This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Review Article
Received: July 13, 2026 *Accepted: August 17, 2026* *Published: September 20, 2026*
ISSN 2658-5553

Temperature of the inner surface of translucent structures. 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:

Translucent structures; Translucent facades; Windows; Energy saving; Internal surface temperature; Heat transfer; Heat transfer coefficient; Multiphysics modeling; Thermal bridges; Infiltration

Abstract

This review article provides a critical analysis of methods for assessing the temperature regime of the interior surfaces of translucent structures and substantiates the need to move from standardized methods to multiphysics modeling. The focus is on identifying factors influencing the formation of local temperature fields in translucent structures and analyzing inconsistencies in regulatory documents that affect the accuracy of condensation risk prediction. **Methodology.** A systematic analysis was conducted of scientific literature (publications from 2020 onwards, sourced from the Scopus database) and regulatory documents governing the thermal protection of building envelope components. Analysis of the methodology for calculating the internal surface temperature using regulatory formulas was provided, along with comparative engineering calculations for central and edge glazing zones with varying equivalent thermal resistance and heat-transfer coefficients. **Results and Discussion.** It has been shown that the temperature of the interior surfaces of translucent structures is influenced by a combination of factors, including localized "thermal bridges," drafts, the geometry of structural junctions, and heating and ventilation regimes. Regulatory simplifications (average reduced resistance, fixed heat transfer coefficient of 8 W/(m^2 °C), use of "serviced zone" parameters) lead to significant discrepancies between calculated and actual conditions. Analytical calculations revealed significant temperature heterogeneity across the glazing area: edge and node zones (hinges, window sill abutments, bay window corners) regularly have lower temperatures than central sections. It was found that the total heat transfer coefficient on many internal surfaces often lies in the range of 3–5 W/(m^2 °C), rather than 8 W/(m^2 °C), which significantly impacts surface temperature predictions and the risk of condensation. It is noted that laboratory-determined values of reduced heat transfer resistance do not take into account the influence of pressure differences and wind loads that increase blowing in nature. **Conclusion.** To improve the accuracy of temperature field forecasts and reduce the risk of condensation, it is necessary to revise regulatory methodologies: consider the local distribution of heat transfer resistance and local heat exchange coefficients, incorporate the effects of infiltration and pressure drops, and determine microclimatic parameters near enclosing surfaces. A transition to multidimensional multiphysics modeling combined with full-scale testing and the development of practice-oriented calculation algorithms that take into account the design features of components and interactions with heating devices and shading devices is recommended. These measures will improve the reliability of energy assessments of translucent structures.

Ulanov, A.; Okulov, A.; Kotliarskaia, I.; Vatin, N.
Temperature of the inner surface of translucent structures. A Review;
2026; AlfaBuild; **38** Article No 3814. doi: 10.57728/ALF.38.14

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

1 Introduction

Архитектурная выразительность проектируемых объектов все чаще достигается посредством активного внедрения светопрозрачных конструкций (СПК) [1]. СПК состоят из несущего каркаса (алюминиевый, стальной, деревянный, ПВХ-профиль, а также различные сочетания такие как дерево-алюминиевые, ПВХ-алюминиевые и др.), светопрозрачного заполнения (стеклопакеты, стекло), уплотнителей притворов, элементов и узлов крепления, а также и других составляющих, как правило, относимых к понятию узлов примыканий [2]. СПК устанавливаются на отдельных участках зданий или по всей поверхности. СПК обеспечивают естественное освещение, естественную вентиляцию, визуальную связь с окружающей средой, звукоизоляцию, теплозащиту, а также защиту от атмосферных явлений [3], [4].

Теплотехнические характеристики СПК напрямую влияют на обеспечение комфортного микроклимата в помещениях жилых и общественных зданий. Статья [5] сообщает, что СПК характеризуются высокой геометрической и физической неоднородностью, что значительно усложняет проведение теплотехнических расчетов. Статья [6] относит СПК к наиболее слабым элементам теплозащитной оболочки. В многочисленных исследованиях представлены разные оценки теплопотерь через СПК. Статья [7] анализирует данные предшествующих публикаций по теплопотерям через СПК и отмечает, что значения теплопотерь через СПК варьируются от 20% до 60%. Существенные потери тепловой энергии через СПК, как правило, связаны с [8]:

1. высокими значениями коэффициента теплопередачи U (обратная величина сопротивления теплопередаче R), приводящими к увеличению затрат на отопление;
2. значительными величинами общего коэффициента пропускания солнечной энергии g, вызывающими перегрев помещений и рост энергопотребления на охлаждение;
3. совокупным воздействием данных факторов.

Конструктивно остекление занимает наибольшую площадь СПК. С целью совершенствования теплотехнических и оптических показателей СПК исследователи разработали широкий спектр инженерно-технических решений. Исследование [9] посвящено теплопередаче в окнах с двойным, тройным и четверным остеклением. Применение трех- и четырехслойного остекления взамен двухслойного позволяет сократить энергопотребление на 50% и 67% соответственно. Научная группа рассматривает [10, 11] пассивную технологию по использованию солнечной энергии, заключающуюся в использовании двух стеклянных панелей с воздушной полостью с внутренней вентиляцией или без нее. Исследование [12] рассматривает влияние вентиляционных отверстий и глубины воздушного зазора на теплотехническое состояние двойных фасадов. Работа [13] посвящена изучению влияния угла наклона жалюзи на эффективность естественной вентиляции в двойном фасаде. Статья [14] исследует теплотехническую эффективность адаптивных двойных фасадов. Авторы статьи [15] рассчитали скорость ветра, при которой обеспечивается естественная вентиляция при различных солнечных условиях.

Статья [16] исследовала влияние линейных соединений и точечных креплений на теплотехнические характеристики светопрозрачных фасадов, подтверждая необходимость учета точечных тепловых мостиков при энергетических расчетах. Статья [17] рассматривала наклонные стеклянные фасады с применением имитационного моделирования различных углов наклона и ориентации конструкций. Результаты показали, что использование наклона 75° обеспечивает наиболее стабильные показатели тепловой защиты. Научной группой [18] изучалось влияние таких параметров, как площадь остекленной поверхности, форма остекления, ориентация здания по сторонам света и т. д. на энергопотребление.

Исследователи активно разрабатывают низкоэмиссионные покрытия и пленки на основе серебра [19], меди [20], титана [21] и т.д., отражающие тепловое излучение. Низкоэмиссионные стекла постоянно отражают инфракрасное излучение, сохраняя тепло зимой и не допуская солнечного перегрева помещений летом, работают автоматически без дополнительных стимулов [22], [23].

Хромогенные материалы, наоборот, требуют активации функционала посредством приложения внешнего стимула [24]. Например, термохромные стекла меняют степень затемнения в зависимости от температуры на улице [25]. В качестве основных материалов для термохромных окон являются диоксид ванадия (VO_2) [26], термохромные гидрогели [27] и жидкие кристаллы [28]. Фотохромные материалы автоматически изменяют уровень прозрачности и степень затемнения

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

в зависимости от интенсивности солнечного света и ультрафиолетового излучения [29]. Фотохромные материалы для стекол классифицируются на органические и неорганические. Органические материалы (азобензолы [30], спиропираны [31], диарилвинилы [32]) обладают богатой окраской, но имеют недостатки, такие как высокая стоимость и короткая продолжительность обесцвечивания [33]. Неорганические соединения (оксид вольфрама [34, 35], молибдат аммония [36], оксид цинка [37]) обладают хорошей обратимостью, длительной продолжительностью обесцвечивания и высокой стабильностью, что открывает широкие перспективы применения [29]. С использованием фотохромных материалов изготавливаются фотоэлектрические окна, которые преобразуют солнечный свет в электроэнергию [38, 39]. Статья [40] сравнивала энергетическую эффективность двойного стеклянного фасада с фотоэлектрическими панелями и стеклопакета с фотоэлектрическими панелями. Двойной стеклянный фасад показал более низкое значение коэффициента пропускания солнечной энергии g и более высокое значение коэффициента теплопередачи U, чем стеклопакет с фотоэлектрическими панелями. Электрохромные окна изменяют прозрачность и уровень затемнения под воздействием слабого электрического тока [41]. Электрохромные устройства имеют сэндвич-структуру, состоящую из проводящих электродов, слоя электролита, слоя хранения ионов и электрохромного слоя с переменной отражательной способностью или пропусканием [42].

