



Research Article





Received: May 30, 2023

Accepted: June 27, 2023

Published: July 14, 2023

ISSN 2304-6295

Thermal balance of the high-rise building with translucent modular glazing

Gorshkov Rostislav Alexandrovich ¹ 
Nemova Darya Victorovna ² 
Andreeva Daria Sergeevna ^{2*} 
Cherkashin, Artemiy Viktorovich ² 

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation; rostalsgor@gmail.com

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
rostalsgor@gmail.com (G. R. A); darya0690@mail.ru (N.D.V.); andreeva_ds@spbstu.ru (A.D.S.);
cherkashin_av@spbstu.ru (C.A.V.)

Correspondence:* email andreeva_ds@spbstu.ru; contact phone +79312564594

Keywords:

High-rise buildings; Enclosure Structure; Heat transfer; Facades; Thermal balance; Energy Efficiency; Thermal Performance

Abstract:

Translucent facades are broadly applied in modern architecture, especially in office buildings. Considering the energy use strategies and thermal performance during the initial design process is beneficial for building performance. **The object of the research** is the translucent glazing facades of high-rise buildings. The research aims to develop a methodology for calculating and evaluating the thermal performance of a high-rise building with translucent modular glazing in the cold season. **Methods.** A method for calculating and estimating the thermal performance of a high-rise building with translucent modular glazing has been developed and presented. **Results.** The equation of the thermal balance of the high-rise building with translucent modular glazing is obtained and presented. Based on the obtained equation, the formula for calculating the current indoor air temperature in a heated building is obtained. The indoor air temperature in a heated building depends on the external climatic conditions (outdoor air temperature), thermal performance characteristics of the external enclosing structures, the calculated capacity of the heating system, and the heat storage capacity. The model allows to consider not only the heating system's power but also common and solar heat gain.

1 Introduction

В крупных городах появляется все больше зданий с высоким коэффициентом остекленности фасадов. С одной стороны их более массовое строительство отражает тренды в архитектуре, с другой стороны отражает достижения в области строительных наук и инженерии, показывая технические возможности, которые ранее были недостижимы.

Коэффициент остекленности фасадов зданий исторической постройки, как правило, не превышал 0.15-0.20. Такие значения коэффициента остекленности обеспечивали естественную освещенность помещений в дневное время суток и одновременно минимизировали потери тепловой энергии через наружную оболочку зданий в холодный период года, т.к. сопротивление теплопередаче окон было значительно меньше, чем у стен и иных массивных наружных ограждений. Это в полной мере соответствовало рекомендациям итальянского зодчего Андреа Палладио [1], согласно которому: «При выведении окон необходимо иметь в виду, чтобы они пропускали света не более и не менее того, что требуется, и чтобы они были не слишком часты и не слишком редки».

Gorshkov, R.; Nemova, D.; Andreeva, D.; Cherkashin, A.

Thermal balance of the high-rise building with translucent modular glazing

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **109** Article No 10905. doi: 10.4123/CUBS.109.5



Следует отметить, что и здесь имели место исключения. Крупным торговым магазинам для более представительной демонстрации выставляемых на продажу товаров требовались значительные по габаритам витрины. Так в начале XX века в г. Санкт-Петербурге, России появились здания компании «Зингер» («Дом книги»), торговой фирмы «С.Эсдерс и К.Схейфальс» Au Pont Rouge («У Красного Моста»), дома Мертенса и ряд других [2]-[4].

В советский период коэффициент остекленности фасадов ограничивался нормативно. Подобное ограничение действовало и в постсоветский период вплоть до норм 2003 года [5], согласно которым в жилых зданиях коэффициент остекленности фасадов не должен был превышать 0.18, а в зданиях общественного назначения должен быть не более 0.25, если приведенное сопротивление теплопередаче окон (кроме мансардных) оказывалось меньше определенного значения [6].

