом за обсуждением технических деталей остается забытым важнейший базовый вопрос: всегда ли возможно применение элементного подхода для реальных конструкций? Это вопрос границ применимости метода. Авторам хотелось бы, чтобы этот вопрос также оказался в центре внимания и был по возможности разобран.

Отсутствие подобного рассмотрения для предыдущего широко распространенного метода привело к тому, что большинство расчетчиков не понимали его недостатков и границ применимости вплоть до его замены. Что, безусловно, служило основой для массовых ошибок в расчетах. В первую очередь логических.

Несмотря на кажущуюся простоту и очевидность, вопрос применимости элементного подхода для реальных конструкций оказывается наиболее сложным. Пока не видно даже путей для его точного научного доказательства. При этом, каждый конкретный пример показывает, что элементный подход применим.

Статья будет построена по следующему принципу. В начале, будут сформулированы два утверждения, точное доказательство которых пока затруднительно, но знание и понимание которых весьма важно для научного анализа свойств теплозащитных элементов. Далее каждое из утверждений будет подробно рассмотрено и подтверждено на примере связанной группы узлов.

### **Базовые понятия и рассматриваемые утверждения.**

Легко представить себе однородную конструкцию. С точки зрения тепловой защиты это бесконечная конструкция, состоящая из плоскопараллельных слоев какого-либо материала. *Любое локальное отклонение от однородности по форме или по характеристикам материала какой-либо части конструкции вызывает теплотехническую неоднородность.* Далее в случае отклонения только характеристик материалов неоднородность будет называться «теплопроводным включением», а в случае отклонения еще и формы – «геометрической неоднородностью».

Современный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче оперирует таким понятием, как теплозащитный элемент. В большинстве случаев это просто теплотехническая неоднородность в понимании описанном выше. Однако, иногда теплотехническим элементом может стать часть неоднородности или группа неоднородностей, в зависимости

от потребностей исследования. При этом, чтобы теплотехническая неоднородность могла стать теплозащитным элементом, должны выполняться дополнительные условия. Данное понятие вводится для удобства расчета приведенного сопротивления теплопередаче и анализа потерь теплоты через конструкцию, поэтому его свойства и ограничения определяются методом расчета приведенного сопротивления теплопередаче. При расчете теплозащитные элементы используются как самостоятельные величины независимые от места расположения в конструкции и соседства других элементов. Выполнение этого свойства и является основным условием признания теплотехнической неоднородности теплозащитным элементом.

Что же делать, если в выбранной для расчета конструкции встречаются теплотехнические неоднородности оказывающие взаимовлияние? Возможно ли рассчитать приведенное сопротивление теплопередаче такой конструкции обсуждаемым методом? Да. Ничего страшного здесь нет. Если точность расчетов требует учесть взаимовлияние группы неоднородностей, то всю эту группу нужно принять еще одним теплозащитным элементом. Точно также как атомы водорода и кислорода имеют свои свойства, а молекула воды свои, групповой теплозащитный элемент будет иметь свои уникальные свойства, которые будут учтены в расчете. Для практической выполнимости расчета приведенного сопротивления теплопередаче важно лишь, чтобы разнообразие таких групповых элементов было не слишком велико, из-за разрастания трудоемкости расчета.

#### Первое утверждение.

Практически все отдельные теплотехнические неоднородности могут рассматриваться как теплозащитные элементы, т.е. самостоятельные, независимые акторы процесса теплопереноса. Различное взаимное расположение теплозащитных элементов в конструкции не оказывает существенного влияния на приведенное сопротивление теплопередаче конструкции.

Лишь в исключительных случаях, особо «мощных» теплотехнических неоднородностей при их значительном сближении или соприкосновении может возникать заметное влияние на приведенное сопротивление теплопередаче. Для таких случаев необходимо вводить дополнительный теплозащитный элемент, соответствующий группе сблизившихся неоднородностей.

#### Второе утверждение.

На величину удельных потерь теплоты через теплозащитный элемент оказывают влияние, как свойства элемента, так и свойства конструкции, в которой он установлен. Это влияние можно явно разделить, причем искажение теплопереноса и распределения температуры за счет появления теплозащитного элемента будет определяться только значением его удельных потерь теплоты. То есть, все влияние элемента определяется его «мощностью».

