

УДК 62-97:624:697.34

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ С ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ В ТЕПЛОМ БАЛАНСЕ ЗДАНИЯ

^{1,2}Цыцарева Е.И., ¹Левцев А.П., ^{1,2}Лысяков А.И.¹ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», Саранск, e-mail: lenalisakowa@mail.ru;²ООО НПО «Энергосистемы», р.п. Атяшево, Мордовия, e-mail: lysyakov_lai@mail.ru

Существующие методики расчета теплового баланса здания учитывают инфильтрацию воздуха без соответствующего обоснования либо вовсе не учитывают, что приводит не только к недоверности определения ее значения, но и снижению общей достоверности теплового баланса здания. Разработана концепция совершенствования оценки инфильтрации для существующих зданий и сооружений за счет совершенствования определения площади щелей и неплотностей в ограждающих конструкциях. Определены основные факторы, оказывающие влияние на определение площади объекта, изображение которого получено при проведении тепловизионного обследования, данными факторами являются расстояние до объекта съемки, угол съемки и технические характеристики используемого тепловизора, в случае определения которых можно определить физическую площадь объекта съемки. Площадь щелей на термограмме определена на основании количества точек, значения температуры которых меньше принятой пороговой температуры, определенной экспериментальным путем. Физическая площадь щелей определяется исходя из площади щелей на термограмме с учетом выведенной зависимости. В результате проведенного анализа определена эффективность методики совершенствования оценки инфильтрации в тепловом балансе здания на основании повышения точности определения площади щелей и неплотностей в ограждающих конструкциях.

Ключевые слова: методика, инфильтрация, площадь щелей, пороговая температура

IMPROVEMENT OF METHODS FOR ESTIMATING HEAT LOSS WITH INFILTRATION IN THE HEAT BALANCE OF THE BUILDING

^{1,2}Tsytsareva E.I., ¹Levtsev A.P., ^{1,2}Lysyakov A.I.¹National Research Mordovia State University, Saransk, e-mail: lenalisakowa@mail.ru;²LLC SPA «Energy Systems», Atyashevo, Mordovia, e-mail: lysyakov_lai@mail.ru

Existing methods for calculating the heat balance of a building take into account air infiltration without appropriate justification or do not take it into account at all, which leads not only to inaccurate determination of its value, but also to a decrease in the overall reliability of the heat balance of the building. A concept has been developed to improve the assessment of infiltration for existing buildings and structures by improving the definition of the area of cracks and leaks in building envelopes. The main factors that influence the determination of the area of the object, the image of which was obtained during the thermal imaging survey, are identified; these factors are the distance to the subject, the angle of the survey, and the technical characteristics of the thermal imager used, if determined, the physical area of the subject can be determined. The area of the slots in the thermogram is determined on the basis of the number of points whose temperature is less than the accepted threshold temperature determined experimentally. The physical area of the slots is determined based on the area of the slots in the thermogram, taking into account the derived dependence. As a result of the analysis, the effectiveness of the methodology for improving the assessment of infiltration in the heat balance of a building is determined based on increasing the accuracy of determining the area of cracks and leaks in building envelopes.

Keywords: methods, infiltration, area of cracks, threshold temperature

Тепловая мощность системы отопления подбирается исходя из принципа возмещения тепла, уходящего через ограждающие конструкции, и тепла, уходящего при инфильтрации. Согласно [1] СНиП 2.04.05-91* расход теплоты на нагревание инфильтрующегося наружного воздуха можно определить двумя способами: расчетным и нормативным, при этом расход теплоты принимается равным большей из полученных величин. Нормативным способом определяется удельный расход удаляемого воздуха, равный 3 м³/ч на 1 м² жилых помещений. На практике расчет нормативным способом менее трудоемкий, но при этом значение расхода теплоты на нагревание

инфильтрующегося воздуха получается завышенным.

