Применение методики учета теплотехнических неоднородностей ограждающих конструкций из актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» для расчета нагрузки на системы отопления и охлаждения зданий

В. Г. Гагарин, профессор НИИСФ РААСН

А. Ю. Неклюдов, инженер, аспирант МГСУ

Введение

При актуализации СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» [1] требования к значениям сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий не были повышены, однако в СНиП была введена методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Данная методика, в другой форме, применялась при расчете теплозащиты ограждающих конструкций [2], по применяемым обозначениям удельных потоков теплоты через теплотехнические неоднородности ограждений она была гармонизирована с европейскими нормами [3, 4, 5]. Теоретическое обоснование данной методики, основанной на элементном подходе приведено в [6]. Применение методики позволяет достаточно точно определить приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий и избежать спекуляций, связанных с неоправданным повышением толщины слоя теплоизоляционного материала в ограждающей конструкции, якобы для повышения «энергоэффективности». Гармонизация обозначений удельных потоков теплоты через теплотехнические неоднородности и подходов к расчету характеристик теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах позволила проводить сравнение нормативных требований и методов расчета с европейскими нормативными документами [7].

Настоящая статья посвящена дальнейшему развитию указанной методики: описанию применения удельных потоков теплоты через теплотехнические неоднородности ограждений для расчетов трансмиссионной составляющей нагрузки при проектировании систем отопления и охлаждения зданий. Рассмотрено практическое применение СП 50.13330.2012 при проектировании системы отопления зданий.

Использование приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций при проектировании систем отопления и охлаждения

Зададимся вопросом: зачем вообще надо рассчитывать и нормировать приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций? В последние, без малого, 20 лет требуемые сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций нормируются в зависимости от градусо-суток отопительного периода (ГСОП). Это означает, что они используются для вычисления потребления тепловой энергии за отопительный период, т. е. за год. А зачем нужно знать это потребление энергии? Для того чтобы вычислить, сколько энергии следует потратить на отопление здания. А это, в свою очередь, нужно, чтобы определить «класс энергоэффективности», который в перспективе должен влиять на стоимость 1 м^2 площади здания. То есть нормируемые таким образом значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций отражают эксплуатационные свойства здания. Характеристик, отражающих эксплуатационные свойства зданий, много, и сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций — только одни из них. Однако понятие сопротивления теплопередаче было введено исходя из других соображений, оно потребовалось для того, чтобы рассчитать трансмиссионную составляющую тепловой

нагрузки на систему отопления здания, а затем произвести тепловой расчет и подобрать отопительные приборы, которые компенсировали бы эту нагрузку. Именно работа системы отопления и обеспечивает повышение энергоэффективности здания. Поэтому нормирование сопротивления теплопередаче целесообразно проводить исходя из того, что нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций будет использовано для расчета нагрузки на систему отопления здания.

Для расчета нагрузки на систему отопления с конца XIX века использовалось уравнение, согласно которому тепловой поток в единицу времени через ограждающую конструкцию составляет

$$Q = K \cdot A \cdot (t_в - t_н)(1 + \Sigma\beta_i), \quad (1)$$

где $t_в$, $t_н$ — температура воздуха по разные стороны ограждающей конструкции, °С;
A — площадь ограждающей конструкции м^2;
K — коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, Вт/(м^2°С).

Множитель $(1+\Sigma\beta_i)$ учитывает различные поправочные коэффициенты.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, является сопротивлением теплопередаче, причем по своему смыслу это *приведенное* сопротивление теплопередаче, т.к. величина K отражает все теплопотери через ограждающую конструкцию как по глади, так и через теплопроводные включения. В то время ограждающие конструкции были однослойными и на учет отдельных теплопроводных включений не обращалось внимания. Коэффициент K принимался одинаковым для всех помещений здания. С развитием техники строительства ограждающие конструкции в основном стали многослойными, обладающими теплопроводными включениями.

