

Проектирование теплоизоляционной оболочки по максимально допустимым удельным теплопотерям здания

Тимофеев Н.В., Сахновская С.А.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

Энергоэффективность жилых и общественных зданий в настоящее время как раздел рабочего проекта обязателен при проектировании нового строительства, а особенно, при реконструкции зданий. Без должного практического опыта сложно выбрать наиболее оптимальное сочетание конструктивных решений. Если принять в качестве первого приближения минимальные требования обеспечения энергоэффективности (класс «С»), то этому будут соответствовать минимальные соотношения сопротивлений теплопередаче наружных ограждений. Для достижения этой цели разработана математическая модель, определяющая достаточный уровень энергоэффективности зданий при оптимальных соотношениях сопротивлений теплопередаче основных элементов внешней оболочки здания (стены, окна, покрытия). Математическая модель оценена методами математической статистики (критерии Фишера и Стьюдента) и может быть использована для принятия окончательных проектных решений.

Актуальность темы. Новое строительство и термомодернизация зданий требует от проектировщиков обязательной разработки раздела «Энергоэффективность». Учитывая большую гамму строительных материалов, технологий и конструктивных решений по утеплению наружных ограждений, есть вероятность принятия не совсем оптимального ре-

шения. Это также связано с недостаточным практическим опытом и нетиповыми решениями основных узловых соединений. При типовом проектировании существовало обязательное правило составления каталога типовых узлов [1], которые демонстрировали необходимое сопротивление теплопередаче и невозможность образования конденсата в местах с минимальными температурами при расчетных условиях эксплуатации. Принятие оптимального решения ведется в настоящее время исключительно субъективно и не всегда удачно, а поэтому требует дополнительного научного анализа и выработки определенного алгоритма расчета, что и является целью данного исследования.

Постановка задачи. Подразумевается, что составление энергетического паспорта в разделе «Энергоэффективность» будет завершающим этапом всей проектной работы, на котором выявляется класс энергоэффективности и проверяется условие ДБН В.2.6-31 [2]:

$$q_{\text{буд}} \leq E_{\text{max}} \quad (1)$$

где $q_{\text{буд}}$ – расчетное значение удельных теплотрат на отопление здания за отопительный период, кВт·ч/м²;

E_{max} – максимально допустимое значение удельных теплотрат на отопление здания за отопительный период, кВт·ч/м², что устанавливается согласно ДБН В.2.6-31[2] в зависимости от назначения здания, его этажности и температурной зоны эксплуатации здания.

При получении положительного результата можно этап проектирования считать завершенным и приступать к другим разделам проектирования, в частности составлению сметы. При получении отрицательного результата необходимо возвращать проект на доработку. И в первом, и во втором случаях (после доработок) невозможно дать ответ оптимальное ли, с точки зрения соотношения предложенных сопротивлений и минимальных затрат на отопление, принято решение. Для облегчения процесса проектирования предлагается следующий алгоритм выполнения работ, основанный на ином подходе к назначению сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций.

Решение задачи. Поскольку для утверждения проекта достаточно достижения минимального требования по энергоэффективности (не ниже класса «С»), то в первом приближении условие (1) можно принять в виде:

$$q_{\text{буд}} = E_{\text{max}} \quad (2)$$

Тогда годовые затраты тепловой энергии $Q_{\text{рик}}$, кВт·ч, следует находить как:

$$Q_{рик} = E_{max} \cdot F_h \tag{3}$$

где F_h – отапливаемая площадь здания, м².

Опуская расшифровку всех величин, которые позволяют определять $Q_{рик}$, представим теплототери через внешнюю оболочку в виде зависимости:

$$\left(\frac{F_{ин}}{R_{\Sigma прип}} + \frac{F_{ст}}{R_{\Sigma прств}} + \frac{F_{д}}{R_{\Sigma прд}} + \frac{F_{ок}}{R_{\Sigma прок}} + \frac{F_{ц}}{R_{\Sigma приц}} \right) = X, \tag{4}$$

где $F_{ин}$, $F_{ст}$, $F_{д}$, $F_{ок}$, $F_{ц}$ (м²) и $R_{\Sigma прип}$, $R_{\Sigma прств}$, $R_{\Sigma прд}$, $R_{\Sigma прок}$, $R_{\Sigma приц}$ (м²·К/Вт) – соответственно площади и приведенные сопротивления теплопередаче непрозрачной части (внешние стены), светопрозрачной (окна, балконные двери), дверей, покрытия и перекрытия над техподпольем. Площади ограждений есть величины также известные, а значения сопротивлений теплопередаче должны соответствовать минимальным нормативным требованиям;

X – величина, которая включает информацию о затратах на инфильтрацию и вентиляцию, а также бытовые и солнечные тепlopоступления.

