

УДК 697.921.23

© Т. А. Дацюк, д-р техн. наук, профессор
© В. М. Уляшева, д-р техн. наук, профессор
© В. А. Пухкал, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: tdatsuk@mail.ru
© А. А. Верховский, канд. техн. наук
(Научно-исследовательский институт строительной
физики, Москва, Россия)
E-mail: v250815@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-73-83

© Т. А. Datsuk, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. M. Ulyasheva, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. A. Pukhkal, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: tdatsuk@mail.ru
© A. A. Verhovskiy, PhD in Sci. Tech.
(The Research Institute of Building Physics,
Moscow, Russia)
E-mail: v250815@gmail.com

ВЛИЯНИЕ УДЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОФИСНЫХ ЗДАНИЙ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

INFLUENCE OF SPECIFIC VENTILATION CHARACTERISTICS OF OFFICE BUILDINGS ON ENERGY CONSUMPTION

Предложена методика для анализа проектных решений офисных зданий с модульными фасадами, позволяющая оценить влияние удельной вентиляционной характеристики на потребление энергоресурсов. Проведен анализ действующего нормативного документа, который применяется для разработки энергетического паспорта. Выявлено влияние инфильтрации воздуха на энергетические показатели здания. Показано, что для зданий рассматриваемого типа инфильтрация должна определяться на основании результатов испытаний фрагментов фасада на воздухопроницаемость и ветровую нагрузку. Предложена методика расчета энергопотребления зданий на стадии проектирования.

Ключевые слова: энергосбережение, вентиляция, инфильтрация.

There is proposed a methodology for analyzing design solutions of office buildings with modular facades which allows assessing the impact of specific ventilation characteristics on energy consumption. An analysis of the currently valid regulatory document which is used to develop an energy passport has been carried out. The influence of air infiltration on the energy performance of the building has been revealed. It is shown that for buildings of the type under consideration, infiltration should be determined basing on the results of tests of facade fragments for air permeability and wind load. The authors propose a calculation algorithm for implementing the developed methodology for the energy consumption of buildings at the design stage.

Keywords: energy saving, ventilation, infiltration.

Введение

Расчет затрат энергии на нужды вентиляции требует учета вклада инфильтрации, который во многих случаях становится достаточно существенным, но оценивается весьма приближенно. Количество инфильтрующегося в здание воздуха зависит от ряда факторов, основными из которых можно считать конструктивные решения здания, аэродинамический режим застройки, особенности функционирования систем вентиляции.

В отечественной литературе, к сожалению, вопросу расчета инфильтрации не уделяется достаточного внимания. В большинстве случаев расчеты ориентируются на требования действующих нормативных документов¹ [1, 2], оценивая общий воздушный режим зданий [3, 4]. Влияние воздухопроницаемости на воздушный режим и тепловые нагрузки здания рассматривается в работах [5–11]. В зарубежной строительной практике исследование вопросов воздухопроницаемости

строительных конструкций и инфильтрации в основном относится к высотным зданиям. Обзор методов расчета инфильтрации в высотных зданиях разного назначения приведен в [12–15]. Для исследования вопросов инфильтрации используются как натурные испытания, так и численные методы CFD [16–19]. Интерес представляют также работы, направленные на оценку энергосбережения зданий с учетом инфильтрации [20–26].

В РФ при проектировании зданий вопросы их энергосбережения прорабатываются в соответствии с методикой¹ в рамках энергетического паспорта (ЭП). В качестве базовой величины принята удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, $q_{от}^P$, которая используется для ранжирования зданий по классам энергосбережения и нормируется в пределах каждого класса. Вопрос о соответствии проектируемого здания классу энергосбережения, например А или В, весьма важен для инвесторов.

Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания $q_{от}^P$ определяется в соответствии с приложением Г методики¹:

$$q_{от}^P = [k_{об} + k_{вент} - \beta_{КПИ} (k_{быт} + k_{рад})], \quad (1)$$

где $\beta_{КПИ}$ — коэффициент полезного использования теплоступлений, определяемый по формуле

$$\beta_{КПИ} = \frac{k_{рег}}{1 + 0,5n_B}; \quad (2)$$

$k_{об}$ — удельная теплозащитная характеристика здания, Вт/(м³ · °С); $k_{вент}$ — удельная вентиляционная характеристика здания, Вт/(м³ · °С); $k_{быт}$ — удельная характеристика внутренних теплоступлений здания; $k_{рад}$ — удельная характеристика теплоступлений в здание от солнечной радиации, Вт/(м³ · °С); $k_{рег}$ — коэффициент эффективности регулирования подачи теплоты в системах отопления, рекомендуемое значение

$k_{рег} = 0,9$ в системе отопления с местными терморегуляторами и центральным авторегулированием на вводе; n_B — средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период, ч⁻¹.

Использование методики¹ применительно к общественным или уникальным зданиям, особенно повышенной этажности, требует корректной оценки инфильтрации. Анализ ряда проектов показал, что удельная вентиляционная характеристика может превышать в 1,2–1,5 раза удельную теплозащитную характеристику здания, которая расчетным путем определяется более достоверно и при этом имеется возможность для ее варьирования за счет увеличения, например, толщины утеплителя.

Кроме того, корректная оценка объемов инфильтрации и удельной вентиляционной характеристики здания приобретает особую актуальность в связи с требуемым снижением на 40 % удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию для проектируемых зданий с 1 января 2023 г. (приказ Минстроя России № 1550/пр). Это требует не только применения новых энергосберегающих материалов и конструкций, но и повышения точности расчетов.

