

В.Г. ГАГАРИН, д-р техн. наук, член-корр. РААСН,
В.В. КОЗЛОВ, канд. техн. наук, НИИСФ РААСН (Москва)

Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Введение

В настоящее время идет активная актуализация нормативно-технической базы строительства, что создает хорошие предпосылки для развития некоторых методов нормирования и расчета, в том числе методов нормирования и расчета теплозащиты ограждающих конструкций зданий.

В нормативных документах [1, 2] для характеристики теплозащитных свойств ограждающих конструкций используются следующие понятия:

- термическое сопротивление R ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);
- сопротивление теплопередаче R_o ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);
- условное сопротивление теплопередаче R_o^{chl} ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);
- приведенное сопротивление теплопередаче R_o^{np} ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);
- коэффициент теплотехнической однородности r (доли ед.).

Эти понятия были введены в процессе развития составной части строительной теплофизики — теории теплозащиты зданий. Для характеристики теплозащиты ограждающей конструкции достаточно только значения приведенного сопротивления теплопередаче. Однако значения остальных величин являются вспомогательными и обычно используются на промежуточных этапах расчета и анализа приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Значения приведенного сопротивления теплопередаче редко рассчитываются правильно при проектировании зданий и подготовке раздела «Энергоэффективность» [3]. Причин тому несколько.

Во-первых, в нормативных документах нет четкого определения понятия приведенного сопротивления теплопередаче. В СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий» [1] это определение отсутствует вовсе. В СП 23-101–2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [2] дается неправильная система определений этого понятия: «величина, обратная приведенному коэффициенту теплопередачи ограждающей конструкции», а указанный коэффициент в свою очередь определяется как «средневзвешенный коэффициент теплопередачи теплотехнически неоднородной ограждающей конструкции»; последнее понятие — «коэффициент теплопередачи теплотехнически неоднородной ограждающей конструкции» в СП не определено никак. Таким образом, понятие определяется через неопределенное понятие. Основная формула (9) в [2] для расчета которая могла бы служить определением, приведена некорректно.

Во-вторых, методики, предлагаемые в СП для расчета R_o^{np} , изложены путано. Алгоритм на основе расчета температурных полей не сформулирован в общем виде и лишь поясняется примерами в приложении М [2]. Допускаются методики вычисления R_o^{np} , основанные на расчете коэффициента теплотехнической однородности r , который в свою очередь вычисляется по эмпирическим и полуэмпирическим формулам. Этот метод является приближенным, сложен и неприемлем для некоторых современных ограждающих конструкций, например для конструкций с вентилируемым фасадом.

В-третьих, неправильно воспринимается таблица 6 [2], содержащая значения «минимально допустимых значений коэффициента теплотехнической однородности для конструкций индустриального изготовления». Эта таблица содержит завышенные значения r , как правило, недостижимые на практике. Вместо своего прямого назначения — ограничения конструкций по однородности приведенные в этой таблице значения воспринимаются в качестве ориентировочных значений r для соответствующих или похожих конструкций. В результате для расчетов принимаются завышенные значения r , что приводит к проектированию ограждающих конструкций с недостаточными теплозащитными свойствами [3].

Ниже представлено теоретическое обоснование и изложение методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче, которая применяется в лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН, а также в некоторых других организациях, но не изложена подробно в нормативных документах. Некоторые термины могут показаться читателям неожиданными, они представляют предмет дискуссии.

Определения (дефиниции) основных характеристик теплозащитных свойств ограждающих конструкций

Пусть имеется фрагмент ограждающей конструкции (не обязательно плоской) с площадью поверхности A (м^2) с теплопроводными включениями или без них. Пусть по разные стороны ограждающей конструкции имеется перепад температуры воздуха (°C): с внутренней стороны $t_{в}$, с наружной стороны $t_{н}$. Определения характеристик теплозащитных свойств ограждающих конструкций могут быть сформулированы следующим образом [4].

Приведенным сопротивлением теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции называется физическая величина, численно равная отношению перепада температуры воздуха по разные стороны ограждающей конструкции, к осредненной по площади фрагмента плотности потока теплоты через данный фрагмент конструкции при стационарных условиях теплопередачи. Данное определение эквивалентно следующему: приведенным сопротивлением теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции называется физическая величина, численно равная перепаду температуры воздуха по разные стороны ограждающей конструкции, при котором в стационарных условиях теплопередачи осредненная по площади фрагмента плотность потока теплоты через данный фрагмент конструкции равна $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Данное определение соответствует формуле:

$$R_o^{np} = \frac{t_{в} - t_{н}}{\left(\int_A q dA \right) / A} \quad (1)$$

Условным сопротивлением теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции называется приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента условной

многослойной ограждающей конструкции, в которой отсутствуют теплопроводные включения, толщина слоев в любом ее сечении одинакова, слои плоские и расположены перпендикулярно направлению потока теплоты через конструкцию.

Коэффициентом теплотехнической однородности фрагмента ограждающей конструкции называется величина, обратная отношению потока теплоты через рассматриваемый фрагмент конструкции к потоку теплоты через условную ограждающую конструкцию той же площади, что и рассматриваемый фрагмент.

Сформулированные определения можно уточнять и совершенствовать, но в рамках данной статьи они являются достаточными. Формулы для расчета приведенного сопротивления теплопередаче конструкций, используемые в статье, вытекают непосредственно из этих определений. Например, из сопоставления определенных непосредственно следует, что коэффициент теплотехнической однородности равен отношению приведенного к условному сопротивлению теплопередаче ограждающей конструкции. Важно подчеркнуть, что эти определения не опираются на понятие термического сопротивления, это позволяет избежать неопределенного понятия «приведенное термическое сопротивление», использование которого является логической ошибкой и затрудняет проведение расчетов. Кроме того, приведенное сопротивление теплопередаче определяется через поток теплоты и разность температуры, а не через просто «сопротивление теплопередаче» и коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции, что вносило путаницу в методику проведения расчетов.

Важной особенностью приведенного сопротивления теплопередаче является то, что оно относится к определенному фрагменту ограждающей конструкции. Если этот фрагмент не указан, то понятие, вообще говоря, лишено смысла. Однако обычно из контекста ясно, какой фрагмент имеется в виду. В противном случае термин «приведенное сопротивление теплопередаче стены» следует относить к совокупности всех стен здания. Именно так приходится понимать использование этого термина в СНиП [1] и других документах. Наконец, можно заметить, что понятие «сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции» является лишним и практически может не использоваться. Оно было введено в учебниках, например, еще в 1930-х гг. в первых изданиях книги К.Ф. Фокина [5], в то время, когда конструкций с существенными теплопроводными включениями было очень мало и понятие приведенного сопротивления теплопередаче отсутствовало. Возможно, со временем из названия «приведенное сопротивление теплопередаче» исчезнет слово «приведенное», но смысл этого термина сохранится.

