This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Review Article
Received: July 16, 2026 *Accepted: August 20, 2026* *Published: September 23, 2026*
ISSN 2658-5553

Stack effect in window units of high-rise buildings. A Review

Ulanov, Aleksandr Vadimovich[1]
Okulov, Andrej Yurievich[1]
Kotliarskaia, Irina Leonidovna[2*]
Vatin, Nikolai Ivanovich[2]

[1] VEKA Rus, Moscow, Russian Federation; aulanov@veka.ru (U.A.V.), aokulov@veka.ru (O.A.Y.)
[2] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russian Federation; iravassilek@mail.ru (K.I.L.); vatin@mail.ru (V.N.I.)
Correspondence:* email iravassilek@mail.ru; contact phone +79095863919

Keywords:

Window units; Air permeability; Window airtightness; Stack effect; Chimney Effect; Buoyancy pressure; Wind pressure; Air leakage; Aerodynamic noise; Indoor air quality; Ventilation; Heat losses; CFD modeling

Abstract

This review article provides a comprehensive analysis of the stack effect's influence on the air permeability of window structures, infiltration heat loss, and acoustic manifestations of air leaks in high-rise buildings. The aim of the study is to clarify the physical mechanism underlying the relationship between temperature and wind effects, pressure differences, window unit design features, and actual airflow through leaks. **Methodology:** An analytical review of scientific publications (publications since 2020, Scopus database) on the stack effect, air permeability of building envelopes, natural infiltration, indoor air quality, and acoustic air leak diagnostics was conducted. Engineering calculations were performed to determine the stack effect pressure on a window unit, airflow through leaks, and airflow velocity in localized slot channels. The combined effects of temperature and wind pressure on the performance of window structures were analyzed. **Results and Discussion:** It has been established that the actual air permeability of window units depends not only on the regulatory class but also on the pressure drop, temperature and wind conditions, the area of the structure, and ventilation operation. It has been shown that areas of hinges, rebate joints, drainage holes, and damage to the sealing contour can form the main leakage channels even with high overall window airtightness. It has been established that reducing the area of localized leaks increases the airflow velocity through the remaining channels, contributing to the development of vortex flows and aerodynamic noise. It has been shown that high window airtightness reduces uncontrolled infiltration and associated heat loss. Still, in the absence of organized airflow, it can lead to insufficient air exchange and increased concentrations of CO_2, moisture, and other pollutants. An additional factor is the spatial heterogeneity of wind pressure: localized zones of vacuum and increased pressure pulsations form in the corner, lateral, and leeward areas of the façade, which can increase air leakage and acoustic discomfort. **Conclusion:** Reducing the negative consequences of the stack effect requires the comprehensive use of sealed window structures, improved sealing contours, localized sealing of components, and the installation of controlled airflow and balanced ventilation systems. The results obtained can be used to evaluate the thermal, aerodynamic, and acoustic performance of window structures in high-rise buildings.

1 Introduction / Введение

В условиях глобального изменения климата и ужесточения требований по снижению воздействия на окружающую среду, энергосбережение зданий и сооружений является одним из приоритетных направлений строительной науки [1]. Наукометрический анализ [2] прогнозирует

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

снижение потребления энергии на отопление с −12.6% (2020 г.) до −47.5% (2080 г.); увеличение потребления энергии на охлаждение с +28.8% (2020 г.) до +60.9% (2080 г.); рост общего потребления с +2.6% (2020 г.) до +12% (2080 г.). Данные показатели подтверждают научную актуальность энергосбережения в меняющемся климате. Авторы исследования [3] на основе модели из более чем 59 тысяч зданий изучили изменения в энергопотреблении зданий в ответ на будущие климатические изменения. Модель показала рост первичного энергопотребления зданий на 4.56% к 2080 г. Комплекс мер энергосбережения дал снижение потребления энергии на 46.55%. Систематический обзор [4] также подтверждает, что пассивные меры (теплоизоляция, эффективное остекление) и активные меры (солнечные панели) снижают энергозатраты в условиях потепления.

Значительная часть эксплуатационных теплопотерь в отопительный период связана не только с передачей теплоты через конструкционные слои ограждающих конструкций [5, 6], но и с конвективным переносом теплоты при неконтролируемом воздухообмене через неплотности наружной оболочки здания. [7]. Исследователи [8], [9] проверили натурные исследования воздухопроницаемости в реальных условиях эксплуатации с помощью трассирующего безопасного газа. Результаты исследования [10] показали, что инфракрасная термография позволяет определять места и оценивать относительные коэффициенты утечки воздуха. Герметичность здания также исследовалась методом акустического формирования луча [11]. Исследование [12] описывает методику определения естественной инфильтрации по данным испытаний воздухопроницаемости здания. Авторы статьи [13] рассчитали, что неконтролируемый воздухообмен становится причиной повышения затрат на отопление и охлаждение дома более, чем на 30% и способствует возникновению проблем с влажностью, шумом, пылью и проникновением загрязняющих веществ внутрь помещения. Статья [14] утверждает, что значение утечек также зависит от возраста и типа зданий.

Генератором инфильтрации в высотных зданиях является гравитационный напор, возникающий вследствие разности плотностей внутреннего и наружного воздуха, известный как "стак-эффект" (эффект тяги, chimney effect) [15]. Плотность воздуха зависит от температуры, и чем больше разница температур наружного и внутреннего воздуха, тем сильнее эффект тяги. При отрицательных температурах наружного воздуха его плотность превышает плотность внутреннего тёплого воздуха, в результате чего холодный воздух оказывает большее гидростатическое давление на ограждающие конструкции, особенно на нижних этажах. Данное явление приводит к формированию перепада давления, направленного снаружи внутрь здания в нижней его части (инфильтрация), и обратного перепада изнутри наружу в верхней части (экфильтрация) [16].

