УДК 697.921.23

© Т. А. Дацюк, д-р техн. наук, профессор
© А. М. Гримитлин, д-р техн. наук, профессор
© С. М. Анисимов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: tdatsuk@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru
© А. В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор
(Национальный исследовательский университет
ИТМО, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: tsygaav@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120

© T. A. Datsiuk, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. M. Gritmitlin, Dr. Sci. Tech., Professor
© S. M. Anisimov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: tdatsuk@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru
© A. V. Tsygankov, Dr. Sci. Tech., Professor
(ITMO University, St. Petersburg, Russia)
E-mail: tsygaav@rambler.ru

ТРАНСМИССИОННЫЕ И ИНФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ТЕПЛОПТЕРИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

TRANSMISSION AND INFILTRATION HEAT LOSSES OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Рассматриваются вопросы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и соблюдения требований по естественной вентиляции. Для организации приточного воздуха в жилые помещения применяют различные вентиляционные устройства. На базе математического моделирования и лабораторных испытаний показана возможность прогнозирования теплопотерь зданий и качества воздушной среды в жилых зданиях.

Ключевые слова: естественная вентиляция, оконные клапаны, кратность воздухообмена.

The article considers some issues regarding the determining of the thermal performance of enclosing structures and compliance with the requirements for natural ventilation. Various ventilation devices are used to organize the air supply to residential buildings. On the basis of mathematical modeling and laboratory tests, the authors show the feasibility of predicting the heat losses of buildings and the quality of the air in residential buildings.

Keywords: natural ventilation, window air inlets, air exchange rate.

Вопросы, связанные с увеличением тепловой защиты зданий, остаются актуальными и на сегодняшний день [1–4]. Применение новых утеплителей и технологий строительства направлено на снижение трансмиссионных теплопотерь, которые могут быть рассчитаны с определенной степенью точности. Сопротивление теплопередаче непрозрачных однородных конструкций рассчитывается согласно нормативным документам достаточно надежно. Для оценки теплопотерь в узловых соединениях рекомендуется расчет температурных полей с решением урав-

нения теплопроводности по СП 50.13330–2012¹. Такие расчеты позволяют более точно определить теплотехнические характеристики узловых соединений, особенно если используется формат 3D. Кроме того, анализ температурных полей дает возможность прогнозировать наличие конденсата в наиболее неблагоприятных местах, которые могут быть также выявлены с применением термографического метода обследования ограждающих конструкций. На рис. 1 показано температурное поле в месте сопряжения наружных стен и чердачного покрытия, рассчитанное

¹ СП 50.13330–2012. Тепловая защита зданий. М.: Минрегион России, 2012. 96 с.

в формате 3D с использованием программы STAR CCM+, и термограмма внутренней поверхности наружного угла. Наружные стены выполнены из газобетона, наружный слой — облицовочный кирпич, полкирпича. Расчетные условия для рис. 1 и 2: температура внутреннего воздуха $t_{в} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$, наружного воздуха $t_{н} = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 55 %, коэффициенты теплообмена для внутренних поверхностей стен $\alpha_{в} = 8,7\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, окон — $\alpha_{в} = 8,0\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Теплозащитные свойства наружных стен и покрытий в 3–5 раз превышают соответствующие для оконных и балконных блоков. Фирмы-производители оконных и дверных блоков в настоящее время выпускают конструкции, теплотехнические характеристики которых превышают нормативные требования по сопротивлению теплопередаче (СП 50.13330–2012). Применение светопрозрачных конструкций с более высокими теплотехническими свойствами позволяет не только сократить теплопотери зданий, но и обеспечить комфортные условия в жилых помещениях.

Для расчета теплотехнических характеристик оконных и балконных блоков, а также узлов их примыкания к конструкциям рекомендована программа «Window» — «Therm», которая сертифицирована в системе ГОСТ Р. На рис. 2 приведен пример расчета алюмодеревянного оконного блока со стеклопакетами СПД 6М1-16Аг-4М1-16Аг-И6 и дистанционными рамками, выполненными из разных материалов.

Применение стеклопакетов с «теплой рамкой», внешняя сторона которой — нержавеющая сталь, а внутренняя — покрытие из поликарбоната, позволяет увеличить сопротивление теплопередаче и температуру на поверхности рам.

