УДК 697.921.23

© В. А. Пухкал, канд. техн. наук, доцент
© С. М. Анисимов, д-р техн. наук, профессор
© А. Л. Шкаровский, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: pva1111@rambler.ru, szkarowski@mail.ru
© А. В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор
(Национальный исследовательский университет
ИТМО, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: kafedra-kv@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-5-130-136

© V. A. Pukhkal, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© S. M. Anisimov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. L. Shkarovsky, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: pva1111@rambler.ru, szkarowski@mail.ru
© A. V. Tsygankov, Dr. Sci. Tech., Professor
(ITMO University, St. Petersburg, Russia)
E-mail: kafedra-kv@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ С ПОДАЧЕЙ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ РЕГУЛИРУЕМЫЕ ОКОННЫЕ СТОРКИ

MODELING OF VENTILATION IN LIVING PREMISES WITH AIR INTAKE THROUGH ADJUSTABLE WINDOW SASHES

Рассматриваются системы естественной приточно-вытяжной вентиляции жилых помещений с подачей воздуха через конструкции окон. Основное внимание уделено подаче воздуха при открывании окна наклонном створки и параллельным смещением створки от рамы с образованием щели (проветривание помещения). Приведены данные исследований скоростных и температурных полей в объеме помещения, а также изменение температуры внутреннего воздуха при проветривании помещения при работающем и неработающем отопительном приборе. Исследована подача воздуха параллельным смещением створки от рамы с образованием щели в жилых помещениях квартир с использованием отопительных конвекторов. Исследовано распределение потоков воздуха в помещениях с использованием гидродинамического пакета STAR-CCM+. Установка в жилых зданиях оконных блоков с функцией параллельного смещения створки позволяет обеспечить нормативный воздухообмен в помещениях без применения специальных приточных устройств. В закрытом состоянии оконный блок соответствует нормативным требованиям по сопротивлению теплопередаче и звукоизоляции.

Ключевые слова: вентиляция, жилые помещения, окна, температурные поля.

The article presents the results of investigating the systems of natural supply and exhaust ventilation of residential premises with air supply through window structures. In particular, the analysis focuses on cases of air intake through a gap in tilting window sash and parallel opening window sash (room's ventilation). There are provided the study results concerning the air velocity and temperature fields in the room's volume, as well as the internal air temperature changes during the room's ventilation in cases of active and inactive heating appliance. There is studied the air intake by the parallel displacement of the sash from the frame with formation of a gap in the living premises where heating convectors are used. The distribution of air flows is explored using STAR-CCM+ hydrodynamic analysis software package. The installation of window blocks in residential buildings with the function of parallel displacement of the sash allows for the standards-compliant air exchange in the premises without the use of special supply devices. When closed, the window block complies with regulatory requirements to heat transfer resistance and soundproofing.

Keywords: ventilation, living accommodations, windows, temperature fields.

Введение

В жилых помещениях в большинстве случаев устраиваются системы естественной приточно-вытяжной вентиляции. Поступление наружного воздуха в помещения предусматривается через

конструкции окон или специальные приточные устройства в наружных стенах или окнах¹ [1–4].

¹ Рекомендации по улучшению воздухообмена в жилых зданиях повышенной этажности. М.: Стройиздат, 1978. 40 с.

При использовании окон в качестве приточных устройств возможны три варианта их открывания (рис. 1):

- наклон створки окна (рис. 1, б);
- открывание створки окна (рис. 1, з);
- параллельное смещение створки от рамы с образованием щели между створкой и рамой окна (рис. 1, в) [5].

Проживающий в помещении регулирует проветривание с помощью окон или приточных устройств вслед за сменой погодных условий, опираясь при этом на свои теплоощущения. Но стандартные окна сложно открывать плавно, поэтому они не обеспечивают необходимого по нормам притока воздуха. Через них поступает наружный воздух, как правило, создавая сквозняк в жилых помещениях. С помощью таких окон можно проветривать помещения «залпом», но сложно использовать их как постоянные приточные устройства для нормативного воздухообмена квартир.