Работа [17] выделила основные проблемы, обусловленные стак-эффектом, в высотных зданиях: влияние на повседневную эксплуатацию (комфорт и функциональность помещений) и обеспечение безопасности жизни при чрезвычайных ситуациях. К эксплуатационным проблемам относятся нарушения в работе лифтового оборудования [18] и неполное закрывание дверей лифтовых шахт [19], [20] и внутренних помещений. Эксплуатационной проблемой является также повышенный акустический дискомфорт вследствие высокоскоростного движения воздуха через неплотности ограждающих конструкций [21]; интенсивные сквозняки в лифтовых холлах и коридорах [22]. Увеличение тепловой нагрузки на системы отопления и охлаждения из-за неконтролируемой инфильтрации наружного воздуха и проникновения влаги [23], [24]; перенос запахов между помещениями [25]; снижение эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВК) также являются следствиями стак-эффекта [26, 27]. Во время приготовления пищи образуются вредные соединения, такие как полициклические ароматические углеводороды, гетероциклические амины и ненасыщенные альдегиды, которые перемещаются их кухни из-за стак-эффекта [28]. Пары от растительного масла могут вызывать респираторные и другие заболевания [29], [30]. Исследование [31] анализирует передачу воздушно-капельных инфекций, вызванную эффектом тяги в высотных больницах. Стак-эффект также представляет угрозу во время аварий. Стак-эффект влияет на движение дыма и распространение токсичных газов во время пожаров [32]. Статья [33] исследовала движение дыма в лестничной клетке 17-этажного здания с использованием CFD-моделирования (Computational Fluid Dynamics) в PyroSim [34] и показала, что увеличение высоты проема усиливает стак-эффект и изменяет направление и скорость дымового потока. Исследование [35] показало, что при наличии значительного перепада температур и открытых или негерметичных проемов восходящие потоки могут значительно ускорять перенос продуктов горения, в результате чего

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

верхние этажи подвергаются воздействию дыма еще до непосредственного распространения огня. Авторы статьи [36] показали, что стак-эффект усиливает вертикальный перенос загрязняющих газов даже вне пожарного сценария.

Учитывая прямое влияние указанных явлений как на комфорт пребывания людей в здании, так и на безопасность, в проектах высотных зданий необходимо предусматривать комплексные инженерные меры по снижению негативных последствий стак-эффекта [37]. Статья [38] рассматривает влияние двойного фасада на энергосбережение под совместным действием ветра и стак-эффекта. Экспериментальные и аналитические работы по герметизации лестничных клеток, герметизации шахт и систем дымоудаления [39, 40] показали, что герметизация лестниц и шахт в сочетании с механической вентиляцией эффективно ограничивает распространение дыма и контролирует перепады давления во время пожаров. Для снижения стак-эффекта авторы [41] на основе натурных испытаний в аэродинамической трубе и численного моделирования (программа COMIS) предлагает комбинацию мер: замена распашных дверей на вращающиеся, устройство дополнительных перегородок и локальное усиление герметичности ограждающих конструкций. Авторы [42] разработали полномасштабную экспериментальную установку для моделирования давления тяги, основанную на использовании давления ветра для моделирования воздействия теплового давления на систему лифтовых дверей. Статья [43] показывает, что комбинация мер (например, устройство тамбуров у лифтов и повышение герметичности дверей) позволяет снизить инфильтрацию на 26.88% и перепад давления на 87.58% при умеренных затратах. На основе натурных измерений и компьютерного моделирования (программа CONTAM) исследование [44] показало, что создание избыточного давления в верхней зоне здания (этажи 40–60) путём увеличения подачи наружного воздуха при одновременном сокращении объёма удаляемого воздуха позволяет снизить перепад давления на дверях лифтов первого этажа с 135 до 95 Па, что обеспечивает нормальное закрывание дверей. Тем не менее, проблемы, связанные с эффектом тяги в высотных зданиях, продолжают регистрироваться. Статья [45] исследует влияние положения нейтрального уровня давления на инфильтрационные нагрузки в высотных зданиях. Статья [45] показала, что различия в планировке вертикальных шахт могут приводить к изменению отопительных и охлаждающих нагрузок до 55%.

Нормативное регулирование герметичности оконных блоков в Российской Федерации осуществляется в соответствии с ГОСТ 23166-2024 "Блоки оконные и балконные. Общие технические условия" [46], который классифицирует изделия по объемной воздухопроницаемости при стандартизированном перепаде давления 100 Па. Однако сравнительный анализ международных стандартов (ISO 9972-2015 " Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method" [47], ASTM E283-E283M-19 [48], DIN EN 12207-2017 "Windows and doors. Air permeability. Classification" [49]) показывает, что реальные эксплуатационные перепады давлений в высотных зданиях часто выходят за пределы лабораторных испытаний, что приводит к некорректной оценке фактических потерь тепла. Проблема усугубляется конструктивными особенностями оконной фурнитуры. Как отмечают исследователи [50], стандартные петли видимого монтажа создают локальные зоны нарушения герметичности уплотнительных контуров, которые становятся каналами интенсивной инфильтрации при воздействии гравитационного напора.

Взаимосвязь между герметичностью окон и требованиями к качеству внутреннего воздуха имеет существенное значение [51]. Согласно СП 60.13330.2020 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха" [52] и международным стандартам ASHRAE 62.1 "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality" [53], минимальный расход наружного воздуха для обеспечения физиологического комфорта составляет 30 м^3/ч на человека. Парадокс заключается в том, что энергосберегающие окна, обеспечивая высокую герметичность, часто приводят к дефициту притока и росту концентрации CO_2, что требует обязательного дополнения систем пассивной инфильтрации организованными приточными устройствами [54]. Статья [55] подтверждает, что снижение неконтролируемой инфильтрации уменьшает поступление внешних загрязнителей, но при недостаточной вентиляции одновременно затрудняет удаление загрязнителей, образующихся внутри помещения. Исследование [56] сообщает о том, что герметичная оболочка и отказ от открывания окон зимой приводит к недостаточному воздухообмену и росту CO_2.

Акустические проявления инфильтрации, такие как свист и шум в притворах, становятся предметом отдельного научного интереса [57]. Гидродинамические модели, применяемые для анализа течения воздуха через неплотности ограждающих конструкций, показывают, что при увеличении перепада давления происходит формирование переходного и турбулентного

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

режимов течения, сопровождаемого аэродинамическим шумом. Акустические методы уже используются для обнаружения и локализации утечек воздуха в оболочке здания, включая натурные исследования высотных зданий [58], [59]. Ветровое давление, определяемое в соответствии с СП 20.13330.2016 "Нагрузки и воздействия" [60], совместно с гравитационной составляющей, обусловленной разностью температур и высотой здания, формирует пространственно неоднородное поле давлений [61]. Для оценки распределения скоростей, давления и вихревых структур в угловых и других локально неблагоприятных зонах целесообразно применять методы вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics) [62], в том числе URANS (unsteady Reynolds Averaging Navier Stokes models) и LES (Large Eddy Simulations) [63]. Исследование [64] рассматривает численное моделирование ветрового воздействия на высотные здания сложной формы и обсуждает применение LES для задач вычислительной аэродинамики зданий.

Несмотря на значительное число исследований, посвящённых механизмам формирования и последствиям стак-эффекта в высотных зданиях [65], [66], взаимосвязь между конструктивными особенностями оконных узлов, фактическими перепадами давления и акустическими проявлениями продуваний изучена недостаточно. Воздухопроницаемость оконных конструкций обычно описывается степенной зависимостью расхода воздуха от перепада давления [67], что обусловливает нелинейный характер изменения инфильтрации при повышении давления. В частности, недостаточно исследовано влияние совместного действия ветрового и гравитационного напоров на работу оконной фурнитуры, плотность притвора и акустические характеристики неплотностей.