При этом в СССР продолжали проектироваться и возводиться объекты, коэффициент остекленности фасадов которых превосходил нормативные ограничения по коэффициенту остекленности (примеры: здания института «Гидропроект», Центросоюза, Центрального телеграфа и СЭВ (секретариата Совета экономической взаимопомощи) в Москве, Дворец спорта «Юбилейный» в Ленинграде и др.). С одной стороны это было данью зарождавшейся в мире моды на «стеклянную архитектуру», с другой – поиском новых архитектурных решений в рамках экспериментального проектирования [7]-[9]. Общее количество подобных объектов долгое время оставалось незначительным. При отсутствии систем кондиционирования воздуха в теплый период года при солнечной погоде в таких зданиях наблюдался перегрев. А в наиболее холодные периоды года на внутренней поверхности оконных конструкций мог выпадать конденсат и, кроме того, в приоконной зоне помещений параметры микроклимата не всегда соответствовали оптимальным или даже допустимым значениям. Для снижения энергопотребления зданий разрабатываются новые методы повышения сопротивления теплопередачи фасадов с многослойным остеклением [10]-[12].

По мере развития систем централизованного теплоснабжения [13], [14], применения более эффективных теплоизоляционных материалов и изделий [15], [16], повышения нормативных требований по тепловой защите зданий [17], [18], улучшения теплоизоляционных характеристик ограждающих конструкций [19], в том числе светопрозрачных [20], [21], развитие систем холодоснабжения и кондиционирования воздуха, применение материалов с фазовым переходом в составе светопрозрачных фасадов [23]-[24] создались благоприятные условия для строительства зданий с более высоким коэффициентом остекленности фасадов. Сопротивление теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций стало сопоставимым по теплоизоляционным свойствам с однородным фрагментом каменной кладки наружных стен исторических зданий [22].

Это позволило массово возводить здания с коэффициентом остекленности фасадов 0.8 и более. Первые такие объекты в мире стали появляться в странах Западной Европы, Северной Америки, Юго-Восточной Азии, Аравийского полуострова. Постепенно высотные здания стали возводиться и в крупных мегаполисах России: Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, других [25]-[28]. Наиболее известными из них являются: Башня в составе МФК «Лахта Центр» (Санкт-Петербург), Башни «Восток» и «Запад» в составе МФК «Федерация» (Москва), Южная и Северная Башни в составе МФК «Око» (Москва), Башня «Меркурий» в составе МФК «Меркурий Сити» (Москва), Башня «Евразия» (Москва), Башни «Москва» и «Санкт-Петербург» в составе комплекса «Город Столиц» (Москва), Башня «С» в составе комплекса зданий «Башня на Набережной» (Москва), комплекс «Imperia Tower» (Москва), Башня «Исеть» в составе будущего делового центра «Екатеринбург-Сити» (г. Екатеринбург), Башни А и Б в составе МФК «Миракс Плаза» (Москва), небоскреб «Высоцкий» (г. Екатеринбург), Башня «Лидер» (Санкт-Петербург) и многие другие.

Светопрозрачные фасады широко применяются в архитектуре, особенно в офисных зданиях [29]-[31]. Однако применение стеклянных фасадов без учета оценки теплового режима на начальном этапе проектирования может способствовать снижению энергоэффективности зданий и увеличению потребления энергии [32]-[34]. Учет оценки теплового комфорта на начальном этапе проектирования непременно важен для улучшения эксплуатационных характеристик зданий [35]-[37].

Авторы [38] разработали и верифицировали новый метод оценки теплового режима зданий в реальных условиях эксплуатации. Были измерены параметры теплопередачи и проанализирован механизм процессов теплопередачи в фасадных системах зданий. Однако точная тепловая оценка в реальных условиях эксплуатации является сложной задачей.



В работе [39] предлагается новая методика определения удельного теплового коэффициента для адаптивных светопрозрачных фасадов в условиях мягкого климата.

Адаптивные светопрозрачные фасады представляют собой современные высокотехнологичные ограждающие конструкции здания, способные адаптироваться к изменяющимся внешним условиям, таким как солнечное излучение, температура внешнего воздуха, ветер и т.д., для обеспечения нормированных параметров внутреннего климата, повышения теплотехнических характеристик и достижения максимальной энергоэффективности здания. Такие фасады могут включать в себя различные современные технологии и системы управления, например:

- автоматические жалюзи или шторы, которые регулируются в зависимости от интенсивности солнечного света;
- сенсорные системы, которые реагируют на изменения температуры и освещенности, регулируя пропускание света;
- использование «умного стекла», которое в зависимости от условий может менять свою прозрачность.