Сравнение температурных полей, приведенных на рис. 2, показало, что температура на поверхности деревянной облицовки короба оконного блока с дистанционной рамкой из алюминия равна $16,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а с «теплой» рамкой — $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что удовлетворяет требованиям п. 5.7 СП 50.13330–2012 и обеспечивает условия невыпадения конденсата. Однако расчетные методы в ряде случаев не позволяют получить надежные данные. Более точная оценка теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций проводится в аккредитованных лабораториях (центрах) при испытаниях в климатических камерах, на основании которых определяется их эксплуатационный диапазон. В ИЦ СПбГАСУ такие испытания проводятся в течение 18 лет. Практика показала, что, несмотря на то что сопротивление теплопередаче оконных блоков превышает требуемое по СП 50.13330–2012, теплопотери через окна могут превышать расчетные величины, что объясняется качеством их монтажа на фасаде зданий.

Для контроля теплотехнических свойств окон и качества их установки в эксплуатируемых зданиях с участием СПбГАСУ разработан ГОСТ Р 59149–2020², который регламентирует проведение натурных измерений. Такие испытания в основном проводят при сдаче объектов в эксплуатацию для выявления строительных дефектов и оценки теплопотерь зданий.

Согласно общепризнанным данным инфильтрационные теплопотери в зданиях значительно превышают трансмиссионные. Современные конструкции оконных блоков отличаются высокой степенью герметичности, что позволяет со-

² ГОСТ Р 59149–2020. Окна и двери. Метод определения теплотехнических характеристик в натурных условиях.

Рис. 1. Температурное поле в вертикальном сечении наружного угла (а) и термограмма (б)

Рис. 2. Температурное поле, боковое примыкание оконного блока с двухкамерным стеклопакетом СПД с дистанционными рамками: а — из алюминия; б — «теплая рамка» chromatech ultra

кратить теплопотери за счет инфильтрации. Однако это приводит к нарушению требований по естественной вентиляции.

При отсутствии специальных приточных устройств естественная вентиляция помещений в зимний период осуществляется в основном за счет воздухопроницаемости окон и балконных дверей, а также кратковременного проветривания. Оконные блоки по воздухопроницаемости классифицируются согласно ГОСТ 26602.2–99³ и подразделяются на пять классов при разности давления $\Delta P = 100$ Па. Соответственно количество воздуха, поступающее через оконный блок, в зависимости от класса (А–В), изменяется от 3 до 17 м³/(ч · м²). Следует отметить, что классы Г и Д нехарактерны для современных оконных конструкций.

Обобщение результатов испытаний, проведенных в ИЦ СПбГАСУ, показало, что через оконные блоки, которые наиболее часто используются при строительстве типовых зданий, в помещение при разности давления $\Delta P = 10$ Па поступает менее 5 кг/(ч · м²) наружного воздуха, что соответствует нормативным требованиям по воздухопроницаемости для оконных блоков из ПВХ профиля (ГОСТ 26602.2–99), но не отвечает требованиям по вентиляции (СП 60.13330.2020⁴, СП 54.13330.2016⁵). В качестве примера на рис. 3 приведен расход воздуха для оконного блока,

воздухопроницаемость которого соответствует классу А.

Максимальное количество воздуха, поступающее в жилые помещения через оконный блок класса А при разности давления $\Delta P = 50$ Па, не превышает 2 м³/(ч · м²). Для однокомнатной квартиры с двумя оконными блоками общей площадью 7,2 м² количество инфильтрационного воздуха не более 28 м³/ч, что составляет 25 % от нормативного воздухообмена (СП 60.13330.2020, СП 54.13330.2016), который должен быть не менее однократной величины вытяжки, 110 м³/ч. Следует также отметить, что фирмы-производители оконных блоков стремятся обеспечить максимально возможный класс изделия, тем самым сведя до минимума инфильтрацию воздуха.

При такой ситуации весьма вероятно превышение концентрации CO₂ и снижение качества

Рис. 3. Воздухопроницаемость оконного блока (класс А) по результатам испытаний при $\Delta P = 100$ Па, $Q_1 = 0,36$ м³/(ч · м²)

³ ГОСТ 26602.2–99. Блоки оконные и дверные. Методы определения воздухо- и водопроницаемости. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000.

⁴ СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003. М.: Минстрой России, 2020.

⁵ СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003. М.: Минстрой России, 2016.

воздуха. Вопросы, связанные с повышением качества воздуха в жилых и общественных зданиях, широко обсуждаются и рассмотрены в работах [5–8].

Следует также отметить, что при выборе конструкции оконного блока согласно требованиям СП 50.13330–2012 необходимо обеспечить условие

$$R_u \geq R_u^{TP}, \quad (1)$$

где R_u , R_u^{TP} — соответственно сопротивление оконного блока и требуемое сопротивление воздухопроницанию.