Объектом исследования являются оконные конструкции высотных зданий в условиях совместного действия гравитационного (стак-эффект) и ветрового напоров.

Предметом исследования является взаимосвязь между перепадом давления на оконном блоке, локальной воздухопроницаемостью узлов притвора и фурнитуры, объёмом инфильтрационных потерь и акустическими проявлениями воздушных утечек.

Таким образом, целью настоящей работы является уточнение физического механизма влияния стак-эффекта на воздухопроницаемость оконных конструкций, установление связи между перепадом давления, конструктивными параметрами фурнитуры и акустическими проявлениями воздушных утечек, а также разработка практических рекомендаций по снижению негативных последствий данного явления.

Задачи исследования:

1. Проведение аналитического обзора научных публикаций и нормативных документов, посвящённых стак-эффекту, воздухопроницаемости окон, инфильтрации, качеству внутреннего воздуха и акустике утечек.
2. Предложение а инженерных мер по снижению негативных последствий стак-эффекта.

2 Literature Search Methods / Методы поиска литературы

Для обзорной статьи использовались общенаучные методы анализа, сравнения, обобщения и синтеза научной информации. Поиск литературы был направлен на выявление исследований, посвященных стак-эффекту в высотных зданиях, воздухопроницаемости оконных конструкций, инфильтрации, распределению давления, тепловым потерям, акустическим проявлениям воздушных утечек и качеству внутреннего воздуха. Основным источником научной литературы являлась международная библиографическая и реферативная база данных Scopus, содержащая сведения о рецензируемых публикациях в области строительной физики, инженерии, архитектуры, теплотехники, аэродинамики и пожарной безопасности [68], [69].

Поисковые запросы формировались с использованием ключевых слов и словосочетаний, отражающих основные направления исследования: "stack effect" (стак-эффект, эффект тяги); "chimney effect" (эффект дымовой трубы); "high-rise buildings" (высотные здания), "window units" (оконные блоки); "window" (окно); "air permeability" (воздухопроницаемость); "window airtightness" (герметичность окон); "infiltration" (инфильтрация); "buoyancy pressure" (гравитационный напор); "wind pressure" (ветровое давление); "pressure difference" (перепад давления); "window hardware" (оконная фурнитура); "air leakage" (утечка воздуха); "aerodynamic noise" (аэродинамический шум); "indoor air quality" (качество внутреннего воздуха); "ventilation" (вентиляция); "heat losses" (теплопотери); "cfd modeling" (cfd моделирование).

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Основной период публикации был ограничен 2020–2026 гг. Более ранние публикации включались выборочно. Нормативные документы рассматривались отдельно. Дата формирования основного поискового массива: 18.07.2026.

TITLE-ABS-KEY ("stack effect" OR "chimney effect") AND TITLE-ABS-KEY ("high-rise buildings" OR "window units" OR window OR "air permeability" OR "window airtightness" OR "infiltration" OR "buoyancy pressure" OR "wind pressure" OR "wind pressure" OR "window hardware" OR "air leakage" OR "aerodynamic noise" OR "indoor air quality" OR "ventilation" OR "heat losses" OR "cfd modeling") SUBJAREA ("ENGI") AND PUBYEAR > 2019

Данный поисковый запрос показал 226 публикаций.

Далее из обзора были исключены публикации, которые:

1. Были не связаны напрямую с высотными зданиями, оконными конструкциями или механизмами инфильтрации (например, только общие вопросы энергетики зданий без анализа воздухопроницаемости и давления).
2. Работы, в которых стак-эффект упоминался лишь эпизодически, без количественной оценки перепадов давления, расходов воздуха или влияния на ограждающие конструкции.
3. Дубликаты записей (одна и та же работа, представленная в разных базах или версиях).
4. Статьи без доступа к полному тексту или с недостаточным объёмом методической информации для оценки качества (при невозможности восстановить ключевые параметры модели или эксперимента).

Таким образом, из 226 первоначально найденных записей в окончательный обзор вошло 92 источника, непосредственно использованных при анализе связи стак-эффекта, воздухопроницаемости окон и акустических проявлений утечек.

3 Results and Discussion / Результаты и Обсуждение

3.1 Physical principles and mechanisms of formation of the stack effect / Физические основы и механизмы формирования стак-эффекта

Стак-эффект является термогравитационным явлением, возникающим в зданиях в холодный период года вследствие разности температур внутренней и наружной среды [65]. В соответствии с ГОСТ Р 59972-2021 "Системы вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий. Технические требования" [70] при стак-эффекте связанные объемы в здании (лифтовые шахты, лестничные клетки и т.п.) начинают работать по принципу дымовой трубы, т.е. в них возникает неконтролируемая тяга.

Механизм естественной вентиляции базируется на фундаментальном физическом принципе: теплый воздух, обладая меньшей плотностью по сравнению с холодным, поднимается вверх по вентиляционным каналам, создавая разрежение в обслуживаемых помещениях (кухни, санузлы) [71, 72]. Компенсация массового расхода воздуха происходит за счет притока из смежных помещений (комнаты, коридоры) и внешней среды через неплотности ограждающих конструкций [73, 74]. Таким образом, наличие вертикальных коммуникационных каналов не является строго необходимым условием возникновения стак-эффекта, однако в реальных высотных зданиях именно вертикальные коммуникационные каналы служат основными путями вертикального перемещения воздуха и существенно усиливают проявление эффекта тяги [75].

3.2 Regulatory regulation of air permeability of window structures / Нормативное регулирование воздухопроницаемости оконных конструкций

Оконные блоки, несмотря на высокие показатели герметичности, не являются абсолютно воздухонепроницаемыми. Классификация по воздухопроницаемости регламентируется ГОСТ 23166-2024 "Блоки оконные и балконные. Общие технические условия" [46]. Таблица 1 устанавливает градацию классов от А (наивысшая герметичность) до Д (низкая герметичность).

Table 2. Classes of products by air permeability (Russian State Standard GOST 23166-2024)
Таблица 1. Классы изделий по воздухопроницаемости (ГОСТ 23166-2024)

Класс изделия	Объемная воздухопроницаемость при $\Delta P = 100$ $Па$, $м^3/(ч \cdot м^2)$ (по площади)	Объемная воздухопроницаемость при $\Delta P = 100$ $Па$, $м^3/(ч \cdot м^2)$ (по длине притвора)

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

А	3.0	0.75
Б	9.0	2.25
В	17.0	4.25
Г	27.0	6.75
Д	50.0	12.5

Большинство качественных ПВХ-конструкций соответствуют классу А или Б, обеспечивая воздухопроницаемость не более 9 $м^3/(ч·м^2)$. Однако данные показатели получены при стандартизированном перепаде давления 100 Па, что в определенных случаях не соответствует реальным условиям эксплуатации в высотных зданиях, где давления могут достигать более высоких величин [76].