Для организованного притока наружного воздуха в жилых помещениях рекомендуются регулируемые приточные устройства, отвечающие следующим требованиям²:

- отсутствие дискомфорта по температуре и скорости воздуха в зоне обитания;
- герметичность устройств в закрытом положении;
- термическое сопротивление приточных устройств — не менее термического сопротивления оконного заполнения;

² Там же.

- возможность плавного регулирования во всем диапазоне — от полностью открытого до полностью закрытого положения;

- эстетичность.

Приточные устройства для подачи наружного воздуха в помещения могут располагаться в окнах или наружных стенах и иметь разные конструкции и исполнение. Как показано в работе [6], поля температуры и скорости потока воздуха в жилых помещениях при поступлении наружного воздуха через приточные устройства неоднородны и значения параметров воздуха в зоне обитания отличаются от нормативных значений. Формирование поля температуры и скорости воздуха в помещении сильно зависит от типа отопительного прибора, конструкции и размещения приточного устройства.

Учитывая более высокие затраты на устройство приточных устройств по сравнению с оконными конструкциями, целесообразно рассмотреть решения по использованию окон в качестве приточных устройств, в частности — применение параллельного смещения створки от рамы с образованием щели между створкой и рамой окна. В статье поставлена задача исследования таких решений.

Методы исследования

Одним из методов изучения особенностей формирования полей температуры и скорости в объеме жилой комнаты является численное моделирование. В [5] представлены данные моделирования в программе TRNSYS помещения размерами 5×4×2,5 м. Исследованы конструкции

Рис. 1. Варианты открывания окон: а — окно закрыто; б — наклон створки окна при открывании; в — параллельное смещение створки от рамы; з — боковое открывание створки окна

окон с откидыванием створки и параллельным смещением для режимов закрытого окна (без вентиляции) и открытого (с вентиляцией помещения путем проветривания).

Если приток наружного воздуха и выход внутреннего воздуха происходят через одно окно, то нижняя часть окна служит для входа наружного воздуха, а верхняя — для выхода внутреннего воздуха.

Воздухообмен через открытое окно, находящееся в жилом помещении, может быть определен по зависимости [7]

$$G = \mu F_o \frac{2}{3} \sqrt{2g \frac{(\rho_n - \rho_v) \rho_n \rho_v}{(\sqrt[3]{\rho_n} + \sqrt[3]{\rho_v})^3}} \sqrt{H}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент расхода; F_o — площадь открытого отверстия окна, м^2 ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ_n — плотность наружного воздуха, кг/м^3 ; ρ_v — плотность внутреннего воздуха, кг/м^3 .

При открывании окон на 90° (рис. 1, з):

- коэффициент расхода $\mu_{90^\circ} = 0,7$;
- площадь окна (открытого отверстия), м^2 :

$$F_o = BH,$$

где H — высота окна, м; B — ширина окна, м.

При меньших углах коэффициенты расхода изменяются. Кроме того, меняется свободная площадь отверстия окна F_o для прохода воздуха.

При малых углах открытия створок коэффициент расхода зависит от формы фальца, толщины оконной рамы и схемы установки рамы в откосе. При углах поворота створок до 25° коэффициент расхода можно определить по зависимости [8]

$$\mu_\phi = 0,0147\phi - 0,0928 \frac{H}{B} + 0,4116, \quad (2)$$

где ϕ — угол между плоскостью открытой и закрытой створки окна в градусах.

По результатам испытаний при параллельном смещении створки на 6 мм коэффициент расхода $\mu_{ш} = 0,51$.