В настоящее время фактически единственной характеристикой теплозащиты ограждающей конструкции является приведенное сопротивление теплопередаче. Именно эту характеристику можно измерить непосредственно для конструкции, для чего был разработан ГОСТ [6]. Условное сопротивление теплопередаче характеризует несуществующую конструкцию, его можно использовать в методических целях, но как характеристика теплозащиты оно непригодно и измерить его можно в ограниченном числе случаев. Для современных конструкций выбор значения условного сопротивления теплопередаче может оказаться субъективным. Коэффициент теплотехнической однородности, не являясь показателем теплозащиты, характеризует конструкцию с точки зрения эффективности использования в ней теплоизоляционных материалов и зависит от того, какая конструкция принята в качестве условной, что вносит дополнительную неопределенность. В связи с этим для

определения теплозащиты ограждающей конструкции следует непосредственно рассчитывать приведенное сопротивление теплопередаче исходя из определения (дефиниции) этой величины, а затем в качестве справочной величины рассчитывать коэффициент теплотехнической однородности конструкции, если это требуется, а не наоборот, как часто делается. Именно такой порядок расчетов использован в настоящей статье.

Методы расчета приведенного сопротивления теплопередаче

Для проведения практических расчетов или измерений в большинстве случаев формулу (1) непосредственно использовать нельзя. Ее необходимо преобразовать к виду, приемлемому для расчетов или соответственно измерений. Применяется два подхода для преобразования (1) и последующего вычисления на основе расчета температурных полей.

Фрагментный подход

к расчету приведенного сопротивления теплопередаче

Первый подход заключается в расчете температурного поля всего фрагмента целиком, в определении потока теплоты через фрагмент и в дальнейшем расчете приведенного сопротивления теплопередаче этого фрагмента. Если фрагмент слишком велик и сложен для непосредственного расчета температурного поля, то он разделяется на несколько частей (подфрагментов) и для каждой части проводится расчет температурного поля и определение приведенного сопротивления теплопередаче. Далее общее приведенное сопротивление теплопередаче всего фрагмента находится согласно уравнению (1), которое преобразуется к виду:

$$R_o^{np} = \frac{t_e - t_n}{\left(\int_A q dA \right) / A} \approx \frac{t_e - t_n}{\sum (q_i A_i) / A} = \frac{A}{\sum \left(\frac{q_i}{t_e - t_n} A_i \right)} = \frac{A}{\sum \left(\frac{A_i}{R_{o,i}^{np}} \right)}, \quad (2)$$

где A_i – площадь i -й части (подфрагмента) конструкции, m^2 ; q_i – плотность потока теплоты через поверхность i -й части, $Вт/м^2$; $R_{o,i}^{np}$ – приведенное сопротивление теплопередаче i -й части фрагмента ограждающей конструкции, $м^2 \cdot ^\circ C/Вт$.

Именно такой подход представлен в СП [2], а формула (2) совпадает с формулой (10) СП. Эти части (подфрагменты) при проведении расчета используются как самостоятельные фрагменты конструкции, отсюда и название подхода «фрагментный».

Так как в большинстве случаев фрагменты стен очень велики, например стены многоэтажных зданий, большое значение приобретает адекватность математической модели теплопереноса в подфрагменте физическому теплопереносу и оптимальность разбивки на части (подфрагменты). На практике такую разбивку фрагмента на части в большинстве случаев осуществить не удастся.

Трудности адекватной разбивки фрагмента конструкции на части.

Основное требование к разбивке фрагмента на части заключается в том, что через границы подфрагментов, так же как и всего фрагмента, не должно происходить переноса теплоты. Учитывая, что на практике границы проходят перпендикулярно плоскости стены, требование отсутствия переноса энергии означает расположение границ в районе локального максимума или локального минимума потока теплоты через обе поверхности ограждающей конструкции. Следует заметить, что при расчете температурного поля отсутствие переноса теплоты через границы расчетного участка будет автоматически «навязано» принимаемыми граничными условиями. Поэтому результаты расчета температурного поля не могут являться доказательством правильности выбора границ частей.

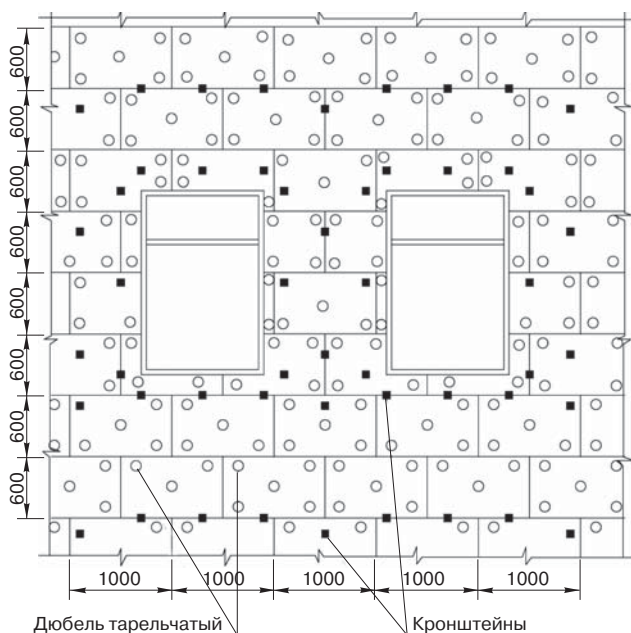


Рис. 1. Схема установки металлических кронштейнов и дюбелей с металлическим сердечником на фрагменте стены для вентилируемого фасада

Именно для того, чтобы «навязанные» граничные условия II рода совпадали с реальными и не искажали результат, требуется проводить границы фрагментов и подфрагментов указанным образом. Очевидно, что выбор границ должен быть произведен до расчета. Это возможно сделать только при наличии признаков симметрии или периодичности в конструкции фрагмента.

Трудности оптимальной разбивки фрагмента конструкции на части.

