

**РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ АКТИВНО РЕГУЛИРУЕМОЙ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ФИЗКУЛЬТУРНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
С КУПОЛЬНЫМ СВЕТОПРОЗРАЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

***Н. П. Умнякова, Н. В. Купчикова, К. В. Любавина***

**Умнякова Нина Павловна**, заместитель директора по науке, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук; доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация;

**Купчикова Наталья Викторовна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ); доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

**Любавина Ксения Валерьевна**, студент, филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в Мытищи, г. Мытищи, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований активно регулируемой фасадной системы динамического смарт-остекления для большепролетных светопрозрачных покрытий в холодном климате. Объект – физкультурно-оздоровительный комплекс в г. Рыбинске с купольным покрытием из клееных деревянных балок и двухкамерными стеклопакетами. Система объединяет три подсистемы: наружные перфорированные алюминиевые шторы с интеллектуальным управлением, контурный электрообогрев стеклопакета и автоматическую противообледенительную систему с метеомодулем «ЛУЧ». Эксперименты проведены на натурном фрагменте 4,2 × 2,5 м в климатической камере НИИСФ РААСН при перепаде температур 46 °С. Определены приведенные сопротивления теплопередаче: стеклопакета – 0,82 м<sup>2</sup>·°С/Вт, всей конструкции – 0,92 м<sup>2</sup>·°С/Вт, что выше норматива 0,56. Тепловизионная съемка выявила зоны минимальных температур по контуру стекла 10,8–12,5 °С. Расчет точки росы с учетом градиента 0,5 °С/м показал неизбежность конденсата, устраненного локальным обогревом краевой зоны на 2–3 °С. Разработан интегральный алгоритм управления на основе солнечной радиации, температуры и индекса PMV. Алгоритм (Python) для широты 58° с.ш. снижает число циклов переключений в 3,3 раза, увеличивая ресурс приводов с 5 до 15 лет. Экономия энергии – 62 % с 110 до 45 кВт·ч/м<sup>2</sup>·год, интегральный критерий IEER = 41 % класс A++, срок окупаемости – 6,8 лет. Решения типизируемы для спортивных, выставочных и транспортных сооружений. Результаты рекомендованы для включения в СП 50.13330 и СП 23-101-2004.

**Ключевые слова:** динамическое смарт-остекление, купольное покрытие, большепролетные конструкции, активно регулируемая фасадная система, контурный электрообогрев, антиобледенительная система, экспериментальные теплотехнические исследования, интегральный алгоритм управления, энергоэффективность.

**DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF AN ACTIVELY ADJUSTABLE FACADE SYSTEM  
FOR A SPORTS AND RECREATION COMPLEX WITH A DOMED TRANSLUCENT COATING**

***N. P. Umnyakova, N. V. Kupchikova, K. V. Lyubavina***

**Umnyakova Nina Pavlovna**, Deputy Director for Research, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; Doctor of Technical Sciences, Professor of Industrial and Civil Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation;

**Kupchikova Natalya Viktorovna**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Building Structures, Buildings, and Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT); Doctor of Technical Sciences, Professor of Industrial and Civil Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

**Lyubavina Ksenia Valerievna**, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

The paper presents experimental and computational results of an actively controlled facade system of dynamic smart glazing for large-span translucent roofs in cold climates. The object is a sports and recreation centre in Rybinsk with a domed roof made of glued laminated timber beams and double-glazed units. The system integrates three subsystems: external perforated aluminium louvers with intelligent control, contour electric heating of the glazing unit, and an automatic anti-icing system with the “LUCH” weather module. Tests were performed on a full-scale fragment 4.2×2.5 m in a climatic chamber of NIISF RAASN at a 46 °C temperature difference. The reduced thermal transmittance resistances were determined: 0.82 м<sup>2</sup>·°С/W for the glazing and 0.92 м<sup>2</sup>·°С/W for the whole structure, exceeding the standard 0.56. Thermal imaging revealed minimum temperatures along the glass perimeter 10.8–12.5 °C. Dew point calculation with a 0.5 °С/m gradient proved inevitable condensation, eliminated by local edge heating (2–3 °C). An integral control algorithm based on solar radiation, temperature and PMV index was developed. The algorithm (Python) for latitude 58° N reduces switching cycles by 3.3 times, increasing actuator service life from 5 to 15 years. Energy saving is 62 % from 110 to 45 kWh/m<sup>2</sup>·year, integral IEER = 41 % class A++, payback period – 6.8 years. The solutions are typifiable for sports, exhibition and transport facilities. The results are recommended for inclusion in SP 50.13330 and SP 23-101-2004.

**Keywords:** dynamic smart glazing, domed roof, large-span structures, actively controlled facade system, contour electric heating, anti-icing system, experimental thermal tests, integral control algorithm, energy efficiency.

### Введение

Современные архитектурные тенденции направлены на создание интегрируемых в пространство объектов, которые стирают грань между интерьером и экстерьером. Одним из инструментов реализации такой задачи являются светопрозрачные конструкции (СПК), которые обеспечивают естественное освещение и визуальную связь с окружающей средой [1]. Однако обширное использование СПК в большепролетных сооружениях ставит перед проектировщиками ряд дополнительных задач: регулирование инсоляции и нежелательной солнечной радиации, поддержание температурно-влажностного режима в помещениях, а также оптимизация затрат на эксплуатацию.

Анализ климатических трендов показывает устойчивый рост среднегодовых температур и увеличение частоты экстремально жарких дней [2]. Для Ярославской области за последние 60 лет среднегодовая температура выросла на 3–4 °С, число экстремально жарких дней увеличилось на 40 %, а объем твердых осадков – на 20 %. Для большепролетных купольных покрытий это приводит к трем критическим последствиям: летнему перегреву помещений, образованию конденсата на внутренней поверхности остекления и лавинообразному накоплению снега и наледи на покрытии.

Существующие статические и динамические фасадные системы ориентированы преимущественно на регулирование инсоляции и практиче-

ски не учитывают вопросы конденсатообразования, антиобледенения и специфику большепролетных светопрозрачных покрытий сложной геометрии [3, 4]. Анализ нормативно-технической базы (СП 50.13330, СП 118.13330, СП 60.13330, ГОСТ Р 57792-2017, ГОСТ 33125-2014) выявил противоречия между документами: СП 50.13330 требует установки солнцезащитных устройств только при июльской температуре выше 21 °С, тогда как СанПиН – по ориентации фасадов независимо от температуры [5]. Отмечено отсутствие в нормативах методик количественной оценки солнечного фактора для динамических систем и требований к автоматическому управлению.

**Цель исследования** – разработка и обоснование применения динамического смарт-остекления для сооружений с большепролетными конструкциями покрытия, обеспечивающего адаптацию к климатическим воздействиям (инсоляция, перегрев, конденсат, снеговые нагрузки) на примере физкультурно-оздоровительного комплекса.

### Методы

**Объект исследования** – физкультурно-оздоровительный комплекс в г. Рыбинске Ярославской области, II климатический район, подрайон ПВ по СП 131.13330.2025 (рис. 1). Здание в осях имеет размеры 46,5 × 60,9 м. Общая высота – 12,8 м. Корпус с бассейном имеет купольное светопрозрачное покрытие пролетом 32 м. Несущие балки – клееные деревянные сечением 400 × 800 мм. Угол наклона остекления меняется от 10 до 36° [6].



Рис. 1. Конструктивные решения и общий вид проектируемого физкультурно-оздоровительного комплекса (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Structural solutions and general view of the designed sports and recreation centre (illustration by the authors)

Для экспериментальных исследований в климатической камере НИИСФ РААСН был изготовлен

натурный фрагмент-прототип купольного покрытия размерами 4,2 × 2,5 м. Несущий каркас прототипа выполнен из клееной древесины сосны

по ГОСТ 20850-2014, влажностью  $12 \pm 2 \%$ . Стеклопакет двухкамерный: 6 мм закаленное стекло – 16 мм аргон 90 % – 6 мм низкоэмиссионное стекло  $\varepsilon = 0,04$  – 16 мм аргон 90 % – 8 мм триплекс. Дистанционная рамка – алюминиевая с терморазрывом из нержавеющей стали.

Испытания проводились в климатической камере НИИСФ РААСН при перепаде температур  $46 \text{ }^\circ\text{C}$ : в теплой зоне поддерживалась температура  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  нормативные условия для спортивных залов, в холодной –  $-26 \text{ }^\circ\text{C}$  расчетная температура для г. Рыбинска. Режим контролировался до достижения стационарного теплового состояния [7].

Для измерений плотности теплового потока и температуры использовались приборы «ИТП-МГ4.03Х(У) Поток» – термопары и тепломеры, подключенные к автоматической системе сбора данных. Датчики фиксировались на различных участках стеклопакета – центральной части, зон примыкания к стойкам и ригелям, участках деревянного каркаса. Дополнительно проводилась тепловизионная съемка камерой Fluke Ti400 [8].

Приведенное термическое сопротивление стеклопакета и всей конструкции определялось по формуле:

$$R_{\text{пр}} = \frac{\sum A}{\sum R_{\text{одн}}},$$

где  $A$  – площадь отдельных участков,  $R_{\text{одн}}$  – термическое сопротивление однородного участка.

Методика расчета затенения и алгоритм управления. Для широты  $58^\circ$  с.ш. построена солнечная карта нежелательной радиации с определением периодов перегрева с 22 мая по 22 июля, с 9 до 18 ч. Для каждой зоны купола построены картограммы затенения [9].

Разработан интегральный алгоритм управления приводами шторок на основе взвешенной суммы трех показателей:

$$U = \omega_1 \times \frac{Q_{\text{тек}}}{Q_{\text{макс}}} + \omega_2 \times \frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{макс}}} + \omega_3 \times \frac{PVM}{PVM_{\text{макс}}},$$

где  $Q_{\text{тек}}$  – текущая солнечная радиация,  $T$  – отклонение температуры от комфортной,  $PVM$  – индекс теплового комфорта. Алгоритм реализован на языке Python [10].

Расчет точки росы с учетом температурного градиента. Помещение с бассейном высотой 12 м разделено на 6 зон по 2 м с градиентом температуры  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ . Температура воздуха изменяется от  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  в нижней зоне до  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  в пиковой зоне. Для каждой зоны рассчитаны давление насыщенного водяного пара  $E$ , парциальное давление  $e$  и температура точки росы по методике [11]. Условие конденсации: температура точки росы не должна превышать температуру на внутренней поверхности остекления.

#### Результаты и обсуждение

По результатам испытаний приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета составило  $R_{\text{пр}} = 0,82 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , что почти в 1,5 раза превышает нормативное требование для II климатического района  $0,56 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Приведенное сопротивление теплопередаче всей конструкции –  $R_0 = 0,92 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

Однако тепловизионная съемка выявила критическую зону: по контуру стекла температура внутренней поверхности упала до  $10,8\text{--}12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , тогда как в центре составляла  $14\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$ , что обусловлено пониженным термическим сопротивлением в зоне прилегания к элементам каркаса и локальными «мостиками холода» в узлах примыкания [12].

Верификация экспериментальных данных с численным моделированием в программном комплексе Window 7.0 показала расхождение не более  $1,2 \%$  по приведенному сопротивлению теплопередаче и  $2,1 \%$  по температуре внутренней поверхности, что подтверждает достоверность результатов. Оценка погрешностей измерений: для плотности теплового потока – не более  $5 \%$ , для температуры –  $1\text{--}2 \%$ .

Построенная солнечная карта нежелательной радиации для широты  $58^\circ$  с.ш. позволила определить периоды максимальной инсоляции. Коэффициент перфорации шторок  $f_p = 0,3$  с перфорацией 2 мм с шагом 10 мм обеспечивает коэффициент светопропускания системы  $\tau_e = 0,195$  при  $\tau_{\text{стекла}} = 0,65$ , что дает снижение тепlopоступлений на  $80 \%$  по сравнению с открытым остеклением. Даже при полностью закрытых шторках уровень естественной освещенности внутри помещения составляет  $1950 \text{ Лк}$ , что значительно выше минимально допустимого для спортзалов  $200 \text{ Лк}$  по СП 52.13330.2016.

Интегральный алгоритм управления показал снижение числа циклов «открытие-закрытие» с 3600 до 1080 за сезон – в 3,3 раза, что увеличивает расчетный ресурс приводов с 5 до 15 лет. Алгоритм протестирован на статистических данных по г. Рыбинску за 2023–2024 гг. и показал снижение тепlopоступлений на  $40 \%$  по сравнению с нерегулируемым остеклением.

Расчет точки росы с учетом температурного градиента по высоте помещения показал, что температура точки росы изменяется от  $21,4$  до  $26,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пересчет экспериментальных данных на расчетные условия по ГОСТ 26254-84 показал, что во всех зонах расчетная температура внутренней поверхности  $19,4\text{--}25,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ниже температуры точки росы  $21,4\text{--}26,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , следовательно, образование конденсата неизбежно.

Предложено решение – локальный контурный электрообогрев стеклопакета по периметру нагревательным кабелем. Обогрев только краевой зоны, где зафиксированы минимальные температуры  $10,8\text{--}12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , позволяет повысить температуру в критической области на  $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$  без существенных энергозатрат и без нарушения светопропускания центральной части (рис. 2).

Исследование влияния угла наклона остекления показало, что при изменении от  $36^\circ$  до  $10^\circ$  сопротивление теплопередаче падает на  $18 \%$ . Коэффициент уменьшения сопротивления теплопередаче изменяется от  $0,9$  при  $36^\circ$  до  $0,82$  при  $10^\circ$ . Поверхность купола разделена на 6 зон излома, для каждой рассчитано сопротивление теплопередаче от  $0,738$  до  $0,67 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Впервые количественно доказано, что геометрия купола напрямую влияет на энергоэффективность.

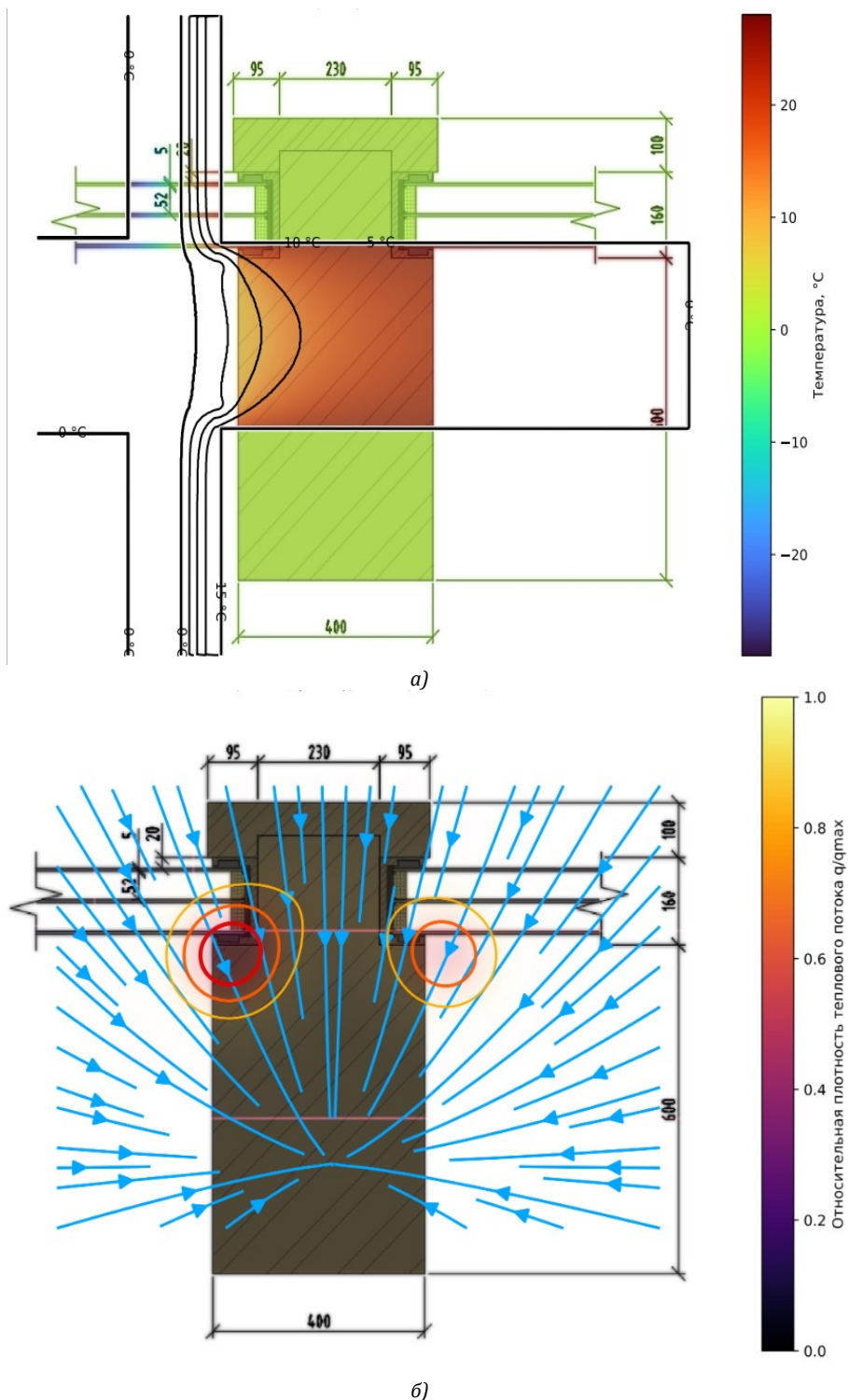


Рис. 2. а) температурное поле узла сопряжения стеклопакета с клееной деревянной балкой  $\lambda$  древесины = 0,18 Вт/(м °С);  $R$  стеклопакета  $R = 0,85 \text{ м}^2 / \text{°С}/\text{Вт}$ ; б) карта относительной плотности теплового потока  $q/q_{max}$  с выделением зон повышенных теплопотерь (иллюстрации авторов)

Fig. 2. a) temperature field of the glazing unit connection node with glued laminated timber beam (wood thermal conductivity  $\lambda = 0.18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C})$ ; glazing unit thermal resistance  $R = 0.85 \text{ m}^2\cdot\text{°C}/\text{W}$ ;

b) map of relative heat flux density  $q/q_{max}$  highlighting areas of increased heat loss (illustration by the authors)

Комплексное применение динамической солнцезащиты позволило снизить теплопоступления в летний период на 62 %. Интегральный показатель энергоэффективности IEER = 41 %, что соответствует наивысшему классу энергоэффективности A++ по ГОСТ Р 51379-2019 [13].

Сравнение с аналогами: годовое энергопотребление снижено с 110 до 45 кВт·ч/м<sup>2</sup> – экономия 60 %. Эксплуатационные расходы – 50 руб./м<sup>2</sup> против 200 – в 4 раза меньше. Срок службы деревянных конструкций увеличен с 15–20 до 25–30 лет.

Технико-экономическое обоснование: дополнительные капитальные затраты – 78,5 млн руб., всего 0,59 % от стоимости объекта. Годовой экономический эффект – 11,5 млн руб. Срок окупаемости – 6,8 лет.

Разработана автоматическая противообледенительная система светопрозрачного покрытия купола (АПОССПК) – стационарный технический ком-

плекс для автоматического нанесения жидкого противогололедного реагента на участки кровли. Система работает превентивно на основе данных автоматической измерительной станции «ЛУЧ», осуществляющей непрерывный мониторинг температуры, влажности, осадков и прогнозирование состояния покрытия (рис. 3).

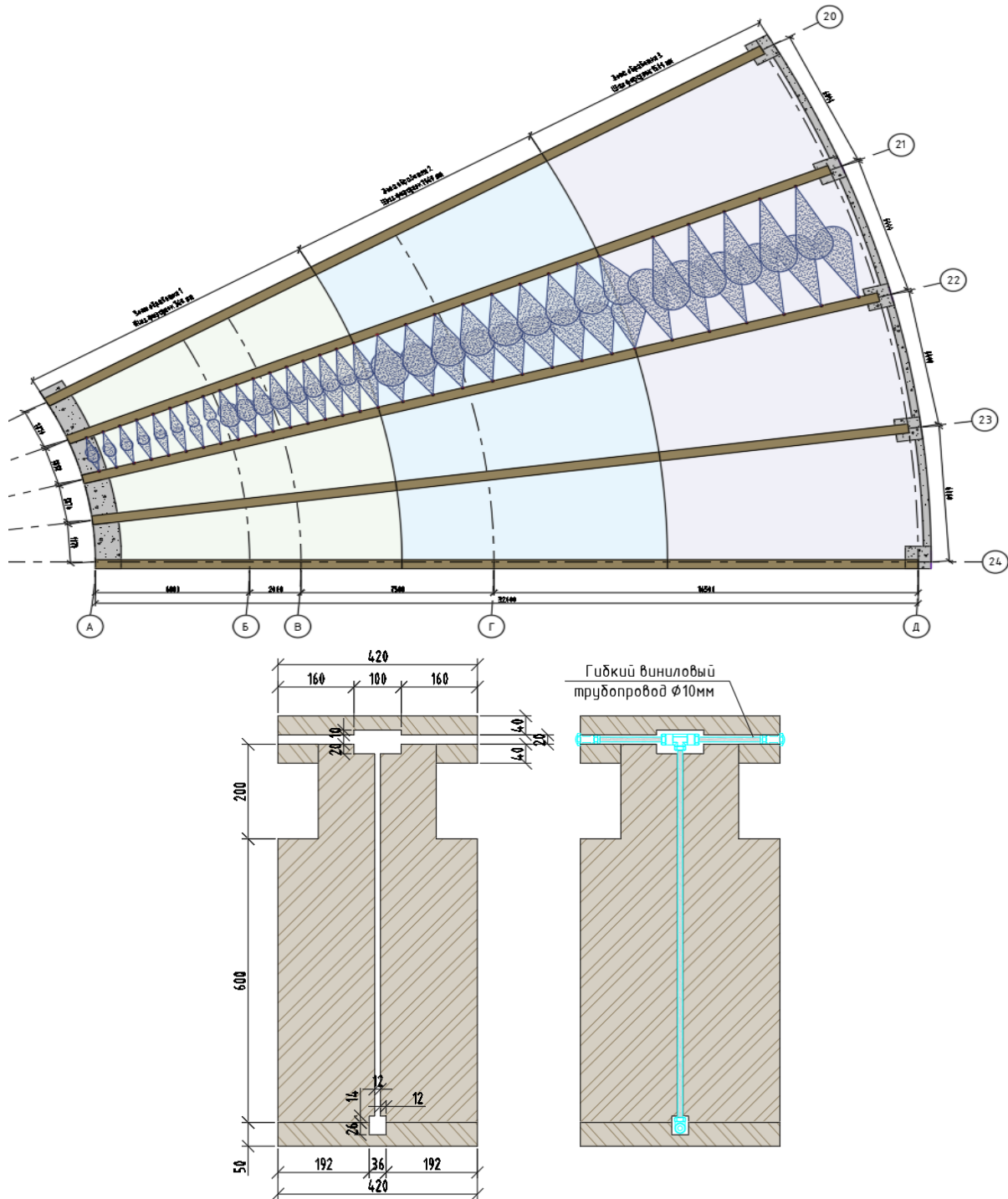


Рис. 3. Автоматическая противообледенительная система светопрозрачного покрытия купола (иллюстрация авторов)  
Fig. 3. Automatic anti-icing system for the translucent dome covering (illustration by the authors)

### Заключение

В ходе исследования разработана и экспериментально обоснована комплексная технология интел-

лектуального управления светопрозрачными покрытиями большепролетных сооружений, объединяющая динамическую солнцезащиту, контурный

электрообогрев и автоматическую противообледенительную систему.

#### Основные результаты:

1) экспериментально определено приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета  $R_{пр} = 0,82 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и всей конструкции  $R_o = 0,92 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что превышает нормативные требования;

2) тепловизионная съемка выявила критические зоны конденсатообразования по контуру стеклопакета  $10,8\text{--}12,5 \text{ °C}$ , что стало основой для разработки системы локального контурного электрообогрева;

3) разработана методика зонного расчета конденсата с учетом температурного градиента по высоте помещения  $0,5 \text{ °C}/\text{м}$  – первая для купольных покрытий;

4) впервые для широты  $58^\circ$  с.ш. построена солнечная карта нежелательной радиации и создан интегральный алгоритм управления, обеспечивающий снижение числа циклов переключений в 3,3 раза;

5) получены новые значения удельных линейных теплопотерь для узла «стеклопакет – деревянная балка», ранее отсутствовавшие в нормативной литературе;

6) доказано влияние угла наклона остекления  $10\text{--}36^\circ$  на сопротивление теплопередаче – снижение до 18 %;

7) технико-экономическое обоснование подтвердило экономическую эффективность: снижение энергопотребления на 60 %, класс А++, окупаемость 6,8 лет.

Результаты приняты НИИСФ РААСН для актуализации нормативной базы; проектная часть внедрена в «СпецПроектРеконструкция»; система АПО-ССПК принята компанией «СОВТРАНСТЕХ». Разработанная технология может быть типизирована для спортивных, выставочных и транспортных сооружений с большепролетными светопрозрачными покрытиями. Проект является ПОБЕДИТЕЛЕМ Всероссийского инженерного конкурса выпускных квалификационных работ ВИК ВКР 2026 г. по направлению «СТРОИТЕЛЬСТВО».

#### Список литературы

1. Наймушина В. О. Адаптивные фасадные системы: тенденции применения // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – № 28. – С. 7–11.
2. Шмаров И. А., Земцов В. А., Земцов В. В., Козлов В. А. Обновленная методика расчета продолжительности инсоляции помещений жилых и общественных зданий и территорий по инсоляционным графикам // Жилищное строительство. – 2018. – № 6. – С. 24–31.
3. Наймушина В. О. Типология адаптивных фасадных систем // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – № 28. – С. 12–16.
4. Генералова Е. М. Роль фасадных систем в борьбе за энергоэффективность // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2017. – № 8. – С. 48–53.
5. Куприянов В. Н. К расчету величины солнечного фактора солнцезащитных устройств // Жилищное строительство. – 2021. – № 11. – С. 40–45. – DOI: 10.31659/0044-4472-2021-11-40-45.
6. Пинус Б. И., Кажарский В. В., Корнеева И. Г. Железобетонные и каменные конструкции: Расчет и конструирование элементов перекрытий многоэтажного здания. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – 98 с.
7. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973.
8. Василенко А. Н., Спивак И. Е. Технологические процессы в строительстве : учебно-методическое пособие. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. – 76 с.
9. Земцов В. А., Шмаров И. А., Земцов В. В., Козлов В. А. Методика расчета продолжительности инсоляции помещений жилых и общественных зданий и территорий по солнечным картам // Жилищное строительство. – 2018. – № 7. – С. 32–37.
10. Золина Т. В., Купчикова Н. В. Цифровые кейсы как инструмент цифровой трансформации проектной деятельности // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 4(46). – С. 86–91. – DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-86-91.
11. Купчикова Н. В., Баталов М. А. Цифровизация в реализации инвестиционно-строительного проекта крытого горнолыжного комплекса «Ледяное сердце» с масштабированием в регионы Российской Федерации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 1(47). – С. 32–37. – DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-32-37.
12. Золина Т. В., Купчикова Н. В., Кулебянов А. В. Конструктивные решения общественного сооружения при террористических угрозах на примере реализации инвестиционно-строительного проекта // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 2 (48). – С. 118–122. – DOI: 10.52684/2312-3702-2024-48-2-118-122.
13. ГОСТ Р 51379-2019. Энергосбережение. Энергетический паспорт потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019.
14. Generalova E. M., Generalov V. P. Special Features and Development Prospects of Social Rental Housing in Russia // Architectural, Construction, Environmental and Digital Technologies for Future Cities. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022. – Vol. 227. – P. 363–374. – DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5\_28.
15. Stec W., van Paassen A. H. C. Definition of the thermal comfort and energy performance of a building with dynamic solar shading // Energy and Buildings. – 2007. – Vol. 39, