Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 697.921.23

© Т. А. Дацюк, д-р техн. наук, профессор
© А. М. Гримитлин, д-р техн. наук, профессор
© Е. А. Анишукова, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: tdatsuk@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,
anshukovaekaterina@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-141-145

© Т. А. Datsyuk, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. M. Grimitlin, Dr. Sci. Tech., Professor
© E. A. Anshukova, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: tdatsuk@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,
anshukovaekaterina@gmail.com

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY INDICATORS OF BUILDINGS

На основании анализа энергетических паспортов получено соотношение удельных характеристик, учитывающих расход энергии на отопление и вентиляцию жилых зданий. Дана численная оценка влияния методологических неточностей при измерении сопротивления теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций зданий. Выявлены причины некорректной оценки показателей теплозащиты здания.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, тепловая защита, сопротивление теплопередаче.

Basing on the analysis of energy passports, there has been obtained the ratio of specific characteristics taking into account the energy consumption value for heating and ventilation of residential buildings. The authors provide numerical assessment of the impact of methodological inaccuracies in the measurement of heat transfer resistance of heterogeneous building envelope. The reasons for the incorrect estimation of the thermal protection indices of the building are identified.

Keywords: enclosing structures, thermal protection, heat transfer resistance.

В настоящее время потребление энергии проектируемых зданий на отопление и вентиляцию должно быть на 30–40 % ниже базового варианта [1, 2]. Однако, несмотря на тщательность расчетов на стадии проектирования, оказывается, что при эксплуатации новых зданий их энергопотребление в 1,5–2 раза превышает проектные значения [3]. В связи с отмеченным проведение натурных исследований и их достоверность представляют интерес для специалистов [4]. Согласно СП 50.13330.2012¹ расчет затрат энергии на компенсацию трансмиссионных теплопотерь и вентиляцию зданий проводится отдельно. Потребление энергии на отопление зданий зависит от сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций (НОК) и учитывается через удельную теплозащитную характе-

ристику здания $k_{об}$. Затраты энергии на вентиляцию характеризует удельная вентиляционная характеристика здания $k_{вен}$, которая зависит от принятой кратности воздухообмена. Для выявления причин несоответствия расчетного и фактического энергопотребления зданий интересно проанализировать соотношение расчетных и фактических значений $k_{об}/k_{вен}$.

Анализ энергетических паспортов новых зданий показал, что если кратность воздухообмена, например, для жилых зданий не превышает $n = 0,45–0,47 \text{ ч}^{-1}$, то расчетное отношение $k_{об}/k_{вен}$ составляет 1,35–1,5. При увеличении кратности воздухообмена до $n = 0,6–0,65 \text{ ч}^{-1}$ преобладают затраты энергии на вентиляцию, отношение $k_{об}/k_{вен}$ составляет 0,8–0,9. Фактические затраты энергии на компенсацию трансмиссионных те-

¹ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.

плототер можно определить по результатам измерений сопротивления теплопередаче элементов здания в натурных условиях. Оценить фактические затраты энергии на вентиляцию для жилых зданий можно лишь приближенно, как разность показаний теплосчетчика и затрат энергии на компенсацию трансмиссионных теплопотерь. Достоверность такой оценки зависит от того, как учтены бытовые теплопоступления и теплопоступления от солнечной радиации, а также с какой степенью точности выполняются натурные измерения сопротивления теплопередаче оболочки здания и какие неточности характерны для расчетных значений.

На первом этапе следует оценить различия между расчетными и фактическими значениями $k_{об}$.

Удельная теплозащитная характеристика здания $k_{об}$, Вт/(м³ · °C), рассчитывается по формуле (Ж.1) СП 50.13330.2012:

$$k_{об} = \frac{1}{V_{об}} \sum_i \left(n_{ii} \frac{A_{ф,i}}{R_{о,i}^{пр}} \right), \quad (1)$$

где $V_{об}$ — отапливаемый объем здания, м³; n_{ii} — коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП, определяется по формуле (5.3) СП 50.13330.2012; $A_{ф,i}$ — площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²; $R_{о,i}^{пр}$ — приведенное сопротивление теплопередаче i -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, (м² · °C)/Вт.

Для определения фактических значений удельной теплозащитной характеристики здания $k_{об}$ необходимо знать сопротивление теплопередаче оболочки здания. В условиях эксплуатации зданий корректно измерить сопротивления теплопередаче отдельных элементов здания весьма сложно. Погрешность измерений сопротивления теплопередаче в натурных условиях составляет 35–40 %.