Проблема оптимальности разбиения фрагмента на части определяется наличием множества вариантов разбиения, и не все эти варианты одинаково удобны для расчета. Большое количество различных теплотехнических неоднородностей, которые не позволяют рассчитать температурное поле фрагмента целиком, также будет препятствовать и расчету при неоптимальном разбиении фрагмента на части. При современном уровне вычислительной техники сложность расчета единого температурного поля, например, для всей стены здания связана не столько с расчетными возможностями машин, которые быстро нарастают, сколько с возможностями человека. Задать расчетную схему, содержащую тысячи неоднородностей, — задача непосильная для человека, точно так же как и обработать информацию после такого расчета. Необоснованная разбивка фрагмента на участки приведет не к снижению объема работы, а к перераспределению. Следовательно, разбивка фрагмента на части должна быть такой, чтобы уменьшить объем работы расчетчика без ущерба для точности расчетов. Основой такой разбивки служит тот факт, что если выделенные части фрагмента являются идентичными, то и их характеристики также будут идентичными. Поэтому при разбиении фрагмента следует стремиться к выделению нескольких небольших подфрагментов, многократное повторение которых в различных комбинациях полностью покрывает весь фрагмент. В большинстве случаев это сделать не удастся, поскольку наличие нескольких теплотехнических неоднородностей разной природы, расположенных с переменным шагом, приводит к разбивке на огромное количество подфрагментов, даже после оптимизации разбивки (рис. 1).

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче при фрагментном подходе возможен только при принятии

ряда упрощений, каждое из которых снижает точность расчетов. Несмотря на то что такой подход содержится в СП [2], вызывает большое сомнение, что при его помощи хоть раз было правильно определено приведенное сопротивление теплопередаче современной конструкции с несколькими видами теплопроводных включений.

Элементный подход к расчету приведенного сопротивления теплопередаче

Второй подход заключается в представлении фрагмента в виде совокупности элементов (отсюда название подхода). Элементы — это детали, из которых состоит фрагмент, причем они могут находиться как близко, так и далеко друг от друга. При любом взаимном расположении они рассматриваются независимо друг от друга. Каждый элемент оказывает некоторое влияние, возможно и нулевое, на поток теплоты через конструкцию. Это влияние можно выразить соответствующим потоком теплоты ΔQ_m через рассматриваемый фрагмент ограждающей конструкции. Полная совокупность этих элементов составляет рассматриваемый фрагмент ограждающей конструкции, а сумма потоков теплоты, обусловленная совокупностью всех этих элементов, равна полной потоку теплоты через фрагмент ограждающей конструкции:

$$\left(\int_A q dA \right) = \sum \Delta Q_m. \quad (3)$$

Поток теплоты, обусловленный каждым из этих элементов, может быть охарактеризован удельной величиной потока, умноженной на размерный геометрический показатель. Для введения соответствующих геометрических показателей и характеристик удельной величины потока, обусловленной каждым элементом, рассматриваются проекции этих элементов на поверхность фрагмента ограждающей конструкции. Поскольку рассматривается общий поток теплоты через *площадь* поверхности ограждения, геометрический показатель которой имеет размерность 2, то есть измеряется в м², то размерность геометрических показателей проекций элементов может быть равной только 2, 1 или 0. Геометрические показатели проекций элементов будут соответственно измеряться в квадратных метрах, метрах или штуках (единицах). Предлагается классифицировать элементы по размерности их проекций и условно называть элементы в первом случае *плоскими*, во втором — *линейными*, в третьем — *точечными*. Конечно, такое деление элементов является условным.

Точечным, элемент может быть назван, если размеры его проекции на поверхность ограждения малы по сравнению с площадью рассматриваемого фрагмента ограждающей конструкции; примерами точечных элементов могут служить дюбели со стальным сердечником, которые используются для крепления слоя теплоизоляции к стене здания или кронштейны в вентилируемых фасадах.

Линейным элемент может быть назван, если один его размер существенно меньше другого и мал по сравнению с размерами рассматриваемого фрагмента ограждающей конструкции; примерами линейных элементов могут служить оконные откосы, стыки наружной стены с перекрытием, дистанционные рамки в стеклопакетах и т. д.

Плоским называется элемент (часть фрагмента ограждающей конструкции), площадь проекции которого сопоставима с площадью поверхности рассматриваемого фрагмента или равна ей. Эта часть фрагмента названа так для общности описания подхода к расчету. Плоские элементы в старых обозначениях — это «гладь ограждающей конструкции» (такое название было введено в 50-х гг. прошлого века, а может быть, и ранее). Примером плоского элемента является участок однослойной стены любой конструкции.

Выражение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$R_o^{np} = \frac{t_g - t_n}{\left(\int q dA \right) / A} = \frac{t_g - t_n}{\left(\sum \Delta Q_m \right) / A} = \frac{1}{\left(\sum \frac{\Delta Q_m}{t_g - t_n} \right) / A} = \frac{1}{\left(\sum \frac{\Delta Q_i}{(t_g - t_n) S_i} + \sum \frac{\Delta Q_j}{(t_g - t_n) L_j} + \sum \frac{\Delta Q_k}{(t_g - t_n) N_k} \right) / A} \quad (4)$$

После введения обозначений для удельных величин потока

$$U_i = \frac{\Delta Q_i}{(t_g - t_n) S_i}; \quad \Psi_j = \frac{\Delta Q_j}{(t_g - t_n) L_j}; \quad K_k = \frac{\Delta Q_k}{(t_g - t_n) N_k} \quad (5)$$

выражение (1) преобразуется к виду:

$$R_o^{np} = \frac{1}{\sum U_i \frac{S_i}{A} + \sum \Psi_j \frac{L_j}{A} + \sum K_k \frac{N_k}{A}}, \quad (6)$$

где U_i, S_i – удельные потоки теплоты через плоские элементы и площади проекций этих элементов, Вт/(м² · °С) и м² соответственно; Ψ_j, L_j – удельные потоки теплоты через линейные элементы и соответствующая длина проекций этих элементов во фрагменте, Вт/(м · °С) и м соответственно; K_k, N_k – удельные потоки теплоты через точечные элементы и количество этих элементов во фрагменте, Вт/°С и штук соответственно.