Адаптивные светопрозрачные фасады способствуют сохранению тепла зимой и предотвращению его избытка летом, что снижает потребность в искусственном отоплении, кондиционировании и освещении, и как результат, ведет к экономии энергии.

В предлагаемой методологии значения сопротивления теплопередачи и коэффициента увеличения солнечного тепла являются неизвестными и определяются с помощью эвристической процедуры, основанной на эксперименте и симуляции, которая берет данные, полученные в ходе эксперимента, как отправную точку. Предложенная авторами методика позволяет быстро получить эмпирическую оценку тепловых параметров фасадов, а именно сопротивления теплопередачи и коэффициента увеличения солнечного тепла, что позволяет оценить энергетическую эффективность фасада и их вклад в энергетический баланс зданий. Данный эвристический подход полезен для воспроизведения экспериментальных результатов в условиях мягкого климата и предлагается для оценки тепловых и энергетических характеристик светопрозрачных адаптивных фасадов.

В статье [40] исследуются различные подходы к оценке тепловых характеристик вентилируемых фотоэлектрических фасадов.

В исследовании [41] разработана карта солнечной апертуры для регионов с жарким и влажным климатом, которая учитывает потребление энергии, качество внутренней среды и солнечную апертуру фасада. Предлагаемую карту рекомендуется применять к офисным зданиям, расположенным в аналогичных географических точках, особенно в зоне жаркого и влажного климата. Прилагаемый метод оценки тепловых характеристик фасада может быть адаптирован и применен к другим регионам с использованием местных погодных данных, а также стандартов в области энергопотребления. Таким образом, карта солнечной апертуры фасада может быть составлена и для других регионов. Карта позволяет получить оптимальные схемы адаптивных фасадных систем, учитывая влияние различных конструктивных параметров на энергопотребление и тепловой комфорт с помощью визуализированной информации. Предлагаемые результаты способствуют повышению энергосбережения и теплового комфорта за счет более совершенных стратегий проектирования остекленных фасадов.

Авторами [42] разработана физико–математическая модель для моделирования процессов тепломассопереноса и оценки теплового режима здания, проведено численное моделирование для различных климатических условий (Венеция, Хельсинки и Абу-Даби) для оценки эффективности и достоверности предлагаемого решения.

Тепловой режим высотных зданий со светопрозрачными фасадами изучен недостаточно полно. Общепринятая методика теплотехнического расчета ограждающих конструкций подобных зданий отсутствует.

Целью исследования является разработка методики расчета и оценки теплового режима высотного здания со светопрозрачным модульным остеклением в холодный период года.

В качестве примера подобного здания может служить здание Башни многофункционального комплекса «Лахта Центр» высотой 462 м, расположенного в г. Санкт-Петербург, в зоне холодного климата Dfb - холодный континентальный, в соответствии с международной классификацией климата Кеппена. Данный метод расчета может быть адаптирован для любых климатических условий и зданий со светопрозрачными фасадными системами.



Объектом исследования являются высотные здания с модульным остеклением. Предметом исследования является тепловой режим высотных зданий со светопрозрачным модульным остеклением.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- 1) составить уравнение теплового баланса для отапливаемого высотного здания,
- 2) вывести формулу для расчета текущей температуры внутреннего воздуха в отапливаемом здании в зависимости от наружных климатических условий (температуры наружного воздуха), теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций, расчетной мощности системы отопления и теплоаккумулирующей способности его внутренних ограждений. Модель должна учитывать не только собственную мощность системы отопления, но также бытовые и солнечные тепlopоступления.

В исследовании [43] проанализирован режим эксплуатации Башни при аварийном отключении системы отопления в здании, т.е. при полном прекращении подачи теплоты в здании. В рамках настоящей работы исследован проектный режим работы системы отопления.