3.3 Sanitary and hygienic requirements and air exchange balance / Санитарно-гигиенические требования и баланс воздухообмена

Обеспечение физиологически необходимого воздухообмена является императивом проектирования систем вентиляции. СП 60.13330.2020 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха" [52] регламентирует нормативный расход наружного воздуха для жилых помещений от 30 $м^3/ч$ на человека (при площади более 20 $м^2$) до 3 $м^3/ч$ на 1 $м^2$ жилой площади (при площади менее 20 $м^2$).

Сравнительный анализ показывает, что инфильтрация через закрытые оконные блоки с высокой герметичностью, включая конструкции класса А, в ряде случаев недостаточна для обеспечения требуемого воздухообмена в помещении. Это связано с тем, что фактический приток воздуха зависит не только от класса окна, но и от величины перепада давления, площади окон, температуры наружного воздуха, ветрового режима и состояния вентиляционной системы. При недостаточном воздухообмене возможно повышение концентрации углекислого газа, влажности и других загрязняющих веществ. Авторы [77] показали, что при отключённой механической вентиляции воздухообмен в обследованных помещениях составлял около 0.18–0.53 $ч^{-1}$, а при работе вентиляции воздухообмен составил 0.45–0.90 $ч^{-1}$. При периодической работе вентиляции в помещениях фиксировались концентрации выше 1500 и 2000 ppm (от англ. parts per million). Статья [77] подтверждает, что одной неконтролируемой инфильтрации может быть недостаточно для поддержания требуемого качества воздуха. Исследователи [78] подчёркивают, что энергоэффективные здания с герметичной оболочкой нуждаются в организованной вентиляции. Максимальные среднечасовые концентрации CO_2 в жилых помещениях с вентиляцией через окна были выше, чем в зданиях с механической вентиляцией: медианное значение составляло около 1830 ppm против 1360 ppm [78].

Дополнительные данные о недостаточности естественного воздухообмена в герметичных энергоэффективных зданиях получили [56, 79]. На основе годового мониторинга девяти жилых домов авторы установили, что зимой медианная кратность воздухообмена снижалась до 0.15 $ч^{-1}$, тогда как летом возрастала до 0.27 $ч^{-1}$. Повышенные концентрации CO_2 в отопительный период были связаны с уменьшением частоты открывания окон и недостаточной компенсацией снижения естественного притока. Авторы [80] обследовали жилые дома и показали, что работа общеобменной механической вентиляции достоверно снижала концентрации CO_2 и радона, тогда как неисправность или отключение вентиляционного оборудования ухудшали качество внутреннего воздуха. Исследователи [81] установили, что пассивные оконные приточные клапаны могут иметь недостаточную производительность при типичных перепадах давления и потому должны применяться совместно с механической вытяжкой. Таким образом, исследования подтверждают, что повышение герметичности оконных блоков должно сопровождаться организацией управляемого притока и контролем фактической работы вентиляционной системы.

3.4 Design features and local air permeability / Конструктивные особенности и локальная воздухопроницаемость

Типовая оконная фурнитура с видимыми петлями создает локальные зоны повышенной инфильтрации [82]. Конструкция верхней петли предполагает механическое отжатие уплотнителя створки, что формирует канал для прохода воздуха. Данный эффект является конструктивно обусловленным и не классифицируется как дефект изделия.

Воздухопроницаемость в зоне петель усугубляется наличием дренажных и компенсационных отверстий в профиле, которые позволяют воздуху обходить внешний контур уплотнения. Таким образом, барьерную функцию выполняет преимущественно внутренний контур уплотнения. Зоны повышенного продувания могут также возникать вследствие производственных

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

дефектов или ошибок проектирования, что требует детального инструментального контроля. Статья [83] посвящена экспериментальному сравнению различных материалов и способов герметизации строительных соединений, а также подтверждает, что качество монтажа, непрерывность уплотняющего контура и отсутствие локальных дефектов существенно влияют на воздухопроницаемость.

3.5 Aerodynamic loads: stack effect and wind / Аэродинамические нагрузки: стак-эффект и ветер

Доминирующими факторами, вызывающими инфильтрацию, являются стак-эффект и ветровое давление. В угловых зонах здания аэродинамические нагрузки возрастают вследствие образования зон разрежения на заветренной стороне фасада [84]. Авторы [85] установили, что острые углы способствуют отрыву потока и формированию вихрей, вследствие чего в угловых и боковых зонах возрастает интенсивность отрицательного давления. Статьи [86, 87] также показали, что угловые элементы изменяют направление потока и интенсивность локального ускорения воздуха.

СП 20.13330.2016 "Нагрузки и воздействия" [60] регламентирует, что нормативная ветровая нагрузка зависит от ветрового района, типа местности и высоты здания. Для г. Москвы (Российская Федерация) на высоте 20 м (7-й этаж) нормативная ветровая нагрузка составляет 260 Па, тогда как пиковые значения в угловых зонах могут достигать -1000 Па. Такие перепады давления приводят к турбулизации потока воздуха в неплотностях, вызывая акустические эффекты (шум, свист). Интенсификация шума при открывании входной двери объясняется увеличением массового расхода воздуха при неизменном сечении приточных щелей, что ведет к росту скорости потока и перепада давления на локальных участках [88].

В отличие от ветровой нагрузки, имеющей стохастический характер, температурный перепад, вызывающий стак-эффект, является стабильным фактором в зимний период. Статья [89] показывает, что разность температур в Российской Федерации достигает 45–50 К. Такой перепад определяет значительную величину гравитационного напора.

3.6 Estimated stack effect pressure / Расчетная оценка давления стак-эффекта

Перепад давления на окнах составляет [90], [91]:

$$P = (H - H_w) \cdot (\rho_н - \rho_в) \cdot g \,, \tag{1}$$

где H это высота здания, H_w это высота расположения окон, $\rho_н$ это плотность наружного воздуха, $\rho_в$ это плотность внутреннего воздуха, g это ускорение свободного падения.

Если:

- высота здания $H = 75 м$;.
- высота расположения окна $H_w = 21 м$ (7-й этаж)
- температура наружного воздуха $t_{out} = -25°C$;
- температура внутреннего воздуха $t_{in} = 20°C$;
- плотность наружного воздуха $\rho_н = 1.4 кг / м^3$;
- плотность внутреннего воздуха $\rho_в = 1.18\ кг / м^3$.