Помимо интеллектуального хромогенного остекления, для автоматической регулировки тепловых и оптических свойств окон используются солнцезащитные устройства (например, жалюзи [43] или венецианские ламели [44], [45]) и регулируемые динамические навесы. Механизм солнцезащитных устройств работает за счет преобразования прямого солнечного излучения в рассеянный свет и модуляции количества проникающего света [46]. Работа [47] описывает динамические устройства затенения как интеллектуальные системы, автоматически работающие в ответ на наружные или внутренние погодные параметры в целях обеспечения высокого уровня комфорта и энергосбережения.

Для корректирования теплотехнических характеристик остекления исследователи разработали вакуумное остекление [48]. Как правило, вакуумное остекление применяется совместно с фотохромными технологиями для достижения сбалансированных тепловых, свето- и электрических характеристик. Работа [49] предлагает модель, прогнозирующую тепловыделение, потребление электроэнергии и естественное освещение фотоэлектрических панелей с вакуумным остеклением. Работа [49] показала, что фотоэлектрическое вакуумное остекление позволяет снизить потребность в охлаждении офисных зданий до 45%. Исследователи [50] рассмотрели вакуумно-электрохромное окно в реальном масштабе. Экспериментальные результаты показали, что окно снижает температуру воздуха в помещении на 3.05 °C в пиковый период и температуру внутренней поверхности на 13.6 °C в пиковый период летом.

Аэрогелевые светопрозрачные конструкции подтвердили свою применимость для наружного ограждения [51]. Научная группа [52] установила, что использование стеклопакета, заполненного аэрогелем, на северном фасаде улучшает как визуальный, так и тепловой комфорт, снижает потребность в отоплении без значительного увеличения потребности в охлаждении. Эксперимент [53] показал, что оптические и тепловые свойства аэрогелевого стеклопакета существенно зависят от размера частиц используемых гранул аэрогеля. Стеклопакеты с более крупными гранулами аэрогеля (размер частиц 3–5 мм) обеспечивают снижение теплопотерь на 58% и снижение светопропускания на 38% по сравнению с обычными стеклопакетами. Стеклопакеты с мелкими гранулами аэрогеля (размер частиц <0.5 мм) снижают теплопотери на 63%, а светопропускание на 81%. Исследования [54], [55] рассматривали интеграцию аэрогелевого остекления и фотоэлектрических элементов совместно в ограждающей конструкции.

Применение фазоизменяющихся материалов для хранения солнечной энергии активно обсуждается в научной литературе как средство обеспечения стабильности теплового режима помещений [56, 57]. Фазоизменяющиеся материалы способны поглощать или выделять большое количество скрытой теплоты посредством процесса фазового перехода, показывая высокую емкость хранения энергии и способность к терморегулированию [58]. Экспериментальные результаты [59] показали, что интеграция материалов с фазовым переходом в стеклянные ограждающие конструкции снижает пиковые энергетические нагрузки на 20%. Исследование [60] пришло к выводу, что потребность в тепловой энергии снижается на 10 % и 14 % за счет

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

применения фазоизменяющихся материалов и фазоизменяющихся материалов в сочетании с кремнеземным аэрогелем. Статья [58] рассмотрела интегрированную светопропускающую и энергоаккумулирующую пленку для прозрачных ограждающих конструкций зданий на основе фазоизменяющегося полиэтиленгликоля. Исследование [61] описывает интеграциию фазоизменяющего материала в солнцезащитные устройства, размещенные внутри фасадов с двойным и тройным остеклением, для повышения тепловых характеристик. Статья [62] описывает разработку и тестирование динамического затеняющего устройства с использованием фазоизменяющего материала.

Авторы статьи [63] рассмотрели концепцию и энергетический потенциал биомиметических светопрозрачных фасадов, спроектированных с учетом принципов, позаимствованных у естественных биологических систем. В работе показано, что биомиметический подход к конструированию светопрозрачных ограждающих систем позволяет реализовать адаптивные механизмы управления потоками солнечной радиации, теплообмена и вентиляции, что в сумме повышает энергоэффективность здания. Например, статья [64] предлагает концепцию адаптивной динамической системы затенения, вдохновленной движением цветка гацании, в соответствии с принципами биомиметического проектирования. Публикация [65] приводит анализ 24 примеров биомиметических оболочек.

Статья [66] утверждает, что существующие нормативные значения сопротивления теплопередаче окон не всегда соответствуют актуальным требованиям по энергосбережению. Несмотря на широкий спектр технических и материальных решений, направленных на уменьшение теплопотерь и управляемость солнечным светом в СПК, действующие нормативные методики часто остаются усредненными и не учитывают сложную мультифизическую природу тепловых полей и эксплуатационных факторов.

Проведенный анализ публикаций показывает, что большинство исследований сосредоточено на улучшении теплотехнических и оптических характеристик светопрозрачных конструкций за счет многослойного остекления, низкоэмиссионных покрытий, хромогенных материалов, вакуумного и аэрогелевого остекления, а также фазоизменяющихся материалов. Рассмотренные работы решают задачу снижения коэффициента теплопередачи и управления солнечными теплопритоками, однако температура внутренней поверхности остекления в них рассматривается либо косвенно (через общие показатели энергоэффективности), либо в рамках упрощенных стационарных расчетов по нормативным формулам.

В современной нормативной базе, включая СП 50.13330.2024 "Тепловая защита зданий" [67], предъявляются жесткие требования к температуре внутренней поверхности остекления, однако существующие методики расчета не учитывают комплексное влияние эксплуатационных факторов. Существующие методики не позволяют корректно прогнозировать температурные поля в локальных зонах (петли, примыкания, углы эркеров) и оценивать риск конденсации в реальных эксплуатационных условиях. Отсутствие системного подхода к оценке температурных полей СПК приводит к некорректным оценкам энергоэффективности и ошибочной интерпретации причин возникновения конденсата.

Таким образом, исследовательский разрыв состоит в следующем: отсутствуют работы, в которых бы (а) систематически показано, как локальные конструктивные и эксплуатационные факторы формируют температуру внутренней поверхности СПК; (б) предложена и верифицирована методика, связывающая нормативные требования к температуре поверхности с реальными параметрами микроклимата в оконной нише; (в) оценена погрешность нормативного расчета температуры внутренней поверхности вследствие принятых упрощений.

Объектом исследования являются СПК, эксплуатируемые в условиях переменных климатических воздействий и различных режимов отопления и вентиляции. Предметом исследования является определение внутренней температуры СПК.

Целью исследования является критический анализ действующей нормативной методики оценки температурного режима СПК и обоснование необходимости перехода к мультифизическому моделированию. Под мультифизическим моделированием в контексте работы понимается совместное решение задач теплопроводности, конвективного и лучевого теплообмена, а также аэродинамики воздухопроницаемых зон ограждающей конструкции.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Идентифицировать основные факторы, влияющие на формирование температуры внутренних поверхностей СПК.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

2. Выявить противоречия в действующих нормативных документах, касающиеся учета влажностного режима и нормирования температуры поверхностей.

3. Оценить влияние допущений в расчетах коэффициентов теплообмена на достоверность прогнозирования температурных полей.

2 Literature Search Methods

Для обзорной части статьи использовался общенаучный метод анализа и синтеза научной информации. Были отобраны научные публикации, посвященные инженерно-техническим разработкам СПК для усовершенствования теплотехнического состояния конструкций. Основным инструментом для поиска научной литературы стала международная база данных Scopus. Междисциплинарная база данных цитирования рецензируемой литературы Scopus обладает инструментами для отслеживания, анализа и визуализации исследований по заданной теме [68], [69]. Поисковый запрос был сформирован с использованием ключевых слов и фраз, наиболее релевантных теме исследования: "Translucent structures" (Светопрозрачные конструкции), "Window" (Окно), "Translucent facades" (Светопрозрачные фасады) и "Energy-efficient windows" (Энергоэффективные окна). Рассматривались публикации, изданные не ранее, чем в 2020-м году. Была выбрана область исследования "Engineering" (Техника). Итоговый расширенный запрос выглядел следующим образом:

TITLE-ABS-KEY ("Translucent structures" OR Window OR "Translucent facades" OR "Energy-efficient windows" AND SUBJAREA ("ENGI") AND PUBYEAR > 2019

Таким образом, был выявлен массив актуальных публикаций (122131 шт.). Дата составления запроса: 06.05.2026.

Для повышения прозрачности и воспроизводимости обзора были применены следующие критерии включения и исключения. Включение: (а) публикации на английском языке; (б) рецензируемые статьи, материалы конференций, непосредственно касающиеся теплотехнических, оптических или эксплуатационных характеристик светопрозрачных конструкций; (в) работы, содержащие количественные данные по теплопередаче, температуре поверхностей, воздухопроницаемости или смежным параметрам. Исключение: (а) работы, в которых светопрозрачные конструкции упоминаются лишь эпизодически и не являются объектом исследования; (б) дубликаты и препринты без рецензирования. Релевантность оценивалась по наличию в работе: (а) явной связи с температурным режимом или теплопотерями через СПК; (б) описания конструктивных решений, влияющих на температуру внутренней поверхности; (в) данных, которые могут быть использованы для верификации расчетных методик.

Во второй части статьи были рассмотрены нормативные документы, регламентирующие расчет температуры внутренней поверхности светопрозрачных конструкций, а также методические основы, на которых базируются соответствующие нормативы. Был выполнен инженерный теплотехнический расчет температуры внутренней поверхности светопрозрачных конструкций по нормативной формуле, а также проведено сравнение результатов при варьировании входных данных.

3 Results and Discussion

Температура внутренней поверхности светопрозрачных конструкций $\tau_в$ формируется как результат комплексного влияния совокупности факторов, характерных и для других ограждающих конструкций:

сопротивление теплопередаче СПК в стационарных условиях;

коэффициенты теплоотдачи (теплообмена) на наружной и внутренней поверхностях конструкции;

геометрические особенности конкретного участка конструкции;

интенсивность инфильтрации (продувания) холодного уличного воздуха через конструкцию;

перепад температур по разные стороны конструкции.

Определение температуры $\tau_в$ локальных участков поверхностей СПК, формирующейся в определенных условиях, связано с решением мультифизической задачи, затрагивающей такие разделы строительной физики, как теплофизика, газодинамика (аэродинамика) и механика

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

(сопромат). В части теплофизики, требуется решение задач теплопроводности, конвективного и лучевого теплообмена. В аэродинамическом аспекте требуется моделирование процессов естественной (температурной) и принудительной конвекции. В разделе механики деформируемого твердого тела анализируются изменения физико-механических свойств материалов и деформации конструктивных элементов СПК под воздействием температурных полей и силовых нагрузок.

СП 538.1325800.2024 "Конструкции оконные и балконные. Правила проектирования" [70] распространяется на проектирование оконных и балконных конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения, однако и в данном документе сделаны значительные допущения. Прочие нормативные документы, касающиеся СПК, либо регламентируют требования только к изделиям и комплектующим (оконные блоки, фурнитура, стеклопакеты и т.д.), либо характеризуются недостаточной глубиной проработки. Значительное количество научных статей посвящены анализу СП 50.13330.2024 "Тепловая защита зданий" [71]–[73] и предложению изменений в данном документе. В соответствии с требованиями актуализированного свода правил СП 50.13330.2024 "Тепловая защита зданий" [67] нормируются минимальные допустимые температуры на внутренних поверхностях СПК (п. 5.7). Для вертикальных СПК (с углом наклона 45° и более), кроме конструкций производственных зданий, установлено, что минимальная температура внутренней поверхности остекления $\tau_в$ должна составлять не менее +3°С. Для производственных зданий данный показатель должен быть не ниже 0°С. Установленное требование является обязательным для всей площади остекления, включая зоны сопряжения с непрозрачными элементами конструкции (например, области штапиков). Отдельно регламентируется температура для непрозрачных элементов вертикальных СПК. Внутренняя температура $\tau_в$ в соответствии с требованиями [67] не должна опускаться ниже температуры точки росы t_d (ТТР) внутреннего воздуха помещения [74] при расчетной температуре наружного воздуха, определяемой согласно пояснениям к формуле (5.4) указанного нормативного документа (в данной работе формула (1)). При выполнении данной проверки относительную влажность внутреннего воздуха принимают постоянной и равной 45%, независимо от фактической влажности в помещении. Формула (1) определяет температуру внутренней поверхности светопрозрачных конструкций $\tau_в$:

$$\tau_в = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_o^{пр}\alpha_в}, \quad (1)$$

где $R_o^{пр}$ это значение приведенного сопротивления теплопередаче (должно быть больше или равно нормируемому сопротивлению теплопередаче $R_o^{норм}$); $\alpha_в$ это коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м^2·°С); $t_в$ это расчетная температура внутреннего воздуха здания; $t_н$ это расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0.92 по [75].

Температура точки росы t_d (ТТР) определяется по формуле (2), либо с применением специализированных таблиц:

$$t_d = \frac{b \cdot f(T, Rh)}{a - f(T, Rh)}, \quad (2)$$

где a это постоянная, равная 17.27; b это постоянная равная 237.7. Комплекс $f(T, Rh)$ определяется по формуле (3):

$$f(T, Rh) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln\left(\frac{Rh}{100}\right), \quad (3)$$

где T это температура воздуха, Rh это относительная влажность воздуха. Приведенные формулы (2)-(3) соответствуют широко используемой форме уравнения Магнуса для расчета температуры точки росы [76] .

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Документ [67] не содержит указаний по выбору температуры, при которой следует рассчитывать t_d. Таким образом, за данную температуру принимается фактическая температура. Таблица 1 содержит диапазон температур, в пределах которого находится фактическая температура согласно [77].

Table 1. Optimal and permissible standards for temperature, relative humidity and air velocity in the serviced areas of residential buildings and dormitories

Таблица 1. Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в обслуживаемой зоне помещений жилых зданий и общежитий

Период года	Наименование помещения	Температура воздуха, °С		Результирующая температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		оптим.	допустим.	оптим.	допустим.	оптим.	допустим.	оптим., не более	допустим., не более
Холодный	Жилая комната	20-22	18-24 (20-24)	19-20	17-23 (19-23)	45-30	60	0.15	0.2
	Жилая комната в районах с температурой наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0.92) минус 31°С и ниже	21-23	20-24 (22-24)	20-22	19-23 (21-23)	45-30	60	0.15	0.2
	Кухня	19-21	18-26	18-20	17-25	Не нормируется	Не нормируется	0.15	0.2

Таблица 1 показывает, что допустимая температура воздуха в жилой комнате достигает 24 °С. При относительной влажности воздуха равной 45% $t_d = 11.34°C$. Допустимая температура воздуха на кухне составляет 26°С, относительная влажность не нормируется, т.е. конденсат на окнах в кухне допускается в любых количествах, поскольку, при влажности 90% и при температуре 26°С $t_d = 24.22°C$. Однако, при учете требований [67] контрольная ТТР имеет другое значение $t_d = 13.12°C$ (допустимая температура 26°С и влажность внутреннего воздуха 45%). Существует противоречие: с одной стороны, нормативно не допускается образование конденсата, с другой стороны, исходя из совокупности указанных нормативных положений, появление конденсата представляется неизбежным. Также Таблица 1 не показывает, какую фактическую (допустимую) температуру следует принимать для расчета температуры на внутренней поверхности СПК для студий, а также квартир и домов, где гостиные совмещаются с кухнями.