В соответствии с расчетным методом расход инфильтрующегося воздуха в помещение через неплотности наружных ограждений определяется суммированием расхода инфильтрующегося воздуха через ограждающие конструкции, стыки стеновых панелей и через щели, неплотности и проемы в наружных ограждающих конструкциях. В настоящее время СНиП 2.04.05-91* прекратил действие в связи с вступлением в силу СНиП 41-01-2003.

Согласно Своду правил [2] СП 60.13330.2016 при определении количества воздуха, поступающего в помещение

в результате инфильтрации через ограждающие конструкции, учитывают только расход инфильтрующегося воздуха через ограждающие конструкции. Таким образом, в СНиП 41-01-2003 при расчете инфильтрационных потерь исключены потери через щели и неплотности наружных ограждающих конструкций, в связи со сложностью оценки данного параметра.

Материалы и методы исследования

Цель данной статьи – усовершенствование оценки инфильтрации в тепловом балансе здания. При расчете расхода инфильтрующегося воздуха по СНиП 2.04.05-91* потери через щели, характеризующиеся таким параметром, как площадь щели, является наиболее значимым показателем. Так, опытным путем установлено, что при изменении площади щелей, неплотностей и проемов в наружных ограждающих конструкциях на 1 см расход инфильтрации в среднем изменяется на 1,97 процентов (прямая зависимость).

При определении значимости данного параметра в расчете расхода инфильтрующегося воздуха был произведен анализ 50 вариантов сценариев для каждого объекта. Для этого все расчетные параметры принимались неизменными, кроме одного, принятого за тестовый. Для каждого сценария был осуществлен расчет расхода инфильтрующегося воздуха. Для каждой группы по 10 сценариев изменения тестового параметра и расхода инфильтрующегося воздуха определен коэффициент корреляции. По итогам расчетов все показатели определены как значимые, с коэффициентом корреляции равным единице в прямой и обратной зависимости [3]. Но при этом выявлено, что изменение площади щелей и неплотностей в наружных ограждающих конструкциях привело к наибольшему изменению расхода инфильтрующегося воздуха. При изменении температуры воздуха внутри помещения на 1 градус расход инфильтрации в среднем изменяется на 0,74 процента, при изменении температуры наружного воздуха на 1 градус – 1,07 процента, изменение давления на 1 мм ртутного столба – 0,002 процента, относительной влажности на 1% – 0,0001 процента (табл. 1).

Для определения площади щелей в наружных ограждающих конструкциях можно использовать инфракрасную термографию [4]. При термографировании ограждающих конструкций [5] внутри помещения определяющим параметром является расстояние до объекта, в случае термографирования снаружи помещения добавляется параметр – угол съемки.

Эксперимент был проведен на одном объекте, а затем апробирован на ряде других объектов. Можно выделить несколько основных этапов методики проведения эксперимента [6, 7]. На первом этапе определяются технические характеристики используемого тепловизора [8]. Термографирование осуществлено с использованием тепловизора SDS HotFind-LXT (детектор 320×240, угол обзора тепловизора 24°×18°). Исходя из разрешения детектора тепловизора определено, что полученные термограммы при импортировании в программу для работы с электронными таблицами Microsoft Excel имеют вид прямоугольника с площадью 76800 точек (пикселей) – 320 на 240 пикселей. На втором этапе дальномером устанавливается расстояние до объекта (при термографировании необходимо находиться перпендикулярно к объекту съемки).

Соответственно, в процессе съемки между объектом съемки и тепловизором получается прямоугольный треугольник (рис. 1), в котором известен угол (углы обзора тепловизора по горизонтали и вертикали известны по техническим характеристикам) и прилежащий катет (расстояние до объекта). Противоположный катет (ширина объекта термографирования) определяется через тригонометрическую функцию «Тангенс». Формула для расчета имеет вид (длина объекта термографирования (n, м) определяется аналогично):

$$m = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times 2 \times l,$$

где m – ширина объекта термографирования, м;
 α – угол обзора тепловизора по горизонтали, градусы;
 l – расстояние от тепловизора до объекта, м.