Давление стак-эффекта составляет (1):

$$P = (75 - 21) \cdot (1.4 - 1.18) \cdot 9.81 = 116 Па \,.$$

Полученное значение (116 Па) превышает стандартный перепад для классификации по ГОСТ 23166 (100 Па) [46]. Следовательно, даже оконные конструкции с высокой герметичностью, относящиеся к классу А по объёмной воздухопроницаемости, при перепаде давления 116 Па могут обеспечивать расход воздуха порядка 3 м^3/ч. Такое значение соответствует нормативному диапазону воздухопроницаемости данного класса и не свидетельствует о наличии дефекта конструкции.

3.7 Airflow velocity and acoustic effect assessment / Оценка скорости воздушного потока и акустический эффект

При распределении воздушного потока между отдельными неплотностями 50% общего расхода, то есть 1.5 м^3/ч, может проходить через зазоры в области верхних петель, а оставшаяся часть проходит через другие участки оконной конструкции. Для двухстворчатого окна размером

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

1.5*1.5 м при ширине зазора 0.5 мм и длине 50 мм площадь одного проходного канала составляет 25 мм^2. С учетом двух створок суммарная площадь каналов равна 50 мм^2, или 50*10^{-6}м^2.

Выражение (2) определяет скорость воздушного потока через указанные каналы:

$$v = \frac{Q}{A}, \tag{2}$$

где Q это объёмный расход воздуха, м^3/с; A это суммарная площадь проходного сечения, м^2. При расходе 1.5 м^3/ч:

$$Q = \frac{1.5}{3600} = 4.17 \cdot 10^{-4}\ м^3/с,$$

$$v = \frac{4.17 \cdot 10^{-4}}{50 \cdot 10^{-6}} = 8.3\ м/с = 30\ км/ч.$$

При прохождении воздуха через узкие щелевые каналы со скоростью 30 км/ч возрастает вероятность отрыва потока от кромок, образования вихревых структур и возникновения аэродинамического шума, включая свист. Дополнительное воздействие ветрового давления и гравитационного напора, обусловленного стак-эффектом, способно увеличить расход воздуха через неплотности и соответствующую скорость потока. Поэтому появление шума в окнах при значительном температурном перепаде или ветре имеет физически объяснимый характер и связано с особенностями движения воздуха через локальные каналы малой площади.

3.8 Methods to minimize negative consequences / Методы минимизации негативных последствий

Для снижения инфильтрации и акустического дискомфорта рекомендуются следующие конструктивные и организационные меры:

- применение скрытой фурнитуры: исключает механическое воздействие петель на контур уплотнения, повышая герметичность притвора;
- использование профильных систем с тремя контурами уплотнения: например, VEKA Softline 82 [92], где средний контур разделяет камеру притвора, снижая влияние дренажных систем;
- установка стеновых приточных клапанов обеспечивает организованный приток воздуха, снижая перепад давления на оконных конструкциях и устраняя эффект "подсоса" через неплотности.

Комплексное применение данных методов позволяет минимизировать проявление стак-эффекта и обеспечить комфортные условия эксплуатации ограждающих конструкций.

4 Conclusions

1. Анализ научной литературы показал, что влияние стак-эффекта на воздухопроницаемость оконных конструкций определяется совместным действием температурного перепада, ветровой нагрузки, высоты здания, положения оконного блока, состояния уплотнительных контуров и режима работы вентиляции. Поэтому нормативный класс воздухопроницаемости не может рассматриваться как единственный показатель фактического воздухообмена в условиях эксплуатации.
2. Выполненная расчетная оценка для принятого сценария (высота здания $H = 75\ м$; высота расположения окна $H_w = 21\ м$ (7-й этаж); температура наружного воздуха $t_{out} = -25°C$; температура внутреннего воздуха $t_{in} = 20°C$; плотность наружного воздуха $\rho_н = 1.4\ кг/м^3$; плотность внутреннего воздуха $\rho_в = 1.18\ кг/м^3$) дала перепад давления от стак-эффекта около 116 Па. Полученное значение превышает стандартный перепад 100 Па, используемый при классификации оконных блоков по воздухопроницаемости. Данный результат относится к указанному расчетному сценарию.
3. Установлено, что при уменьшении площади локальных неплотностей возрастает скорость воздушного потока через оставшиеся каналы при сохранении общего расхода воздуха, что способствует формированию вихревых течений и аэродинамического шума.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

4. Установлено, что высокая герметичность окон при отсутствии организованного притока может приводить к недостаточному воздухообмену и росту концентраций CO_2, влажности и других загрязняющих веществ в помещении.
5. Обосновано, что снижение негативных последствий стак-эффекта требует комплексного применения герметизации оконных узлов, совершенствования уплотнительных контуров, установки организованных приточных устройств и балансировки систем вентиляции. Приведенные меры следует рассматривать как инженерные рекомендации, сформированные на основе анализа литературы и расчетных предпосылок.

5 Fundings

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment \u2116 075-03-2026-218 dated 16 January 2026, Additional agreement \u2116 075-03-2026-218/7 dated 4 June 2026, FSEG-2025-0008.