Окно является неоднородной конструкцией, с точки зрения, теплопроводности. В состав окна входят алюминиевые (как правило, дистанционные) рамки в стеклопакетах, элементы примыканий, металлические крепежные элементы, профили рам и створок с различной толщиной и теплопроводностью, а также заполнения (стеклопакеты, газонаполненные промежутки), которые образуют локальные зоны с неодинаковыми теплопередающими характеристиками. Для каждой особой зоны значения сопротивления теплопередаче R и $\alpha_в$ будут разными. Стекло как аморфный материал характеризуется отсутствием кристаллической периодичности и наличием микроструктурных неоднородностей, однако в инженерных расчетах теплопереноса его обычно рассматривают как квазиизотропную и макроскопически однородную среду с усредненным коэффициентом теплопроводности [78].

Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции $\alpha_в$ согласно [67] равен 8 Вт/(м^2°С). Данный показатель характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью окна и окружающей средой. Теплообмен окна со средой помещения складывается из двух составляющих: конвективный теплообмен и теплообмен излучением. Конвективный теплообмен тем интенсивнее, чем интенсивнее конвекция, т.е. чем выше скорость воздуха, омывающего поверхность. Конвекция тем интенсивнее, чем больше разница в температурах воздуха и поверхности окна. Оконные конструкции обладают значительным сопротивлением теплопередаче, вследствие чего внутренние поверхности большинства оконных элементов характеризуются относительно высокими температурами. Таким образом, средняя скорость

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

конвекции воздуха у поверхности окна невысокая, а значит и конвективная составляющая теплообмена не значительно высока. Согласно результатам научной работы, выполненный специалистами НИУ МГСУ в рамках работ по разработке СП 538 "Конструкции оконные и балконные. Правила проектирования" [70], конвективная составляющая теплообмена на многих участках поверхностей окна не превышает 1 Вт/(м^2°С).

Интенсивность лучевого теплообмена между поверхностями зависит от разницы температур этих поверхностей: чем выше разница температур, тем интенсивнее лучевой теплообмен. Работа [79] установила, что при отсутствии каких-либо штор, жалюзи и прочих преград, интенсивность лучевого теплообмена окна со средой помещения составляет 4 Вт/(м^2°С). Таким образом, общий коэффициент теплообмена на значительной доле поверхностей окна не превышает 5 Вт/(м^2°С). Статья [80] также утверждает, что наличие солнцезащитных устройств влияет на солнечный теплоприток и тепловые характеристики СПК, в том числе и на внутренние температуры

Также при расположении экрана между взаимно облучающими поверхностями, у которого коэффициент излучения близок к коэффициенту излучения поверхностей, между которыми экран находится, то интенсивность лучевого теплообмена между поверхностями снижается в $n+1$ раз, где за n принимается количество слоев экрана. Соответственно, в присутствии плотных штор типа "блэк-аут" [81, 82], интенсивность лучевого теплообмена падает примерно в 2 раза, т.е. с 4-х единиц до 2-х. Итого, суммарный коэффициент теплообмена на определенных участках поверхностей окна будет равен максимум 3 – 4 Вт/(м^2°С), а не 8-ми, как указано в [67]. Следовательно, фактические температуры поверхностей будут значительно ниже, чем получаемые в расчетах по СП 50 [67].

Ниже представлен сравнительный расчет температуры внутренней поверхности светопрозрачных конструкций $\tau_в$ для центральной и краевых зон стеклопакета по формуле (1). Для центральной части приведенное сопротивление теплопередаче окна $R_o^{пр}$ равно 0.85 (м^2°С)/Вт, коэффициент теплообмена $\alpha_в$ согласно [67] составляет 8 Вт/(м^2°С). Во втором расчете сопротивление теплопередаче $R_o^{пр}$ составляет 0.4 (м^2°С)/Вт, данное значение характерно для краевой зоны стеклопакета или для участка, где располагаются верхней петли. Коэффициент теплообмена $\alpha_в$ составляет 5 Вт/(м^2°С). Температуры в двух расчетах одинаковые: $t_в = 20$ °С и $t_н = -25$ °С. Расчет $\tau_в$ для центральной части:

$$\tau_в = 20 - \frac{20-(-25)}{0.85 \cdot 8} = 13.4°C.$$

Расчет $\tau_в$ для краевых зон:

$$\tau_в = 20 - \frac{20-(-25)}{0.4 \cdot 5} = -2.5°C.$$

Сравнительный расчет показывает, что температуры на разных поверхностях одного и того же окна могут сильно отличаться в зависимости от конкретных особенностей данного участка.

Ярким примером участков с низкой температурой являются верхние петли оконной фурнитуры. Конструктивно в верхних петлях формируются тепловые мосты. Кроме этого, в данном месте уплотнитель наплава отжимается, из-за чего образуется неплотность, из которой при влиянии "стак-эффекта" формируется продувание [83], еще больше снижающее температуру в области верхней петли (стак-эффект заключается в движении воздуха по вертикали из-за разницы температур внутри и снаружи здания [84]). Применение скрытой фурнитуры, не выступающей в сторону помещения и не оказывающей существенного сдавливающего воздействия на уплотнитель, позволяет частично устранить снижение температуры. В случае использования традиционной фурнитуры пониженные температуры в зоне верхней петли остаются обычным явлением.

Зона примыкания подоконника к оконной раме также характеризуется пониженными температурами [85]. Аэродинамические особенности данной области формируют завихрения, вызванные ниспадающим охлажденным потоком воздуха от поверхности окна. Восходящий тепловой поток от отопительной батареи практически не компенсирует эти завихрения: теплый воздух втягивается в оконную нишу преимущественно в верхней части и слабо проникает в нижнюю из-за структуры движения воздуха. Описанное явление становится основной причиной пониженных температур в зоне примыкания подоконника. Наличие дефектов конструкции или монтажа, приводящих к продуваниям, усугубляет снижение температур поверхностей. Следует

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

также учитывать, что влияние продуваний усиливается в многоэтажных зданиях, особенно на крайних этажах (нижних и верхних) и в угловых секциях: на нижних этажах доминирует так называемый стак-эффект, тогда как на верхних и в углах максимальна ветровая нагрузка [86].

Угловые участки эркерных конструкций также относятся к зонам пониженных температур. В любой угловой конфигурации наблюдается существенный дисбаланс между внутренним теплопоступлением и внешней тепловой отдачей: тепловосприятие со стороны помещения по площади и интенсивности заметно уступает теплоотдаче с наружной поверхности. Коэффициент теплообмена со стороны помещения составляет существенно меньшую величину, чем снаружи. В соответствии с требованиями [67] нормативные значения коэффициентов теплообмена для окон принимаются равными $\alpha_в = 8$ Вт/(м²·°С) со стороны помещения и $\alpha_н = 23$ Вт/(м²·°С) снаружи. При использовании более уточненных значений, отраженных, например, в СП 538 [70], разница в интенсивности теплообмена между наружной и внутренней поверхностями достигает больших значений.