Рассмотрим возможные причины расхождения расчетных и фактических значений сопротивления теплопередаче оболочки здания. Приведенное сопротивление теплопередаче неоднородной ограждающей конструкции (НОК) $R_o^{пр}$ определяется по формуле (ГОСТ 26602–85²,

ГОСТ 26602.1–99³, ГОСТ 26254–84⁴, ГОСТ Р 54861–2011⁵, ГОСТ Р 54853–2011⁶, ГОСТ Р 56623–2015⁷):

$$R_o^{пр} = \frac{\sum F_i}{\sum (F_i / R_{oi})}, \quad (2)$$

где F_i — площадь i -й однородной зоны ограждающей конструкции; R_{oi} — сопротивление теплопередаче i -й однородной зоны ограждающей конструкции, которое определяется по формуле (3).

Сопротивление теплопередаче однородного участка конструкции рассчитывается как

$$R_o^{расч} = \frac{1}{\alpha_v} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (3)$$

где α_v — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м² · °C); λ_i — теплопроводность материала i -го слоя ограждающей конструкции, Вт/(м · °C); α_n — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м² · °C); δ_i — толщина i -го слоя конструкции, м.

Из формул (2) и (3) видно, что расчетное значение сопротивления теплопередаче конструкций зависит:

- от значений теплопроводности строительных материалов;
- коэффициента однородности конструкций.

Для оценки различия расчетных и фактических значений сопротивления теплопередаче жилых зданий проанализируем методические аспекты расчета и измерения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.

Теплопроводность строительных материалов зависит от температуры и влажосодержания. Рекомендуемые значения теплопроводности строительных материалов, приведенные в СП 23-101–2004⁸, получены при средней температуре образцов (25 ± 1) °C и для сухого состояния⁹.

³ ГОСТ 26602.1–99. Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче.

⁴ ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

⁵ ГОСТ Р 54861–2011. Окна и наружные двери. Методы определения сопротивления теплопередаче.

⁶ ГОСТ Р 54853–2011. Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера.

⁷ ГОСТ Р 56623–2015. Контроль неразрушающий. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

⁸ СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий.

⁹ ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.

² ГОСТ 26602–85. Окна. Метод определения сопротивления теплопередаче.

В зимний период температура в конструкции наружных стен, в месте расположения теплоизоляционных материалов отрицательная, нередко ниже минус 20 °С. Плоскость возможной конденсации располагается по наружному слою утеплителя. Таким образом, теплоизоляционный материал в конструкции наружных стен находится при отрицательной температуре и имеет влагосодержание выше расчетных величин, что приводит к отличиям в значениях теплопроводности от приведенных в СП 23-101–2004. Зависимость теплопроводности от температуры для разных теплоизоляционных материалов не одинакова. Например, теплопроводность Пеноплэкса® (ТУ 5767-001-56925804–2003) плотностью 25–33 кг/м³ при температуре минус 17,5 °С по результатам испытаний ВНИИМ им. Д. И. Менделеева ниже на 15 %, чем при положительной температуре 24 °С¹⁰. Теплопроводность силикатного бетона плотностью 2100 кг/м³ при влажности 10,5 % и температуре минус 24 °С, наоборот, на 25 % выше, чем при +25 °С [5]. Теплопроводность ячеистых бетонов при снижении температуры от 0 до –5 °С увеличивается на 25 % [6]. Увеличение теплопроводности сказывается на снижении теплозащитных свойств НОК.

Теплопроводность строительных материалов увеличивается также с повышением их влагосодержания. Для определения расчетных значений теплопроводности в условиях эксплуатации А и Б по методике СП 23-101–2004 используются коэффициенты пересчета, которые требуют актуализации для современных строительных материалов, особенно теплоизоляционных. Для этих целей необходимо проведение лабораторных испытаний в аккредитованных испытательных центрах, оснащенных высокоточной аппаратурой.

Общеизвестно, что в первые годы эксплуатации конструкции зданий имеют повышенное влагосодержание. Например, влажность железобетонных панелей в два и более раза превышает значения, указанные в СП 50.13330.2012. Нельзя не учитывать также увлажнение конструкций атмосферной влагой вследствие сорбции в переходные периоды года. Изотермы сорбции и десорбции для большинства строительных

материалов, как правило, не совпадают. Сорбционная влажность материала при увлажнении меньше, чем при высыхании, т. е. при высыхании некоторая часть влаги удерживается внутри материала и удаляется лишь при высокой температуре и низкой влажности окружающего воздуха.