Удельная вентиляционная характеристика здания, $k_{вент}$, учитывает инфильтрацию и определяется по методике¹:

$$k_{вент} = \frac{L_{вент} \rho_B^{вент} N_{вент} (1 - k_{эф}) + G_{инф} N_{инф}}{(168V_{от})}, \quad (3)$$

где s — удельная теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг · °С); $L_{вент}$ — количество приточного воздуха в здание, м³/ч; $N_{вент}$ — число часов работы механической вентиляции в течение недели; $N_{инф}$ — число часов учета инфильтрации в течение недели, равное для зданий со сбалансированной приточно-вытяжной вентиляцией 168 ч, и $(168 - N_{вент})$ — для помещений, в которых поддерживается подпор воздуха во время

¹ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.

действия приточной механической вентиляции; $\rho_{\text{в}}^{\text{вент}}$ — плотность воздуха, 1,2 кг/м³; $G_{\text{инф}}$ — количество воздуха, инфильтрующегося в здание через ограждающие конструкции, кг/ч; $V_{\text{от}}$ — отапливаемый объем здания, м³; $k_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности рекуператора (утилизатора).

Средняя кратность воздухообмена для здания в целом за отопительный период:

$$n_{\text{в}} = \left[\frac{L_{\text{вент}} N_{\text{вент}}}{168} + \frac{G_{\text{инф}} N_{\text{инф}}}{168 \rho_{\text{в}}^{\text{вент}}} \right] / (\beta_{\text{в}} V_{\text{от}}), \quad (4)$$

где $\beta_{\text{в}}$ — коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций, $\beta_{\text{в}} = 0,85$.

Для многофункциональных зданий допускается выполнять расчет средней кратности воздухообмена за отопительный период для однотипных помещений с последующим осреднением для всего здания в целом.

Количество инфильтрующегося воздуха в основном принимается без расчета, согласно методике¹ в зависимости от этажно-

сти зданий, что нередко приводит к увеличению расчетной кратности воздухообмена, а следовательно, и энергоресурсов. В настоящее время достаточно широко распространено строительство общественных (офисных, спортивных) зданий из модульных фасадных конструкций (КФС, конструкции фасадные светопрозрачные), которые имеют как светопрозрачные, так и непрозрачные элементы. Воздухопроницаемость таких фасадов значительно ниже, чем у обычных зданий, поэтому, если принимать количество инфильтрующегося воздуха согласно п. Г4 методики¹, это приведет к завышенным значениям энергопотребления.

При оценке энергосбережения офисных многофункциональных зданий с модульными фасадами, включающих офисы, зоны спа и бассейны, возникают существенные погрешности, связанные не только с корректной оценкой инфильтрации, но и с функционированием систем вентиляции и учетом времени ее работы. Предварительные расчеты часто приводят к серии последовательных пересчетов и поиску компромиссных решений в связи с тем, что не обеспечиваются требования удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания в целом.

Методы

Для офисных зданий с модульными фасадами (КФС) инфильтрация определяется по результатам испытаний. Фрагменты таких фасадов исследуются в аккредитованных испытательных центрах на специальных стендах на водовоздухопроницаемость и ветровую нагрузку согласно ГОСТ 33792 и ГОСТ 33793 в диапазоне разности давлений 10–2000 Па.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены результаты испытаний на воздухопроницаемость модуля фасада здания «СКА Арена», расположенного в Санкт-Петербурге.

По результатам испытаний КФС определяют зависимость воздухопроницаемости



Рис. 1. Испытание модуля КФС на воздухопроницаемость на стенде СПбГАСУ

фасадных модулей для расчетного диапазона давлений и показатель фильтрации (см. рис. 2).

Результаты

Для оценки влияния удельной вентиляционной характеристики на энергопотребление офисных зданий с модульным фасадом при проектировании или анализе проектных решений предложена методика, основанная на расчетах по нормативному документу¹ и многочисленных испытаниях фасадных конструкций в ИЦ «Фасады-СПК» НИИСФ РААСН и ИЦ СПбГАСУ. Применение предложенной методики позволяет выявить диапазон возможных значений удельной вентиляционной характеристики здания, при котором обеспечивается нормируемый удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Характеристики энергопотребления здания, такие как $k_{об}$, $k_{быт}$, $k_{рад}$, входящие в формулу (1), принимаются согласно расчету по нормативному документу¹ и в статье не рассматриваются.

Ниже приведен алгоритм для расчета инфильтрации и анализа влияния удельной вен-

тиляционной характеристики на энергопотребление здания по укрупненным показателям.

1. Определение расхода инфильтрующегося воздуха для здания в целом

1.1. Определяется распределение расчетного давления по высоте здания, положение нейтральной оси здания (NLP), площадь фасада (количество модулей разного типа N_i) ниже NLP для определения объемного расхода воздуха через фасад.

1.2. По результатам испытаний однотипных модулей фасада на воздухопроницаемость определяются зависимости удельного объемного расхода воздуха g_i , $m^3/(ч \cdot m^2)$ от разности давлений и показатель фильтрации аналогично примеру, приведенному на рис. 2:

$$\ln g_i = a_i + b_i \ln \Delta P_i, \quad (5)$$

где g_i — удельный объемный расход воздуха через неплотности для i -го модуля, $m^3/(ч \cdot m^2)$; b_i — показатель фильтрации i -го модуля; a_i — характеристика i -го модуля КФС; ΔP_i — разность давлений, Па.