Формула 1 использует для расчета температуры внутренней поверхности светопрозрачных конструкций $\tau_в$ приведенное сопротивление теплопередаче $R_o^{пр}$, которое характеризует усредненную по площади плотность потока теплоты через фрагмент теплозащитной оболочки здания в стационарных условиях теплопередачи. При сертификационных и иных испытаниях значение приведенного сопротивления определяется в лабораторных условиях. В упрощенном виде методика испытаний сводится к следующему: в стенке климатической камеры (термошкафа) оформляют проем по размерам испытываемого оконного блока, устанавливают образец уличной стороной внутрь камеры и со стороны помещения размещают датчики температуры и теплового потока. В камере поддерживают заданную отрицательную температуру, после чего по показаниям датчиков вычисляют приведенное сопротивление теплопередаче испытуемого окна. Светопрозрачные ограждающие конструкции неоднократно исследовались в климатических камерах. Например, статья [87] рассматривала прозрачные вакуумные изоляционные панели с целью определения влияния сезонных колебаний влажности на качество изоляции панелей. Измерения проводились в условиях, имитирующих зиму и лето. Статья [88] исследовала окна, в которых размещались теплоотражающие экраны с солнечными фотоэлектрическими панелями. Статья [89] описывала исследование двухкамерных стеклопакетов и двухкамерных стеклопакетов с низким коэффициентом излучения в климатической камере во время экстремальной жары и отключения электроэнергии использовалась. Однако, в ходе лабораторных испытаний в климатических камерах не воспроизводится перепад давления и ветровой напор, тогда как в натурных условиях перепад давления присутствует постоянно. Наличие перепада давления увеличивает воздухопроницаемость оконных узлов и усиливает продувание, что заметно влияет на температуры поверхностей, особенно в локальных зонах с повышенной воздухопроницаемостью. Следовательно, лабораторно измеренное приведенное сопротивление теплопередаче плохо коррелирует с фактическими температурами поверхностей в реальных условиях. Тем не менее при выборе окон для строительных объектов ориентируются именно на лабораторные показатели сопротивления теплопередаче, что приводит к недооценке влияния продуваний в натурных эксплуатационных условиях.

Рассматриваемая проблематика усугубляется отсутствием жесткого требования о размещении отопительных приборов непосредственно под оконными проемами. В пункте 6.4.6 СП 60.13330.2020 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха" [90] указано, что отопительные приборы в жилых зданиях следует размещать под световыми проемами или в непосредственной близости от них, а их длину рекомендуется определять расчетом и принимать максимально возможной для перекрытия ширины светового проема в ряде учреждений (медицинские и образовательные организации, дома-интернаты и др.). Тем не менее на практике архитектор или дизайнер могут разместить отопительный прибор в иной части помещения или отказаться от традиционных радиаторов в пользу систем напольного обогрева [91], [92], поскольку норматив не содержит запрета на такие решения. Кроме того, документ [90] не требует, чтобы отопительный прибор обеспечивал расчетный коэффициент теплообмена с поверхностями стен и окон, необходимый для обеспечения заданной тепловой нагрузки. Норматив устанавливает лишь условие по суммарной теплоотдаче, достаточной для поддержания температуры воздуха в помещении заданного объема. Таким образом, даже при выполнении требований по тепловой мощности помещения возможно недостаточное локальное прогревание ограждающих

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

поверхностей возле окон, что усиливает риск образования зон пониженных температур и конденсации [93], [94].

Еще одним фактором, усугубляющим проблемы с расчетом температур на внутренней поверхности окон, является то, что температура и влажность воздуха внутри помещения нормируются только в "обслуживаемой зоне" помещения. У данного термина есть синонимы: "зона обитания", "эксплуатируемая зона", "рабочая зона" помещения. Обслуживаемая зона ограничена центральной частью помещения и отстоит от ограждающих конструкций, включая оконные проемы, примерно на 0.5 м [77], [90]. Следовательно, температура и относительная влажность воздуха непосредственно у поверхности окна или в оконной нише не нормируются. Требования к температуре внутренней поверхности окна теряют обоснование, поскольку для корректного определения температурно-влажностного режима необходимы значения температуры и влажности воздуха вблизи окон, т.е. входные данные, которые нормативами формально не задаются. Без знания перечисленных параметров требование поддерживать температуру поверхности выше расчетного уровня не имеет четкого алгоритма применения.

4 Conclusions

Такие технические решения как многослойные остекления, низкоэмиссионные покрытия, электро-/фото-/термохромные стекла, вакуумное и аэрогелевое остекление, фазоизменяющиеся материалы и др. показывают высокий потенциал для улучшения теплотехнических и оптических характеристик светопрозрачных конструкций (СПК). Однако эффект от применения перечисленных технологий зависит от правильного учета локальных теплопотерь, продуваний и интеграции с системами отопления и вентиляции. Проведенный обзор научной литературы и существующих нормативов показали:

1. Температура внутренних поверхностей светопрозрачных конструкций (СПК) определяется комплексом мультифизических факторов, включающих теплопередачу через ограждающую конструкцию, конвективный и лучевой теплообмен, геометрические особенности участков, инфильтрацию (продувание) и эксплуатационные режимы отопления и вентиляции. Следовательно, корректное определение локальных температурных полей СПК требует перехода от усредненных одномерных методов к многомерному мультифизическому моделированию. Для практической реализации мкльтифизического моделирования могут быть использованы специализированные программные комплексы (например, COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, OpenFOAM и др.), позволяющие учитывать нестационарные режимы, локальные тепловые мосты и инфильтрацию. Конкретный выбор программного обеспечения, типа анализа (стационарный/нестационарный, линейный/нелинейный), параметров сетки и критериев сходимости должен определяться в рамках последующих исследований, направленных на верификацию предложенной концепции на натурных данных.
2. Действующие нормативные методики (СП 50.13330.2024 и СП 538.1325800.2024) содержат существенные упрощения и допущения: усреднение приведенного сопротивления теплопередаче по площади, фиксированное значение коэффициента теплообмена на внутренней поверхности, а также унифицированный выбор входных параметров (температуры и влажности). Перечисленные упрощения приводят к систематическому недооцениванию влияния локальных тепловых мостов, продуваний и аэродинамических эффектов на температуру локальных участков поверхности.
3. Принятые в нормативных документах значения коэффициента теплообмена внутренней поверхности (8 Вт/(м^{2}·°С)) оказываются завышенными для значительной доли участков остекления. Анализ радиационной и конвективной составляющих показал, что на многих поверхностях суммарный коэффициент теплообмена находится в интервале порядка 3–5 Вт/(м^{2}·°С). Использование более реалистичных значений существенно изменяет прогнозируемые температуры внутренних поверхностей.
4. Существующие нормативные требования по температуре и влажности воздуха задаются для "обслуживаемой зоны", удаленной от ограждающих поверхностей, и не определяют микроклимат непосредственно у оконных проемов и в оконных нишах, что означает, что требования по температуре поверхностей и по отсутствию на них конденсата не обоснованы .

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

5. Локальные конструктивные особенности (верхние петли, примыкания подоконника, угловые эркеры и др.) формируют зоны пониженных температур вследствие тепловых мостов и аэродинамических завихрений. Для внешних углов (эркеров) характерна выраженная трехмерная структура теплового поля, при которой теплоотдача с наружной поверхности существенно преобладает над теплопоступлением со стороны помещения, что дополнительно снижает температуру внутренней поверхности в угловых зонах. Проблема усугубляется отсутствием единых требований по размещению отопительных приборов под проемами и по контролю их локального воздействия на тепловой режим ограждений.

На основе выявленных ограничений обоснована необходимость пересмотра нормативных методик: ввести требования к учету локального распределения сопротивления теплопередаче и коэффициентов теплообмена, учитывать влияние инфильтрации и давления ветра, а также задавать входные параметры микроклимата вблизи ограждений. Переход к многомерному мультифизическому моделированию и к сочетанию лабораторных и натурных испытаний повысит точность прогнозов температурных полей, достоверность оценки риска конденсации, улучшит комфорт жильцов, а также уменьшит издержки и конфликтные ситуации (экспертизы, суды и т.п.).