References

1. Wang, R., Wan, M., Jiang, H., Wu, X., Zhang, P., & Lu, S. (2026). Building Energy Thermal Resilience under Compound Long-and-Short-Term Climate Disturbances: Impact Mechanisms, Quantitative Evaluation, and Energy Storage Enhancement. *Energy Use*, *2*(2), 100059–1. https://doi.org/10.59717/IPJ.ENERGY-USE.2026.100059
2. Campagna, L. M., & Fiorito, F. (2022). On the Impact of Climate Change on Building Energy Consumptions: A Meta-Analysis. *Energies*, *15*(1), 354. https://doi.org/10.3390/EN15010354
3. Chen, Y., Ren, Z., Peng, Z., Yang, J., Chen, Z., & Deng, Z. (2023). Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption. *Journal of Building Engineering*, *78*, 107646. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107646
4. Kutty, N. A., Barakat, D., Darsaleh, A. O., & Kim, Y. K. (2023). A Systematic Review of Climate Change Implications on Building Energy Consumption: Impacts and Adaptation Measures in Hot Urban Desert Climates. *Buildings*, *14*(1), 13. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14010013
5. Zheng, H., Gao, G., Zhong, X., & Zhao, L. (2022). Monitoring and diagnostics of buildings' heat loss based on 3D IR model of multiple buildings. *Energy and Buildings*, *259*, 111889. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.111889
6. Kim, S., Seo, J., Jeong, H., & Kim, J. (2022). In situ measurement of the heat loss coefficient of thermal bridges in a building envelope. *Energy and Buildings*, *256*, 111627. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111627
7. Younes, C., Shdid, C. A., & Bitsuamlak, G. (2012). Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*, *35*(3), 267–302. https://doi.org/10.1177/1744259111423085
8. Hong, G., & Kim, B. S. (2016). Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method. *Building and Environment*, *97*, 48–54. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.11.027
9. Shi, S., Chen, C., & Zhao, B. (2015). Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and Environment*, *92*, 528–537. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.05.027
10. Mahmoodzadeh, M., Gretka, V., Wong, S., Froese, T., & Mukhopadhyaya, P. (2020). Evaluating Patterns of Building Envelope Air Leakage with Infrared Thermography. *Energies*, *13*(14), 3545. https://doi.org/10.3390/EN13143545
11. Schiricke, B., Diel, M., & Kölsch, B. (2024). Field Testing of an Acoustic Method for Locating Air Leakages in Building Envelopes. *Buildings*, *14*(4), 1159. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14041159
12. Lim, S., Choi, S. J., Jing, J., & Jo, J. H. (2025). A Methodology for Deriving Conversion Coefficients of Natural Infiltration Using Airtightness Data. *Energies*, *18*(23), 6301. https://doi.org/10.3390/EN18236301
13. Hassouneh, K., Alshboul, A., & Al-Salaymeh, A. (2012). Influence of infiltration on the energy losses in residential buildings in Amman. *Sustainable Cities and Society*, *5*(1), 2–7. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2012.09.004
14. Pinto, M., Viegas, J., & de Freitas, V. P. (2011). Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal. *Building and Environment*, *46*(12), 2480–2489. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2011.06.009

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

15. BSI-075: How Do Buildings Stack Up? https://buildingscience.com/documents/insights/bsi-075-how-do-buildings-stack-up
16. Denisikhina, M. D., & Samoletov, M. V. (n.d.). The Stack Effect: from the Driving Force of Natural Ventilation to the Headache of High-Rise Buildings. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8592
17. Hwang, T., Hwang, M. K., & Kim, J. (2025). Reduction Characteristics of Stack-Effect Problems According to Applying Local Countermeasures by Pressure Distribution Measurement in Buildings. *Buildings*, *15*(24), 4453. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS15244453
18. Jing, J. J., Ji, K. H., Yoon, S., & Jo, J. H. (2024). A novel method for evaluating stack pressure in real high-rise buildings: Optimization of measurement points. *Building and Environment*, *259*. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2024.111661
19. Yousefi, M. M. (2025). CFD simulation and field validation of stack effect in elevator shafts and the effects of airflow on elevator door operation. *Theses*. https://repository.rit.edu/theses/12370
20. Zhang, X., Ma, Y., Wang, Q., Zhang, H., & Zhao, S. (2023). Research on the thermal pressure of elevator shaft in high-rise residential building under different cooling conditions based on computer simulation. *Proc. SPIE 12639, Third International Conference on Mechanical Design and Simulation (MDS 2023)*, *12639*, 250. https://doi.org/10.1117/12.2681813
21. Rubino, C., Liuzzi, S., & Martellotta, F. (2026). Assessing airflow performance of ventilated acoustic metamaterials: a methodology to foster comparability of results. *Building and Environment*, *288*, 114001. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.114001
22. Park, S., Park, S., & Song, D. (2026). Guidelines for predicting airtightness in residential buildings under climatic pressure conditions. *Energy and Built Environment*, *7*(2), 267–277. https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2024.11.002
23. Hu, J., Liu, Z., Ma, G., Zhang, G., & Ai, Z. (2023). Air infiltration and related building energy consumption: A case study of office buildings in Changsha, China. *Journal of Building Engineering*, *74*, 106859. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106859
24. Vera Alves, Romero Rincón, M., Tudela, J., & Martínez Beltrán, P. (2026). Comparison of models for estimating air infiltration in dwellings and their impact on heating demand. *Energy Efficiency*, *19*(1), 10-. https://doi.org/10.1007/S12053-026-10413-W
25. Lozinsky, C. H., Casquero-Modrego, N., Walker, I. S., Less, B. D., Graessle, Q. P., & Sohn, M. D. (2026). The impact of simplified window and exhaust fan assumptions on indoor air quality in multifamily buildings. *International Journal of Ventilation*, *25*(2), 204–225. https://doi.org/10.1080/14733315.2025.2550854
26. Lee, D. S., Ji, K. H., Jing, J., & Jo, J. H. (2022). Experimental study on elevator door reopening problems caused by stack induced pressure differences across the elevator door in buildings. *Building and Environment*, *221*, 109271. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109271
27. Xie, X. F., & Yang, Y. (2020). Numerical investigation on the stack effect of a general high-rise building model. *Engineering Mechanics*, *37*(3), 217–227. https://doi.org/10.6052/J.ISSN.1000-4750.2019.05.0251
28. Huang, K., Yu, M., Liu, X., & Wang, R. (2024). The mathematical model of kitchen smoke exhaust system in high-rise residential buildings considering the Influence of Stack effect. *Energy and Built Environment*, *5*(4), 580–591. https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2023.04.007
29. See, S. W., & Balasubramanian, R. (2008). Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods. *Atmospheric Environment*, *42*(39), 8852–8862. https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2008.09.011
30. Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., & Di Sabatino, S. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Building and Environment*, *56*, 346–360. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.03.023
31. Lim, T., Cho, J., & Kim, B. S. (2010). The predictions of infection risk of indoor airborne transmission of diseases in high-rise hospitals: Tracer gas simulation. *Energy and Buildings*, *42*(8), 1172–1181. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.02.008
32. Miller, R. S., & Beasley, D. (2009). On stairwell and elevator shaft pressurization for smoke control in tall buildings. *Building and Environment*, *44*(6), 1306–1317. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2008.09.015
33. Abdullah, N. S., Hanapi, N. L., Apet, R. A. A., Azmy, M. S., Jalil, N. A. A., & Tatriwartami, M. (2025). Numerical Simulation: Smoke Movement at Stairwell of High-rise Buildings. *Journal of Design and Built Environment*, *2025*(Special Issue 7), 123–141. https://doi.org/10.22452/JDBE.SPVII.9

