

Оценка влияния герметичности оконных конструкций на воздухообмен в жилом помещении

Болтовский Лев Александрович

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема

Студент

Приходько Себастьян Николаевич

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Студент

Аннотация

Целью исследования является оценка влияния герметичности оконных конструкций на воздухообмен в жилом помещении. В ходе работы использованы поисковые, аналитические и вычислительные методы исследования, позволившие определить расход воздуха через оконную конструкцию, кратность воздухообмена, изменение концентрации CO₂ и вентиляционные теплопотери. В результате установлено, что повышение герметичности окна значительно уменьшает неконтролируемый приток наружного воздуха, но при отсутствии организованного притока может привести к недостаточному воздухообмену и ухудшению качества воздуха в помещении.

Ключевые слова: герметичность окон, воздухообмен, инфильтрация.

Assessment of the impact of airtightness of window structures on air exchange in a residential room

Boltovskiy Lev Alexandrovich

Sholom-Aleichem Priamursky State University

Student

Prikhodko Sebastian Nikolayevich

Sholom-Aleichem Priamursky State University

Student

Abstract

The purpose of this study is to assess the impact of airtightness of window structures on air exchange in a residential room. This work used exploratory, analytical and computational research methods to determine the air flow through the window structure, air change rate, CO₂ concentration dynamics and ventilation heat losses. As a result, it was found that increased airtightness significantly reduces uncontrolled outdoor air inflow, but without organized air supply it can lead to insufficient air exchange and deterioration of indoor air quality.

Keywords: window airtightness, air exchange.

1 Введение

1.1 Актуальность исследования

Актуальность исследования обусловлена широким применением современных оконных конструкций с повышенной герметичностью. Такие окна уменьшают тепловые потери через неплотности и повышают комфорт за счёт снижения продувания, однако одновременно сокращают естественный приток наружного воздуха. Для жилых помещений это особенно важно, поскольку в них постоянно образуются загрязняющие вещества: углекислый газ от дыхания человека, избыточная влажность, запахи и летучие органические соединения от отделочных материалов и мебели.

В зданиях с естественной вентиляцией приток воздуха традиционно частично обеспечивался через неплотности оконных и дверных проёмов. При замене старых окон на герметичные стеклопакеты этот путь поступления воздуха резко уменьшается. В результате вытяжные каналы могут работать хуже, а фактический воздухообмен становится ниже требуемого. Поэтому оценка влияния герметичности оконных конструкций необходима как для обеспечения нормативного микроклимата, так и для выбора рациональных решений: микропроветривания, приточных клапанов или механической вентиляции.

1.2 Обзор исследований

В статье А. В. Голенкова [1] рассматриваются проблемы использования естественной вентиляции в жилых домах, в том числе влияние оконных и дверных блоков с повышенной герметичностью на естественный воздухообмен. В работе В. И. Веснина [2] исследованы инфильтрация воздуха и связанные с ней тепловые потери помещений через оконные проёмы. Отдельное значение имеют исследования, посвящённые обеспечению параметров микроклимата в зданиях, где отмечается, что современные пластиковые окна могут снижать поступление свежего воздуха в помещения [3]. В работе В. В. Федорова и соавторов [4] рассматривается оптимизация воздушно-теплого режима реконструируемых зданий, что связано с проблемой сочетания энергосбережения и требуемого воздухообмена. В исследовании А. М. Берегового и В. А. Берегового [5] анализируются показатели микроклимата и воздухообмена, включая режимы проветривания. В. А. Пухкал и С. М. Анисимов [6] рассматривают моделирование вентиляции жилых помещений с подачей приточного воздуха через регулируемые оконные створки. Данные работы показывают, что повышение герметичности окон нельзя оценивать только с позиции энергосбережения: оно должно рассматриваться совместно с обеспечением организованного притока воздуха.

1.3 Цель исследования

Целью исследования является оценка влияния герметичности оконных конструкций на воздухообмен в жилом помещении и определение

последствий изменения притока воздуха для микроклимата и тепловых потерь.