Формулу для расчета можно представить в следующем виде:

$$R_o^{np} = \frac{1}{\sum U_i s_i + \sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k}, \quad (7)$$

где используются удельные геометрические показатели:

$$s_i = \frac{S_i}{A}; \quad l_j = \frac{L_j}{A}; \quad n_k = \frac{N_k}{A}. \quad (8)$$

Данный подход позволяет проанализировать вклад в теплозащиту фрагмента ограждающей конструкции каждого элемента. Накопление данных об удельных потоках теплоты через линейные и точечные элементы позволит создавать достаточно простые инженерные методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче современных ограждающих конструкций, содержащих различные теплотехнические неоднородности. Такой подход позволит также упростить контроль результатов расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции. Этот контроль, по сути, сведется к анализу используемых при расчете по формуле (7) значений U_i, Ψ_j, K_k ; если какое-то из этих значений получилось меньшим, чем в других аналогичных случаях, то оно требует проверки и объяснения.

Таким образом, расчет величины R_o^{np} по методикам, основанным на использовании формулы (7), является предпочтительным по сравнению с методиками, основанными на формуле (2).

Сравнение фрагментного и элементного подходов к расчету приведенного сопротивления теплопередаче

Фрагментный и элементный подходы при адекватном разбиении фрагмента ограждающей конструкции на части и выделении элементов должны давать одинаковые результаты расчетов в границах точности вычислений.

Сложности построения адекватной и оптимальной разбивки иллюстрирует рис. 1, где представлена схема

небольшого фрагмента стены здания с расстановкой металлических кронштейнов для крепления подконструкции теплоизоляционного вентилируемого фасада и дюбелей с металлическим сердечником для крепления минераловатных плит. Вследствие разного размера минераловатных плит и шага расстановки кронштейнов даже вдали от оконных откосов трудно выбрать идентичные участки на поверхности конструкции. Наличие оконных откосов усложняет этот выбор. А после выбора таких участков провести границы разбивки на части из условий симметрии температурного поля не представляется возможным. Даже если эта работа будет проделана, то придется рассчитывать не один десяток трехмерных температурных полей, содержащих по несколько разнородных теплопроводных включений, физически весьма затруднительно.

При элементном подходе во фрагменте выделяется набор различающихся между собой элементов. Такое разбиение является простым при выполнении и доступно для систематизации и описания теплопотерь через различные элементы. В практических случаях элементный подход требует несопоставимо меньше вычислительных затрат. Рассмотренный выше (рис. 1) фрагмент стены здания состоит из одного вида основания и фасадной системы. В качестве элементов легко выделяется стена с основанием и минераловатными плитами, тарельчатые дюбели со стальным сердечником, кронштейны навесной фасадной системы и оконные откосы. Если дюбели, кронштейны и оконные откосы используются одной разновидностью, то для проведения расчета по поэлементному подходу достаточно рассчитать по одному температурному полю для дюбеля, кронштейна и оконного откоса (всего три поля) и правильно подсчитать геометрические характеристики неоднородностей.

Существует ошибочное мнение, что фрагментный метод расчета соответствует методу измерений приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента конструкции в климатической камере. Нечеткость определения приведенного сопротивления теплопередаче в нормативной базе и справочной литературе приводит к недопониманию того, что требуется сделать при измерении приведенного сопротивления теплопередаче, а сделать требуется немало.

Во-первых, следует заметить, что для определения приведенного сопротивления теплопередаче стены здания по первому методу испытания одного фрагмента конструкции будет явно недостаточно. Одного испытания хватило бы при условии, что вся стена состоит из периодически повторяющихся фрагментов одного вида. На практике это невыполнимо, так как наличие окон, входной двери и углов внесут разнообразие в любую конструкцию.

Во-вторых, для измерения приведенного сопротивления теплопередаче с помощью термометров фрагмент конструкции нужно разбить на части, в пределах которых удельный поток теплоты изменяется плавно и в ограниченных пределах. С некоторой натяжкой это позволяет подготовленному специалисту расставить термометры таким образом, чтобы каждый термометр показывал удельный тепловой поток через свою часть фрагмента. Очевидно, что такое деление на части крайне затруднительно и уж точно не совпадает с разбиением при фрагментном подходе. Каждый подфрагмент, выделенный для расчета температурного поля, не может быть описан результатами измерений одного термометра и требует дополнительного деления на участки, то есть при внешнем сходстве формул разбиения на участки для фрагментного способа расчета и для измерения различаются.

Элементный подход и формула (7) позволяют оценить рекомендованные СП [2] эмпирические и полуэм-

пирические методики расчета R_o^{np} , основанные на использовании формулы:

$$R_o^{np} = R_o^{ysl} r. \quad (9)$$

Прежде всего эти методы справедливы для фрагмента, имеющего только один плоский элемент. Данный элемент будет представлять собой условную ограждающую конструкцию, для которой $R_o^{ysl} = 1/U$ и $s = 1$. Согласно следствию из приведенного выше определения, а также из (9) коэффициент теплотехнической однородности равен:

$$r = \frac{R_o^{np}}{R_o^{ysl}} = \frac{U}{U + \sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k} = \left[1 + \frac{\sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k}{U} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Если же во фрагменте имеется несколько плоских элементов, то логичным представляется расчет величины r по формуле, обобщающей (10) и позволяющей оценить роль линейных и точечных элементов относительно всех плоских элементов:

$$r = \frac{\sum U_i s_i}{\sum U_i s_i + \sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k} = \left[1 + \frac{\sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k}{\sum U_i s_i} \right]^{-1}. \quad (11)$$

Однако в таких случаях зачастую выбирается один плоский элемент, имеющий для определенности номер i_0 , и рассчитывается r_{i_0} относительно именно этого плоского элемента, что ничем не обосновано, по формуле:

$$r_{i_0} = \frac{U_{i_0}}{\sum U_i s_i + \sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k}. \quad (12)$$

Выражения (10), (11) или (12) не являются характеристиками теплозащиты ограждающей конструкции, они могут характеризовать только долю теплопотерь через точечные и линейные элементы относительно выбранных (не всегда корректно) плоских элементов. Вообще говоря, расчеты коэффициента теплотехнической однородности r являются ненужными для практических целей. Из рассмотрения (10)–(12) следует, что величина r , как и методика его вычисления, представленные в многочисленных пособиях, в том числе в СП [2], является эмпирической и, следовательно, методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче на основании формулы (9) имеют весьма ограниченную область применения. Таким образом, расчет на основании формулы (9), как это допускается СП, является фактически более сложным, чем расчет на основании формулы (7), и может иметь только ограниченное применение, как и любой расчет, основанный на эмпирических формулах.