Площадь отверстия, м^2 , при открывании створки окна на угол ϕ :

- при наклоне створки окна (см. рис. 1, б)

$$F_o = 2H \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \left[H \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + B \right]; \quad (3)$$

- боковым открывании створки окна (см. рис. 1, з)

$$F_o = 2B \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \left[B \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + H \right]. \quad (4)$$

Зависимость (1) можно преобразовать к виду

$$G = \beta_{\Delta t} F_o \mu \sqrt{H}, \text{ кг/с}, \quad (5)$$

где $\beta_{\Delta t}$ — комплекс, зависящий от разности температур внутреннего и наружного воздуха и определяемый по формуле

$$\beta_{\Delta t} = 0,0705 (t_v - t_n)^{0,538}. \quad (6)$$

В СПбГАСУ выполнено моделирование режима вентиляции помещения при применении в качестве отопительного прибора плинтусного конвектора. За модель принято помещение с характерными для жилых зданий размерами: ширина (между осями) — 3 м; глубина — 6 м; высота (разность отметок чистого пола двух этажей) — 3 м. Размеры окна 1,4×1,5 м. Расчетная температура наружного воздуха -24°C , внутреннего воздуха $+20^\circ\text{C}$.

Приведенное термическое сопротивление наружной стены $R_{0\text{н.с.пр}} = 2,997 (\text{м}^2 \times \text{К})/\text{Вт}$; окна — $R_{0\text{ок.пр}} = 0,51 (\text{м}^2 \times \text{К})/\text{Вт}$.

Расход наружного воздуха определен из санитарных норм: 3 $\text{м}^3/\text{ч}$ на 1 м^2 жилой площади. Приточный воздух подается через регулируемые оконные створки, удаляется через щель высотой 0,02 м между поверхностью пола и нижней поверхностью створки внутренней двери, расположенной по оси помещения напротив окна.

Моделировался плинтусный отопительный прибор конвекторного типа высотой 140 мм и шириной 30 мм, который установлен на наружной стене помещения вместо плинтуса.

Результаты исследований

Данные моделирования скоростных полей в помещении при наклоне створки окна (см. рис. 1, б) и параллельном смещении створки от рамы с образованием щели в 6 мм между створкой и рамой окна (см. рис. 1, в) через 100 с после открывания представлены на рис. 2 и 3 [5].

В рассматриваемом помещении удаление воздуха не предусмотрено (режим проветривания помещения), поэтому в нижней части окна холодный воздух поступает в помещение, а в верхней — удаляется из помещения (рис. 4). Такое распределение потоков наблюдается как при неработающем, так и при работающем отопительном приборе.

При наклоне створки окна образуются две струи холодного приточного воздуха по бокам, опускающиеся вниз к поверхности пола. Восходящая конвективная струя от отопительного

Рис. 2. Скоростные поля при открывании окна при отсутствии или неработающем отопительном приборе:
а — наклон створки окна; б — параллельное смещение створки от рамы с образованием щели в 6 мм между створкой и рамой окна

Рис. 3. Скоростные поля при открывании окна при работающем отопительном приборе (конвекторе):
а — наклон створки окна; б — параллельное смещение створки от рамы с образованием щели в 6 мм между створкой и рамой окна

Рис. 4. Подача и удаление воздуха в помещении при проветривании

прибора не предотвращает его поступление на пол. Нагретый в конвекторе воздух выходит из помещения в верхней части окна. Такой режим работы приводит к повышенному теплопотреблению системы отопления помещения и является неэффективным.

При параллельном смещении створки от рамы с образованием щели в 6 мм и неработающем отопительном приборе образуется плоский поток по всей ширине окна, который опускается и поступает на поверхность пола. При работающем отопительном приборе наружный холодный воздух встречается с восходящим потоком нагретого внутреннего воздуха, перемешивается с ним и, настилаясь на поверхность окна, наружной стены и потолка, поступает в помещение.

Чтобы создать комфортные условия в жилой зоне, нужно разместить приточное устройство и отопительный прибор наилучшим образом относительно друг друга. У оконных блоков с функцией параллельного смещения створки лучше устанавливать отопительные приборы, образующие восходящие конвективные потоки.

Зависимости изменения температуры воздуха в помещении при открывании окон приведены на рис. 5 [5]. Помещение имело начальную температуру внутреннего воздуха $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного воздуха $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При параллельном смещении створки от рамы с образованием щели кратность воздухообмена в помещении ниже, и значительно ниже темп снижения температуры в помещении по сравнению с откинутой створкой. Следовательно, при регулировании ширины щели и открывания окон можно обеспечить требуемый расход приточного воздуха в помещении.