2 Материалы и методы

В качестве объекта исследования рассматривается условное жилое помещение площадью 18 м^2 с одним оконным блоком. Расчёт выполняется для трёх вариантов эксплуатации: окно с повышенной воздухопроницаемостью, современное герметичное окно без организованного притока и современное герметичное окно с приточным клапаном или режимом микропроветривания.

Методика исследования включает определение объёма помещения, нормативного расхода воздуха, расчётного расхода воздуха через окно, кратности воздухообмена, вентиляционных тепловых потерь и изменения концентрации CO_2 во времени. Расчёты выполняются расчётно-аналитическим методом на основе принятых исходных данных и нормативных подходов, применяемых при оценке микроклимата и вентиляции жилых помещений [7, 8].

3 Результаты и обсуждение

Воздухообмен – это процесс замены загрязнённого внутреннего воздуха наружным воздухом. Количественно он может характеризоваться расходом воздуха L , $\text{м}^3/\text{ч}$, и кратностью воздухообмена n , ч^{-1} . Кратность показывает, сколько раз в течение одного часа объём воздуха, равный объёму помещения, заменяется новым воздухом.

Герметичность оконной конструкции в данном исследовании рассматривается как способность оконного блока ограничивать неконтролируемое поступление наружного воздуха через притворы, уплотнители и монтажные швы. Чем выше герметичность окна, тем меньше инфильтрационный расход воздуха, но тем выше зависимость помещения от организованного притока.

Исходные данные для расчёта представлены в таблице (табл 1).

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта

Показатель	Значение
Площадь жилого помещения S	18 м^2
Высота помещения h	$2,7 \text{ м}$
Площадь оконного блока $A_{ок}$	$2,1 \text{ м}^2$
Количество людей N	1 человек
Нормируемый приток на человека q_n	$30 \text{ м}^3/\text{ч}$
Плотность воздуха ρ	$1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$
Температура внутри помещения	$+22 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура наружного воздуха	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$
Разность температур ΔT	$32 \text{ }^\circ\text{C}$
Выделение CO_2 одним человеком q_{CO_2}	$0,018 \text{ м}^3/\text{ч}$
Начальная и наружная концентрация CO_2	420 ppm

Объём помещения определяется по формуле

$$V = S \cdot h$$

где S – площадь помещения, м^2 .

h – высота помещения, м .

$$V = 18 \cdot 2,7 = 48,6 \text{ м}^3$$

Необходимый расход воздуха для одного человека определим по формуле

$$L_n = N \cdot q_n$$

$$L_n = 1 \cdot 30 = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Требуемая кратность воздухообмена равна

$$n_n = \frac{L_n}{V}$$

$$n_n = \frac{30}{48,6} = 0,62 \text{ ч}^{-1}$$

Представлены возможные вариации герметичности в таблице (табл. 2).

Таблица 2 – Расчётные варианты герметичности оконной конструкции

Вариант	Принятая характеристика	Пояснение
Окно с повышенной воздухопроницаемостью	$G = 6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Условный вариант старого или неплотного оконного блока
Современное герметичное окно	$G = 1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Условный вариант плотного оконного блока без приточного устройства
Герметичное окно + приточный клапан	$G = 1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $L_{\text{кл}} = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$	Контролируемый приток через клапан или режим микропроветривания

Расход воздуха через оконную конструкцию определялся через условный показатель воздухопроницаемости

$$L_{\text{ок}} = \frac{G \cdot A_{\text{ок}}}{\rho}$$

где

G – воздухопроницаемость оконного блока, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

$A_{\text{ок}}$ – площадь оконного блока, м^2

ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$

Для окна с повышенной воздухопроницаемостью

$$L_{\text{ок1}} = \frac{6 \cdot 2,1}{1,2} = 10,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$n_1 = \frac{10,5}{48,6} = 0,22 \text{ ч}^{-1}$$

Для современного герметичного окна без организованного притока

$$L_{\text{ок2}} = \frac{1 \cdot 2,1}{1,2} = 1,75 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$n_2 = \frac{1,75}{48,6} = 0,036 \text{ ч}^{-1}$$

Для герметичного окна с приточным клапаном

$$L_3 = 1,75 + 30 = 31,75 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$n_3 = \frac{31,75}{48,6} = 0,65 \text{ ч}^{-1}$$