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

34. Frikel, M. D., Paskhina, D. A., Anosova, E. B., & Sandalov, V. M. (2023). Application of the PyroSim software product to assess the dynamics of distribution of hazardous factors using a zone model. *Advances in Chemistry and Chemical Engineering (in Rus)*, *37*(10 (272)), 90–95. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-programmnogo-produkta-pyrosim-dlya-otsenki-dinamiki-rasprostraneniya-opasnyh-faktorov-pri-ispolzovanii-zonnoy-modeli
35. Ene, I. C., Iordache, V., & Anghel, I. (2024). The Impact of an Office Fire Combined with the Stack Effect in a Multi-Story Building. *Applied Sciences*, *14*(24), 11659. https://doi.org/10.3390/APP142411659
36. Reichman, R., & Dubowski, Y. (2021). Gaseous pollutant transport from an underground parking garage in a Mediterranean multi-story building—Effect of temporal resolution under varying weather conditions. *Building Simulation*, *14*(5), 1511–1523. https://doi.org/10.1007/S12273-020-0757-4
37. Klote, J. H., & Milke, J. A. (n.d.). Principles of Smoke Management. https://firedoc.nist.gov/article/i3gzXYQBWEcjUZEYKAmN
38. Mona, Azarbayjani, Jigisha, & Mehta. (n.d.). Climatic Based Consideration of Double Skin Façade System: Comparative Analysis of Energy Performance of a Double Skin Façade Building in Boston. https://doi.org/10.5555/2339453.2339461
39. Black, W. Z. (2010). COSMO—Software for designing smoke control systems in high-rise buildings. *Fire Safety Journal*, *45*(6–8), 337–348. https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2010.07.001
40. Bellido, C., Quiroz, A., Panizo, A., & Torero, J. L. (2009). Performance assessment of pressurized stairs in high rise buildings. *Fire Technology*, *45*(2), 189–200. https://doi.org/10.1007/S10694-008-0078-0/TABLES/3
41. Xu, H., Su, L., Lou, W., & Shan, H. (2024). Combined Effects of Thermal Buoyancy, Wind Action, and State of the First-Floor Lobby Entrance on the Pressure Difference in a High-Rise Building. *Energies*, *17*(9), 2117. https://doi.org/10.3390/EN17092117
42. Yang, Y., Hou, R., & Xie, C. (2024). Full-scale experimental simulation of the stack effect pressure acting on an elevator door system in a high-rise building. *Building and Environment*, *256*, 111443. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2024.111443
43. Li, Y., Zhu, N., & Hou, Y. (2023). Multi-Criteria Decision-Making of Countermeasure Combination for Mitigating the Stack Effect in High-Rise Office Building. *Buildings, 13*(3), 653. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13030653
44. Yu, J. yeon, Song, K. dong, & Cho, D. woo. (2017). Resolving Stack Effect Problems in a High-Rise Office Building by Mechanical Pressurization. *Sustainability*, *9*(10), 1731. https://doi.org/10.3390/SU9101731
45. Park, S. Y., Choi, S. J., Lee, D. S., & Jo, J. H. (2025). Assessing stack-induced infiltration loads by predicting neutral pressure levels in high-rise buildings. *Building Simulation*, *18*(5), 999–1017. https://doi.org/10.1007/S12273-025-1255-5
46. GOST 23166-2024 Window and balcony blocks. General specifications. https://docs.cntd.ru/document/1305402755
47. ISO 9972-2015 Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method. https://docs.cntd.ru/document/431977007
48. ASTM E283 Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Skylights, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen. (n.d.). West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0283_E0283M-26
49. DIN EN 12207-2017 Windows and doors - Air permeability – Classification. https://docs.cntd.ru/document/440169302
50. New Windows Still Drafty? The 4 Hidden Reasons Your "Thermal Break" Aluminum Windows Are Failing. https://www.gdaaluminiumprofile.com/news/what-window-dealers-won-t-tell-you-why-your-thermal-break-aluminum-windows-start-leaking-air-in-2-years-349535.html
51. Ustinov, V. V. (n.d.). Determining the Minimum Outside Air Flowrate in Design of Ventilation Systems. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6507
52. SP 60.13330.2020 Heating, ventilation and air conditioning. https://docs.cntd.ru/document/573697256
53. ASHRAE STD 62.1-2020 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. https://docs.cntd.ru/document/565106304

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

54. Kempton, L., Daly, D., Kokogiannakis, G., & Dewsbury, M. (2022). A rapid review of the impact of increasing airtightness on indoor air quality. *Journal of Building Engineering*, *57*, 104798. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104798
55. Roy Choudhury, A., Singh, N., Chinthala, S., Lalwani, J., Sri Kalyana Rama, J., Chandana, N., … Akhbari, A. (2025). Environmental health hazards attributed to deteriorated indoor air quality caused by inferior construction practices. *Environmental Science: Atmospheres*, *5*(9), 941–961. https://doi.org/10.1039/D5EA00027K
56. Alhindawi, I., Fernandes, J. M., Sood, D., O'Donnell, J., & Byrne, M. A. (2026). A longitudinal study of CO2 and air exchange rate variations in naturally ventilated airtight energy-efficient dwellings. *Journal of Building Engineering*, *119*. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2026.115257
57. Scrosati, C., Bianco, F., Depalma, M., Belussi, L., Strini, A., Schiavi, L., … Garai, M. (2025). Preliminary evaluation of ventilation and acoustics insulation of partially open windows for the PRIN – METAWAVE project. *54th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, INTERNOISE 2025*, *1*, 3158–3164. https://doi.org/10.3397/IN_2025_1090359
58. Elsaei, A., Machimbarrena, M., Meiss, A., Poza-Casado, I., & Padilla-Marcos, M. A. (2025). A multi-stage analysis of air leakage and acoustic performance on a full-scale test chamber. *Journal of Building Engineering*, *114*, 114301. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.114301
59. Chum, S., Lozinsky, C. H., Andargie, M. S., & Touchie, M. F. (2023). Empirical investigation of interzonal air leakage and airborne sound transmission correlation in multi-unit residential buildings. *Building and Environment*, *239*, 110345. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110345
60. SP 20.13330.2016 Loads and actions. https://docs.cntd.ru/document/456044318
61. Li, J., & Li, Z. (2024). Acoustic wind tunnel experimental study of aerodynamic noise distribution in high-rise buildings. *Journal of Building Engineering*, *91*, 109621. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109621
62. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *96*(10–11), 1749–1761. https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2008.02.058
63. Wijesooriya, K., Mohotti, D., Lee, C. K., & Mendis, P. (2023). A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future. *Journal of Building Engineering*, *74*, 106828. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106828
64. Estrado, E., Turrin, M., & Eigenraam, P. (2023). Optimization of complex-geometry high-rise buildings based on wind load analysis. *Simulation*, *99*(11), 1133–1146. https://doi.org/10.1177/00375497221109577;WGROUP:STRING:PUBLICATION
65. Man, X., Lu, Y., Li, G., Wang, Y., & Liu, J. (2020). A study on the stack effect of a super high-rise residential building in a severe cold region in China. *Indoor and Built Environment*, *29*(2), 255–269. https://doi.org/10.1177/1420326X19856045
66. Jing, J., Lee, D. S., & Jo, J. H. (2026). Stack effect in high-rise buildings: A comprehensive review on theoretical mechanisms, impacts, and evaluation methods. *Building and Environment*, *288*, 113971. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.113971
67. Kolsch, B., Walker, I., Delp, W., Schiricke, B., & Hoffschmidt, B. (2022, May 1). Comparison of Airflow and Acoustic Measurements for Evaluation of Building Air Leakage Paths in a Laboratory Test Apparatus. https://escholarship.org/uc/item/6r69f93b
68. Moed, H. F., Bar-Ilan, J., & Halevi, G. (2016). A new methodology for comparing Google Scholar and Scopus. *Journal of Informetrics*, *10*(2), 533–551. https://doi.org/10.1016/J.JOI.2016.04.017
69. Montoya, F. G., Alcayde, A., Baños, R., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). A fast method for identifying worldwide scientific collaborations using the Scopus database. *Telematics and Informatics*, *35*(1), 168–185. https://doi.org/10.1016/J.TELE.2017.10.010
70. GOST R 59972-2021 "Ventilation and air conditioning systems of public buildings. Technical requirements. https://docs.cntd.ru/document/1200182524
71. Shi, X., Li, Y., Long, T., Zhao, N., Liu, S., & Li, T. (2023). Buoyancy-driven natural ventilation performance of a multi-story building with vertical shaft designed by using dimensionless design approach. *Sustainable Cities and Society*, *99*, 104997. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2023.104997