Согласно СП 50.13330.2012 приведенное сопротивление теплопередаче, следовательно, коэффициент теплопередачи, можно рассчитывать для ограждающих конструкций каждого помещения по формуле вида [5]

$$K = \frac{1}{R_o^{пр}} = \left[\Sigma(a_i \cdot U_i) + \Sigma(l_j \cdot \psi_j) + \Sigma(n_k \cdot \chi_k)\right], \text{ Вт/(м}^2\text{°С)}, \quad (2)$$

где K — коэффициент теплопередачи несветопрозрачных наружных ограждающих конструкций помещения, °Вт/(м^2 °С);
$R_o^{пр}$ — приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций помещения, (м^2°С)/Вт;
A — суммарная площадь наружных ограждающих конструкций помещения, м^2;
a_i — относительная площадь плоского элемента конструкции i-го вида, приходящаяся на 1 м^2 ограждающей конструкции, м^2/м^2;
l_j — относительная протяженность линейной неоднородности j-го вида, приходящаяся на 1 м^2 ограждающей конструкции, м/м^2;
n_k — относительное количество точечных неоднородностей k-го вида, приходящихся на 1 м^2 ограждающей конструкции, шт/м^2;
A_i — площадь плоского элемента конструкции i-го вида, м^2;
L_j — протяженность линейной неоднородности j-го вида, м;
N_k — количество точечных неоднородностей k-го вида, шт.;
U_i — коэффициент теплопередачи однородной i-той части ограждающей конструкции, Вт/(м^2°С);
ψ_j — удельные потери теплоты через линейную неоднородность j-го вида, Вт/(м°С);
χ_k — удельные потери теплоты через точечную неоднородность k-го вида, Вт/°С.

Методика расчетов величин ψ и χ приведена в [1]. В НИИСФ РААСН совместно с ОАО ЦНИИПромзданий разработан проект Свода правил «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей» (отв. исполнитель к. т. н. ведущий научный сотрудник НИИСФ В. В. Козлов). В данном документе содержатся схемы теплотехнических неоднородностей с расчетными значениями удельных потоков теплоты через них. Этот СП подготовлен к печати и будет издан в ближайшее время.

При замене относительных геометрических и количественных характеристик элементов ограждений a_i, l_j, n_k на абсолютные значения A_i, L_j, N_k она преобразуется к виду (3):

$$H = K \cdot A = \left[\Sigma(A_i \cdot U_i) + \Sigma(L_j \cdot \psi_j) + \Sigma(N_k \cdot \chi_k)\right], \text{Вт/(°C)}, \quad (3)$$

H — удельная теплопередача ограждения, Вт/°С.

Таким образом, традиционная формула для расчета трансмиссионного потока теплоты принимает вид (4):

$$Q_{тр} = K \cdot A \cdot (t_в - t_н) \cdot (1 + \Sigma\beta_i) = H \cdot (t_в - t_н) \cdot (1 + \Sigma\beta_i), Вт, \quad (4)$$

где $t_в$ и $t_н$ — температуры воздуха внутри помещения и снаружи соответственно, °С.

Множитель $(1 + \Sigma\beta_i)$, учитывающий различные поправочные коэффициенты, может быть изъят в результате адаптации поправочных коэффициентов. Тогда, для каждого *i*-того помещения можно рассчитать трансмиссионный поток теплоты по формуле (5):

$$Q_{тр,i} = H_i \cdot (t_в - t_н), Вт. \quad (5)$$

Впоследствии значения удельной теплопередачи ограждений можно использовать и для расчета тепловых поступлений в помещения в теплый период года, что необходимо для расчета нагрузок на системы холодоснабжения и кондиционирования воздуха.

Формирование матриц с теплотехническими и геометрическими характеристиками наружных ограждающих конструкций помещений здания

Для современных многоэтажных зданий расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, коэффициентов теплопередачи и удельной теплопередачи ограждения по формулам (2) и (3), а затем трансмиссионного потока теплоты по формуле (5) для всех помещений представляет собой сложную комплексную задачу, требующую особой тщательности от инженера-проектировщика. Поэтому предлагается выполнять расчеты с использованием матричного представления исходных данных (матричный метод) [8].

Совокупность значений трансмиссионных потоков теплоты для всех помещений здания можно представить в виде вектора-столбца (6):

$$Q_{тр} = \begin{pmatrix} Q_{тр\,1} \\ Q_{тр\,2} \\ Q_{тр\,3} \\ \dots \\ Q_{тр\,n} \end{pmatrix}, Вт. \quad (6)$$

Для получения матрицы, представляющей собой вектор-столбец (6), координаты которого являются трансмиссионными потерями теплоты помещений здания, необходимо выполнить операцию умножения матриц (7):

$$Q_{тр} = \Delta T \cdot H, Вт. \quad (7)$$

Количество строк в такой матрице — количество помещений здания, равное *n*.