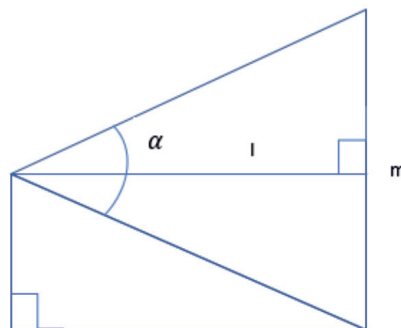


Рис. 1. Визуализация процесса термографирования при учете фактора – расстояние до объекта термографирования

Таблица 1

Влияние различных параметров на инфильтрационные потери

Показатель	Корреляция	Среднее значение отклонения, %
Площадь щелей, неплотностей и проемов в наружных ограждающих конструкциях, кв. м	1,00	1,97
Температура воздуха: внутреннего, С	1,00	–0,74
Температура воздуха: наружного, С	–1,00	–1,07
Давление, мм ртутного столба	–1,00	–0,002
Расход инфильтрующегося воздуха через ограждающие конструкции помещения	1,00	0,0001

Таблица 2

Результаты исследования влияния расстояния до объекта термографирования на площадь объекта съемки

Показатель	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние до объекта съемки, м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размерность одного пикселя, см	0,13	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80	0,93	1,06	1,20	1,33
Физическая длина кадра съемки, м	0,43	0,85	1,28	1,70	2,13	2,55	2,98	3,40	3,83	4,25
Физическая ширина кадра съемки, м	0,32	0,63	0,95	1,27	1,58	1,90	2,22	2,53	2,85	3,17
Физическая площадь кадра съемки, кв. м	0,14	0,54	1,21	2,16	3,37	4,85	6,60	8,62	10,91	13,47

Для удобства вычислений вводится показатель размерности одного пикселя (одной точки) термограммы, который равен частному площади объекта и площади термограммы. Так как технические характеристики тепловизора неизменны, единственным параметром, влияющим на вычисление площади объекта при термографировании внутри здания, является расстояние до объекта.

Расчет размерности одного пикселя был осуществлен для расстояний до объекта от 1 до 10 м, при неизменных: площади термограммы – 76800 пикселей, угла обзора тепловизора по горизонтали – 24 градуса, угла обзора тепловизора по вертикали – 18 градусов (табл. 2).

В результате проведенных экспериментов и регрессионного анализа, уравнение для расчета физической площади одного пикселя имеет вид:

$$s_{\text{пикселя}} = 0,133 \times l - 0,0002,$$

где $s_{\text{пикселя}}$ – физическая площадь одного пикселя, м.

Таким образом, исходя из расстояния до объекта, можно определить его физическую площадь.

$$S_{\text{объекта}} = m \times n = tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times tg\left(\frac{\beta}{2}\right) \times 4 \times l^2,$$

где $S_{\text{объекта}}$ – физическая площадь объекта, м²;

n – длина объекта термографирования, м;

β – угол обзора тепловизора по горизонтали, градусы.

В случае осуществления термографирования снаружи здания, в расчет площади необходимо ввести поправочный коэффициент, характеризующий угол съемки (поправка на этажность объекта). Данный коэффициент применяется к длине объекта съемки и рассчитывается как отношение расстояния (перпендикулярно) от тепловизора до здания и расстояния (под углом) от тепловизора до объекта съемки (противоположный катет и гипотенуза прямоугольного треугольника соответственно).

Расстояние от тепловизора до объекта съемки, в случае проведения неперпендикулярной съемки, рассчитывается исходя из расстояния до здания (перпендикуляра) и высоты здания до объекта термографирования по формуле

$$k = \sqrt{l^2 + h^2},$$

где k – расстояние от тепловизора до объекта съемки, м; h – высота здания до объекта термографирования, м.