2 Materials and Methods

Для реализации обозначенной выше цели исследования составлено уравнение теплового баланса отапливаемого здания. Принято, что за время $d\tau$ в систему отопления здания поступает количество теплоты $Q_0 \cdot d\tau$. Поступающая из системы отопления тепловая энергия расходуется на нагрев на dt градусов внутренних ограждающих конструкций, элементов интерьера, мебели, инженерного оборудования и компенсацию тепlopотерь через наружные ограждающие конструкции.

В этом случае баланс тепловой энергии в отапливаемом здании можно представить в виде следующего уравнения:

$$c \cdot \rho_{BH} \cdot \delta_{BH} \cdot S_{BH} \cdot dt = [Q_0 - k_{НОК} \cdot S_{НОК} \cdot (t_B - t_H)] \cdot d\tau, \quad (1)$$

где левая часть уравнения (1) представляет собой количество тепловой энергии расходуемой на нагрев на dt градусов внутренних ограждающих конструкций, элементов интерьера, мебели, инженерного оборудования, правая часть – разницу между количеством поступающей за время $d\tau$ от системы отопления тепловой энергии и тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции.

В уравнении (1) приняты следующие обозначения:

c – это теплоемкость материала внутренних массивных ограждений и колонн, кДж/(кг·К);

ρ_{BH} – это плотность материала наиболее массивных внутренних конструкций здания; кг/м³;

δ_{BH} – это толщина внутренних железобетонных конструкций здания, м;

S_{BH} – это площадь поверхности внутренних железобетонных конструкций здания, м²;

dt – это изменение температуры внутренних ограждающих конструкций зданий за счет поступления тепловой энергии при включении системы отопления, °С;

Q_0 – это мощность системы отопления при текущей температуре наружного воздуха, МВт;

$k_{НОК}$ – это коэффициент теплопередачи наружных ограждающих конструкций, Вт/(м²·К);

$S_{НОК}$ – это площадь поверхности наружных ограждающих конструкций здания, м²;

t_B – это температура внутреннего воздуха, °С;

t_H – это температура наружного воздуха, °С.

Уравнение (1) можно преобразовать к виду:

$$\frac{c \cdot \rho_{BH} \cdot \delta_{BH} \cdot S_{BH}}{k_{НОК} \cdot S_{НОК}} \cdot dt = \left[\frac{Q_0}{k_{НОК} \cdot S_{НОК}} - (t_B - t_H) \right] \cdot d\tau. \quad (2)$$



Введем следующее обозначение:

$$\beta = \frac{c \cdot \rho_{BH} \cdot \delta_{BH} \cdot S_{BH}}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}} \quad (3)$$

Параметр β имеет размерность времени и характеризует теплоаккумулирующие свойства конкретного здания. Коэффициент тепловой аккумуляции здания β имеет размерность времени и показывает временной интервал, в течение которого начальная разность температур, установившаяся в здании перед аварийным отключением системы отопления, уменьшится в 2.72 раза. Высотные здания, как правило, имеют внутренне железобетонное ядро, в котором располагаются лифтовые шахты и инженерные коммуникации. Примером такого объекта является здание Башни в составе многофункционального комплекса «Лахта центр» [43].

Тогда выражение (2) можно привести к виду:

$$\left[t_B - t_H - \frac{Q_o}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}} \right] = - \frac{d\tau}{\beta}. \quad (4)$$

Продифференцировав уравнение (4), получено выражение:

$$\ln \left[t_B - t_H - \frac{Q_o}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}} \right] \Big|_{t_B^0}^{t_B^\tau} = - \frac{\tau}{\beta} \Big|_0^\tau. \quad (5)$$

В формуле (5) приняты следующие дополнительные обозначения:

t_B^0 – это температура внутреннего воздуха, установившаяся в здании перед аварийным отключением системы отопления;

t_B^τ – это температура внутреннего воздуха в момент времени τ .