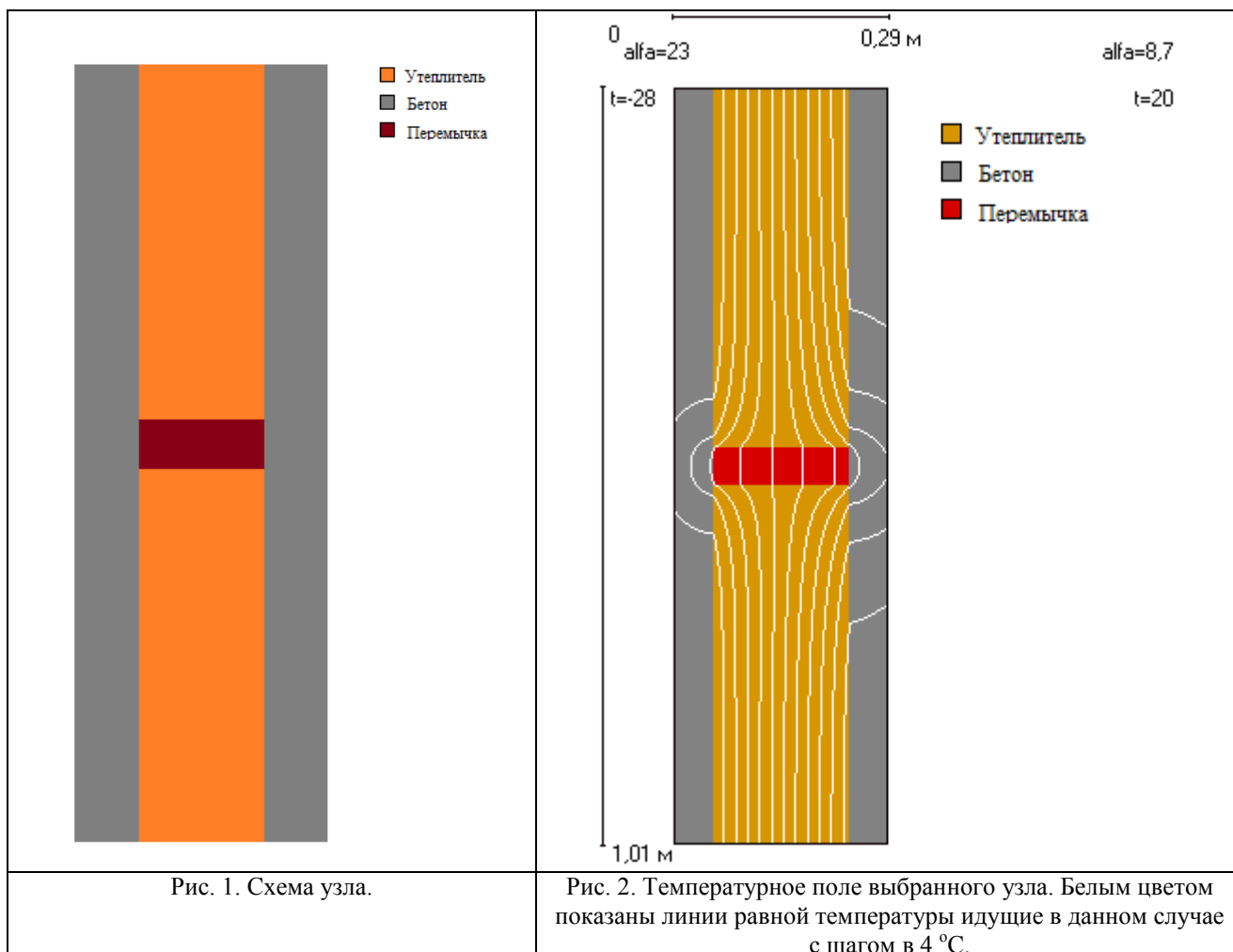
Второе утверждение потребуется при изучении первого, так как позволяет значительно сократить объем примеров необходимых для иллюстрации. Действительно, основной вывод из второго утверждения: какую бы теплотехническую неоднородность мы не выбрали для примера, ее влияние ничем не будет отличаться от влияния другой неоднородности с тем же значением удельных потерь теплоты.

Конечно, это утверждение имеет свои пределы применимости и не может быть распространено на крупногабаритные неоднородности.

#### **Описание выбранного узла и пример температурного поля**

Как уже было сказано, сделанные выше утверждения пока не удается доказать в общем виде. Основной помехой этому оказывается многообразие конструкций и узлов, встречающихся в строительной практике. В то же время, для любой выбранной конструкции и узла утверждения оказываются верными с незначительными ограничениями. Для частичного (локального) подтверждения сделанных утверждений далее проводится расчет температурных полей для определенной конструкции и связанной группы узлов.

В целом выбор конструкции, как и группы узлов не существен. Ни один частный пример не способен доказать общего утверждения. В тоже время, правильный набор примеров способен значительно продвинуть нас в понимании происходящих процессов. Поэтому, конструкция и тип узла выбраны из соображений наглядности и удобства дальнейшего описания.



Далее в качестве основного примера будет использоваться конструкция, схематично показанная на рис. 1. Слой утеплителя зажат между двумя более плотными и более теплопроводящими слоями (в большинстве примеров характеристики материала этих слоев близки к тяжелому бетону). Сквозь утеплитель проходит линейное теплопроводное включение (перемычка), характеристики которого будут далее варьироваться. Данная схема одна из самых распространенных в строительной практике. Ближе всего она соответствует совмещенному кровельному покрытию со стропилами в утеплителе, или трехслойной панели с ребром.

Более подробно останавливаться на размерах слоев и характеристиках материалов в данной работе не имеет смысла, так как она посвящена изучению общих зависимостей производящихся для каждого конкретного значения параметров.

В случаях, когда потребуется рассмотреть другую конструкцию, это будет указано отдельно.

Для иллюстрации на рис. 2 представлено температурное поле выбранного узла для случая существенной неоднородности. Теплопроводность материала перемычки в данном примере равна 5,8 Вт/(м°С) (это отвлеченное значение не соответствует какому-либо конкретному материалу).

Для выбранной группы узлов достаточно двухмерного температурного поля. Расчетный участок стены имеет протяженность 1000 мм с расположением перемычки строго по центру. Эффективно такой выбор расчетного участка соответствует регулярному расположению перемычек с шагом в 1 м.

Для показанного на рис. 2 случая удельные потери теплоты составили  $\Psi=0,544$  Вт/(м<sup>2</sup>С). Это очень большая величина, которая редко встречается в реальных конструкциях. Теплопроводное включение имеет такую «мощность», что определяет теплопередачу всего рассматриваемого узла. Более 2/3 всей теряемой через узел теплоты приходится на неоднородность.

Сильное влияние теплопроводного включения на теплоперенос через конструкцию заметно и по температурному полю. Линии равной температуры параллельные в однородном случае сильно изгибаются (раздвигаются) в месте расположения включения.

Влияние теплозащитного элемента на конструкцию можно проиллюстрировать графиком распределения температуры по поверхности конструкции. Далее такие графики будут приводиться только для внутренней поверхности (обращенной в помещение).