Значимость полученных результатов заключается в том, что выявленные ограничения действующих нормативных методик объясняют систематические расхождения между расчетными и фактическими температурами внутренних поверхностей остекления и, как следствие, между прогнозируемым и реальным риском конденсации. Данная публикация создает основу для пересмотра нормативных подходов к проверке температурного режима светопрозрачных конструкций.

Ограничения работы связаны с тем, что количественная оценка температурных полей выполнена на основе упрощенных расчетных схем и литературных данных; собственные натурные измерения и детальное численное моделирование в данной работе не проводились. Поэтому полученные оценки носят качественный и демонстрационный характер и требуют дальнейшей верификации.

5 Acknowledgements

If any acknowledgments or supporting information are required, they should be provided after the conclusion section.

6 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. Nemova, D. V., Vasileva, I. L., & Vatin, N. I. (2019). Introduction of double-skin facades in the Russian Federation. *Construction of Unique Buildings and Structures*, *84*(9), 51–62. https://doi.org/10.18720/CUBS.84.4
2. Luchkin, E. A., & Ivanchuk, E. V. (2021). Classification of translucent facade systems (in Rus). *StudNet*, *4*(11), 1–13. https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-svetoprozrachnyh-fasadnyh-sistem
3. Abolghasemi Moghaddam, S., Simões, N., & Gameiro da Silva, M. (2023). Review of the experimental methods for evaluation of windows' solar heat gain coefficient: From standardized tests to new possibilities. *Building and Environment*, *242*, 110527. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110527
4. Pham, H., Soto, A., & Arul, M. (2025). Identification of features influencing glass façade damage in mid- to high-rise buildings during extreme wind events. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *267*, 106232. https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2025.106232
5. Panaritis, C., Couillard, M., Baranova -, E. A., Bukola, S., Mayura Silva, L., Creager, S. E., … Akhrorova, M. (2023). Improvement of the method of calculation of the reduced heat transfer

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

resistance of light openings of buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, *2573*(1), 012045. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2573/1/012045

6. Kamalisarvestani, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Javadi, F. S. (2013). Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*(26), 353–364. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003419
7. Moghaddam, S. A., Mattsson, M., Ameen, A., Akander, J., Gameiro Da Silva, M., & Simões, N. (2021). Low-Emissivity Window Films as an Energy Retrofit Option for a Historical Stone Building in Cold Climate. *Energies*, *14*(22), 7584. https://doi.org/10.3390/EN14227584
8. Krarti, M. (2022). Performance of smart glazed overhang systems for US residential buildings. *Building and Environment*, *208*, 108634. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108634
9. Arici, M., Karabay, H., & Kan, M. (2015). Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows. *Energy and Buildings*, *86*, 394–402. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.10.043
10. Vasileva, I. L., Nemova, D. V., Vatin, N. I., Fediuk, R. S., & Karelina, M. I. (2022). Climate-Adaptive Façades with an Air Chamber. *Buildings*, *12*(3), 366. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12030366
11. Andreeva, D., Nemova, D., & Kotov, E. (2022). Multi-Skin Adaptive Ventilated Facade: A Review. *Energies*, *15*(9), 3447. https://doi.org/10.3390/EN15093447
12. Ma'bdeh, S. N., Alali, R. O., Al-Shawabkeh, M., Almomani, R. M., Hamasha, A. A., Shannik, R., & Alrebei, O. F. (2025). Optimizing airflow in double-skin facades: Influence of vents design and cavity depth. *Cleaner Engineering and Technology*, *26*, 100980. https://doi.org/10.1016/J.CLET.2025.100980
13. Zhao, X., Song, Y., Dong, Q., Huang, L., Wang, Y., & Shi, L. (2025). Solar radiation-controllable double-skin façades to enhance natural ventilation for green buildings. *Renewable Energy*, *255*, 123805. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2025.123805
14. Nemova, D. V., Kotov, E. V., Daurov, Z. S., & Olshevskiy, V. I. (2020). Energy Efficiency of Closed Cavity Fasades. *Construction of unique buildings and structures*, *93*(8), 9305–9305. https://doi.org/10.18720/CUBS.93.5
15. Tao, Y., Yan, Y., Tu, J., & Shi, L. (2024). Impact of wind on solar-induced natural ventilation through double-skin facade. *Applied Energy*, *364*, 123205. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2024.123205
16. Laczkó, A., & Nagy, B. (2026). Thermal Performance Modeling of Point-Fixed Glass Façades. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *795 LNCE*, 829–845. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14011-1_66
17. Binyas, B. L., Sulaiman, M. K. A. M., Hembali, N. H., Rauf, A. A., Ayyash, A. B., & Wei, W. (2025). Application of Inclined Glass Wall as Building Facade under Tropical Climate Condition. *Jurnal Kejuruteraan*, *37*(5), 2059–2070. https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(5)-02
18. Imomova, N., Komilov, O., Majitov, J., Ergashov, J., & Usmonov, K. (2021). Calculation of the power of thermal energy consumed for heating the reactor of a bioenergy plant. *E3S Web of Conferences*, *264*, 04069. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202126404069
19. Baygi, S. J. M. (2023). Effect of the Thin Silver Layer in SnO2/Ag/SnO2 Nano-Coatings with Low Emission for Energy Storage. *Journal of Electronic Materials*, *52*(7), 4532–4539. https://doi.org/10.1007/S11664-023-10339-4
20. Zakharov, A. N., Kovsharov, N. F., Oskomov, K. V., Rabotkin, S. V., Solovyev, A. A., & Sochugov, N. S. (2012). Properties of low-emission coatings based on Ag and Cu deposited on polymer film by magnetron sputtering. *Inorganic Materials: Applied Research*, *3*(5), 433–439. https://doi.org/10.1134/S2075113312050206
21. Ma, Y., Yang, D., Jiang, Q., Zhu, K., Yuan, H., Cui, J., & Yuan, L. (2020). TiN-based organic-inorganic composite films with dual functions of solar control and low-emission for energy-saving coatings. *Materials Research Express*, *7*(6). https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab96fd
22. Huang, Z., & Yang, E. (2025). Highly solar transparent and low-emissivity glass based on hydrogen-doped indium oxide. *Materials Science and Engineering: B*, *312*, 117818. https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2024.117818
23. Solovyev, A. A., Rabotkin, S. V., & Kovsharov, N. F. (2015). Polymer films with multilayer low-E coatings. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *38*, 373–380. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.02.051