При сорбционном увлажнении количество влаги, содержащейся в материале, зависит от температуры и увеличивается при ее понижении. Согласно [7] в зимний период средняя влажность строительных материалов НОК близка к сорбционной влажности при относительной влажности воздуха 80 %.

Использование значений теплопроводности строительных материалов, приведенных в СП 23-101–2004, при расчете сопротивления теплопередаче может привести к расхождению фактических и расчетных значений удельного энергопотребления зданий на 15–25 %.

Коэффициент однородности конструкций. Фасад здания — неоднородная конструкция. Расчет теплотерь по отдельным элементам фасада приводит к дополнительным погрешностям. Наличие термовкладышей и теплопроводных включений вызывает деформацию температурного поля конструкций, область локального измерения температуры зависит от вида включений. Для повышения точности расчетов неоднородных ограждающих конструкций целесообразно применять математическое моделирование. Расчет температурных полей конструкций в формате 3D позволяет определить интегральный тепловой поток с учетом всех неоднородностей.

В качестве примера на рисунке приведены температурные поля фрагментов наружных стен, рассчитанные с использованием программ StarCCM+ и Ansys. На рисунке (а) приведено температурное поле железобетонной плиты перекрытия с термовкладышами. Температура на поверхности утеплителя на 10 °С выше, чем на бетонной поверхности. Разность температуры зависит от соотношения теплопроводности железобетона и материала термовкладышей. Рисунок (б) иллюстрирует температурное поле фрагмента перекрытия, включающего «мостики холода» разного типа.

Коэффициент однородности играет существенную роль при расчете сопротивления теплопередаче НОК. Некорректный учет коэффици-

¹⁰ Протокол ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (регистрационный номер аттестата аккредитации RA.RU.311541) от 24.03.2017 № 2413/01 измерений теплопроводности образцов материала Пеноплэкс® (ТУ 5767-001-56925804–2003).

Температурные поля фрагментов наружных стен

циента однородности может привести к завышенным значениям сопротивления теплопередаче НОК на 20–30 %. Для типовых конструкций целесообразно определять коэффициент однородности при испытаниях их фрагментов в климатических камерах [8].

Фактические значения сопротивления теплопередаче определяются по результатам измерений в натурных условиях. Однако достоверность полученных результатов в значительной степени зависит от методических аспектов: аппаратуры, времени проведения измерений, способов обработки результатов. Измерения сопротивления теплопередаче НОК в натурных и лабораторных условиях для непрозрачных конструкций проводят согласно ГОСТ Р 54853–2011, ГОСТ Р 56623–2015, для светопрозрачных конструкций — ГОСТ 26602.1–99, ГОСТ Р 54861–2011.

Сопротивление теплопередаче однородной ограждающей конструкции определяют как отношение разности температуры окружающей среды по обе стороны от конструкции t_v и t_n к поверхностной плотности теплового потока через конструкцию q в условиях стационарной теплопередачи:

$$R = (t_v - t_n) / q, \quad (4)$$

где t_v , t_n — соответственно температура внутреннего и наружного воздуха, °C; q — плотность теплового потока через конструкцию, Вт/м².

Для реализации метода измерений рекомендуется использовать измерители плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03 «Поток» (п. 4.2.1 ГОСТ 25380–2014¹¹), внесенные в Государствен-

¹¹ ГОСТ 25380–2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции.

ный реестр средств измерений РФ под номером 42424-15. Нижний предел измерения плотности теплового потока прибором ИТП-МГ4.03 «Поток» составляет 10 Вт/м².

Фактические значения сопротивления теплопередаче, полученные в климатических камерах или в натурных условиях согласно ГОСТ 26602.1–99, ГОСТ Р 54853–2011, могут отличаться от проектных значений вследствие:

- влияния человеческого фактора при выделении однородных зон и определении их площади;
- неправильной градуировки тепломеров;
- неисключенной систематической погрешности, которая обусловлена отличием излучательной способности тепломера от исследуемого объекта.

Из формулы (2) видно, что дополнительная погрешность при измерениях сопротивления теплопередаче неоднородной ограждающей конструкции может быть также связана с некорректным определением площади однородных зон при установке тепломеров. Например, современные светопрозрачные конструкции имеют многокамерные профильные системы, в которых зачастую вообще не удастся выявить сколь угодно точно однородных зон.