График распределения температуры по внутренней поверхности конструкции для рассчитанного узла показан на рис. 3. На графике красной линией (Ряд 1) показано распределение температуры для рассчитанного узла, фиолетовой линией (Ряд 2) показана температура в той же плоскости для однородной конструкции. Нулевая абсцисса соответствует центру перемычки.

Из графика видно как температура внутренней поверхности «проваливается» в месте расположения перемычки, постепенно выравниваясь по мере удаления от него. Площадь фигуры, заключенной между красной и фиолетовой линиями, умноженная на коэффициент теплообмена, равна дополнительным потерям теплоты через узел.

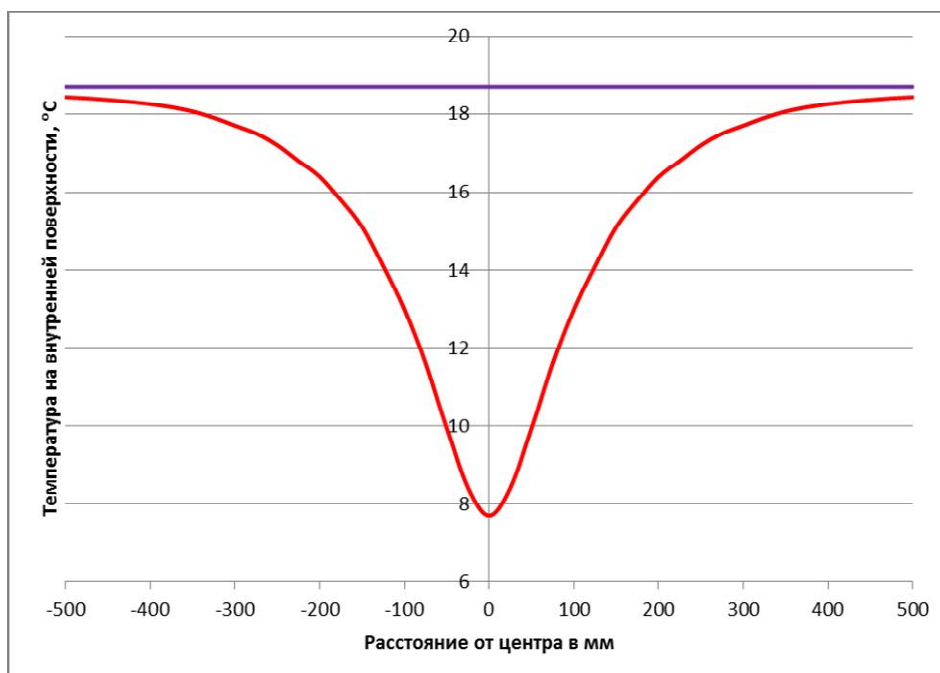


Рис. 3. Распределение температуры по внутренней поверхности однородной и неоднородной конструкции.

Бытует мнение, что при расчете температурного поля необходимо выбирать размеры расчетной зоны так, чтобы на границах распределение температуры совпадало с распределением для однородной конструкции. Вообще говоря, это неверно. Хотя и большой беды от такого подхода не будет. Основные последствия: значения  $\Psi$  могут оказаться несколько завышенными, что пойдет в запас, а объем расчетов возрастет, что при современной технике тоже не критично.

Для максимальной точности температурного поля расчетная схема должна полностью соответствовать реально возводимой конструкции. Это условие накладывает ограничение и на расчетную зону, ведь ее границы автоматически становятся осями симметрии. Соответственно, выбирая расчетную зону необходимо заранее угадать и попасть ее границами в реальные оси симметрии. Сделать это в общем случае крайне сложно. Но такая большая точность на практике почти не требуется, поэтому процесс выбора расчетной зоны возможно упростить. В данной статье мы не будем подробнее останавливаться на правилах выбора границ расчетной зоны. Но есть один важный момент, который обычно остается незамеченным, и который хотелось бы здесь осветить. Удельные потери теплоты оказываются намного менее чувствительными к выбору границ расчетной зоны, чем само распределение температуры.

На рис. 3 видно, что для выбранного случая даже на границах расчетной зоны температура внутренней поверхности не достигает температуры для однородного случая (фиолетовая линия). Разница составляет  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  или примерно  $0,6\%$  от общего температурного перепада внутренним и наружным воздухом. При этом дополнительные расчеты показывают, что  $\Psi$  данного узла имеет погрешность менее  $0,1\%$  (техническая погрешность данного численного расчета). При выборе расчетной зоны значительно большего или значительно меньшего размера распределение температуры меняется, а удельные потери теплоты остаются практически неизменными. Далее на примерах будет продемонстрировано, что даже значительное сближение теплопроводных включений, или, отклонение от симметричного расположения, позволяют получать достаточно точное значение  $\Psi$ , несмотря на существенное искажение температурного поля.

#### **Анализ с помощью удвоения теплопроводного включения**

Рассмотреть все многообразие группового взаимодействия различных теплотехнических неоднородностей не представляется возможным, количество комбинаций бесконечно. В данной статье будет рассматриваться только парное взаимодействие, так как его уже достаточно для иллюстрации применимости метода расчета. Очевидно, для изучения парного взаимодействия необходимо рассмотреть влияние расстояния между неоднородностями в паре на удельные потери теплоты. В соответствии со вторым утверждением не имеет значения, какую теплотехническую неоднородность использовать для примера, важны достигаемые значения удельных потерь теплоты.