1.3. Для характеристики воздухопроницаемости разных модулей фасада определяется их герметичность C_p , $m^3/(ч \cdot Pa^{b_i})$:

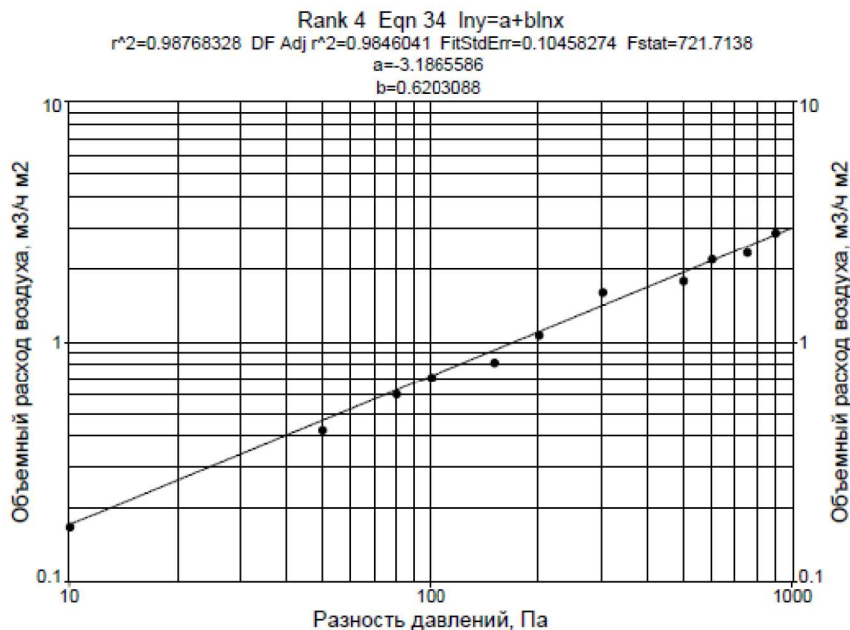


Рис. 2. Зависимость удельного объемного расхода воздуха g , $m^3/(ч \cdot m^2)$, от разности давлений ΔP , Па

$$C_i = g_i / \Delta P_{\text{рас}}^{b_i} \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{рас}}$ — расчетная разность давлений, Па; b_i — показатель фильтрации, определяемый экспериментально (см. рис. 2).

1.4. Для оценки объема инфильтрации за расчетную разность давлений $\Delta P_{\text{рас}}$, Па, принимается значение, соответствующее половине высоты зоны *NLP*.

1.5. Определяется расход инфильтрующегося воздуха $L_{\text{инф},i}$, м³/ч, при расчетной разности давлений $\Delta P_{\text{рас}}$, через *i*-й модуль:

$$L_{\text{инф},i} = \sum_{i=1}^n C_i \Delta P_{\text{рас}}^{b_i} S_i, \quad (7)$$

где S_i — площадь *i*-го модуля, м²; $L_{\text{инф},i}$ — расход инфильтрующегося воздуха, м³/ч, через *i*-й модуль.

1.6. Определяется расход инфильтрующегося воздуха $L_{\text{инф}}$, м³/ч, для расчетной разности давлений $\Delta P_{\text{рас}}$ через поверхность фасада ниже *NLP*, состоящую из различных модулей:

$$L_{\text{инф}} = \sum_{i=1}^N L_{\text{инф},i}, \quad (8)$$

где n — количество разнотипных модулей; N_i — количество модулей каждого типа.

1.7. Определяется зависимость объема инфильтрующегося воздуха $L_{\text{инф}}$ от разности давлений, например в диапазоне 10–2000 Па, аналогично приведенной на рис. 2. Средний показатель фильтрации фасада $b_{\text{ср}}$ принимается как среднее значение показателей для n модулей. Рассчитывается средняя герметичность фасада $C_{\text{ср}}$, м³/(ч · Па ^{$b_{\text{ср}}$}), по формуле (6).

1.8. Средний показатель фильтрации по зданию $b_{\text{ср}}$ и средняя герметичность фасада $C_{\text{ср}}$ используются для оценки объема инфильтрации при изменении положения *NLP*, которая, в свою очередь, зависит от функционирования систем вентиляции.

1.9. Для более точного определения $L_{\text{инф}}$ при заданном расположении модулей на фасаде здания расчет рекомендуется проводить для каждого модуля при разности давлений, соответствующих его центру.

2. Анализ влияния удельной вентиляционной характеристики на энергопотребление здания

2.1. Определяется средняя кратность воздухообмена по зданию в целом за отопительный период механической вентиляции без учета инфильтрации и с учетом инфильтрации по зависимости (4). При этом

$$\frac{G_{\text{инф}}}{\rho_{\text{вент}}} = L_{\text{инф}}$$

Оценивается вклад инфильтрации (для сбалансированной вентиляции или предварительной оценки время действия инфильтрации принимается 168 ч).

2.2. Средняя кратность воздухообмена по зданию $n_{\text{в}}$ в целом с учетом инфильтрации рассчитывается по зависимости (4).

2.3. Определяется зависимость $n_{\text{в}}$ от времени работы механической вентиляции. Пример зависимости средней кратности воздухообмена $n_{\text{в}}$ от времени работы систем вентиляции приведен на рис. 3. Для построения графика рекомендуется использовать не менее пяти значений времени работы систем вентиляции (например, 60, 80, 120, 140, 160 часов).

В общем виде расчетная зависимость имеет вид

$$\ln n_{\text{в}} = a + b \ln N_{\text{вент}}, \quad (9)$$

где $n_{\text{в}}$ — средняя кратность воздухообмена по зданию с учетом инфильтрации, ч⁻¹; $N_{\text{вент}}$ — время работы систем вентиляции здания, ч; a , b — параметры, определяемые для конкретных условий расчета.