Предлагаемая зависимость (4) отвечает в общем виде поставленной цели – обеспечения минимальных требований по энергоэффективности здания. На этом этапе можно устанавливать иной (более высокий класс энергоэффективности), например, «В» или «А». Для этого в формуле (2) вместо E_{max} нужно подставить соответствующее значение.

На следующем этапе необходимо вести поиск оптимального соотношения приведенных в формуле (4) сопротивлений теплопередаче. Дальнейшие расчеты нужно выполнять для конкретного здания. Рассмотрим отдельно расположенную секцию девятиэтажного крупноблочного дома серии 87-Б. О результатах натуральных наблюдений этого дома сообщалось в [3].

Приняв допустимое значение удельных теплотозатрат на уровне $E_{max} = 79$ кВт·ч и воспользовавшись другими характеристиками (геометрическими - $F_h = 2143,3$ м²; $F_{ст} = 2275,5$ м²; климатическими - $D_d = 3750$ гр·сут; энергетическими - $Q_{внп} = 84000$ кВт·ч; $Q_s = 58500$ кВт·ч), а также подставив значения соответствующих площадей, получим расчетную зависимость:

$$\left(\frac{1449,3}{R_{\Sigma прип}} + \frac{327,1}{R_{\Sigma прств}} + \frac{29,5}{R_{\Sigma прд}} + \frac{239,1}{R_{\Sigma прок}} + \frac{230,5 \cdot 0,33}{R_{\Sigma приц}} \right) = 0,683. \tag{5}$$

Следует уточнить, что предварительно с учетом утепления стен подвала выполнялся расчет температуры в техподполье по методике [4]. Она равна $t_u = 6^\circ\text{C}$. Это позволяет не утеплять существующее перекрытие. Для расчетов принимается его сопротивление $R_{\Sigma\text{прп}} = 0,96 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, а коэффициент $n = 0,33$. Условный коэффициент теплопередаче здания, что учитывает теплопотери за счет инфильтрации и вентиляции, составляет $k_{\text{инф}} = 0,59 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Для дальнейших упрощений принимаем данные, которые могут также считаться неизменными. Сопротивление теплопередаче дверей (учитывает теплопотери через лестничную клетку) при замене окон и утеплении стен составит $R_{\Sigma\text{прд}} = 0,5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$.

Коэффициент авторегулирования подачи тепла принято с использованием двухтрубной системы отопления с поквартирным регулированием со значением $\zeta = 0,95$.

Тогда получим следующую зависимость:

$$\left(\frac{1449,3}{R_{\Sigma\text{прп}}} + \frac{327,1}{R_{\Sigma\text{прств}}} + \frac{29,5}{R_{\Sigma\text{пртк}}} \right) = 1238,5 \quad \text{или} \quad \left(\frac{1,17}{R_{\Sigma\text{прп}}} + \frac{0,264}{R_{\Sigma\text{прств}}} + \frac{0,193}{R_{\Sigma\text{пртк}}} \right) = 1. \quad (6)$$

Полученная зависимость связывает характеристики трех наиболее важных конструкций и может быть основой для дальнейшего анализа. При этом обязательно необходимо учесть следующие рекомендации ДБН В 2.6-31 [2].

Во-первых, пункта 2.3, который допускает для непрозрачных ограждений при термомодернизации принимать $R_{q\text{min}}$ с понижающим коэффициентом 0,8.

Во-вторых, пункта 3.3, который указывает, что при выполнении условия (1) возможно применять отдельные конструктивные элементы теплоизолирующей оболочки со сниженными значениями сопротивления теплопередаче до уровня 75% от $R_{q\text{min}}$ для непрозрачных частей и до уровня 80% для иных, т.е. светопрозрачных. Поэтому возможно представить диапазон изменений значений сопротивлений теплопередаче, входящих в формулу (6) следующим:

$$R_{\Sigma\text{прп}} = 1,68 - 2,24 - 2,8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт};$$

$$R_{\Sigma\text{прств}} = 0,5 - 0,6 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт};$$

$$R_{\Sigma\text{пртк}} = 1,98 - 2,64 - 3,3 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}.$$

Иными словами, нельзя принимать значение сопротивления теплопередаче ниже указанных для каждой конструкции величин. Зависи-

мость (6) была проанализирована методом математической статистики. Для создания математической модели в уравнении (6) введены новые обозначения: $R_{\Sigma_{\text{прт}}} = y$; $R_{\Sigma_{\text{пртк}}} = x_1$; $R_{\Sigma_{\text{прств}}} = x_2$; и отыскивалась зависимость $y = f(x_1, x_2)$. Сравнительный анализ параметров равенств регрессии выявил, что наиболее близкою есть модель в виде:

$$y = a_0 + \frac{a_1}{x_1} + \frac{a_2}{x_2}. \quad (7)$$

В соответствии с данными о возможном диапазоне изменения величин сопротивлений теплопередаче с помощью метода наименьших квадратов [5, 6] были получены оценки параметров модели: $a_0 = -0,03934$, $a_1 = 0,833687$, $a_2 = 1,281204$.