Каждая теплотехническая неоднородность искажает температурное поле вокруг себя (см. рис. 2, 3). При сближении двух теплотехнических неоднородностей, каждая из них начнет взаимодействовать с искажением температурного поля, создаваемым соседней неоднородностью. Таким образом, возникнет взаимовлияние теплотехнических неоднородностей. Ясно, что, кроме расстояния между неоднородностями, на величину взаимодействия окажет влияние и «мощность» неоднородностей, т.е. интенсивность искажения температурного поля. При этом, найдутся величины удельных потерь теплоты, для которых взаимовлияние окажется столь малым, что его не удастся зафиксировать даже при максимальном сближении неоднородностей.

Чтобы полноценно исследовать зависимость взаимовлияния парных неоднородностей от расстояния необходимо, чтобы их удельные потери теплоты были «достаточно» велики. Но как узнать, какая величина удельных потерь теплоты достаточна? Для решения этого вопроса предлагается оригинальный способ исследования.

Очевидно, что с уменьшением расстояния между неоднородностями взаимовлияние будет возрастать. Тогда, следует рассмотреть предельный случай, в котором две неоднородности расположены в одной и той же точке. В реальной конструкции это невозможно, так как неоднородности будут иметь конечные размеры. Естественно, что если даже при совпадении места расположения неоднородностей взаимовлияние будет мало, то исследовать его зависимость от расстояния не имеет смысла. Более того, в этом случае можно считать тепло-

защитные элементы независимыми. А вот если взаимовлияние велико, то данный случай подходит для дальнейшего исследования путем варьирования расстояния между неоднородностями.

Возвращаясь к использованному выше узлу конструкции. Что означает для нее наложение двух одинаковых теплозащитных элементов? Отклонение от однородной конструкции исследуемого узла заключается только в увеличении теплопроводности по сравнению с теплопроводностью утеплителя в месте расположения перемычки (рис. 1). Значит, наложение двух теплозащитных элементов данного вида будет заключаться в удвоении увеличения теплопроводности по сравнению с теплопроводностью утеплителя. Важный момент, что удваивается не теплопроводность включения, а только его превышение над теплопроводностью утеплителя. Если такое изменение теплопроводности перемычки будет приводить к удвоению  $\Psi$ , значит рассматриваемые теплозащитные элементы «абсолютно независимы».

Еще раз, для «абсолютной независимости» теплозащитного элемента требуется, чтобы при удвоении неоднородности удваивались удельные потери теплоты. Отклонение от этого правила показывает, насколько исследуемые теплотехнические неоднородности потенциально взаимозависимы.

Чтобы составить полноценное представление о данном типе неоднородности и данной конструкции требуется проверить описанное правило для всего диапазона «мощностей» теплозащитного элемента. В данном случае для всего диапазона теплопроводностей перемычки. Для этого рассчитывается серия температурных полей для узлов конструкции, отличающихся теплопроводностью перемычки. Причем для каждого следующего элемента серии превышение теплопроводности перемычки над теплопроводностью утеплителя удваивается.

Результаты расчета удельных потерь теплоты для всей серии представлены на графиках рис. 4а, 4б. Зависимость удельных потерь теплоты от теплопроводности перемычки (обозначим ее  $\Psi_1(\lambda)$ ) показана сплошной красной линией.

Для удобства проверки правила «при удвоении теплопроводного включения удваиваются удельные потери теплоты» рядом проведена сплошная синяя линия, точки которой получены с помощью следующего преобразования из красной линии:

$$\Psi_2(2\lambda - 0,045) = 2\Psi_1(\lambda) \quad (1)$$

Здесь 0,045 Вт/(м<sup>0</sup>С) теплопроводность утеплителя для исследуемой конструкции.

Расхождение между красной и синей линией показывает, величину взаимовлияния при совмещении двух теплопроводных включений в одной точке. Из приведенного графика видно, что взаимовлияние постепенно нарастает с увеличением «мощности» теплопроводного включения.

При  $\Psi < 0,025$  Вт/(м<sup>0</sup>С) каждого элемента в паре взаимовлияние практически отсутствует.

Для  $0,025 \leq \Psi < 0,05$  Вт/(м<sup>0</sup>С) взаимовлияние уже можно заметить, но оно еще не изменяет приведенное сопротивление теплопередаче конструкции.

При  $\Psi = 0,05$  Вт/(м<sup>0</sup>С) разница между синей и красной линиями составляет 0,005 Вт/(м<sup>0</sup>С), что потенциально может привести к занижению приведенного сопротивления теплопередаче конструкции на 1% (если при его расчете пренебречь взаимовлиянием).

Существенное влияние на приведенное сопротивление теплопередаче возникает лишь при  $\Psi = 0,15$  Вт/(м<sup>0</sup>С). Занижение удельных потерь теплоты парного включения в этом случае составляет на 0,044 Вт/(м<sup>0</sup>С), что может привести к занижению приведенного сопротивления теплопередаче на 5% - 7%.

Следует заметить, что на рис. 4а, 4б охвачен широчайший диапазон возможных теплопроводных включений, от тончайших деревянных стропил, до стальных двутавров с толщиной стенки 10 мм.