В СПБГАСУ с использованием гидродинамического пакета STAR-CCM+ выполнено исследование скоростных и температурных полей в помещении при применении в качестве отопительного прибора плинтусного конвектора (рис. 6) [9–12].

Удельные тепловые потери в области окна с учетом нагрева поступающего наружного воздуха составляют 716 Вт/м .

Исследованы плинтусные конвекторы с различным удельным тепловым потоком (от 218 до 330 Вт/м). Даже при удельном тепловом потоке 330 Вт/м нисходящий поток охлажденного у поверхности остекления и приточного наружного воздуха поступает в жилую зону помещения со скоростью $0,3\text{ м/с}$ на расстоянии $1,2\text{ м}$ от наружной стены.

Чтобы предотвратить попадание холодного потока воздуха в обслуживаемую зону, нужно отклонить струю нисходящего потока в верхнюю зону помещения. Оптимальным вариантом бу-

Рис. 5. Изменение температуры внутреннего воздуха в помещении

Рис. 6. Распределение температуры воздуха по оси помещения с плинтусным конвектором, установленным на наружной стене внутри помещения при удельном тепловом потоке конвектора: а — 218 Вт/м; б — 274 Вт/м; в — 330 Вт/м

дет размещение под окном конвектора, имеющего удельный тепловой поток, равный удельным тепловым потерям в области окна, и длину, соответствующую ширине окна.

Установка в жилых зданиях оконных блоков с функцией параллельного смещения створки позволяет обеспечить нормативный воздухооб-

мен в помещениях без применения специальных приточных устройств. В закрытом состоянии оконные блоки соответствуют нормативным требованиям по сопротивлению теплопередаче и звукоизоляции.

Закключение

1. В режиме проветривания жилых помещений при откинутой створке окна наружный воздух поступает в помещение по бокам створки. При неработающем и работающем отопительном приборе холодный воздух опускается вниз и настиляется на пол.

2. В режиме проветривания помещений при параллельном смещении створки от рамы наружный воздух поступает в помещение в виде плоской струи по всей длине створки. При работающем конвекторе, размещенном под окном, над отопительным прибором формируется восходящая конвективная струя, предотвращающая поступление холодного воздуха в нижнюю зону помещения. В помещении образуются устойчивые циркуляционные потоки от окна к противоположной внутренней стене.

3. Предложены зависимости для определения расхода приточного воздуха в режиме проветривания помещений при использовании окон в качестве приточных устройств (открыванием створки окна, наклоном створки окна, параллельным смещением створки от рамы).

4. При применении подачи приточного воздуха в жилые помещения через регулируемые оконные створки с параллельным смещением створки от рамы с образованием щели необходимо применять отопительные приборы конвективного типа, формирующие восходящие потоки нагретого воздуха и позволяющие локализовать нисходящие потоки наружного холодного воздуха.

Библиографический список

1. Дацюк Т. А. Оценка эффективности естественной вентиляции жилых зданий // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 1 (145). С. 112–115.
2. Дацюк Т. А. Качество воздуха в зданиях с естественной вентиляцией // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2016. № 1 (169). С. 78–81.
3. Дацюк Т. А., Гримитлин А. М. Моделирование тепловлажностного режима при проектировании зда-

ний // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 3 (38). С. 117–121.

4. Смирнов Е. Б., Дацюк Т. А., Таурит В. Р. Оценка экологической безопасности проектируемых зданий // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 3 (71). С. 83–99.

5. Петров О. А. Инновационные решения для комфортного микроклимата в доме // URL: <https://www.aktivhaus.ru/upload/iblock/a51/a517e8cb63a0920666bcb2f5223bf44f.pdf> (дата обращения: 28.08.2021). 46 с.

6. Дацюк Т. А., Ивлев Ю. П., Пухкал В. А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 6 (41). С. 12–21.

7. Максимов Г. А., Орлов А. И. Отопление и вентиляция. 2-е изд., перераб. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954–1955. Ч. 2. Вентиляция. 1955. 343 с.

8. Hall M. Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechselpotential von Kippfenstern: Dissertation. Kassel, 2004. URL: https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/handle/123456789/983/Diss3190_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 28.08.2021).

9. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.

10. Пухкал В. А., Суханов К. О., Гримитлин А. М. Обеспечение теплового комфорта в помещениях с плинтусной системой водяного отопления // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 156–162.

11. Суханов К. О., Гримитлин А. М., Шкаровский А. Л. Микроклимат жилых помещений с плинтусной системой водяного отопления и подачей приточного воздуха через регулируемые оконные створки // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 111–115.

12. Ploskić A., Holmberg S. Heat emission from thermal skirting boards // Building and Environment. 2010. Vol. 45. № 5. Pp. 1123–1133.

References

1. Datsyuk T. A. Otsenka effektivnosti estestvennoy ventilyatsii zhilykh zdaniy [Evaluation of the effectiveness of natural ventilation of residential buildings]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie – Plumbing, heating, air conditioning*, 2014, no. 1 (145), pp. 112–115.

2. Datsyuk T. A. Kachestvo vozdukha v zdaniyakh s estestvennoy ventilyatsiyey [Air quality in buildings with natural ventilation]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie – Plumbing, heating, air conditioning*, 2016, no. 1 (169), pp. 78–81.

3. Datsyuk T. A., Grititlin A. M. Modelirovanie teplovlazhnostnogo rezhima pri proektirovanii zdaniy [Modeling of the heat and humidity conditions at designing of buildings]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 3 (38), pp. 117–121.

4. Smirnov E. B., Datsyuk T. A., Taurit V. R. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti proektiruemykh zdaniy [Assessment of environmental safety of projected buildings]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya – Water and Ecology: Problems and Solutions*, 2017, no. 3 (71), pp. 83–99.

5. Petrov O. A. Innovatsionnye resheniya dlya komfortnogo mikroklimata v dome [Innovative solutions for a comfortable microclimate in the house]. Available at: <https://www.aktivhaus.ru/upload/iblock/a51/a517e8cb63a0920666bcb2f5223bf44f.pdf> (accessed: 28.08.2021), 46 p.

6. Datsyuk T. A., Ivlev Yu. P., Pukhkal V. A. Rezul'taty modelirovaniya mikroklimata zhilykh pomeshcheniy pri razlichnykh tipakh otopitel'nykh priborov [Results of modeling the microclimate of residential premises with various types of heating devices]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Civil Engineering Journal*, 2013, no. 6 (41), pp. 12–21.

7. Maksimov G. A., Orlov A. I. Otoplenie i ventilyatsiya [Heating and ventilation]. 2-nd ed., revised. Moscow, 1954–1955, Gos. izd-vo lit. po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., Pt. 2. Ventilyatsiya [Ventilation]. 1955, 343 p.

8. Hall M. Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechselpotential von Kippfenstern: Dissertation. Kassel, 2004. Available at: https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/handle/123456789/983/Diss3190_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed: 28.08.2021).

9. Grititlin A. M., Datsyuk T. A., Denisikhina D. M. Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya [Mathematical modeling in the design of ventilation and air conditioning systems]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2013, 192 p.

10. Pukhkal V. A., Sukhanov K. O., Grititlin A. M. Obespechenie teplovogo komforta v pomeshcheniyakh s plintusnoy sistemoy vodyanogo otopleniya [Indoor thermal comfort maintenance by means of water skirting board heating system]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 6 (59), pp. 156–162.

11. Sukhanov K. O., Grititlin A. M., Szkarowski A. L. Mikroklimat zhilykh pomeshcheniy s plintusnoy sistemoy vodyanogo otopleniya i podachey pritochnogo vozdukha cherez reguliruemye okonnnye stvorki [The microclimate of living quarters with a skirting board water heating system and fresh air input through adjustable window sashes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 111–115.

12. Ploskić A., Holmberg S. Heat emission from thermal skirting boards. *Building and Environment*, 2010, vol. 45, no. 5, pp. 1123–1133.