Сопротивление воздухопроницанию оконных блоков определяется как

$$R_u = (1 / G_{ок}) (\Delta P / \Delta P_0)^n, \quad (2)$$

где $G_{ок}$ — воздухопроницаемость светопрозрачной конструкции, кг/(м² · ч), при $\Delta P_0 = 10$ Па, полученная в результате испытаний.

Для определения требуемого сопротивления воздухопроницанию оконных блоков рекомендована формула из СП 50.13330–2012

$$R_u^{TP} = (1 / G_n) (\Delta P / \Delta P_0)^{0,67}, \quad (3)$$

где ΔP — разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, рассчитанная для середины здания.

При испытаниях оконных блоков определяется, как правило, только величина $G_{ок}$ (см. рис. 3). В реальных условиях согласно формуле (2) сопротивление воздухопроницанию оконных блоков непостоянно и зависит от этажа установки, что должно учитываться при расчете систем естественной вентиляции. Из вышеприведенного следует, что качественная работа систем естественной вентиляции обусловлена совокупностью большого числа факторов.

Вопросы повышения эффективности работы естественной вентиляции отражены в работах [9–11].

Для обеспечения нормируемого воздухообмена в жилых зданиях необходимо использовать дополнительные приточные устройства. На строительном рынке имеется большое разнообразие приточных устройств отечественных и зарубежных фирм. При выборе приточных устройств необходимо ориентироваться на обеспечение требований по теплотехнике, звукоизоляции и расходу воздуха. Эффективность работы приточных устройств зависит от их типа и места расположения. Для выбора наиболее ра-

циональных вариантов используется математическое моделирование как эффективный метод исследований [12–14].

Установка пассивных вентиляционных устройств фактически представляет собой точечный или линейный «источник» инфильтрации. Надежно оценить затраты энергии на нагрев поступающего воздуха весьма сложно. Кроме того, выбор места расположения «источника» инфильтрации и его характеристик, особенно в жилых помещениях, требует дополнительных исследований, связанных с особенностями распределения параметров микроклимата.

Моделирование тепловлажностного режима проводилось с использованием гидродинамического пакета STAR-CCM+ для различной планировки квартир. Исходные данные для расчета приняты аналогично приведенным на рис. 1 и 2. Расчеты выполнялись с учетом динамического давления, теплотехнические характеристики ограждающих конструкций соответствовали нормативным значениям СП 50.13330–2012. Определяли наиболее рациональный тип приточного устройства и нагревательного прибора, а также их взаимное расположение. Рассматривались оконные и стеновые клапаны как пассивного, так и активного типа, например «Аэровитал» и WINZEL COMFO RB1-50.

Как пример, на рис. 4 показаны результаты моделирования поля скорости и температуры при установке одного оконного блока с функцией щелевого проветривания. Расчеты показали, что при расположении одного оконного блока с функцией щелевого проветривания в двухкомнатной квартире обеспечивается нормативный воздухообмен. Температура в объеме квартиры соответствует нормативным требованиям. Однако в комнате, где осуществляется приток холодного воздуха, средняя температура снижается на 3–4 °С при обеспечении нормативного притока. Для получения более равномерных полей температуры и подвижности воздуха рекомендуется применение конвекторов в качестве отопительных приборов [15–16].

Выводы

При применении герметичных оконных блоков в жилых и общественных зданиях кратность воздухообмена не соответствует нормам. Для выполнения требований по вентиляции

Рис. 4. Распределение параметров микроклимата в объеме двухкомнатной квартиры при целевом проветривании через оконный блок; отопительные приборы — конвекторы

(СП 60.13330.2020) необходимы дополнительные пассивные или активные приборы для притока воздуха. При этом целесообразно применение конвекторов как отопительных приборов, которые увеличивают конвективный теплообмен в помещениях.