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

24. Gong, J., Wu, R., Hu, Y., Wang, S., & Mao, J. (2026). A multiple cross-linked photo-/thermo-dual-responsive hydrogel for energy-efficient smart windows with integrated UV monitoring and information encryption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *748*, 140969. https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2026.140969
25. Zhao, Y., Ji, H., Lu, M., Tao, J., Ou, Y., Wang, Y., … Mao, Y. (2022). Thermochromic Smart Windows Assisted by Photothermal Nanomaterials. *Nanomaterials*, *12*(21), 3865. https://doi.org/10.3390/NANO12213865
26. Zhang, K., Tai, X., Jiao, S., Zhang, Y., & Zou, Q. (2026). Temperature adaptive regulating window boosted by incorporating modified PNIPAM hydrogels with PVDF for building energy efficiency. *Energy and Buildings*, *354*, 116993. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2026.116993
27. Raghuwanshi, V. S., Joram Mendoza, D., Browne, C., Ayurini, M., Gervinskas, G., Hooper, J. F., … Garnier, G. (2023). Effect of temperature on the conformation and functionality of poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM)-grafted nanocellulose hydrogels. *Journal of Colloid and Interface Science*, *652*, 1609–1619. https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2023.08.152
28. Kotliarskaia, I. L., Nosova, A. O., Uspenskaya, M. V., & Vatin, N. I. (2025). Thermosensitive Coatings: A Review. *AlfaBuild*, *35*(3), 3502–3502. https://doi.org/10.57728/ALF.35.2
29. Chen, X., Cui, J., Liu, Z., Wang, Y., Li, M., Zhang, J., … Wei, Q. (2024). Polyacrylamide/sodium alginate/sodium chloride photochromic hydrogel with high conductivity, anti-freezing property and fast response for information storage and electronic skin. *International Journal of Biological Macromolecules*, *268*, 131972. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.131972
30. Castillo, S., Ramírez, Ó., Kortaberria, G., Forero-Giron, A. C., Cortés-Arriagada, D., Pizarro, N., … Leiva, Á. (2026). Transparent photoactive azobenzene-functionalized poly(ε-caprolactone)/chitosan nanofiber composites for solid-state molecular solar thermal energy storage. *Reactive and Functional Polymers*, 106857. https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2026.106857
31. Shao, Q., Yang, M., Wang, J., Wang, T., Wang, B., Fan, Y., & Wang, Y. (2026). Ultrasound/light/pH interactive control over cycling reconfiguration of spiropyran surfactant bowl-shaped nano-assemblies. *Chinese Chemical Letters*, 112647. https://doi.org/10.1016/J.CCLET.2026.112647
32. Li, Z., Zheng, W., Ji, R., Zhao, Y., Wang, K. P., Chen, S., & Hu, Z. Q. (2026). Multistimuli responsive fluorescent materials based on unsymmetric diarylvinyl anthracene-type solid-state fluorophores. *Dyes and Pigments*, *246*, 113402. https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2025.113402
33. Zuo, W., Chen, Q., Xie, Z., Habib, S., Jing, Y., Zhang, X., … Zhu, J. (2023). Synthesis of sodium alginate/polyacrylamide photochromic hydrogels with quadruple crosslinked networks. *Journal of Materials Chemistry B*, *11*(29), 6952–6960. https://doi.org/10.1039/D3TB00141E
34. Usha, K. S., Vijaya Prasath, G., & Lee, S. Y. (2026). Nickel–tungsten oxide thin films: Enhanced switching kinetics via thermal treatment for energy-efficient smart window applications. *Ceramics International*, *52*(8), 10671–10680. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2026.01.243
35. Bhattacharjee, S., Pramanik, J., Das, A., Ghosh, S., & Kundu, S. (2026). Time resolved phase engineering of sub-stoichiometric tungsten oxide for advanced electrochromic smart windows. *Materials Today Chemistry*, *54*, 103696. https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2026.103696
36. Abouelleef, E. M., Wahba, R. H., El-Sonbati, A. Z., Diab, M. A., & Gomaa, E. A. (2026). Electrochemical, thermodynamic, and antibacterial evaluation of ammonium molybdate in acidic medium with eosin yellow: Cyclic voltammetry. *Journal of Molecular Liquids*, *442*, 129114. https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2025.129114
37. Moon, C. W., Bhoumik, N. C., Mondol, P., Park, S. H., Jang, H. W., & Barile, C. J. (2023). Origin of high optical contrast in zinc-zinc oxide electrodeposits for dynamic windows. *Nano Energy*, *114*, 108666. https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2023.108666
38. Skandalos, N., & Karamanis, D. (2015). PV glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 306–322. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.145
39. Norton, B., Eames, P. C., Mallick, T. K., Huang, M. J., McCormack, S. J., Mondol, J. D., & Yohanis, Y. G. (2011). Enhancing the performance of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, *85*(8), 1629–1664. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2009.10.004
40. Wang, M., Peng, J., Li, N., Yang, H., Wang, C., Li, X., & Lu, T. (2017). Comparison of energy performance between PV double skin facades and PV insulating glass units. *Applied Energy*, *194*, 148–160. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.03.019

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

41. Wang, K., Yang, X., Yan, D., Liu, T., Liu, L., & Zhang, W. (2026). Dual-Salt Hydrogel Electrolyte for a Robust Zn-Ion Electrochromic Device toward Dynamic Infrared Regulation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *18*(15), 22171–22183. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.6C02668
42. Yan, D., Liu, L., Guo, T., Zhang, Z., Wang, M., Li, C., … Hu, S. (2025). High-performance reflective-type Zn-ions electrochromic devices toward visible-to-infrared broadband dynamic regulation. *Chemical Engineering Journal*, *504*, 159117. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.159117
43. Niknia, S., & Rashed-Ali, H. (2024). Analyzing energy consumption due to occupant interaction with manual and automatic window blinds in multiple climates. *Journal of Building Engineering*, *90*, 109506. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109506
44. Nilsson, A. M., & Jonsson, J. C. (2010). Light-scattering properties of a Venetian blind slat used for daylighting applications. *Solar Energy*, *84*(12), 2103–2111. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.09.005
45. Chaiyapinunt, S., & Worasinchai, S. (2009). Development of a mathematical model for a curved slat venetian blind with thickness. *Solar Energy*, *83*(7), 1093–1113. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2009.01.013
46. Al-Obaidi, K. M., Ismail, M. A., & Abdul Rahman, A. M. (2015). Assessing the allowable daylight illuminance from skylights in single-storey buildings in Malaysia: a review. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, *6*(4), 236–248. https://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1129369
47. Al-Masrani, S. M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in Construction*, *102*, 195–216. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.01.014
48. Eames, P. C. (2008). Vacuum glazing: Current performance and future prospects. *Vacuum*, *82*(7), 717–722. https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2007.10.017
49. Bi, Q., Jin, Q., Cao, M., & Yu, Z. (2026). Investigation of the Photothermal–Electrical Characteristics of Insulated and Ventilated Photovoltaic Vacuum Glazing Systems. *Renewable Energy*, 126110. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2026.126110
50. Mi, W., Pu, J., Shen, C., Chen, G., & Soteris, K. A. (2025). Vacuum-structured electrochromic glazing windows with ultra-low U-Values for building energy savings in all climatic zones. *Energy*, *336*, 138496. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.138496
51. Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., & Zinzi, M. (2021). Aerogel glazing systems for building applications: A review. *Energy and Buildings*, *231*, 110587. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110587
52. Zheng, D., Chen, Y., & Yan, D. (2025). Effects of optical scattering in aerogel glazing system on daylight illuminance and discomfort glare. *Building and Environment*, *286*, 113765. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.113765
53. Gao, T., Jelle, B. P., Ihara, T., & Gustavsen, A. (2014). Insulating glazing units with silica aerogel granules: The impact of particle size. *Applied Energy*, *128*, 27–34. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.04.037
54. Liu, Y., Wang, Y., Wang, X., Xu, Y., Li, X., Liu, Y., … Wu, X. H. (2025). Investigation on the optical, thermal, and electrical performance of photovoltaic-aerogel glazing system under different weather conditions. *Energy*, *326*, 136335. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.136335
55. Belloni, E., Anderson, A. M., Carroll, M. K., Frizzi, B., Pierini, T., & Buratti, C. (2026). Innovative glazing systems composed of photovoltaic cells and monolithic aerogel layers: Electrical and thermal experimental characterization and simulation analysis. *Energy and Buildings*, *356*, 117071. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2026.117071
56. Vukadinović, A., Radosavljević, J., & Đorđević, A. (2020). Energy performance impact of using phase-change materials in thermal storage walls of detached residential buildings with a sunspace. *Solar Energy*, *206*, 228–244. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.06.008
57. Liu, C., Zheng, Y., Li, D., Qi, H., & Liu, X. (2016). A Model to Determine Thermal Performance of a Non-ventilated Double Glazing Unit with PCM and Experimental Validation. *Procedia Engineering*, *157*, 293–300. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.08.369
58. Yan, W., Sang, G., Cai, P., Zhang, X., Cui, X., Ban, T., & Shen, M. (2026). Light-transmitting and energy-storing integrated PEG-HPMC phase change film for transparent building envelopes: Preparation, properties, and thermal regulation simulation. *Energy and Built Environment*. https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2026.06.003