Методика расчета удельных потоков теплоты, обусловленных элементами фрагмента ограждающей конструкции

Плоский элемент

Плоский элемент является по сути условной многослойной ограждающей конструкцией. Удельный поток теплоты, обусловленный этим элементом, представляет собой коэффициент теплопередачи этой конструкции и определяется по хорошо известной формуле

$$U = \frac{1}{R_o^{ysl}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_n}}, \quad (13)$$

где α_g – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности конструкции, Вт/(м²·°C); α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности конструкции, Вт/(м²·°C); R_i – термическое сопротивление однородного слоя условной конструкции (заполнения), м²·°C/Вт, определяемое для замкнутых воздушных прослоек по табличным значениям [2], для материальных слоев – по формуле: $R_i = \delta_i / \lambda_i$, здесь i – номер слоя; δ_i – толщина слоя, м; λ_i – теплопроводность материала слоя, Вт/(м·°C).

Линейный элемент

Линейный элемент либо располагается на границе фрагмента ограждающей конструкции, либо разделяет два соседних плоских элемента, которые могут быть конструктивно одинаковыми. Способ определения потока теплоты, обусловленного линейным элементом, заключается в определении и последующем сравнении потоков теплоты, с одной стороны, через участок фрагмента, состоящий из двух соседних плоских элементов и линейного элемента, и, с другой – через условный участок фрагмента, состоящий из этих же двух соседних плоских элементов той же площади, но «не состыкованных» между собой и при отсутствии линейного элемента. Первый поток вычисляется на основе двумерного температурного поля, а второй – по формулам для одномерного теплопереноса.

Удельный поток теплоты через линейный элемент, например стык между конструкциями, определяется по формуле:

$$\Psi_j = \frac{\Delta Q_j^L}{t_g - t_n}, \quad (14)$$

где ΔQ_j^L – дополнительный поток теплоты, обусловленный линейным элементом j -го вида, приходящийся на 1 п. м этого элемента, Вт/м, определяемый по формуле:

$$\Delta Q_j^L = Q_j^L - Q_{j,1} - Q_{j,2}, \quad (15)$$

где Q_j^L – поток теплоты через участок фрагмента с линейным элементом j -го вида, приходящийся на 1 п. м линейного элемента, являющийся результатом расчета двумерного температурного поля, Вт/м; $Q_{j,1}$, $Q_{j,2}$ – потоки теплоты через соответствующие плоские элементы, включенные в состав рассматриваемого участка фрагмента, Вт/м, определяемые по формулам:

$$Q_{j,1} = \frac{t_g - t_n}{R_{o,j1}} \cdot S_{j,1}, \quad Q_{j,2} = \frac{t_g - t_n}{R_{o,j2}} \cdot S_{j,2}, \quad (16)$$

где b – протяженность расчетной области при расчете двумерного температурного поля в направлении, перпендикулярном сечению, равная 1 м; $S_{j,1}$, $S_{j,2}$ – площади плоских элементов, вошедших в расчетную область при расчете температурного поля, м².

При этом величина $S_{j,1} + S_{j,2}$ равна площади расчетной области, принятой при расчете температурного поля.

Точечный элемент

Точечный элемент в большинстве случаев находится в плоском элементе фрагмента ограждающей конструкции. Способ определения потоков теплоты через точечный элемент заключается в определении и последующем сравнении потоков теплоты, с одной стороны, через участок фрагмента, состоящий из плоского элемента и точечного элемента, и с другой – через условный участок фрагмента, состоящий только из этого плоского элемента, той же площади. Первый поток вы-

числяется на основе трехмерного температурного поля, а второй поток — по формуле для одномерного теплопереноса.

Удельный поток теплоты, обусловленный точечным элементом, определяется по формуле:

$$K_k = \frac{\Delta Q_k}{t_a - t_n}, \quad (17)$$

где K_k — удельный поток теплоты через точечный элемент k -го вида, Вт/°С; ΔQ_k — дополнительный поток теплоты через точечный элемент k -го вида, Вт, определяемый по формуле:

$$\Delta Q_k = Q_k - \tilde{Q}_k, \quad (18)$$

где Q_k — поток теплоты через плоский элемент, содержащий точечный элемент k -го вида, являющийся результатом расчета трехмерного температурного поля, Вт; \tilde{Q}_k — поток теплоты через тот же плоский элемент, Вт, не содержащий точечный элемент, определяемый по формуле:

$$\tilde{Q}_k = \frac{t_a - t_n}{R_{o,k}} \cdot S_k, \quad (19)$$

где S_k — площадь однородного заполнения, вошедшего в расчетную область при расчете температурного поля, м².

Таким образом, для расчета удельного потока теплоты, обусловленного плоским элементом, требуется расчет на основе одномерного температурного поля, линейным элементом — на основе двумерного температурного поля, точечным элементом — на основе трехмерного температурного поля. Сумма размерности проекции элемента и размерности температурного поля, требуемого для вычисления удельного потока теплоты, обусловленного этим элементом, равна трем.

Методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции

Рассмотренный выше подход, основанный на выделении влияния отдельных элементов ограждающей конструкции, и способы определения удельных потоков теплоты, обусловленные этими теплопроводными включениями, позволяют сформулировать алгоритм расчета приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции.

1. Из рассматриваемого фрагмента ограждающей конструкции выделяют элементы. Определяют их проекции на плоскость ограждающей конструкции. Проводят классификацию этих элементов по форме их проекций на плоские, линейные и точечные.
2. Для каждого элемента определяют абсолютные, а затем по формуле (8) относительные геометрические характеристики: для плоских — площадь проекции на поверхность ограждающей конструкции и долю этой площади проекции от общей площади поверхности фрагмента; для линейных — общую длину проекции на поверхности ограждающей конструкции и длину, приходящуюся на 1 м² общей площади поверхности фрагмента; для точечных — общее количество на проекции фрагмента и количество, приходящееся на 1 м² общей площади поверхности фрагмента.
3. Для каждого элемента определяют удельные потери теплоты: для плоских — по формуле (13); для линейных — по формуле (14) на основе расчета двумерного температурного поля; для точечных — по формуле (17) на основе расчета трехмерного температурного поля.
4. По формуле (7) рассчитывают значение приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции.

Пример расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции

Требуется произвести расчет приведенного сопротивления теплопередаче стены с теплоизоляционной фасадной системой с тонким штукатурным слоем. Фасадная система монтируется на стену здания, выполненного с каркасом из монолитного железобетона. Наружные стены выполняются из кирпичной кладки из полнотелого кирпича толщиной 250 мм (в один кирпич). Толщина теплоизоляционного слоя фасада из минераловатных плит составляет 150 мм. Высота этажа от пола до пола 3300 мм. Толщина железобетонного перекрытия 200 мм. Под перекрытием проходит железобетонный ригель высотой 400 мм. Вертикальный разрез стены с фасадом и оконными проемами схематично представлен на рис. 2. Состав стены (изнутри наружу) представлен в табл. 1.