Таблица 3 – Сравнение фактического воздухообмена

Вариант	Расход воздуха L, м ³ /ч	Кратность n, ч ⁻¹	Доля требуемого расхода от
Окно с повышенной воздухопроницаемостью	10,5	0,22	35 %
Герметичное окно без притока	1,75	0,036	5,8 %
Герметичное окно + приточный клапан	31,75	0,65	106 %

Из расчёта видно, что само по себе герметичное окно почти исключает неконтролируемый приток воздуха через оконный блок. По сравнению с условно неплотным окном расход воздуха снижается с 10,5 до 1,75 м³/ч, то есть примерно в 6 раз. При этом даже неплотное окно в рассматриваемом примере не обеспечивает требуемый воздухообмен 30 м³/ч, а герметичное окно без приточного устройства обеспечивает только около 5,8 % от требуемого значения.

Оценка вентиляционных потерь

Уменьшение инфильтрации снижает теплотери, однако данное снижение нельзя рассматривать изолированно от требований к качеству воздуха. Вентиляционные теплотери определим по приближённой формуле

$$Q_{\text{вент}} = 0,335 \cdot L \cdot \Delta T$$

где

$Q_{\text{вент}}$ – тепловые потери, Вт

L – расход воздуха, м³/ч

ΔT – разность температур внутри и снаружи помещения, °С

$$Q_1 = 0,335 \cdot 10,5 \cdot 32 = 112,6 \text{ Вт}$$

$$Q_2 = 0,335 \cdot 1,75 \cdot 32 = 18,8 \text{ Вт}$$

$$Q_3 = 0,335 \cdot 31,75 \cdot 32 = 340,4 \text{ Вт}$$

Суточные энергозатраты на нагрев приточного воздуха можно оценить по формуле

$$E_{\text{сут}} = Q_{\text{вент}} \cdot \frac{24}{1000}$$

Суточные затраты представлены в таблице (табл. 4).

Таблица 4 – Вентиляционные теплопотери при $\Delta T = 32$ °C

Вариант	Расход воздуха, м³/ч	Теплопотери, Вт	Энергия за сутки, кВт·ч
Окно с повышенной воздухопроницаемостью	10,5	112,6	2,70
Герметичное окно без притока	1,75	18,8	0,45
Герметичное окно + приточный клапан	31,75	340,4	8,17

Герметичное окно действительно снижает теплопотери через неконтролируемую инфильтрацию. Однако полученное снижение достигается за счёт уменьшения притока свежего воздуха. Если для обеспечения микроклимата добавляется приточный клапан, теплопотери возрастают, так как фактически в помещение поступает требуемый объём наружного воздуха. Поэтому энергетически рациональным решением является не полное отсутствие притока, а управляемый приток с возможностью регулирования и, при необходимости, с рекуперацией тепла.

Расчёт изменения концентрации CO₂

Для оценки влияния воздухообмена на качество воздуха выполнен расчёт изменения концентрации CO₂ в помещении. Принимаем, что в помещении находится один человек, начальная концентрация CO₂ равна наружной и составляет 420 ppm. Рассчитанная концентрация CO₂ представлена в таблице (табл. 5). Расчётная зависимость имеет вид

$$C(t) = C_{\text{нар}} + \frac{q_{\text{CO}_2}}{V \cdot n} \cdot (1 - e^{-nt}) \cdot 10^6$$

Где

$C(t)$ – концентрация CO₂ через время t , ppm

$C_{\text{нар}}$ – наружная концентрация CO₂, ppm

q_{CO_2} – выделение CO₂ человеком, м³/ч

V – объём помещения, м³

N – кратность воздухообмена, ч⁻¹

t – время, ч.

Таблица 5 – Расчётная концентрация CO₂ в жилом помещении

Вариант	Кратность n, ч ⁻¹	Через 2 ч, ppm	Через 8 ч, ppm
Герметичное окно без притока	0,036	≈ 1135	≈ 2994
Окно с повышенной воздухопроницаемостью	0,22	≈ 1021	≈ 1830
Герметичное окно + приточный клапан	0,65	≈ 833	≈ 984
Нормативный воздухообмен 30 м ³ /ч	0,62	≈ 845	≈ 1016

Модельная оценка показывает, что при герметичном окне без организованного притока концентрация CO₂ быстро возрастает. Через 8 часов пребывания одного человека она может приблизиться к 3000 ppm. Вариант с приточным клапаном даёт результат, близкий к нормативному воздухообмену: концентрация CO₂ после 8 часов составляет около 984 ppm. Это подтверждает, что высокая герметичность окна сама по себе не является недостатком, если она сопровождается управляемым притоком воздуха.