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

72. Jo, J. H., Lim, H., Yoon, S., & Jing, J. (2026). Ten questions concerning stack effect issues in high-rise buildings. *Building and Environment*, 115049. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2026.115049
73. Yoon, S., Song, D., Kim, J., Kim, J., Lim, H., & Koo, J. (2020). Identifying stack-driven indoor environmental problems and associated pressure difference in high-rise residential buildings: Airflow noise and draft. *Building and Environment*, *168*, 106483. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106483
74. Schuldenfrei, E., Tang, X., Deng, X., Wang, Q., Lin, Z., & Huang, J. (2026). Multi-zone modeling of airflow in a free running building floor: Possible implications for disease transmission. *Building Simulation*, *19*(3), 587–603. https://doi.org/10.1007/S12273-026-1417-0
75. Liu, M., Jiang, X., Sun, J., Wu, L., Zhang, X., Hua, L., & Yang, W. (2026). Comprehensive numerical assessment of stack effect mitigation in high-rise buildings: impacts of architectural, mechanical, and climatic factors. *Science and Technology for the Built Environment*. https://doi.org/10.1080/23744731.2026.2643576
76. Rolfsmeier, S., Mairinger, E., Neubig, J., & Gayer, T. (2025). Measuring Airtightness of High-Rise Buildings (Lessons Learned). *Buildings*, *15*(5), 724. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS15050724
77. Pereira, P. F., & Ramos, N. M. M. (2021). The impact of mechanical ventilation operation strategies on indoor CO2 concentration and air exchange rates in residential buildings. *Indoor and Built Environment*, *30*(9), 1516–1530. https://doi.org/10.1177/1420326X20960767;WGROUP:STRING:PUBLICATION
78. Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J. F., & Hutter, H. P. (2015). Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *12*(11), 14132–14147. https://doi.org/10.3390/IJERPH121114132
79. Alhindawi, I., McGrath, J. A., Sood, D., O'Donnell, J., & Byrne, M. A. (2025). A seasonal assessment of indoor air quality and thermal performance in naturally ventilated airtight energy-efficient dwellings. *Building and Environment*, *276*. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.112862
80. Zhao, H., Martin, E., Khan, T., Chasar, D., Sonne, J., Withers, C. R., … Singer, B. C. (2025). Mechanical ventilation and indoor air quality in recently constructed homes in the humid climate of the Southeast U.S. *Indoor Environments*, *2*(4), 100121. https://doi.org/10.1016/J.INDENV.2025.100121
81. Palcikovskis, A., Lebedeva, K., Zemitis, J., Borodinecs, A., & Prozuments, A. (2025). Analysis of Window Trickle Vents at Various Pressure Differences. *Sustainability*, *17*(20), 9304. https://doi.org/10.3390/SU17209304
82. Aksenov, I., & Konstantinov, A. (2024). Window air permeability calculation methodology with regard to temperature loading. *E3S Web of Conferences*, *535*. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202453501001
83. Van Linden, S., & Van Den Bossche, N. (2020). Airtightness of sealed building joints: Comparison of performance before and after artificial ageing. *Building and Environment*, *180*, 107010. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107010
84. Cheng, Z., Wong, J. K., & Mercan, O. (2025). Evaluating the wind loads on high-rise buildings of various plan dimensions through numerical simulations. *Engineering Structures*, *343*, 120981. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2025.120981
85. Singh, A., Kontoni, D.-P. N., & Mandal, S. (2024). CFD analysis of the impact of corner adjustments in tall square buildings for wind load mitigation. *Engineering Research Express*, *6*(4), 045114. https://doi.org/10.1088/2631-8695/AD8B11
86. Juan, Y. H., Rezaeiha, A., Montazeri, H., Blocken, B., & Yang, A. S. (2024). Improvement of wind energy potential through building corner modifications in compact urban areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *248*. https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2024.105710
87. Jamińska-Gadomska, P., & Sumorek, A. (2025). Experimental Investigation of Local Wind Effects on Façade Scaffolding Structures. *Applied Sciences*, *15*(22), 12196. https://doi.org/10.3390/APP152212196
88. Biler, A., Tavil, A. U., Su, Y., & Khan, N. (2018). A Review of Performance Specifications and Studies of Trickle Vents. *Buildings*, *8*(11), 152. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS8110152
89. Mokhov, I. I., & И., M. И. (2023). Russian Climate Research in 2019–2022. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, *59*(7), 830–851. https://doi.org/10.31857/S0002351523070106

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

90. Dobkowski, J., & Gajewski, A. (2025). Stack Ventilation Performance in a Semi-Detached House After Limiting Energy Consumption for Space Heating. *Energies*, *18*(17), 4616. https://doi.org/10.3390/EN18174616
91. Bak, J., Koo, J., Yoon, S., & Lim, H. (2022). Thermal Draft Load Coefficient for Heating Load Differences Caused by Stack-Driven Infiltration by Floor in Multifamily High-Rise Buildings. *Energies*, *15*(4), 1386. https://doi.org/10.3390/EN15041386
92. VEKA Softline 82. https://www.veka.ru/production/special/profilnye-sistemy-veka/veka-softline-82