2.4. Определяется зависимость удельной вентиляционной характеристики здания (зависимость (3)) от следующих факторов:

- средней кратности воздухообмена (рис. 4);
- эффективности рекуператоров (утилизаторов) (рис. 5).

2.5. Зависимость удельной вентиляционной характеристики здания от средней кратности воздухообмена при отсутствии утилизации теплоты (коэффициент эффективно-

сти утилизаторов теплоты ($k_{эф} = 0$) приведена на рис. 4.

Удельная вентиляционная характеристика здания $k_{вент}$ в зависимости от кратности воздухообмена по зданию n_v аппроксимируется как

$$k_{вент} = -0,001 + 0,314n_v. \quad (10)$$

Примечание. Зависимость (10) справедлива для рассматриваемого примера.

2.6. Зависимость удельной вентиляционной характеристики здания от среднего коэффициента эффективности рекуператоров (утилизаторов) определяется для пяти рассчитанных значений кратности воздухообмена, полученных в п. 2.3. Значения коэффициента эффективности, например, принимаются 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 (см. рис. 5).

3. Определение коэффициента полезного использования теплоступлений $\beta_{кпи}$

3.1. Согласно методике¹ (формула (1)), удельная характеристика расхода тепловой энергии здания зависит от коэффициента полезного использования теплоступле-

ний $\beta_{кпи}$, который, в свою очередь, зависит от средней кратности воздухообмена и определяется по формуле (2). Зависимость $\beta_{кпи}$ от значений средней кратности воздухообмена приведена на рис. 6.

3.2. На основании проведенного анализа оценивается влияние перечисленных факторов на величину удельной вентиляционной характеристики. Результаты расчетов удобно представить в виде таблицы.

Для построения зависимостей и расчетов использовались программные пакеты Excel и TableCurve². Коэффициент детерминации для зависимостей, приведенных на рис. 3–6, не менее 0,99.

Методика ориентирована на учет максимального объема инфильтрации. Если время действия инфильтрации менее 168 ч в неделю, то это учитывается при расчете n_v . На основании результатов расчета, приведен-

² Математический пакет TableCurve. URL: <https://www.androidphonesoft.com/blog/tablecurve-2d-review-simplify-your-graphing-with-this-powerful-software/> (дата обращения: 14.12.2023).

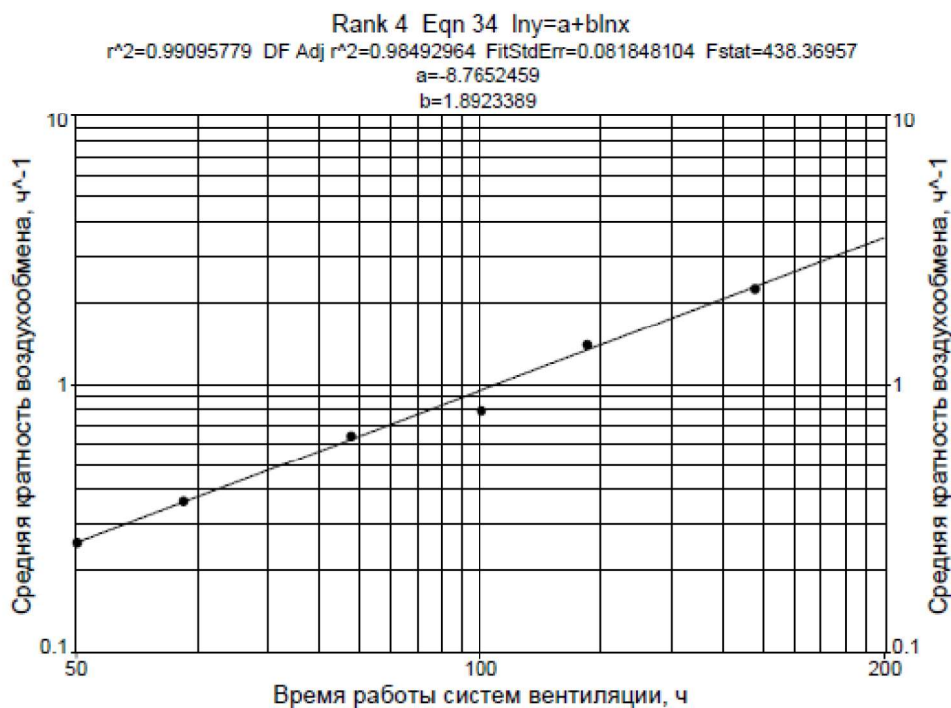


Рис. 3. Пример зависимости средней кратности воздухообмена по зданию n_v от времени работы систем вентиляции $N_{вент}$

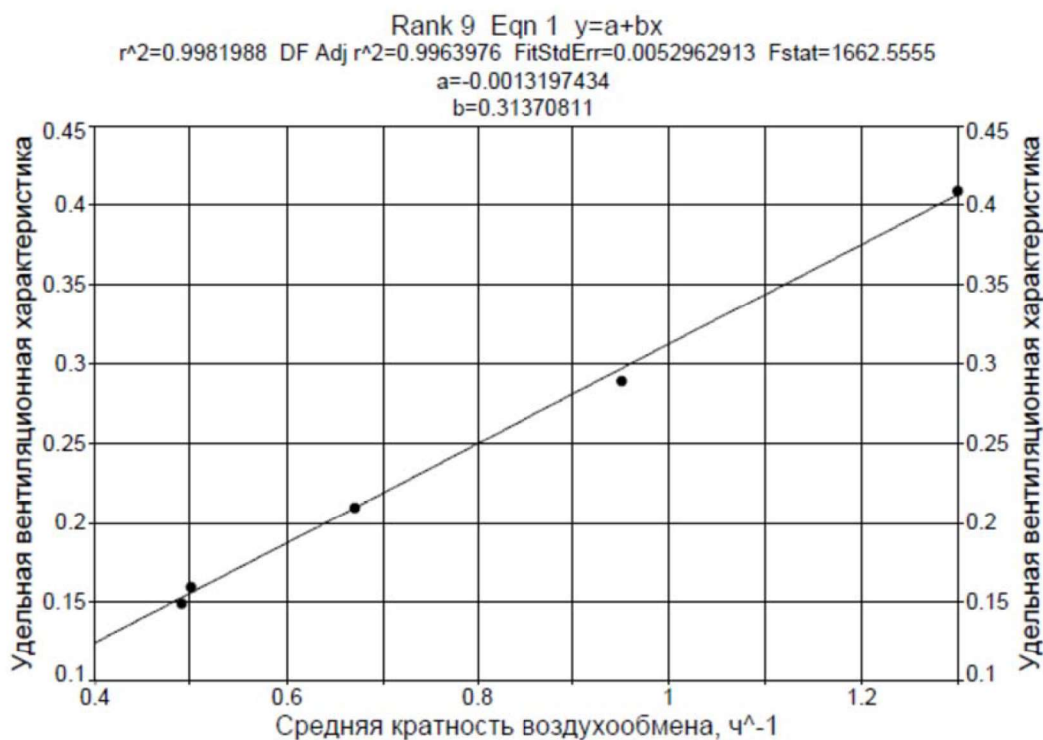


Рис. 4. Пример зависимости удельной вентиляционной характеристики $k_{\text{вент}}$ от средней кратности воздухообмена по зданию без учета утилизации теплоты

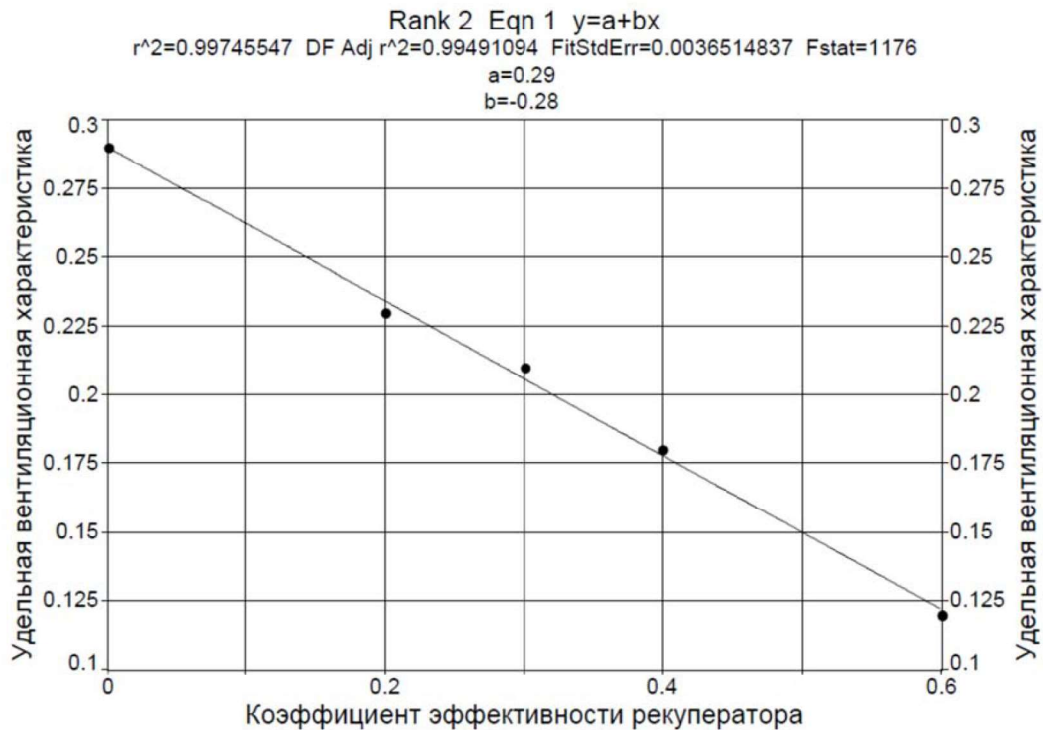


Рис. 5. Зависимость удельной вентиляционной характеристики $k_{\text{вент}}$ от среднего коэффициента эффективности рекуператоров в системах механической вентиляции (например, $N_{\text{вент}} = 120$ ч; $n_{\text{в}} = 0,95$ ч⁻¹)

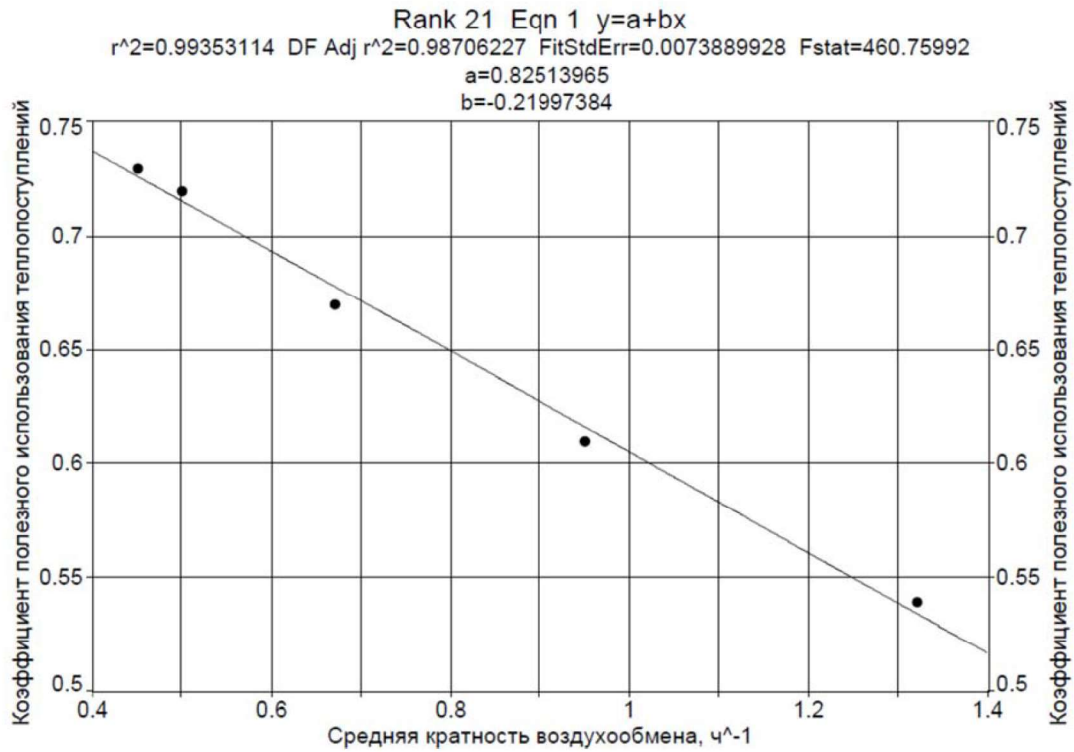


Рис. 6. Пример зависимости коэффициента полезного использования теплоступлений $\beta_{кпи}$ от средней кратности воздухообмена n_v

Влияние удельной вентиляционной характеристики на расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания

$k_{об}^*$, Вт/(м ³ ·°С)	$k_{вент}^*$, Вт/(м ³ ·°С)	Часы работы механической вентиляции $N_{вент}$, ч	n_v , ч ⁻¹	$k_{эф}$	$\beta_{кпи}$	$(k_{быт} + k_{рад})$, Вт/(м ³ ·°С)	$q_{от}^p$, Вт/(м ³ ·°С)

Примечание. Расчет удельных характеристик здания выполняется по нормативному документу¹: $k_{об}$ — удельная теплозащитная характеристика здания, Вт/(м³·°С); $k_{рад}$ — удельная характеристика теплоступлений в здание от солнечной радиации, Вт/(м³·°С); $k_{быт}$ — удельная характеристика бытовых тепловыделений здания, Вт/(м³·°С).

ных в таблице, проводится анализ влияния удельной вентиляционной характеристики на расход энергоресурсов на отопление и вентиляцию здания.

Выводы

1. Для зданий, фасад которых выполнен из модульных конструкций, объемы инфильтрующегося воздуха целесообразно определять по результатам испытаний.

2. Коэффициент полезного использования теплоступлений $\beta_{кпи}$ зависит от средней кратности воздухообмена n_v , а следовательно, и от объема инфильтрации. При максимальном значении коэффициента эффек-

тивности регулирования подачи теплоты в системах отопления ($K_{рег} = 0,95$) при кратности воздухообмена $n_v = 1,5$ ч⁻¹ только 50 % теплоступлений учитывается при расчете энергопотребления зданий.

3. Предложенная методика для анализа влияния удельной вентиляционной характеристики на энергопотребление здания по укрупненным показателям может эффективно использоваться при сравнении и анализе проектных вариантов, составлении энергетических паспортов зданий и ранжировании зданий по классам энергосбережения.

Библиографический список

1. Забегин А. Д. Ошибки при проектировании и оформлении энергетического паспорта здания // АВОК. 2013. № 6. С. 72–74.
2. Герасимова Н. Б., Опарина Л. А. Энергетический паспорт здания: Современные требования // Информационная среда вуза. 2016. № 1 (23). С. 126–131.
3. Малявина Е. Г., Бирюков С. В., Дианов С. Н. Воздушный режим жилых зданий. Учет влияния воздушного режима на работу системы вентиляции жилых зданий // АВОК. 2003. № 6. С. 14–26.
4. Бодров В. И. Энергоэффективность систем обеспечения параметров микроклимата. // СОК. 2015. № 7. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=7&year=2015>
5. Дацюк Т. А., Гримитлин А. М., Анисимов С. М., Цыганков А. В. Трансмиссионные и инфильтрационные теплотери жилых зданий // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 115–120. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120.
6. Клявлин М. С., Халфина Д. А., Клявлиная Я. М., Талипов Р. А. Проектирование систем вентиляции зданий с учетом влияния воздухопроницаемости ограждающих конструкций // Нефтегазовое дѣло. 2020. № 2. С. 26–38. URL: <http://ogbus.ru>
7. Zubarev K., Timofeeva M. Special aspects of calculation of infiltration in residential and public buildings // E3S Web Conf. 2023. Vol. 389. 06001. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338906001>
8. Anis W. A. Влияние воздухопроницаемости на проектирование систем климатизации // АВОК. 2003. № 2. С. 32–37. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1987 (дата обращения: 21.01.2019).
9. Дацюк Т. А., Гримитлин А. М. Влияние воздухопроницаемости ограждающих конструкций на энергопотребление жилых зданий // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 182–187. DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-182-187.
10. Гувернюк С. В., Синявин А. А., Гагарин В. Г. Метод экспресс-оценки интегральных ветровых нагрузок на высотное здание // Жилищное строительство. 2019. № 6. С. 43–48.
11. Сатанов А. А., Поздеев М. Л., Симонов А. В., Помазов А. П., Хазов П. А. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание // Приволжский научный журнал. 2022. № 3 (63). С. 43–51.
12. Risto Kosonen, Juha Jokisalo, et al. Methods to Reduce Stack Effect and Improve Energy Efficiency in a Nordic High Rise Residential Building // Proceedings of the 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Jinan, China Duration: 19–22 Oct 2017. Pp. 2212–2317.
13. Mijorski S., Cammelli S. Stack Effect in High-Rise Buildings: A Review // International Journal of High Rise Buildings. 2016. Vol. 5, No 4. Pp. 327–338.
14. Tamura G. T. Smoke Movement and Control in High-Rise Buildings. National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 1994.
15. Xiaojie Lin, Junwei Zhang, Liuliu Du-Ikonen, Wei Zhong. An infiltration load calculation model of large-space buildings based on the grand canonical ensemble theory // Energy. Vol. 275. 15, July, 127331.
16. Feustel H., Diamond R. Diagnostics and Measurements of Infiltration and Ventilation Systems in High-Rise Apartment Buildings // ACEEE Summer Study, 1996. Pp. 1.95–1.102. URL: www.aceee.org/files/proceedings/1996/data/papers/SS96_Panel1_Paper10.pdf
17. Liu W., Zhao X., Chen Q. A novel method for measuring air infiltration rate in buildings // Energy and Buildings. 2018. Vol. 168. Pp. 309–319.
18. Jo J. H., Lim J. H., Song S. Y., Yeo M. S., Kim K. W. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings // Build. Environ. 2007. Vol. 42. Pp. 263–277.
19. Bilous I. Yu., Deshko V. I., Sukhodub I. O. Building energy modeling using hourly infiltration rate // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 96 (4). Pp. 27–41.
20. Gowri K., Winiarski D., Jarnagin R. Infiltration Modeling Guidelines for Commercial Building Energy Analysis. January 2009. DOI:10.2172/968203.
21. Jung-yeon Yu, Kyoo-dong Song, and Dong-woo Cho. Resolving Stack Effect Problems in a High-Rise Office Building by Mechanical Pressurization // Sustainability. 2017. No 9. 1731; DOI 10.3390/su9101731 www.mdpi.com/journal/sustainability
22. Сандэлевски А. Могут ли высотные здания иметь нулевое потребление энергии? (Часть 1) // Энергосбережение. 2019. № 4. С. 32–37.
23. Бисмарк М. Новые требования к энергетическим паспортам квартир в Германии // Энергосбережение. 2021. № 3. С. 12–13.
24. Емельянов Р. Т., Ревенко В. В. Оценка влияния изменения естественного воздухообмена на энергопотребление здания с учетом показателя герметичности современных окон // Молодой ученый. 2018. № 2 (188). С. 21–25. URL: <https://moluch.ru/archive/188/47749/> (дата обращения: 07.09.2023).
25. Oropeza-Perez I., Ostergaard P. A. Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions — A case study of Mexico // Appl. Energy. 2014. Vol. 130. Pp. 20–32.
26. Jurelionis A., Bouris D. G. Impact of Urban Morphology on Infiltration-Induced Building Energy

Consumption // *Energies*. 2016. Vol. 9 (3), 177. URL: <https://doi.org/10.3390/en9030177>

27. Chen Y., Tong Z., Malkawi A. Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations // *Build. Environ.* 2017. Vol. 122. Pp. 386–396.

References

1. Zabegin A. D. *Oshibki pri proektirovani i oformlenii energeticheskogo pasporta zdaniya* [Errors in the design and execution of the energy passport of the building]. AVOK, 2013, no. 6, pp. 72–74.

2. Gerasimova N. B., Oparina L. A. *Energeticheskiy pasport zdaniya: Sovremennye trebovaniya* [Energy passport of a building: Modern requirements]. *Informatsionnaya sreda vuza – Information media of the higher school*, 2016, no. 1 (23), pp. 126–131.

3. Malyavina E. G., Biryukov S. V., Dianov S. N. *Vozdushniy rezhim zhilykh zdaniy. Uchet vliyaniya vozduhnogo rezhima na rabotu sistemy ventilyatsii zhilykh zdaniy* [Air regime of residential buildings. Taking into account the influence of the air regime on the operation of the ventilation system of residential buildings]. AVOK, 2003, no. 6, pp. 14–26.

4. Bodrov V. I. *Energoeffektivnost' sistem obespecheniya parametrov mikroklimata* [Energy efficiency of systems for ensuring microclimate parameters]. *SOK – Plumbing, Heating and Air Conditioning*, 2015, no. 7. Available at: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=7&year=2015>

5. Datsyuk T. A., Grititlin A. M., Anisimov S. M., Tsygankov A. V. *Transmissiynnye i infil'tratsionnye teplopoteri zhilykh zdaniy* [Transmission and infiltration heat losses of residential buildings]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 6 (89), pp. 115–120. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120.

6. Klyavlin M. S., Khalfina D. A., Klyavlina Ya. M., Talipov R. A. *Proektirovanie sistem ventilyatsii zdaniy s uchetom vliyaniya vozdukhopronitsaemosti ograzhdayushchikh konstruksiy* [Design of ventilation systems of buildings taking into account the influence of air permeability of enclosing structures]. *Neftegazovoe Delo – Oil and Gas Business*, 2020, no. 2, pp. 26–38. Available at: <http://ogbus.ru>.

7. Zubarev K., Timofeeva M. Special aspects of calculation of infiltration in residential and public buildings. *E3S Web Conf.* 2023, vol. 389, 06001. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338906001>

8. Anis W. A. *Vliyanie vozdukhopronitsaemosti na proektirovanie sistem klimatizatsii* [Influence of air permeability on designing of systems of climatization]. AVOK, 2003, no. 2, pp. 32–37. Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1987 (accessed: 21.01.2019).

9. Datsyuk T. A., Grititlin A. M. *Vliyanie vozdukhopronitsaemosti ograzhdayushchikh konstruksiy na energopotreblenie zhilykh zdaniy* [Influence of air permeability of enclosing structures on energy consumption of residential buildings]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 182–187. DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-182-187.

10. Guvernyuk S. V., Sinyavin A. A., Gagarin V. G. *Metod ekspress-otsenki integral'nykh vetrovykh nagruzok na vysotnoe zdanie* [A method for express estimation of integral wind loads on a high-rise building]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2019, no. 6, pp. 43–48.

11. Satanov A. A., Pozdeev M. L., Simonov A. V., Pomazov A. P., Khazov P. A. *Eksperimental'noe issledovanie raspredeleniya aerodinamicheskikh koeffitsientov na vysotnoe zdanie* [Experimental study of the distribution of aerodynamic coefficients on a high-rise building]. *Privolzhskiy nauchniy zhurnal – Volga Region Scientific Journal*, 2022, no. 3 (63), pp. 43–51.

12. Risto Kosonen, et al. Methods to reduce stack effect and improve energy efficiency in Nordic High Rise Residential Building. *Proceedings of the 10-th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*, Jinan, China Duration, 19–22 Oct 2017, pp. 2212–2317.

13. Mijorski S., Cammelli S. Stack effect in high-rise buildings. Review. *International Journal of High Rise Buildings*, 2016, vol. 5, no 4, pp. 327–338.

14. Tamura G. T. Smoke movement and control in high-rise buildings. *National Fire Protection Association*, Quincy, MA, USA, 1994.

15. Xiaojie Lin, Junwei Zhang, Liuliu Du-Ikonen, Wei Zhong. An infiltration load calculation model of large-space buildings based on the grand canonical ensemble theory. *Energy*, vol. 275, 15, July, 127331.

16. Feustel H., Diamond R. Diagnostics and measurements of infiltration and ventilation systems in high-rise apartment buildings. *ACEEE Summer Study*, 1996, pp. 1.95–1.102. Available at: www.aceee.org/files/proceedings/1996/data/papers/SS96_Panel1_Paper10.pdf

17. Liu W., Zhao X., Chen Q. A novel method for measuring air infiltration rate in buildings. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 168, pp. 309–319.

18. Jo J. H., Lim J. H., Song S. Y., Yeo M. S., Kim K. W. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings. *Build. Environ.*, 2007, vol. 42, pp. 263–277.

19. Bilous I. Yu., Deshko V. I., Sukhodub I. O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, vol. 96 (4), pp. 27–41.

20. Gowri K., Winiarski D., Jarnagin R. *Infiltration modeling guidelines for commercial building energy analysis*, January 2009. DOI 10.2172/968203.

21. Jung-yeon Yu, Kyoo-dong Song, and Dong-woo Cho. Resolving stack effect problems in a high-rise office building by mechanical pressurization. *Sustainability*, 2017, no 9. 1731. DOI 10.3390/su9101731 www.mdpi.com/journal/sustainability.

22. Sandelevski A. *Mogut li vysotnye zdaniya imet' nulevoe potreblenie energii? (Chast'1)* [Can high-rise buildings have zero energy consumption? (Part1)]. *Energoberezhenie – Energy Saving*, 2019, no. 4, pp. 32–37.

23. Bismark M. *Novye trebovaniya k energeticheskim passportam kvartir v Germanii* [New requirements for energy passports for apartments in Germany]. *Energoberezhenie – Energy Saving*, 2021, no. 3, pp. 12–13.

24. Emel'yanov R. T., Revenko V. V. *Otsenka vliyaniya izmeneniya estestvennogo vozdukhobmena na energopotreblenie zdaniya s uchyotom pokazatelya germetichnosti sovremennykh okon* [Estimation of

influence of change of natural air exchange on energy consumption of a building taking into account the index of tightness of modern windows]. *Molodoy ucheniy – Young Scientist*, 2018, no. 2 (188), pp. 21–25. Available at: <https://moluch.ru/archive/188/47749/> (accessed: 07.09.2023).

25. Oropeza-Perez I., Ostergaard P. A. Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions — A case study of Mexico. *Appl. Energy*, 2014, vol. 130, pp. 20–32.

26. Jurelionis A., Bouris D. G. Impact of Urban Morphology on Infiltration-Induced Building Energy Consumption. *Energies*, 2016, vol. 9 (3), no. 177. Available at: <https://doi.org/10.3390/en9030177>

27. Chen Y., Tong Z., Malkawi A. Investigating natural ventilation potentials across the globe. Regional and climatic variations. *Build. Environ.*, 2017, vol. 122, pp. 386–396.