Расчет проводится по приведенному выше алгоритму. Фрагментом ограждающей конструкции, для которого требуется определить приведенное сопротивление теплопередаче, является вся стена здания без светопроемов.

1. Выделение элементов во фрагменте ограждающей конструкции.

Поверхностью фрагмента ограждающей конструкции является наружная поверхность стены. Выделяемые элементы конструкции следующие:

- железобетонный ригель с участком перекрытия, утепленный слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки, — плоский элемент;
- кирпичная кладка, утепленная слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки, — плоский элемент;
- оконный откос, образованный железобетонным ригелем, утепленным слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки, — линейный элемент;
- оконный откос, образованный кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки, — линейный элемент;
- дюбель со стальным сердечником, прикрепляющий слой минераловатной плиты к железобетонному ригелю, — точечный элемент;
- дюбель со стальным сердечником, прикрепляющий слой минераловатной плиты к кирпичной кладке, — точечный элемент.

Таким образом, в рассматриваемом фрагменте ограждающей конструкции два вида плоских, два вида линейных и два вида точечных элементов.

2. Геометрические характеристики проекций элементов.

Весь фасад, включая светопроемы, имеет общую площадь 2740 м². Фасад содержит следующие светопроемы: 2400×2000 мм — 80 шт; 1200×2000 мм — 80 шт; 1200×1200 мм — 24 шт. Суммарная площадь светопроемов 611 м².

Площадь поверхности фрагмента ограждающей конструкции для расчета R_o^{np} составляет: $A = 2740 - 611 = 2129$ м².

Суммарная протяженность торцов перекрытий, а также ригелей на фасаде составляет 822 м. Таким образом, площадь стены с основанием из монолитного железобетона, т. е. площадь проекции на поверхность фрагмента составляет: $A_1 = 822 \cdot (0,2 + 0,4) = 493$ м². Доля этой площади от общей площади фрагмента ограждающей конструкции равна:

$$s_1 = \frac{493}{2129} = 0,232 \text{ м}^2 / \text{м}^2.$$

Площадь стены с основанием из кирпичной кладки: $A_2 = 2129 - 493 = 1636$ м². Доля этой площади от общей площади фрагмента ограждающей конструкции равна:

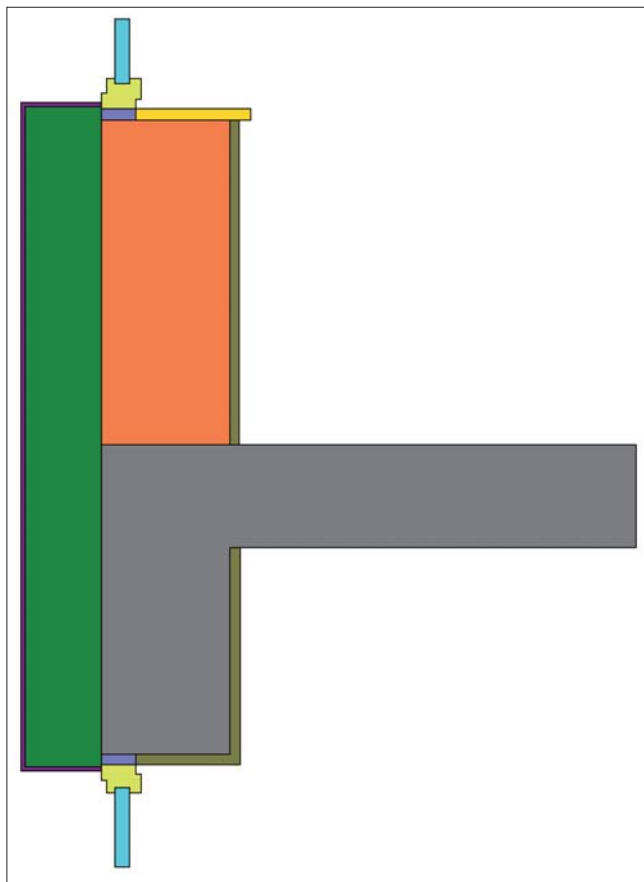


Рис. 2. Схема вертикального разреза стены с теплоизолированным фасадом в зоне расположения светопроемов с оконными блоками

Таблица 1

Материал слоя	δ, мм	λ, Вт/(м·°С)
Внутренняя штукатурка	20	0,93
Кладка из полнотелого кирпича или монолитный железобетон	250 250	0,81 2,04
Минераловатные плиты	150	0,045
Наружная штукатурка	6	–

$$s_2 = \frac{1636}{2129} = 0,768 \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Общая длина проекции оконного откоса, образованного железобетонным ригелем, утепленным слоем минераловатной плиты, определяется по экспликации оконных проемов и равна: $L_1 = 2,4 \cdot 80 + 1,2 \cdot 80 + 1,2 \cdot 24 = 317$ м. Длина проекции этих откосов, приходящаяся на 1 м² площади фрагмента, равна:

$$l_1 = \frac{317}{2129} = 0,149 \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Общая длина проекции оконного откоса, образованного кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты, определяется по экспликации оконных проемов и равна: $L_2 = (2,4 + 2 \cdot 2,0) \cdot 80 + (1,2 + 2 \cdot 2,0) \cdot 80 + (1,2 + 2 \cdot 2,0) \cdot 24 = 1014$ м. Длина проекции этих откосов, приходящаяся на 1 м² площади фрагмента, равна:

$$l_2 = \frac{1014}{2129} = 0,476 \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Общее количество тарельчатых дюбелей на железобетонном ригеле и торце перекрытия равно 3944 шт. Количество таких дюбелей, приходящихся на 1 м² фрагмента, равно:

$$n_1 = \frac{3944}{2129} = 1,85 \text{ 1/м}^2.$$

Общее количество тарельчатых дюбелей на кирпичной кладке равно 13088 шт. Количество таких дюбелей, приходящихся на 1 м² фрагмента, равно:

$$n_2 = \frac{13088}{2129} = 6,15 \text{ 1/м}^2.$$

Таким образом, определены все геометрические характеристики элементов в рассматриваемом фрагменте ограждающей конструкции.