ΔT — диагональная матрица разниц температур наружного и внутреннего воздуха помещений, °С (8):

$$\Delta T = \begin{pmatrix} (t_{в_1} - t_н)_1 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & (t_{в_2} - t_н)_2 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & (t_{в_3} - t_н)_3 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & (t_{в_n} - t_н)_n \end{pmatrix}, ^oC. \quad (8)$$

H — вектор-столбец удельной теплопередачи через наружные ограждения помещений, Вт/°С (9):

$$H = \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ ... \\ H_n \end{pmatrix}, Вт/^oC. \quad (9)$$

Каждая координата этого вектора соответствует помещению и вычисляется по формуле вида (3). Чтобы определить значения удельной теплопередачи для каждого помещения, необходимо выполнить операцию умножения матриц (10):

$$H = C_t \cdot F, Вт/^oC, \quad (10)$$

где C_t — матрица геометрических и количественных характеристик плоских, линейных и точечных теплопроводных элементов наружных ограждений помещений здания (11):

$$C_t = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & ... & A_{1m} & L_{11} & L_{12} & ... & L_{1m} & N_{11} & N_{12} & ... & N_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & ... & A_{2m} & L_{21} & L_{22} & ... & L_{2m} & N_{21} & N_{22} & ... & N_{2m} \\ A_{31} & A_{32} & ... & A_{3m} & L_{31} & L_{32} & ... & L_{3m} & N_{31} & N_{32} & ... & N_{3m} \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ A_{n1} & A_{n2} & ... & A_{nm} & L_{n1} & L_{n2} & ... & L_{nm} & N_{n1} & N_{n2} & ... & N_{nm} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Каждая строка матрицы геометрических характеристик является набором геометрических и количественных характеристик всех типов элементов для соответствующего *n*-ного помещения здания.

A_{nm} — площадь *m*-того участка поверхности ограждения *n*-ного помещения, м^2;

L_{nm} — длина *m*-того линейного «мостика холода» *n*-ного помещения, м;

N_{nm} — количество *m*-тых точечных «тепловых мостиков» *n*-ного помещения, шт.;

U_m — коэффициент теплопередачи однородной *m*-той части фрагмента ограждающей конструкции, Вт/(м^2°С);

ψ_m — удельные потери теплоты через линейную неоднородность *m*-того вида, Вт/(м °С);

χ_m — удельные потери теплоты через точечную неоднородность *m*-того вида, Вт/°С.

F — вектор-столбец удельных потоков теплоты через соответствующие элементы (12):

$$F = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_m \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \dots \\ \psi_m \\ \chi_1 \\ \chi_2 \\ \dots \\ \chi_m \end{pmatrix}. \qquad (12)$$

Удельные потоки теплоты через светопрозрачные ограждающие конструкции U_m и, соответственно, их геометрические характеристики A_{nm} заносят в соответствующие матрицы (12) и (11) наряду с аналогичными величинами для несветопрозрачных ограждений, т. е. рассматривают заполнения светопроемов как составную часть фрагмента ограждающей конструкции.

Результатом составления матриц (8), (11), (12) и двух операций их умножения (7) и (10) является вектор-столбец (6), который представляет собой набор трансмиссионных потоков теплоты через наружные ограждения для каждого помещения здания.

Расчет трансмиссионных потерь теплоты помещения через внутренние ограждающие конструкции

Помимо наружных ограждений для корректного расчета трансмиссионной составляющей ограждающих конструкций необходимо учесть возможные потери теплоты через внутренние ограждения. Тепловые потоки через внутренние ограждения подлежат учету только в том случае, если разница температур воздуха рассматриваемого помещения и воздуха помещения за рассматриваемым внутренним ограждением превышает 3 °С. Проверка расчетом на конкретных объектах подтвердила целесообразность данного допущения. Снижение точности расчета теплового баланса здания при отсутствии учета перераспределения тепловых потоков через внутренние ограждения, если перепад температур воздуха помещений между рассматриваемым ограждением равен 3 °С и менее, составляет не более 1%, что возможно компенсировать соответствующей поправкой.