Библиографический список

1. Pisello A. L., Castaldo V. L., Taylor J. E., Cotana F. The impact of natural ventilation on building energy requirement at inter-building scale // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 127. Pp. 870–883.
2. Tabrizi T. B., Hill G., Aitchison M. The impact of different insulation options on the life cycle energy demands of a hypothetical residential building // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 180. Pp. 128–135.
3. Zamovskis M., Vanaga R., Blumberga A. Mathematical Modelling of Performance of New Type of Climate Adaptive Building Shell // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 113. Pp. 270–276.
4. Van Hooff T., Blocken B. J. E., Hensen J. L. M., Timmermans H. J. P. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings // *Building and Environment*. 2014. Vol. 82. Pp. 300–316.
5. Melo A. P., Sorgato M. J., Lamberts R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 133. Pp. 1–13.
6. Дацюк Т. А., Гримитлин А. М. Влияние воздухопроницаемости ограждающих конструкций на энергопотребление жилых зданий // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6 (65). С. 182–187.
7. Дацюк Т. А. Качество воздуха в зданиях с естественной вентиляцией // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2016. № 1 (169). С. 78–81.
8. Datciuk T. Forecasting of ecological situation in course of buildings' design // *Architecture and Engineering*. 2016. Vol. 1. No 2. Pp. 19–22.
9. Кутайцева Е. Х., Малявина Е. Г. Естественная вентиляция жилых зданий // *АВОК*. 1999. № 3. С. 35–40.
10. Jo J., Lim J., Song S., Yeo M., Kim K. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42 (1). Pp. 263–277.
11. Duan S., Zhang G., Jianguo P. et al. Development in research of natural ventilation // *Heating, Ventilating and Air Conditioning*. 2004. Vol. 34. No. 3. Pp. 22–28.
12. Richards P. J., Hoxey R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993. Vol. 46. Pp. 145–153.
13. Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. No. 4. Pp. 848–858.
14. Дацюк Т. А., Ивлев Ю. П., Пухкал В. А. Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 5. С. 179.
15. Пухкал В. А. Регулирование теплового потока конвекторов воздушным клапаном // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 5 (52). С. 191–195.
16. Пухкал В. А. Исследование инерционности отопительных приборов // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 5. С. 269.

References

1. Pisello A. L., Castaldo V. L., Taylor J. E., Cotana F. The impact of natural ventilation on building energy requirement at inter-building scale. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 127, pp. 870–883.

2. Tabrizi T. B., Hill G., Aitchison M. The impact of different insulation options on the life cycle energy demands of a hypothetical residential building. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 180, pp. 128–135.
3. Zamovskis M., Vanaga R., Blumberga A. Mathematical modelling of performance of new type of climate adaptive building shell. *Energy Procedia*, 2017, vol. 113, pp. 270–276.
4. Van Hooff T., Blocken B. J. E., Hensen J. L. M., Timmermans H. J. P. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. *Building and Environment*, 2014, vol. 82, pp. 300–316.
5. Melo A. P., Sorgato M. J., Lamberts R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 133, pp. 1–13.
6. Datsyuk T. A., Grititlin A. M. Vliyanie vozdukhopronitsaemosti ograzhdayushchikh konstruksiy na energopotreblenie zhilykh zdaniy [The effect of the enclosing structure air permeability value on the energy consumption of residential building]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 182–187.
7. Datsyuk T. A. Kachestvo vozdukha v zdaniyakh s estestvennoy ventilyatsiey [Air quality in buildings with natural ventilation]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie – Plumbing, Heating, Air Conditioning*, 2016, no. 1 (169), pp. 78–81.
8. Datciuk T. Forecasting of ecological situation in course of buildings' design. *Architecture and Engineering*, 2016, vol. 1, no 2, pp. 19–22.
9. Kitaytseva E. Kh., Malyavina E. G. Estestvennaya ventilyatsiya zhilykh zdaniy [Natural ventilation of residential buildings]. *AVOK*, 1999, no. 3, pp. 35–40.
10. Jo J., Lim J., Song S., Yeo M., Kim K. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings. *Building and Environment*, 2007, vol. 42 (1), pp. 263–277.
11. Duan S., et al. Development in research of natural ventilation. *Heating, Ventilating and Air Conditioning*, 2004, vol. 34, no. 3, pp. 22–28.
12. Richards P. J., Hoxey R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, vol. 46, pp. 145–153.
13. Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 2009, vol. 44, no. 4, pp. 848–858.
14. Datsyuk T. A., Ivlev Yu. P., Pukhkal V. A. Modelirovanie teplovogo rezhima zhilykh pomescheniy pri preryvistom otoplenii [Modeling of the thermal regime of residential premises with intermittent heating]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 5, p. 179.
15. Pukhkal V. A. Regulirovanie teplovogo potoka konvektorov vozdushnym klapanom [Regulation of the convector heat flow by using air valves]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 5 (52), pp. 191–195.
16. Pukhkal V. A. Issledovanie inertsionnosti otopitel'nykh priborov [Investigation of heating units' inertia]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 5, p. 269.