Учесть при натурных испытаниях влияние всех теплопроводных включений достаточно сложно, вследствие этого имеет место дополнительная погрешность, связанная с вероятностным учетом теплопроводных включений, что определяется плотностью расстановки датчиков, которая составляет не менее 25 % [8].

Расхождение результатов определения сопротивления теплопередаче по различным действу-

ющим стандартам для одной и той же испытанной конструкции достигает 20 %, а для других, более сложных изделий может различаться в несколько раз.

Выводы

На основании проведенного анализа неточностей расчетные и фактические, измеренные в натурных условиях, значения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций могут отличаться в 1,5 раза. Следовательно, согласно формуле (1) расхождение расчетных и фактических значений $k_{\text{об}}$ удельной теплозащитной характеристики здания будет того же порядка.

Библиографический список

1. Ливчак В. И. Фактическое теплотребление зданий как показатель качества и надежности проектирования // АВОК. 2009. № 2. С. 4–13.
2. Малавина Е. Г. Теплотери здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. 144 с.
3. Киселев И. Я. Повышение точности определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с учетом их структуры и особенностей эксплуатационных воздействий: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 366 с.
4. Ливчак В. И. Об экспериментальной оценке показателя энергоэффективности многоквартирных зданий // Энергосбережение. 2018. № 5. С. 32–38.
5. Крутилин А. Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В. В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 46–55.
6. Лобов О. И., Ананьев А. И., Рымаров А. Г. Основные причины несоответствия фактического уровня тепловой защиты наружных стен современных зданий нормативным требованиям // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 67–71.
7. Фокин К. С. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. 4-е изд. М.: Стройиздат, 1973. 288 с.
8. Дацюк Т. А., Соколов Н. А. Методические аспекты измерений сопротивления теплопередаче неоднородных конструкций // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году: сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. М.: АСВ, 2018. С. 186–191.

References

1. Livchak V. I. *Fakticheskoe teplopotreblenie zdaniy kak pokazatel' kachestva i nadezhnosti proektirovaniya* [Actual heat consumption of buildings as an indicator of the design quality and reliability]. AVOK, 2009, no. 2, pp. 4–13.
2. Malyavina E. G. *Teplopoteri zdaniya* [Heat losses of the building]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2007, 144 p.
3. Kiselev I. Ya. *Povyshenie tochnosti opredeleniya teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov s uchetom ikh struktury i osobennostey ehkspluatatsionnykh vozdeystviy. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Improving the accuracy of assessing the thermal-physical properties of thermal insulation materials based on their structure and specific operational impacts. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2006, 366 p.
4. Livchak V. I. *Ob ehksperimental'noy otsenke pokazatelya ehnergoehffektivnosti mnogokvartirnykh zdaniy* [About the experimental assessment of the energy efficiency index of apartment buildings]. *Ehnergoberezhenie – Energy Saving*, 2018, no. 5, pp. 32–38.
5. Krutinin A. B., Rykhlenok Yu. A., Leshkevich V. V. *Teplofizicheskie kharakteristiki avtoklavnykh yacheistyykh betonov nizkikh plotnostey i ikh vliyaniye na dolgovechnost' naruzhnykh sten zdaniy* [Thermal-physical properties of autoclaved aerated concrete of low density and their influence on the durability of external walls of buildings]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Journal of Civil Engineering*, 2015, no. 2 (54), pp. 46–55.
6. Lobov O. I., Anan'ev A. I., Rymarov A. G. *Osnovnye prichiny nesootvetstviya fakticheskogo urovnya teplovoy zashchity naruzhnykh sten sovremennykh zdaniy normativnym trebovaniyam* [Main causes of discrepancy between the actual level of thermal protection of external walls of modern buildings with regulatory requirements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2016, no. 11, pp. 67–71.
7. Fokin K. S. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy* [Construction heat engineering of enclosing parts of buildings]. The 4-th. edition. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973, 288 p.
8. Datsyuk T. A., Sokolov N. A. *Metodicheskie aspekty izmereniy soprotivleniya teploperedache neodnorodnykh konstruktsiy* [Methodical aspects of measuring the resistance to heat transfer of heterogeneous structures]. *Sb. nauch. tr. RAASN «Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2017 godu»* [Coll. of works RAACS "Fundamental, search and applied research on scientific support of the development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2017"]. Vol. 2. Moscow, ASV Publ., 2018, pp. 186–191.