Для расчета трансмиссионных тепловых потоков через внутренние ограждения составляются матрицы $\tilde{C}_t$, $\tilde{F}$, $\tilde{H}$, $\Delta\tilde{T}$, $\tilde{Q}$, аналогичные матрицам (6), (8), (9), (11), (12) соответственно. Кроме того, для внутренних ограждений допустимо не учитывать теплопроводные включения: прежде всего ввиду сравнительно небольших значений температурных напоров. Следовательно, матрицы геометрических характеристик (13), удельных потоков теплоты (14) и разниц температур (15) для внутренних ограждений выглядят следующим образом:

$$\tilde{C}_t = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ A_{31} & A_{32} & \dots & A_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{pmatrix}, м^2$$

(13)

$$\tilde{F} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_m \end{pmatrix}, Вт/(м^2\,{}^oC)$$

(14)

$$\Delta\tilde{T} = \begin{pmatrix} (t_{в_1} - t_{в_a})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (t_{в_2} - t_{в_b})_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (t_{в_3} - t_{в_c})_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (t_{в_n} - t_{в_d})_n \end{pmatrix}, {}^oC\,.$$

(15)

Тогда полные трансмиссионные потери теплоты будут представлены суммой матриц трансмиссионных потерь теплоты через наружные ограждения и через внутренние ограждения (16):

$$Q_{тр,\sum} = Q_{тр} + \tilde{Q}_{тр}, Вт \quad .$$

(16)

Рассмотрение примера расчета

Для опробования представленного метода для расчета тепловой мощности системы обогрева был рассмотрен ряд существующих объектов и их системы отопления. В данной работе в качестве объекта представлено двухэтажное общественное здание с подвалом.

Рис. 1

Рис. 2

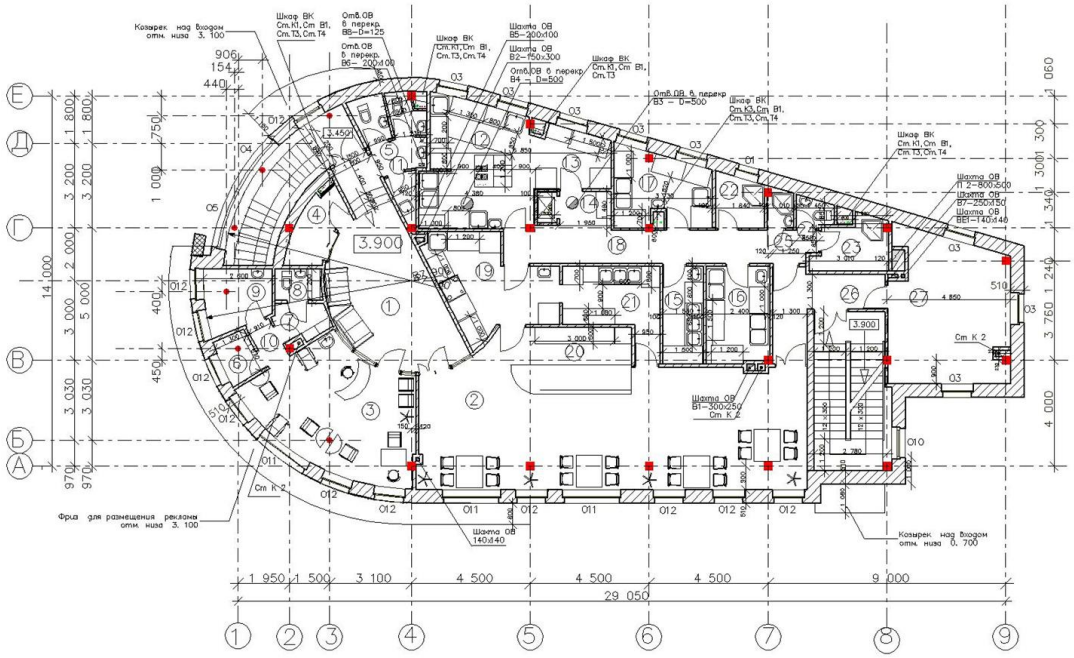

Рис. 3

Сравнение расчетов трансмиссионной составляющей с использованием существующего и матричного методов показало расхождения в значениях трансмиссионных тепловых потерь. Это расхождение вызвано из-за осреднения линейных и точечных теплопроводных включений по площади ограждения и некоторой потери точности расчета,

возникающей при использовании традиционной методики. Для отдельно взятых помещений отклонение традиционного метода от предложенного составило до –9,45% в сторону перегрева или до 47,50% в сторону переохлаждения. Особенно большой процент расхождения характерен для помещений с небольшой площадью наружных стен и вызван относительно большим количеством линейных и точечных «мостиков холода» при наличии теплообменных процессов с внутренними ограждениями.