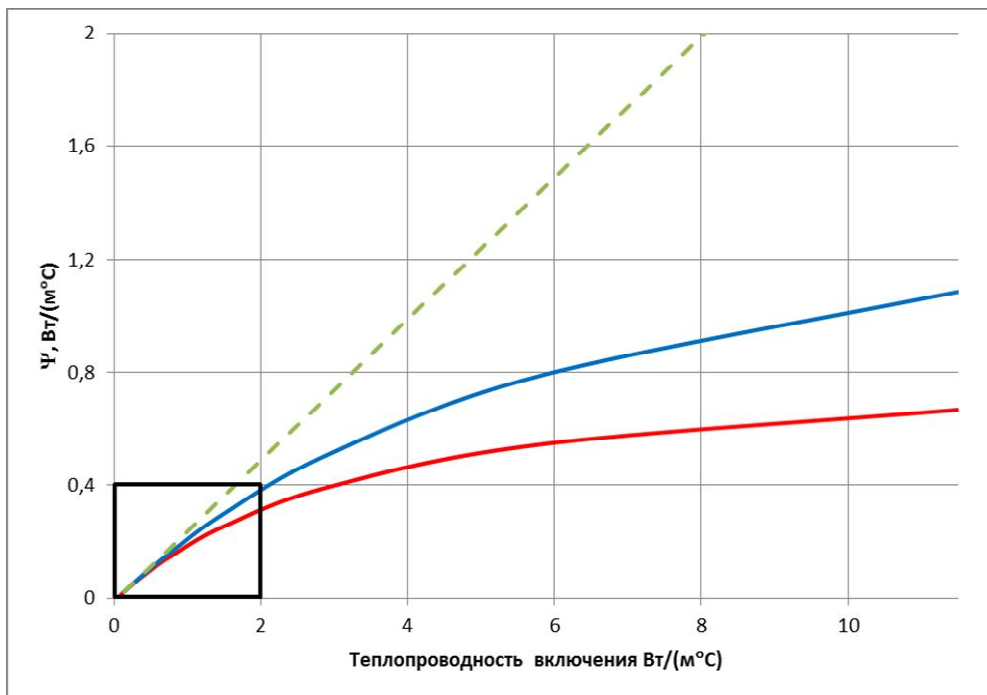


Рис. 4а. Зависимость удельных потерь теплоты от теплопроводности включения. Красная линия результат прямого расчета температурного поля. Синяя линия результат полученный удвоением удельных тепловых потерь при удвоении «добавочной» теплопроводности включения. Зеленая пунктирная линия - случай «абсолютно независимых (идеальных) теплозащитных элементов».

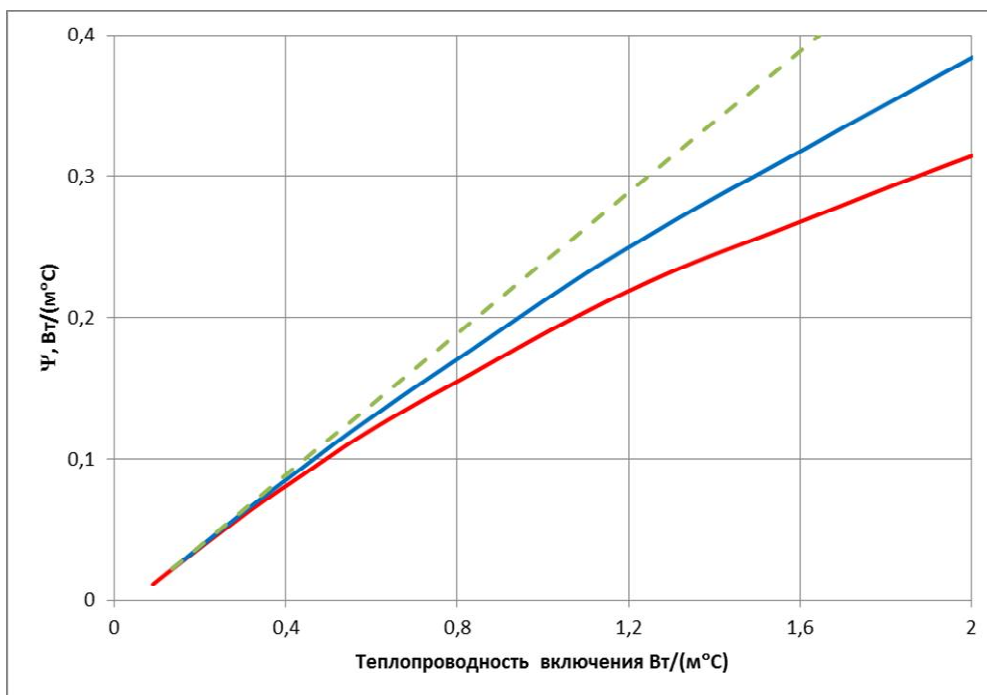


Рис. 4б. Увеличенная часть графика на рис. 4а (в черной рамке).

Рассмотренный случай, совпадения двух теплотехнических неоднородностей в одной точке, предельный, то есть позволяет оценивать ситуацию лишь с большим запасом. По нему можно уверенно говорить, что линейные теплозащитные элементы с удельными потерями теплоты меньше 0,05 Вт/(м²С) могут считаться совершенно независимыми. Но на практике совмещения элементов происходить никогда не будет, поэтому далее необходимо рассмотреть, как изменяются удельные потери теплоты при постепенном сближении элементов.

### Зависимость взаимовлияния от расстояния между центрами неоднородностей в паре.

Чтобы оставаться в точности в рамках приводимой выше группы примеров будет использоваться та же теплотехническая неоднородность (перемычка), расположенная в среднем по стене с той же частотой (1 элемент на метр стены). Для этого элементы будут располагаться не по одному (равномерно), а парами. Далее будет варьироваться расстояние между центрами элементов в паре.

Очевидно, что для теплопроводных включений с  $\Psi$  меньшим  $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$  проводить такое исследование не имеет смысла, так как даже при наложении включений искажение температурного поля крайне мало.

Далее для исследования выбираются теплопроводные включения с  $\Psi=0,544 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$  (температурное поле одиночного включения показано на рис. 3), самые «мощные» в предыдущем примере. Как показано выше, искажение температурного поля для такого теплопроводного включения уже очень велико. Удельные потери теплоты при совмещении включений превышаются более чем в 1,6 раза.

На рис. 5 показана зависимость удельных потерь теплоты одного теплопроводного включения, от расстояния между центрами включений в паре. Напомним, что в первом примере расстояние между перемычками равно 1000 мм.