На практике расстояние от тепловизора до объекта съемки можно определить с помощью дальномера.

Поправочный коэффициент, характеризующий угол съемки, введем по нижней границе съемки (наибольший угол) (рис. 2). В соответствии с признаками подобных треугольников искажение площади объекта термографирования будет иметь следующий вид

(пренебрегаем тем, что каждая точка объекта термографирования располагается к тепловизору под разными углами, уменьшаясь от нижней границы объекта термографирования):

$$\frac{l}{k} = \frac{n}{n_1},$$

где n_1 – длина объекта термографирования с учетом поправочного коэффициента, м.

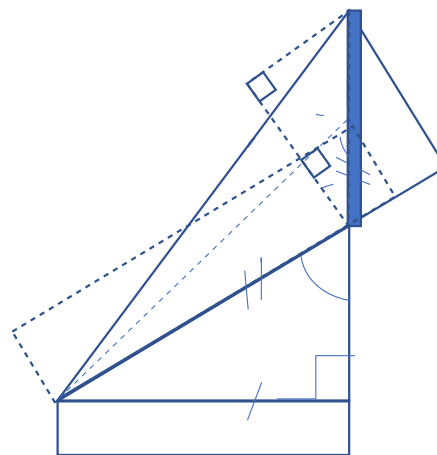


Рис. 2. Визуализация процесса термографирования при учете факторов – расстояние до объекта термографирования и угол съемки

В случае проведения термографирования снаружи здания физическая площадь объекта принимает следующий вид:

$$S_{\text{объекта}} = tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times tg\left(\frac{\beta}{2}\right) \times 4 \times \frac{l^3}{k}.$$

Третий этап методики подразумевает определение значения пороговой температуры – максимальной температуры в щелях. Все точки на термограмме, имеющие значения температуры меньше пороговой, показывают температуру в щелях.

Для определения пороговой температуры были проведены эксперименты по термографированию оконных проемов с выраженными дефектами (видными невооруженным взглядом). Термографирование проводилось при неизменных: температуре воздуха, температуре внутри помещения, влажности, давления и скорости ветра [9, 10]. По данным экспериментов (10 объектов) определено, что средняя пороговая температура находится выше самого низшего

значения на термограмме на 1,64% от общей шкалы распределения температур (от минимальной до максимальной – 100%).

Соответственно, зная, что от нижней температуры до 1,64% от общей шкалы – это температура в щелях, можно определить количество точек, имеющих температуру меньше пороговой посредством функции в Microsoft Excel – «СЧЁТЕСЛИ». Определив количество точек, имеющих температуру меньше пороговой, и зная размерность пикселей, определяем площадь щелей и неплотностей:

$$S_{\text{щелей}} = \frac{K_{\text{порог.}}}{K_{\text{термогр.}}} * S_{\text{объекта}} =$$

$$= \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) \times 4 \times \frac{l^3}{k} \times \frac{K_{\text{порог.}}}{K_{\text{термогр.}}},$$

где $K_{\text{термогр.}}$ – площадь термограммы (всего точек), пиксель;

$K_{\text{порог.}}$ – количество точек с температурой меньше пороговой, пиксель.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим пример расчета площади щелей.

Расстояние от тепловизора до объекта 6,5 м. Термографирование осуществлено внутри помещения с использованием тепловизора SDS HotFind-LXT (детектор 320×240, угловое поле зрения 24°×18°).