Итоговая оценка влияния герметичности (табл. 6).

Таблица 6 – Итоговая оценка вариантов

Вариант	Преимущество	Недостаток	Практический вывод
Окно с повышенной воздухопроницаемостью	Больше естественный приток воздуха	Повышенные теплопотери, невозможность регулирования	Не обеспечивает полностью требуемый воздухообмен и снижает энергоэффективность
Герметичное окно без притока	Минимальные неконтролируемые теплопотери	Недостаточный воздухообмен, рост CO ₂ и влажности	Нужны регулярное проветривание или приточное устройство
Герметичное окно + приточный клапан	Контролируемый приток, близкий к требуемому	Дополнительные теплопотери без рекуперации	Наиболее рациональный вариант для естественной вытяжки

Таким образом, повышение герметичности оконных конструкций положительно влияет на энергосбережение только в части уменьшения случайной инфильтрации. Однако в жилом помещении должен быть обеспечен организованный воздухообмен. В противном случае фактическая

экономия тепла сопровождается ухудшением качества воздуха. На практике герметичные окна целесообразно сочетать с приточными клапанами, регулируемыми створками, периодическим проветриванием или механической приточно-вытяжной вентиляцией.

4 Выводы

В ходе работы выполнена оценка влияния герметичности оконных конструкций на воздухообмен в жилом помещении площадью 18 м². Установлено, что при переходе от условно неплотного окна к современному герметичному оконному блоку инфильтрационный приток воздуха снижается примерно в 6 раз: с 10,5 до 1,75 м³/ч.

Расчёт показал, что для одного человека в рассматриваемом помещении требуется расход воздуха 30 м³/ч, что соответствует кратности воздухообмена 0,62 ч⁻¹. Герметичное окно без приточного устройства обеспечивает только около 5,8 % от данного расхода. Следовательно, при закрытых герметичных окнах естественный воздухообмен через оконные неплотности является недостаточным.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения представленной методики при предварительной оценке последствий замены окон в жилых помещениях и выборе мероприятий по обеспечению нормативного воздухообмена.

Библиографический список

1. Голенков А. В. Проблемы использования естественной вентиляции в жилых домах // Инновации в строительстве 2022: материалы межд. науч.-практ. конф. Брянск, 2022. С. 108–109. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48589683> (дата обращения: 25.05.2026).
2. Веснин В. И. Инфильтрация воздуха и тепловые потери помещений через оконные проёмы // Градостроительство и архитектура. 2016. №. 3(24). С. 10–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27169577> (дата обращения: 25.05.2026).
3. Балябина Т. О. Обеспечение требуемых параметров микроклимата в высотных зданиях // Материалы и методы инновационных научно-практических исследований и разработок: Сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с международным участием, Таганрог, 22 августа 2022 года. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2022. С. 21-24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49329301> (дата обращения: 25.05.2026).
4. Федоров В. В., Федоров М. В., Левиков А. В., Ханьгин Д. А. Оптимизация воздушно-теплого режима реконструируемых зданий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2020. №. 1(5). С. 38-44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43799378> (дата обращения: 25.05.2026).

5. Береговой А. М., Береговая В. А. Показатели микроклимата и воздухообмена в объемно-планировочной структуре многоэтажного жилого здания // Региональная архитектура и строительство. 2021. №. 2(47). С. 72-76. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46676684> (дата обращения: 25.05.2026).
6. Пухкал В. А. Анисимов С. М. Шкаровский А. Л. Цыганков А. В. Моделирование вентиляции жилых помещений с подачей приточного воздуха через регулируемые оконные створки // Вестник гражданских инженеров. 2021. №. 5(88). С. 130-136. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47285402> (дата обращения: 25.05.2026).