Объект	Трансмиссионные теплопотери согласно матричному методу, Вт	Трансмиссионные теплопотери согласно традиционному методу, Вт	Процент расхождения	Отклонение традиционного метода от предложенного
Подвал	7812	8071	-3,31%	Перегрев
1ый этаж	9451	10135	-7,24%	Перегрев
2ой этаж	18335	17115	6,66%	Переохлаждение
ЛК	9670	10451	-8,07%	Перегрев
ИТОГО	45269	45521	-0,56%	Перегрев
Характерные помещения:				
1.1	6020	6286	-4,42%	Перегрев
2.2	5256	4972	5,41%	Переохлаждение
2.3	3773	3615	4,19%	Переохлаждение
2.5	1027	540	47,47%	Переохлаждение
2.6	563	392	30,45%	Переохлаждение
2.17	779	833	-6,91%	Перегрев
2.27	2516	2651	-5,34%	Перегрев
А	4641	5079	-9,44%	Перегрев

Таблица 1

Заключение

Разработанная методика повышает точность расчетов по определению тепловой мощности системы отопления для здания в целом и для отдельных помещений, учитывает всю современную специфику ограждающих конструкций, наличие теплопроводных включений и действие систем вентиляции. Матричное представление данных дает основание для расчета любых эксплуатационных режимов, что необходимо при внедрении переменного гидравлического режима или расчета любых эксплуатационных режимов и соответствует передовым европейским тенденция для зданий с нулевым энергопотреблением в качестве как конструкторского, так и поверочного инструмента.

Матричный метод — шаг к информационному моделированию расчетов систем отопления здания.

Предлагаемый подход для определения тепловых потерь здания помогает:

— модернизировать методы определения тепловой мощности систем отопления в соответствии со сложившейся практикой устройства систем отопления и вентиляции, особенностями современных ограждающих конструкций, современными методы расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и требованиями нормативных документов;

— одновременно повысить точность расчета и максимально автоматизировать работу проектировщика (проектировщику не требуется выполнять ни одной вычислительной операции: только сбор данных в матрицы и выбор параметров, представление данных).

Разработанный метод применим для расчета вентиляционной составляющей нагрузки на системы отопления/охлаждения с учетом сложной специфики расчета воздухообменов для жилых многоквартирных домов при одновременном учете инфильтрационных затрат теплоты.

Рассмотренный матричный метод — один из вероятных путей развития документа [1] в области взаимодействия с иной нормативной документацией, с алгоритмами создания проекта раздела ОВ, с расчетами проектных и фактических значений потребления тепловой энергии зданиями.

Литература

1. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003».
2. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Крышов С. И., Пономарев О. И. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки. // Журнал АВОК. 2009. Часть 1, № 5, с. 48–56. Часть 2, № 6, с. 48–55.
3. EN 12831:2003. Heating systems in buildings. Methods for calculation of the design heat load. DIN Heizungsanlagen in Gebäuden. Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Deutsche Fassung. Die Europäische Norm.
4. EN ISO 13789. Thermal performance of buildings. Transmission and ventilation heat transfer coefficients. Calculation method. 2007.
5. EN ISO 10211. Thermal Bridges in Building Construction: Heat Flows and Surface Temperatures. Detailed Calculations. 2007.
6. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. // Строительные материалы. 2010. № 12, с. 4–12.
7. Гагарин В. Г., Дмитриев К. А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах. // Строительные материалы. 2013. № 6, с. 14–16.
8. Гагарин В. Г., Неклюдов А. Ю. Учет теплотехнических неоднородностей ограждений при определении тепловой нагрузки на систему отопления здания. // Жилищное строительство. 2014. № 6, с. 3–7.