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

59. Čekon, M., Slávik, R., Čurpek, J., Cottone, R., & Bevilacqua, P. (2025). An integrated adaptive façade system using a glass block filled with phase change material: Cooling energy load and performance enhancement. *Building and Environment*, *273*, 112724. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.112724
60. Ceviz, M. A., Mandev, E., Muratçobanoğlu, B., Çelik, A., & Afshari, F. (2023). Experimental analysis of energy storage performance of phase change materials in horizontal double-glazing applications. *Journal of Energy Storage*, *73*, 108836. https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108836
61. Çelik, A., Mandev, E., Ersan, O., Muratçobanoğlu, B., Ceviz, M. A., & Kara, Y. A. (2025). Thermal performance evaluation of PCM-integrated interior shading devices in building glass facades. *Journal of Energy Storage*, *113*, 115614. https://doi.org/10.1016/J.EST.2025.115614
62. Gonçalves, M., Figueiredo, A., Almeida, R. M. S. F., & Vicente, R. (2025). Design and thermal performance analysis of a dynamic shading device incorporating phase change materials. *Journal of Energy Storage*, *134*, 118179. https://doi.org/10.1016/J.EST.2025.118179
63. Öztürk, B., Mutlu-Avinç, G., & Arslan-Selçuk, S. (2024). Enhancing energy efficiency in glass facades through biomimetic design strategies. *Revista Hábitat Sustentable*, *14*(1), 34–43. https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.03
64. Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., Ambrogi, V., & Ausiello, G. (2024). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, *247*, 111052. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.111052
65. Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *169*, 112850. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112850
66. Yessengabulov, S., Kozhakhmet, M., Zharkenov, Y., Abakanov, Y., Dastenova, G., Nurbayeva, M., … Jexembayeva, A. (2025). Study of the Possibility of Transition to More Stringent Energy Efficiency Requirements for Translucent Structures in the Republic of Kazakhstan. *Buildings*, *15*(13), 2354. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS15132354/S1
67. SP 50.13330.2024 Thermal performance of the buildings. https://meganorm.ru/mega_doc/norm/pasport_forma/0/sp_50_13330_2024_svod_pravil_teplovaya_zashchita_zdaniy.html
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. SP 538.1325800.2024 Window and balcony constructions. Design rules. https://docs.cntd.ru/document/1306394702
71. Pirozhnikova, A. P., Bukarov, N. V., & Vasilenko, V. V. (2019). To the question of improving the regulatory framework for energy efficiency of buildings and structures within SP 50.13330.2012 "Thermal protection of buildings," *8*(59), 34. https://elibrary.ru/item.asp?id=42406135
72. Perekhozhentsev, A. G. (2018). Norming and Calculation of Vapor Permeability of MultiLayer Building Enclosing Structures (Recommendations for Improving SP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings"). *Scientific journal "ACADEMIA. ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION,"* (3), 130–134. https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-3-130-134
73. Bodrov, M. V., Yulanova, A. F., & Ruin, A. E. (2024). Scientific and methodological justification of theneed to amend SP 50.13330.2012 "SNIP 23022003 Thermal protection of buildings." *Privolzhsky Scientific Journal*, *1*(69), 49–54. Retrieved from https://elibrary.ru/item.asp?id=65395525
74. Nie, J., & Liu, X. (2024). A review of dew point sensors: Recent advances and future development. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *417*, 136115. https://doi.org/10.1016/J.SNB.2024.136115
75. SP 131.13330.2025 Building climatology.https://docs.cntd.ru/document/1313808224
76. Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *86*(2), 225–233. https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225
77. GOST 30494-2011 "Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures." (n.d.). Retrieved May 21, 2026, from https://docs.cntd.ru/document/1200095053

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

78. Komatsu, T., & Honma, T. (2026). A comprehensive revisit to "what is glass" from nanoscale heterogeneous structure. *Journal of Solid State Chemistry*, *361*, 126072. https://doi.org/10.1016/J.JSSC.2026.126072
79. Konstantinov, A. P., Aksenov, I. S., & Elohov, A. E. (2023). The use of Thermography to Determine the Boundary Conditions of Heat Exchange on The Inner Surfaces of Translucent Enclosing Structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*, 18–21. https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-18-21
80. Collins, M. (2004). Convective heat transfer coefficients from an internal window surface and adjacent sunlit Venetian blind. *Energy and Buildings*, *36*(3), 309–318. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2003.12.014
81. Song, S., Chen, Y., Long, J., & Wang, P. (2026). A curtain regulating strategy for high energy performance in office buildings. *Renewable Energy*, *265*, 125642. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2026.125642
82. Merve Bulut, Merve Kucukali Ozturk, Cevza Candan, Banu Nergis, Tuğba Zengin, Aysun Yenice, … Ecenur Tor. (2022). Evaluation of light blocking effect and acoustic performance of blackout fabrics. In *Conference: 4th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2022) At: Ankara, Turkey*. https://www.researchgate.net/publication/366324830_Evaluation_of_light_blocking_effect_and_acoustic_performance_of_blackout_fabrics
83. Shi, Y., & Li, X. (2020). Effect of mechanical ventilation on infiltration rate under stack effect in buildings with multilayer windows. *Building and Environment*, *170*, 106594. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106594
84. Rogal, I. O. (2024). Calculating the stack effect in high-rise buildings and how it affects ventilation systems (in rus). *Current research (in rus)*, (22 (204)). https://apni.ru/article/9440-raschet-stak-effekta-v-vysotnyh-zdaniyah-i-kak-on-vliyaet-na-sistemy-ventilyacii
85. Qin, X., Liu, H., Zhang, X., Jiang, N., Yang, L., & Jin, X. (2024). Thermal analysis of the window-wall interface for renovation of historical buildings. *Energy and Buildings*, *310*, 114108. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.114108
86. Xie, C., Yang, Y., Li, Q., Yu, X., Wang, Z., Bai, B., … Guo, Y. (2026). Accessing the stack effect in high-rise buildings by the probability method based on climate demarcation: A case study in China. *Energy and Built Environment*, *7*(3), 519–533. https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2025.01.002
87. Hirvonen, E., Katsura, T., & Nagano, K. (2024). Further Experiments in Integrating Transparent Photovoltaic Film with Transparent Vacuum Insulation Panel. *2024 11th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2024*, 280–284. https://doi.org/10.1109/CPESE62584.2024.10840706
88. Parfenov, G. I., Smirnov, N. N., & Tyutikov, V. V. (2024). Energy Efficiency of Using Heat-Reflecting Screens with Solar Photovoltaic Panels in Windows. *Proceedings - 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2024*, 250–254. https://doi.org/10.1109/ICIEAM60818.2024.10554005
89. Paneru, S., Wang, J., Elmi, M., Chi, G., & Hu, Y. (2025). Envelope impact on indoor thermal resilience across different housing types during extreme heatwaves and power outages. *Journal of Building Engineering*, *115*, 114516. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.114516
90. SP 60.13330.2020Heating, ventilation and air conditioning. https://docs.cntd.ru/document/573697256
91. Wang, M., Li, P., & Liu, W. (2022). Generic mathematical formulation of the total heat transfer coefficients between heated radiant floor surfaces and rooms. *Building and Environment*, *211*, 108701. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108701
92. Bellagh, L., Merabtine, A., Kheiri, A., Mokraoui, S., & Kauffmann, J. (2021). Studies on how to counteract overheating caused by sun patch exposure in ventilated highly glazed spaces heated by floor heating systems. *Solar Energy*, *220*, 991–1005. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.04.008
93. Duan, Q., Hinkle, L., Wang, J., Zhang, E., & Memari, A. (2021). Condensation effects on energy performance of building window systems. *Energy Reports*, *7*, 7345–7357. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.10.096
94. Laukkarinen, A., Kero, P., & Vinha, J. (2018). Condensation at the exterior surface of windows. *Journal of Building Engineering*, *19*, 592–601. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2018.06.014