Для оценки вероятности модели использовались такие характеристики, как коэффициент детерминации R^2 , критерий Фишера и критерий Стьюдента.

Полученный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9642$ показывает, что параметр y на 96,42% определяется влиянием исследуемых факторов.

Поскольку при $F_{\text{розн}} = 134,664 > F_{\text{крит}}(0,01;2;10) = 7,559$ при 1% уровне значимости, то в соответствии с критерием Фишера модель является статистически значимой с вероятностью $(1 - \alpha) \cdot 100\% = 99\%$. Поэтому модель может быть использована для принятия решений и осуществления прогнозов. Пользуясь формулой:

$$t_{a_j} = \frac{|a_j|}{S_{a_j}}, \quad (8)$$

где a_j - оценка параметра модели, S_{a_j} - стандартная ошибка параметра модели, были вычислены критерии Стьюдента: $t_{a_0} = 0,2546$, $t_{a_1} = 5,1021$, $t_{a_2} = 16,25$.

Сопоставляя полученные t -критерии с табличными данными $t_{\text{табл}} = 3,249843$ (при уровне значимости $\gamma = 0,01$) делаем вывод, что параметры a_1, a_2 являются статистически значимыми, а статистически незначимый - фактор a_0 . То есть, полученную модель можно упростить, исключив статистически незначимый фактор, и окончательно представить в виде:

$$y = \frac{a_1}{x_1} + \frac{a_2}{x_2}. \quad (9)$$

После этого можно приступать к выявлению соотношений сопротивлений теплопередаче. Для этого снова возвращаемся к теплотехническим показателям и формулу (9) представляем в виде:

$$R_{\Sigma_{прит}} = \frac{0,83}{R_{\Sigma_{прнк}}} + \frac{1,28}{R_{\Sigma_{прств}}} . \quad (10)$$

Если принять постоянным значение $R_{\Sigma_{прнк}} = 3,3 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, а изменять значение $R_{\Sigma_{прств}}$, то для непрозрачной части ограждения (внешние стены) получим следующие результаты (таблица).

Таблица. Результаты расчета

№ п/п	$R_{\Sigma_{прнк}}$	$R_{\Sigma_{прств}}$	$R_{\Sigma_{прит}}$	$\hat{R}_{\Sigma_{прит}}$	$\tilde{R}_{\Sigma_{прит}}$
1	3,3	0,7	2,1	2,04	2,08
2	3,3	0,6	2,33	2,35	2,38
3	3,3	0,5	2,71	2,78	2,81

Примечание: значения $R_{\Sigma_{прнк}}$, $\hat{R}_{\Sigma_{прит}}$ и $\tilde{R}_{\Sigma_{прит}}$ вычислялись по формулам (6), (7) и (10).

Приведенное иллюстрирует реальные условия термомодернизации, когда проектировщику удобнее всего рассматривать только два варианта: окна и стены.

Выводы

1. Предложена математическая модель, которая связывает основные конструктивные элементы (стены, окна, покрытия), соответствующие минимальным требованиям энергоэффективности, и позволяет принимать значения сопротивления теплопередаче ограждений ниже нормативных требований.

2. Модель может быть адаптирована для обеспечения высшего, чем класс «С», уровня энергоэффективности, для чего в формуле (2) нужно принять значение E_{max} , соответствующее требуемому классу.

3. Предложенный алгоритм может быть использован в проектировании новых зданий: с учетом выполнения рекомендаций пункта 3.3 ДБН В 2.6-31 [2] он позволяет принимать сопротивления теплопередаче некоторых ограждений ниже нормативных требований.

Перечень ссылок

1. **Каталог температурных полей узлов типовых ограждающих конструкций.** – М.: Стройиздат. 1980.
2. **ДБН В 2.6-31:2006.** Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель.
3. **Тимофєєв, М.В.** Підвищення енергоефективності будинку серії 87 –Б при термомодернізації/М.В.Тимофєєв, С.О.Сахновська, В.А.Осіпенков//Реконструкція житла. – Вип.11. - 2009. - С.383–388.
4. **ДСТУ-Н Б.А.2.2-5:2007.** Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будівель при новому будівництві та реконструкції.
5. **Езерский, В.А.** Влияние параметров теплоизоляции элементов жилого дома на расход тепловой энергии/В.А.Езерский, П.В.Монастырев, Р.Ю.Клычников// АКАДЕМІА-МГСУ. - М., 2009. - С.291–296.
6. **Смирнов, Н.В.** Курс теории вероятности математической статистики для технических приложений/ Н.В.Смирнов, И.В.Дунин-Барковский. - М.:Наука, 1965. - 512 с

Получено 17.05.2010