3. *Определение удельных потоков теплоты, обусловленных элементами.*

Для плоского элемента в виде железобетонного ригеля с участком перекрытия, утепленного слоем минераловатной плиты, удельные потери теплоты определяют по формуле (13):

$$R_{o,1}^{уст} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,25}{2,04} + \frac{0,15}{0,045} + \frac{1}{23} = 3,64 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт};$$

Таблица 2

Элемент фрагмента	Размерность проекции элемента на поверхность фрагмента	Потоки теплоты через участок однородной стены	Потоки теплоты через неоднородный участок	Удельные потоки теплоты	Удельный геометрический показатель
Оконный откос, образованный железобетонным ригелем, утепленным слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки (рис. 3)	Линейная	$Q_{1,1} = 7 \text{ Вт/м}$	$Q_1^L = 12 \text{ Вт/м}$	$\psi_1 = 0,104 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$	$l_1 = 0,149 \text{ м}^2/\text{м}^2$
Оконный откос, образованный кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки (рис. 4)		$Q_{2,1} = 6,7 \text{ Вт/м}$	$Q_2^L = 11,2 \text{ Вт/м}$	$\psi_2 = 0,094 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$	$l_2 = 0,476 \text{ м}^2/\text{м}^2$
Дюбель со стальным сердечником, прикрепляющий слой минераловатной плиты к железобетонному ригелю (рис. 5)	Точечная	$\tilde{Q}_1 = 1,65 \text{ Вт}$	$Q_1 = 1,9 \text{ Вт}$	$K_1 = 0,0052 \text{ Вт/°С}$	$n_1 = 1,85 \text{ 1/м}^2$
Дюбель со стальным сердечником, прикрепляющий слой минераловатной плиты к кирпичной кладке (рис. 6)		$\tilde{Q}_2 = 1,57 \text{ Вт}$	$Q_2 = 1,8 \text{ Вт}$	$K_2 = 0,0048 \text{ Вт/°С}$	$n_2 = 6,15 \text{ 1/м}^2$

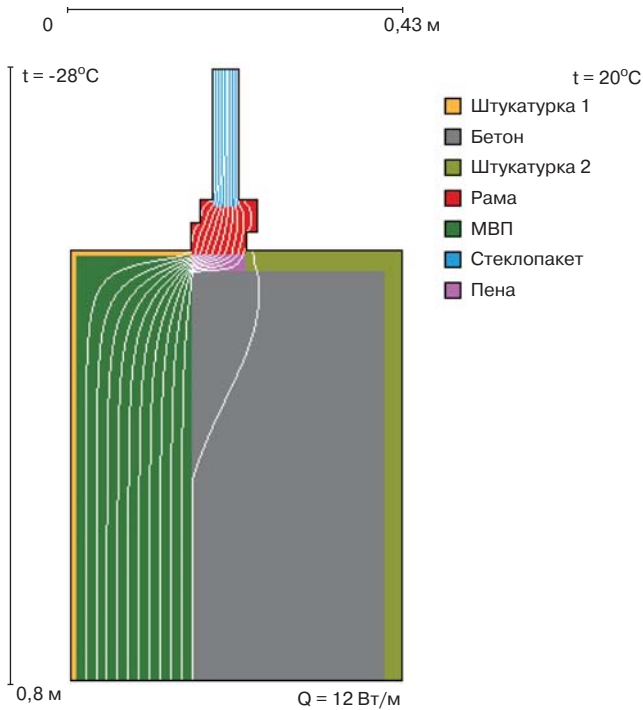


Рис. 3. Температурное поле в зоне оконного откоса по железобетонному ригелю

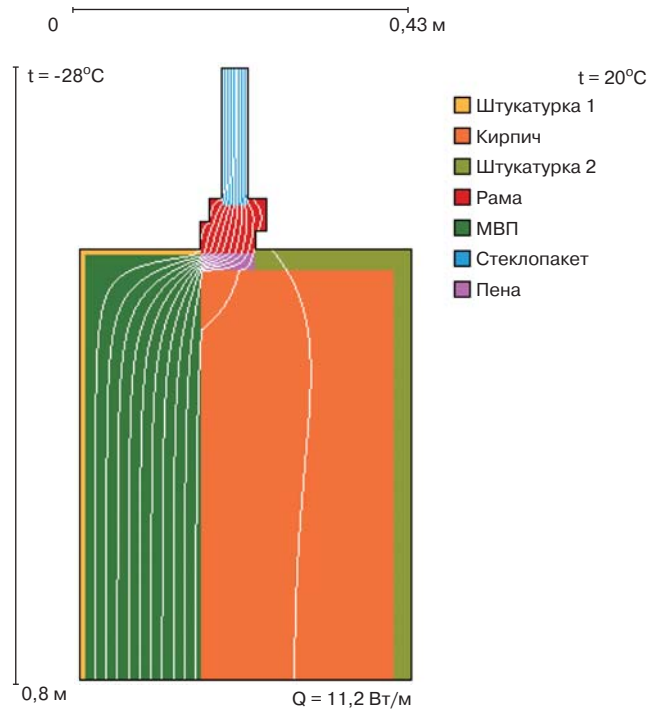


Рис. 4. Температурное поле в зоне оконного откоса по стене из кирпичной кладки

$$U_1 = \frac{1}{R_{o,1}^{ysel}} = \frac{1}{3,64} = 0,275 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Для плоского элемента в виде кирпичной кладки, утепленной слоем минераловатной плиты, удельный поток теплоты определяется по формуле (13):

$$R_{o,2}^{ysel} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,25}{0,81} + \frac{0,15}{0,045} + \frac{1}{23} = 3,82 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

$$U_2 = \frac{1}{R_{o,1}^{ysel}} = \frac{1}{3,82} = 0,262 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Для линейного элемента в виде оконного откоса, образованного железобетонным ригелем, определяется величина $Q_{l,1}^l$, Вт/м, – поток теплоты через участок фрагмента с данным линейным элементом, приходящийся на 1 п. м, являющийся результатом расчета двумерного температурного поля (рис. 3).

Расчетный участок имеет размеры 426×800 мм. Площадь стены, вошедшей в расчетный участок, $S_{l,1} = 0,532 \text{ м}^2$.

Поток теплоты через стену с оконным откосом, вошедшую в участок, по результатам расчета температурного поля равны $Q_l^l = 12 \text{ Вт}/\text{м}$.