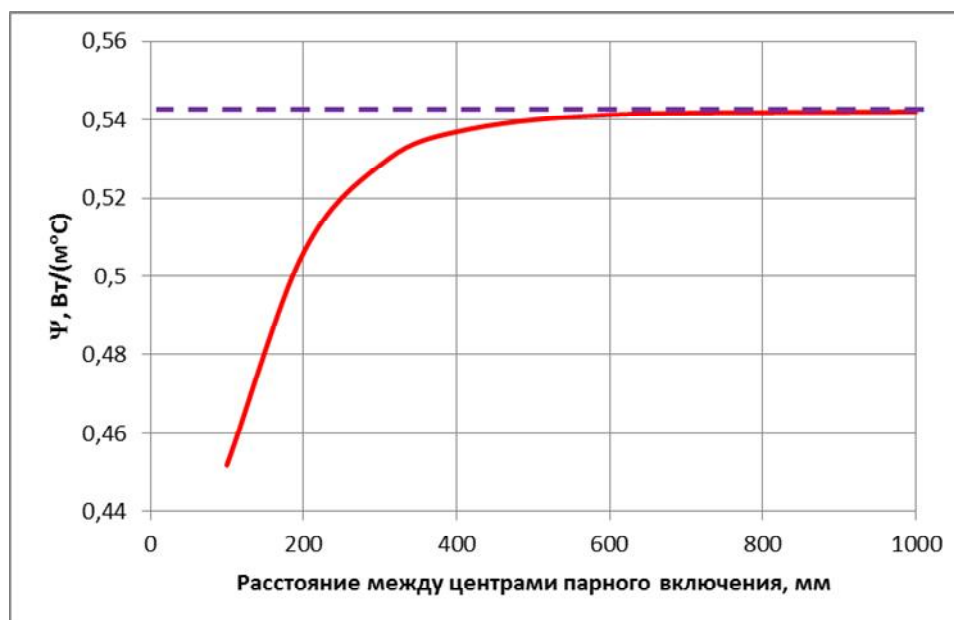


Рис. 5. Зависимость удельных потерь теплоты одного теплопроводного включения от расстояния между центрами включений при парном расположении. Красная линия - результат прямого расчета температурного поля парных включений. Пунктирная фиолетовая линия - удельные потери теплоты для отдельно стоящего включения.

Из графика на рис. 5 видно, что при сближении теплопроводных включений, постепенно, они начинают оказывать взаимное влияние, которое приводит к уменьшению удельных потерь теплоты. Это происходит из-за того, что дополнительный поток теплоты проходит не только через перемычку (составляющую неоднородность), но и через конструкцию. При сближении теплопроводных включений они начинают конкурировать за один и тот же участок конструкции для передачи дополнительных потерь теплоты. Если дополнительные потери теплоты велики, то конструкция может не справиться с их полноценной передачей, что и приводит к взаимовлиянию.

При расстоянии между центрами теплопроводных включений 400 мм снижение удельных потерь теплоты составляет всего 1%. Если не учитывать взаимовлияние, то это может



привести к занижению приведенного сопротивления теплопередаче данной конструкции менее чем на 0,7%.

При расстоянии между центрами 300 мм снижение  $\Psi$  составляет 2,5%, и возможное занижение приведенного сопротивления теплопередаче не превысит 1,8%.

При расстоянии между центрами 200 мм снижение  $\Psi$  составляет 6,7%, и возможное занижение приведенного сопротивления теплопередаче не превысит 4,8%.

Представляет интерес увидеть, как отражается взаимовлияние двух неоднородностей на температуре внутренней поверхности конструкции.

На рис. 6 показано распределение температуры для рассмотренного выше парного теплопроводного включения при расстоянии между центрами включений 300 мм.

На графике показаны:

- распределение температуры для рассматриваемого случая (сплошная красная линия)
- распределение температуры для однородного случая (сплошная фиолетовая линия)
- распределение температуры для случая одиночного (не парного) включения (пунктирная зеленая линия)
- суммарное распределение температуры для двух непарных включений (пунктирная голубая линия).

Как видно из графика суммарное распределение температуры для двух непарных включений хорошо совпадает с результатами расчета температурного поля для парного включения. При этом суммарное распределение в каждой точке чуть ниже, что и определяет большие удельные потери теплоты при таком способе расчета.

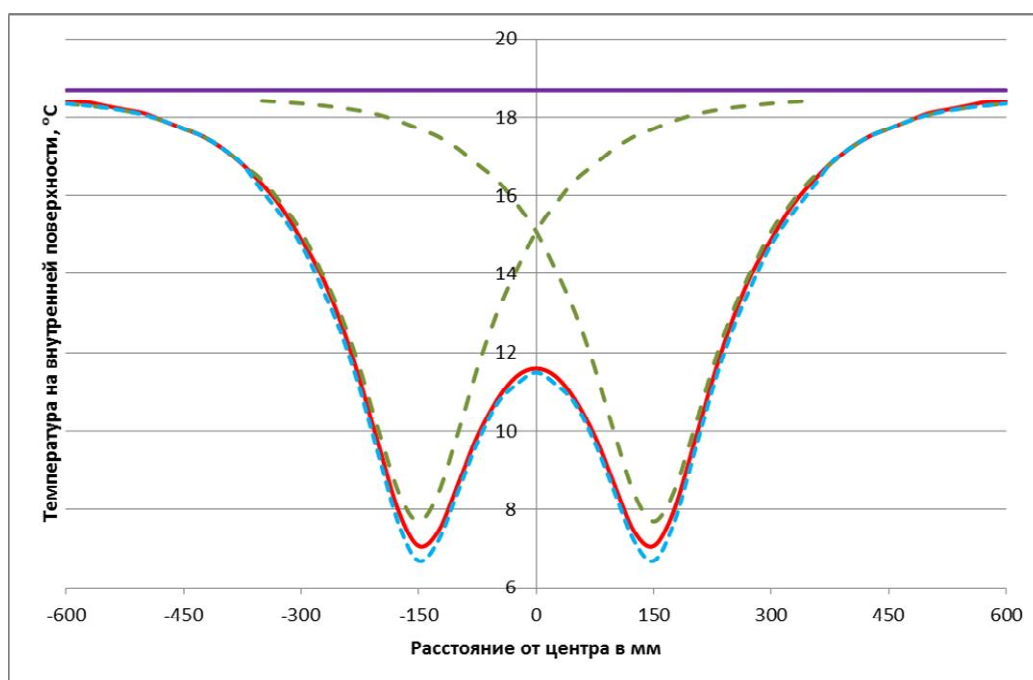


Рис. 6. Распределение температуры по внутренней поверхности однородной и неоднородной конструкции для парного теплопроводного включения.

Проведенный выше анализ полностью распространяется на любые теплопроводные включения, а на геометрические неоднородности может быть распространен лишь частично. Естественно, в других конструкциях конкретные значения  $\Psi$ , при которых взаимовлияние окажется значимым, будут отличаться, но качественно картина будет везде одинаковой.

Метод удвоения неоднородности для геометрических неоднородностей не применим, да и не требуется, так как в геометрических неоднородностях нечего удваивать. В принципе геометрические неоднородности могут исказить температурное поле несколько отличным

образом, чем теплопроводные включения, но все же в широких пределах полученные результаты можно распространить и на них.

Например, рассмотрим одну из самых распространенных теплотехнических неоднородностей - оконный откос. Проведенное выше исследование показывает, что для рассматриваемой конструкции стены даже близко расположенные оконные откосы не должны влиять друг на друга, ввиду того, что их удельные потери теплоты слишком малы. Так и происходит. Проверка на примере конкретного откоса подтверждает этот вывод. Для оконного откоса с  $\Psi=0,026 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{С})$  взаимовлияние даже при расстоянии между соседними откосами **200 мм** не превышает 1,5 % и совершенно не заметно при расчете приведенного сопротивления теплопередаче. Межоконный простенок с шириной 200 мм крайне редок на практике.

Так как этот случай тривиальный (влияния нет) подробно рассматривать его не интересно. Куда интересней рассмотреть случай, в котором взаимовлияние есть. Это случай оконного откоса в стене из блоков ячеистого бетона.

Итак, для конструкции стены: 400 мм кладка из блоков ячеистого бетона (теплопроводность  $0,14 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{С})$ ) облицованная снаружи полнотелым глиняным кирпичом в полкирпича; исследуется зависимость удельных потерь теплоты от расстояния между откосами. График зависимости приведен на рис. 7.

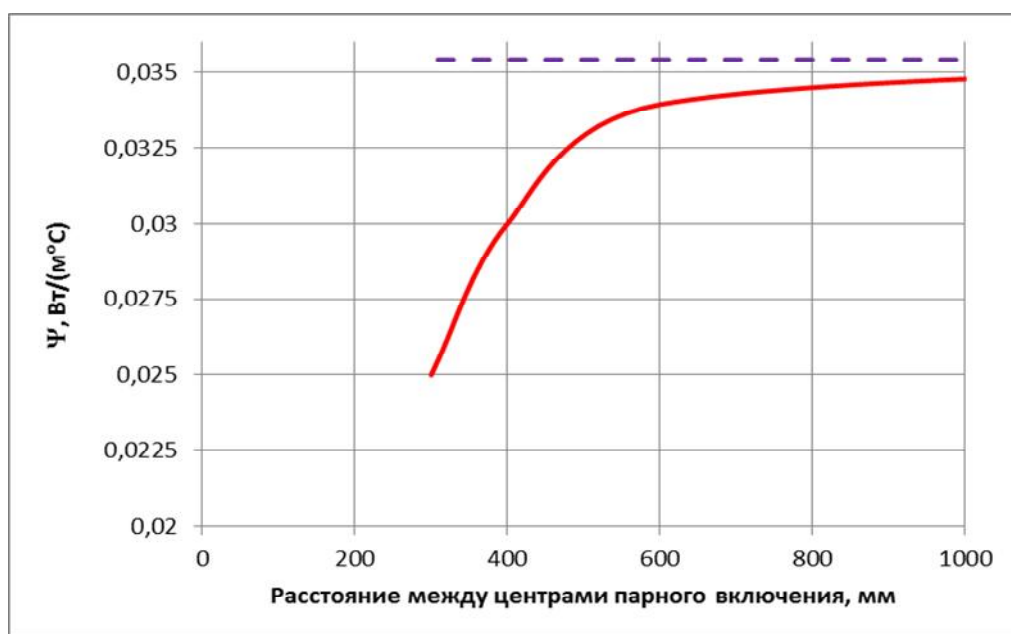


Рис. 7. Зависимость удельных потерь теплоты одного откоса от расстояния между откосами. Красная линия - результат прямого расчета температурного поля. Пунктирная фиолетовая линия - удельные потери теплоты для отдельно стоящего откоса.

Даже для такой «неудобной» конструкции влияние откосов друг на друга оказывается нечувствительным для приведенного сопротивления теплопередаче вплоть до расстояний между откосами 400 мм. Лишь для простенков меньшего размера рекомендуется, при необходимости высокой точности, вводить отдельный теплозащитный элемент простенка в целом.

### **Влияние теплотехнической неоднородности и окружающей ее конструкции на распределение температуры.**

Перейдем ко второму утверждению. Как уже говорилось, теплотехническая неоднородность и окружающая ее конструкция совместно работают при передаче дополнительного потока теплоты. Причем, неоднородность проводит дополнительный поток теплоты через конструкцию, а конструкция перераспределяет и осуществляет теплообмен. Если теплотехническая неоднородность имеет ограниченные размеры, то при замене одной неоднородно-

сти на другую, для окружающей конструкции меняется лишь величина дополнительного потока теплоты, который требуется перераспределить.

Распределение температуры по поверхности ограждающей конструкции подчинено определенным законам. В том числе, оно позволяет определить дополнительный поток теплоты. Смена неоднородности неспособна изменить эти законы, поэтому при любой неоднородности распределения температуры по поверхности конструкции должны быть подобны. В общем виде это записывается следующей формулой.

$$\Delta \tau = \Psi \cdot f(x) \quad (2)$$

где  $\Delta \tau$  - перепад между температурами внутренней поверхности однородной и неоднородной конструкции, °С, на рис. 3 это расстояние между красной и фиолетовой линиями;

$x$  – расстояние от центра неоднородности;

$f$  – некая фиксированная функция, не зависящая от  $\Psi$ .

В формуле (2) все влияние неоднородности сосредоточено в  $\Psi$ , а влияние конструкции присутствует как в  $\Psi$ , так и в  $f$ , причем это влияние взаимосвязано и может быть определено одним параметром.

Для проверки утверждения выраженного формулой (2) требуется сравнить распределения температуры (например, по внутренней поверхности конструкции) для различных «мощностей» теплотехнической неоднородности. Для исследованного выше узла конструкции это было сделано. После масштабирования (деления на  $\Psi$  в соответствии с формулой (2)) распределения температуры полностью совпадают. Чтобы охватить весь диапазон изменений  $\Psi$ , по температурным полям, рассчитанным для построения графика на рис. 4, построен дополнительный график. Это график зависимости  $f(0)$  от  $\Psi$ . Из графика видно, что  $f(0)$  константа для всего диапазона изменения  $\Psi$  от 0,01 Вт/(м°С) до 0,7 Вт/(м°С).

Аналогичные подтверждения находятся и для других примеров, что позволяет сделать заключение? сформулированное выше, функция  $f(x)$  в формуле (2) не зависит от  $\Psi$ .

Подтверждение изложенным выше рассуждениям можно найти и в работах содержащих аналитические решения для частных случаев теплотехнической неоднородности. Например в статье [2].

### **Заключение.**

Выше рассмотрены закономерности взаимовлияния близко расположенных теплотехнических неоднородностей. Они представляют как практический, так и научный интерес.

В статье сформулировано и проиллюстрировано рядом примеров два утверждения.

Первое утверждение демонстрирует, что для любой ограждающей конструкции возможно провести расчет приведенного сопротивления теплопередаче методом теплозащитных элементов, и в подавляющем большинстве реальных конструкций без учета взаимовлияния теплотехнических неоднородностей. Это утверждение важно для практического использования метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче.

Второе утверждение позволяет разделить влияние ограждающей конструкции и теплотехнической неоднородности на удельные потери теплоты и распределение температуры. Это утверждение имеет большое значение для дальнейшего исследования теплопереноса и совершенствования методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче.

На данный момент в НИИСФ РААСН подготовлен и проходит утверждение в государственных органах СП «Правила расчета приведенного сопротивления теплопередаче ...». Основная функция СП, облегчить расчет приведенного сопротивления теплопередаче для проектировщика. Большую часть объема документа (более 50 страниц) составляют таблицы удельных потерь теплоты типовых теплотехнических неоднородностей. Даже такой объем охватывает лишь часть существующих узлов и ограждающих конструкций. Второе утверждение данной статьи и формула (2) позволяют при дальнейших исследованиях свести все

возможные варианты узлов ограждающих конструкций к небольшому набору графиков или таблиц.

Основное отличие подхода будет заключаться в том, что сейчас приходится варьировать огромное количество параметров, чтобы рассмотреть все возможные узлы конструкции. При новом подходе, каждая теплотехническая неоднородность характеризуется лишь одним параметром, и каждая ограждающая конструкция характеризуется лишь одним параметром. Таким образом, весь объем вариантов можно будет охватить варьированием всего двух параметров, что и приведет к многократному снижению объема.

Данный подход открывает новые перспективы в исследовании теплопереноса в ограждающих конструкциях. Сейчас каждый исследователь, рассматривая какую-либо неоднородность, делает это по-своему и практически не увязывает результаты с другими работами. Взаимосвязь характеристик конструкции и теплотехнической неоднородности, приведенная в формуле (2), позволяет проводить исследование однообразно и, таким образом, начать накапливание общих представлений о теплотехнических неоднородностях.

После более подробной проработки данного вопроса, шаблон исследования теплотехнической неоднородности должен заключаться в следующем: находится параметр характеризующий исследуемую конструкцию, находится параметр характеризующий исследуемую неоднородность, изучается отклонение от идеальной картины соответствующей формуле (2).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. (Авторский коллектив Н.П.Умнякова, В.Г.Гагарин, В.В.Козлов, И.Н.Бутовский, Е.Г.Малявина, О.А.Ларин, В.С.Беляев).
2. Козлов В.В. Исследование теплотехнических свойств теплоизоляционного фасада с тонким штукатурным слоем в зоне расположения дюбеля. «Актуальные вопросы строительной физики». // Academia. Архитектура и строительство. 2009, № 5, стр. 346 – 355.
3. Гагарин В.Г., Козлов В.В. «Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций». // Строительные материалы. 2010, №12, стр. 4 – 12.

Об авторах

Козлов Владимир Владимирович, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории «Строительной теплофизики» НИИСФ РААСН, kozlov.v2@yandex.ru