Определяем в табличном редакторе Microsoft Excel физическую ширину кадра съемки:

$$m = \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times 2 \times l = \text{tg}\left(\frac{24}{2}\right) \times 2 \times 6,5 = 2,76 \text{ м.}$$

Аналогично определяем длину кадра съемки:

$$n = \text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) \times 2 \times l = \text{tg}\left(\frac{18}{2}\right) \times 2 \times 6,5 = 2,06 \text{ м.}$$

Физическая площадь объекта съемки:

$$S_{\text{объекта}} = m \times n = 5,69 \text{ кв. м.}$$

Определяем пороговую температуру по термограмме. Минимальная температура на термограмме – 3,5 градусов, максимальная 28,8 градусов. Шкала – 32,30 градусов. Пороговая температура равна

$$T_{\text{пороговая}} = \frac{1,64}{100} \times 32,30 - 3,5 = -2,97^\circ\text{C}.$$

Количество точек, характеризующихся температурой меньше пороговой, определим в табличном редакторе «Excel» по формуле

$$K_{\text{порог.}} = \text{СЧЁТЕСЛИ}(\text{Массив температур по точкам}; -2,97) = 15 \text{ ед.}$$

Физическая площадь щелей

$$S_{\text{щелей}} = \frac{K_{\text{порог.}}}{K_{\text{термогр.}}} * S_{\text{объекта}} = \frac{15}{76800} * 5,69 =$$

$$= 0,001 \text{ кв. м.} = 11,11 \text{ кв. см.}$$

Полученное значение площади щелей можно использовать при расчете расхода воздуха через ограждающие конструкции (кг/ч) по СНиП 2.04.05-91* (обозначения приняты по СНиП 2.04.05-91*):

$$G_i = 0,216 \times \frac{\sum A_i \times \Delta p_i^{0,67}}{R_u} + \sum A_2 \times G_H \times (\Delta p_i / \Delta p_1)^{0,67} +$$

$$+ \frac{3456 \sum A_3 \Delta p_i^{0,5} + 0,5 \sum l \times \Delta p_i}{\Delta p_1} = 0,216 \times \frac{5,69 \times 135,59^{0,67}}{0,89} + 1,50 \times 1 \times \left(\frac{135,59}{10}\right)^{0,67} +$$

$$+ \frac{3456 \times 0,001 \times 135,59^{0,5} + 0,5 \times 0 \times 135,59}{10} = 90,47.$$

Расход инфильтрующегося воздуха в помещении с учетом площади щелей получается выше на 44,72 кг/ч.

Полученное значение расхода воздуха позволяет определить расход теплоты на нагревание инфильтрующегося воздуха (обозначения приняты по СНиП 2.04.05-91*):

$$Q_i = 0,28 \times \sum G_i \times c \times (t_p - t_i) \times k =$$

$$= 0,28 \times 90,47 \times 1 \times (25 - (-20)) \times 1 = 1139,92.$$

Заключение

Расход теплоты на нагревание инфильтрующегося воздуха с учетом площади щелей получается выше на 576,45 кг/ч.

Эффективность применения данной методики заключается в увеличении точности определения инфильтрационных потерь тепла.

Список литературы

1. СНиП 2.04.05-91* Отопление, вентиляция и кондиционирование. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9056428> (дата обращения: 02.09.2019).

2. Свод правил СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003), утвержденный приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 16 декабря 2016 г. № 968/пр. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054205> (дата обращения: 02.09.2019).
3. Лысяков А.И., Цыцарева Е.И., Мельникова М.В., Кондратьева Г.А. Математическое моделирование отпусков тепловой энергии // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. 2014. С. 654–660.
4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 256 с.
5. Веснин В.И. Инфильтрация воздуха и тепловые потери помещений через оконные проёмы // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 3 (24). С. 10–16. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.2.
6. Лысяков А.И. Методика гидравлического расчета систем теплоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя // Приволжский научный журнал. 2018. № 4. С. 59–68.
7. Лысяков А.И., Сарайкин М.Н., Кургунов М.А., Глухов С.Н. Методика оценки технико-экономических параметров работы системы холодоснабжения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 7. С. 51–58.
8. ГОСТ 26629-85 Здания и сооружения. Метод тепло-визионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901707162> (дата обращения: 02.09.2019).
9. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1982. 415 с.
10. Богословский В.Н., Сканин А.Н. Отопление: учебник для вузов по спец. ТГВ. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.