Тогда при $Q_o \neq 0$ в общем виде получено решение вида:

$$\frac{t_B^\tau - t_H - \frac{Q_o}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}}}{t_B^0 - t_H - \frac{Q_o}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}}} = \exp \left[- \frac{\tau}{\beta} \right]. \quad (6)$$

3 Results and Discussion

Температуры воздуха внутри здания в общем случае зависит от времени суток, а также теплоступлений от солнечной радиации и бытовых внутренних теплоступлений.

В работе [43] представлено уравнение для расчета температуры внутреннего воздуха без учета количества теплоты от системы отопления объекта теплоступления, а также без учета бытовых и солнечных теплоступлений.

В модели [43] не учтены внутренние (люди, оборудование) и внешние (солнечная радиация) источники теплоступлений, которые будут оказывать замедляющее действие на процесс остывания помещений.

По результатам настоящего исследований выведена формула для расчета температуры внутреннего воздуха в здании:

$$t_B^\tau = t_H + \frac{Q_o}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}} + \left(t_B^0 - t_H - \frac{Q_o}{k_{HOK} \cdot S_{HOK}} \right) \cdot \exp \left[- \frac{\tau}{\beta} \right]. \quad (7)$$



В отличие от модели, представленной в работе [43], полученное уравнение учитывает подачу теплоты от системы отопления объекта теплоснабжения. При этом в значение Q_o могут быть добавлены бытовые и солнечные теплоснабжения.

Наличие массивного железобетонного ядра высотного здания позволяет реализовать на рассматриваемом объекте прерывистый режим регулирования мощности системы отопления (т.н. пропусками) путем периодического отключения/включения подачи теплоносителя в систему.

В случае прекращения подачи теплоносителя, например, при аварийном отключении системы отопления, т. е. при $Q_o = 0$, уравнение (7) примет вид:

$$t_B^\tau = t_H + (t_B^0 - t_H) \cdot \exp\left[-\frac{\tau}{\beta}\right], \quad (8)$$

что полностью совпадает с результатами, полученными в исследовании [43].

При полном или частичном сокращении подачи тепла в начальный период времени температура внутреннего воздуха в помещении начинает резко понижаться, достигая уровня осредненной температуры внутренних поверхностей. После чего температура воздуха и массивных внутренних ограждений начинает понижаться практически синхронно (с незначительным запаздыванием).

4 Conclusions

Следуя мировым тенденциям в архитектуре по всему миру стало появляться все больше высотных зданий со светопрозрачным остеклением фасадов. Однако тепловой режим подобных зданий изучен недостаточно полно.

По результатам проведенного исследования:

- 1) разработана методика расчета и оценки теплового режима высотного здания со светопрозрачным модульным остеклением,
- 2) приведено уравнение теплового баланса высотного здания со светопрозрачным модульным остеклением.
- 3) На основании полученного уравнения выведена формула расчета текущей температуры внутреннего воздуха в отапливаемом здании в зависимости от наружных климатических условий (температуры наружного воздуха), теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций, расчетной мощности системы отопления и теплоаккумулирующей способности его внутренних ограждений.

Полученная модель позволяет оценить тепловой режим высотных зданий со светопрозрачными фасадными системами и учесть не только собственную мощность системы отопления, но также бытовые и солнечные теплоснабжения.

Разработанная методика и уравнение теплового баланса могут быть применены в практических задачах в нескольких направлениях:

- Дизайн и проектирование зданий: Архитекторы и инженеры могут использовать методику и уравнение для оценки и оптимизации энергоэффективности и теплового комфорта зданий на этапе проектирования. Это поможет предотвратить излишнее потребление энергии и улучшить комфортность внутренней среды.
- Аудит энергоэффективности: Специалисты по энергетике могут использовать методику и уравнение для аудита энергоэффективности существующих зданий и для выработки рекомендаций по их модернизации.
- Разработка новых технологий и продуктов: Производители строительных материалов и оборудования могут использовать методику и уравнение для исследования и разработки новых технологий и продуктов, например, умных стеклопакетов или солнечного остекления.
- Оценка влияния климатических изменений: Ученые и исследователи могут применять методику и уравнение для оценки влияния климатических изменений на энергоэффективность и тепловой комфорт зданий.



Таким образом, разработанная методика и уравнение теплового баланса могут стать ценным инструментом для специалистов с целью повышения энергетической эффективности и теплового комфорта зданий.

5 Fundings

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-03-2022-010 от 14 января 2022 и № 075--01568-23-04 от 28 марта 2023 (Дополнительные соглашения № 075-03-2022-010/10 от 09 ноября 2022 и 075-03-2023-004/4 от 22 мая 2023), FSEG-2022-0010.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2022-010 dated 14 January 2022 and No. 075--01568-23-04 dated 28 March 2023 (Additional agreement 075-03-2022-010/10 dated 09 November 2022, Additional agreement 075-03-2023-004/4 dated 22 May 2023), FSEG-2022-0010.

References

1. Palladio A. Four books about architecture. AST, 2021. 384 p. <https://www.moscowbooks.ru/book/1078871/>
2. Potkina I. V. (2015) Arhitektor i zakazchik: k istorii stroitel'stva zdaniya "kompanii Zinger" v Peterburge. *Istoricheskij zhurnal: nauchnye issledovaniya*. **1**, 88-98. <https://doi.org/10.7256/2222-1972.2015.1.15619>
3. Zolotareva M.V. (2015) Principy prostranstvennogo razvitiya vysotnogo zonirovaniya centra Sankt-Peterburga. *Zhishchnoe stroitel'stvo*, **11**, 27-31. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25032002>
4. Araújo, G.R., Teixeira, H., Gomes, M.G. and Rodrigues, A.M. (2023) Multi-Objective Optimization of Thermochromic Glazing Properties to Enhance Building Energy Performance. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, **249**, 446–456. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.043>.
5. Gorshkov A.S., Livchak V.I. (2015) Istoriya, evolyuciya i razvitie normativnyh trebovanij k ograzhdayushchim konstrukciyam. *Construction of Unique Buildings and Structures*, No **3(30)**, 7-37. <https://doi.org/10.18720/CUBS.30.1>
6. Liu, M., Wittchen, K.B., Heiselberg, P.K. and Winther, F.V. (2014) Development and Sensitivity Study of a Simplified and Dynamic Method for Double Glazing Façade and Verified by a Full-Scale Façade Element. *Energy and Buildings*, Elsevier, **68**, 432–443. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.03.056>.
7. Hien, W.N., Liping, W., Chandra, A.N., Pandey, A.R. and Xiaolin, W. (2005) Effects of Double Glazed Façade on Energy Consumption, Thermal Comfort and Condensation for a Typical Office Building in Singapore. *Energy and Buildings*, **37**, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.004>.
8. Flores Larsen, S., Rengifo, L. and Filippin, C. (2015) Double Skin Glazed Façades in Sunny Mediterranean Climates. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **102**, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.019>.
9. Colombo, E., Zwahlen, M., Frey, M. and Loux, J. (2017) Design of a Glazed Double-Façade by Means of Coupled CFD and Building Performance Simulation. *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, **122**, 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.337>.
10. Liu, C., Zhang, G., Arıcı, M., Bian, J. and Li, D. (2019) Thermal Performance of Non-Ventilated Multilayer Glazing Façades Filled with Phase Change Material. *Solar Energy*, Pergamon, **177**, 464–470. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.11.044>.
11. Inan, T., Başaran, T. and Ezan, M.A. (2016) Experimental and Numerical Investigation of Natural Convection in a Double Skin Façade. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier Ltd, **106**, 1225–1235. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.124>.
12. Khalvati, F. and Omidvar, A. (2019) Summer Study on Thermal Performance of an Exhausting Airflow Window in Evaporatively-Cooled Buildings. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier Ltd, **153**, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.135>.



13. Aver'yanov V.K., Gorshkov A.S., Vasil'ev G.P. (2018) Povyshenie effektivnosti centralizovannogo teplosnabzheniya sushchestvuyushchego zhilogo fonda. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, **6 (71)**, 99-111. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-6-99-111>
14. Aver'yanov V. K., Yuferev YU. V., Melezhik A. A., Gorshkov A. S. (2018) Teplosnabzhenie gorodov v kontekste razvitiya aktivnykh potrebitel'nykh intellektual'nykh energeticheskikh sistem. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*, **1**, 78-87. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-1-78-87>
15. Vatin N.I., Velichkin V.Z., Gorshkov A.S., Pestryakov I.I., Peshkov A.A., Nemova D.V., Kiski S.S. (2013) Album of technical solutions for the application of heat insulating products from polyurethane foam trademark "spu-insulation" in the construction of residential, public and industrial building. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **3 (8)**, 1-264. <https://doi.org/10.18720/CUBS.8.8>
16. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Dacyuk T.A., Bezrukov A.YU., Nemova D.V., Kakula P., Viitanen A. (2014) Album of technical solutions for the application of polyurethane foam thermal insulation products in construction of residential, public and industrial buildings // *Construction of Unique Buildings and Structures*. **5 (20)**, 71-441. <https://doi.org/10.18720/CUBS.20.7>
17. Gorshkov A.S., Sokolov N.A. (2013) Inconsistency in Russian and international standards in the determination of the design values of thermal conductivity of building materials and products. *Magazine of Civil Engineering*. **7 (42)**. 7-14. <https://doi.org/10.5862/MCE.42.2>
18. Vatin N.I., Nemova D.V., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. (2012) Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building. *Magazine of Civil Engineering*. **8 (34)**. 4-14. <https://doi.org/10.5862/MCE.34.1>
19. Gorshkov A.S. (2010) The energy efficiency in the field of construction: questions of norms and standards and solutions for the reduction of energy consumption at buildings. *Magazine of Civil Engineering*. **1 (11)**. 9-13. <https://doi.org/10.18720/MCE.11.2>
20. Spiridonov A.V., Shubin I.L. (2014) Development of translucent structures in Russia. *Light & Engineering*. **22 (3)**. 78-85. https://www.researchgate.net/publication/295569865_Development_of_translucent_structures_in_Russia
21. Spiridonov A.V., Shubin I.L., Osipov V.I. (2014) Development of fenestration in Russia: status and prospects. *Glass and Ceramics*. **70 (9-10)**. 374-379. <https://doi.org/10.1007/s10717-014-9583-4>
22. Gorshkov, A.S., Kabanov, M.S. and Yuferev, Y. V. (2021) Analysis of Thermal Loads and Specific Consumption of Thermal Energy in Apartment Buildings. *Thermal Engineering*, Pleiades journals, **68**, 654–661. <https://doi.org/10.1134/S0040601521050050/METRICS>.
23. Li, D., Ma, T., Liu, C., Zheng, Y., Wang, Z. and Liu, X. (2016) Thermal Performance of a PCM-Filled Double Glazing Unit with Different Optical Properties of Phase Change Material. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **119**, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.036>.
24. Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F. and Castelain, C. (2023) Phase Change Materials (PCMs) in Buildings. *Multifunctional Phase Change Materials: Fundamentals, Properties and Applications*, Elsevier, 507–567. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85719-2.00003-1>.
25. Duraković, B., Halilović, M. and Ali, H.M. (2023) Phase Change Materials Applications in Buildings. *Phase Change Materials for Heat Transfer*, Elsevier, 225–248. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91905-0.00005-8>.
26. Varlamov, N. V., Gorshkov, A.S., Yuferev, Y. V., Lezer, A.Y., Zhirnov, A.E. and Parashchenko, N.A. (2023) The Heat-Storage Capacity of the Lakhta Center Multifunctional Complex Tower Building. *Thermal Engineering*, Pleiades Publishing, **70**, 32–40. <https://doi.org/10.1134/S0040601523010081/METRICS>.
27. Dubinskij S.I. (2008) CHislennoe modelirovanie vetrovykh vozdeystvij na kompleks "Federaciya" "Moskva-siti". *Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nykh konstrukcij* **4(2)**, 58-59. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14932316>
28. Avdonina, L., Alekhin, V. and Galiev, D. (2018) Innovative Solutions Implemented in Design of Iset Tower. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **451**, 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012049>.
29. Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z. and Baharum, M.R. (2015) A Review on Natural Ventilation Applications through Building Façade Components and Ventilation Openings in Tropical Climates. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **101**, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>.

Gorshkov, R.; Nemova, D.; Andreeva, D.; Cherkashin, A.

Thermal balance of the high-rise building with translucent modular glazing

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10905. doi: 10.4123/CUBS.109.5



30. Pourshab, N., Tehrani, M.D., Toghraie, D. and Rostami, S. (2020) Application of Double Glazed Façades with Horizontal and Vertical Louvers to Increase Natural Air Flow in Office Buildings. *Energy*, Elsevier Ltd, **200**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117486>.
31. Saleem, A.A., Bady, M., Ookawara, S. and Abdel-Rahman, A.K. (2016) Achieving Standard Natural Ventilation Rate of Dwellings in a Hot-Arid Climate Using Solar Chimney. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **133**, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.001>.
32. Pomponi, F., Piroozfar, P.A.E., Southall, R., Ashton, P. and Farr, E.R.P. (2016) Energy Performance of Double-Skin Façades in Temperate Climates: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **54**, 1525–1536. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.075>.
33. Marques da Silva, F., Gomes, M.G. and Rodrigues, A.M. (2015) Measuring and Estimating Airflow in Naturally Ventilated Double Skin Facades. *Building and Environment*, Elsevier Ltd, **87**, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.005>.
34. de Gracia, A., Navarro, L., Castell, A. and Cabeza, L.F. (2015) Energy Performance of a Ventilated Double Skin Facade with PCM under Different Climates. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **91**, 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.011>.
35. Cao, X., Dai, X. and Liu, J. (2016) Building Energy-Consumption Status Worldwide and the State-of-the-Art Technologies for Zero-Energy Buildings during the Past Decade. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **128**, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.
36. Bitaab, M., Hosseini Abardeh, R. and Movahhed, S. (2020) Experimental and Numerical Study of Energy Loss through Double-Glazed Windows. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **56**, 727–747. <https://doi.org/10.1007/S00231-019-02729-4>.
37. Krstić-Furundžić, A., Vujošević, M. and Petrovski, A. (2019) Energy and Environmental Performance of the Office Building Facade Scenarios. *Energy*, Elsevier Ltd, **183**, 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.231>.
38. Fu, Y., Xu, W., Wang, Z., Zhang, S., Chen, X. and Chu, J. (2023) Experimental Investigation on Thermal Characteristics and Novel Thermal Estimation Method of BIPV Façade Air Channel under Actual Operation. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **72**, 106489. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106489>.
39. Claros-Marfil, L.J., Zetola, V., Padial, J.F. and Lauret, B. (2022) Experimental-Simulation Methodology for Estimation of Thermal Parameters of Adaptive Facades in Mild Climate Conditions: A Water-Flow Glazing Case Study. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **45**, 103384. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103384>.
40. Infield, D., Mei, L. and Eicker, U. (2004) Thermal Performance Estimation for Ventilated PV Facades. *Solar Energy*, Pergamon, **76**, 93–98. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2003.08.010>.
41. Hwang, R.L. and Chen, W.A. (2022) Creating Glazed Facades Performance Map Based on Energy and Thermal Comfort Perspective for Office Building Design Strategies in Asian Hot-Humid Climate Zone. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, **311**. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.118689>.
42. Elarga, H., Goia, F., Zarrella, A., Dal Monte, A. and Benini, E. (2016) Thermal and Electrical Performance of an Integrated PV-PCM System in Double Skin Façades: A Numerical Study. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, **136**, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.074>.
43. Varlamov N.V., Gorshkov A.S., Yuferev YU.A., Lezer A.YU., ZHirnov A.E., Parashchenko N.A. (2023) Teploakkumuliruyushchaya sposobnost' zdaniya bashni mnogofunkcional'nogo kompleksa «Lahta centr». *Teploenergetika*. **1**. 40-49. <https://doi.org/10.56304/S0040363623010083>.