Поток теплоты через участок однородной стены той же площади определяется по формуле (16):

$$Q_{l,1} = \frac{20 - (-28)}{3,64} \cdot 0,532 = 7 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Дополнительный поток теплоты через верхний откос определяется по формуле (15):

$$\Delta Q_l^l = 12 - 7 = 5 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Удельный линейный поток теплоты через верхний откос определяется по формуле (14):

$$\Psi_1 = \frac{5}{20 - (-28)} = 0,104 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}).$$

Расчеты удельных характеристик других элементов проводятся аналогично и сведены в табл. 2.

Таким образом, определены все удельные потоки теплоты, обусловленные всеми элементами в рассматриваемом фрагменте ограждающей конструкции.

4. Определение приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции.

Определенные в предыдущих пунктах удельные геометрические показатели и удельные потоки теплоты, обусловленные элементами фрагмента ограждающей конструкции, сведены в табл. 3.

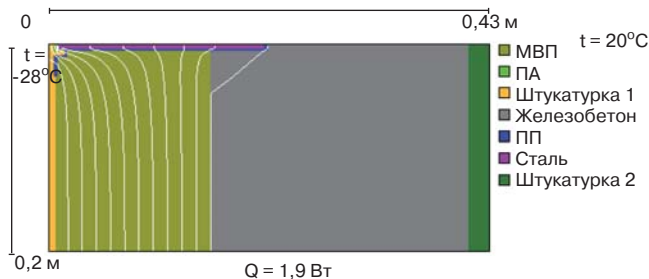


Рис. 5. Температурное поле в зоне расположения дюбеля, закрепленного в железобетонном ригеле

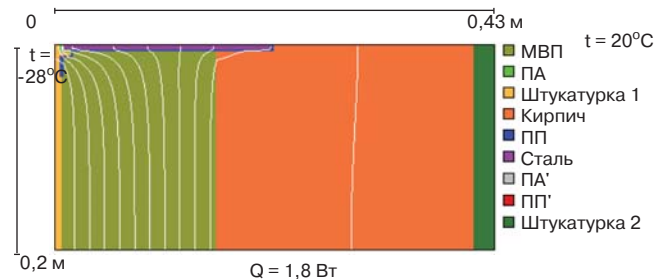


Рис. 6. Температурное поле в зоне расположения дюбеля, закрепленного в кирпичной кладке

Таблица 3

Элемент фрагмента	Размерность проекции элемента на поверхность фрагмента	Удельный геометрический показатель	Удельные потоки теплоты	Удельный поток теплоты, обусловленный элементом	Доля от общего потока теплоты через фрагмент, %
Железобетонный ригель с участком перекрытия, утепленный слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки	Плоская	$s_1 = 0,232 \text{ м}^2/\text{м}^2$	$U_1 = 0,275 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	$U_1 s_1 = 0,0638 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	17,5
Кирпичная кладка, утепленная слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки		$s_2 = 0,768 \text{ м}^2/\text{м}^2$	$U_2 = 0,262 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	$U_2 s_2 = 0,201 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	55,2
Оконный откос, образованный железобетонным ригелем, утепленным слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки	Линейная	$l_1 = 0,149 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_1 = 0,104 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_1 l_1 = 0,0155 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	4,26
Оконный откос, образованный кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты, закрытой тонким слоем штукатурки		$l_2 = 0,476 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_2 = 0,094 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_2 l_2 = 0,0447 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	12,3
Дюбель со стальным сердечником, прикрепляющий слой минераловатной плиты к железобетонному ригелю	Точечная	$n_1 = 1,85 \text{ 1}/\text{м}^2$	$K_1 = 0,0052 \text{ Вт}/\text{°C}$	$K_1 n_1 = 0,00962 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	2,64
Дюбель со стальным сердечником, прикрепляющий слой минераловатной плиты к кирпичной кладке		$n_2 = 6,15 \text{ 1}/\text{м}^2$	$K_2 = 0,0048 \text{ Вт}/\text{°C}$	$K_2 n_2 = 0,0295 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	8,1

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции определяется по формуле (7):

$$R_o^{np} = \frac{1}{0,0638 + 0,201 + 0,0155 + 0,0447 + 0,00962 + 0,0295} = \frac{1}{0,364} = 2,75 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Коэффициент теплотехнической однородности, определенный по формуле (11), равен:

$$r_{i0} = \frac{0,201 + 0,0638}{0,364} = 0,73.$$

Оставляя в стороне анализ полученного значения R_o^{np} , можно отметить простоту определения этого значения. Потребовался расчет всего четырех температурных полей. Данные табл. 3 позволяют провести анализ и наметить пути повышения теплозащиты ограждающей конструкции.

Закключение

Таким образом, сформулировано определение (дефиниция) понятия приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции. Рассмотрены два подхода к определению значения этой величины. Первый подход, который назван *фрагментным*, в большинстве случаев непригоден для адекватных расчетов R_o^{np} . Другой подход, названный *элементным*, является очень удобным именно для проведения расчетов значений R_o^{np} фрагментов ограждающих конструкций, которые требуются для расчетов энергопотребления зданий. Изложена методика соответствующего расчета, которая проиллюстрирована примером. Элементный подход является хорошей основой для разработки инженерных методик расчета R_o^{np} , которые сможет использовать рядовой проектировщик. Примеры подобных расчетов для некоторых конструкций приведены в [7, 8]. Элементный подход представляется также удобным с точки зрения проверки результатов расчета при экспертизе раздела проекта «Энергоэффективность».

Замена в нормативных документах методик расчета фрагментного подхода на методики элементного подхода послужит реальным действием, направленным на повышение теплозащиты ограждающих конструкций проектируемых зданий без повышения требуемых значений сопротивления теплопередаче и без увеличения стоимости строительства.

Ключевые слова: *приведенное сопротивление теплопередаче; теплотехническая неоднородность; удельный поток теплоты; элементный подход; линейный элемент; точечный элемент; плоский элемент; фрагмент ограждающей конструкции.*

Список литературы

1. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». М., 2004.
2. СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий». М., 2004.
3. Татаринов В.А. О необходимости изменений и дополнений в СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 423–427.
4. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Крышов С.И., Пономарев О.И. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки // Журнал АВОК. 2009. Ч. 1. № 5. С. 48–56. Ч. 2. № 6. С. 48–55.
5. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.-Л.: ОНТИ, гл. ред. стр. лит., 1937. 251 с.
6. ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций».
7. Козлов В.В. Исследование теплотехнических свойств теплоизоляционного фасада с тонким штукатурным слоем в зоне расположения дюбеля // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 346–355.
8. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 297–305.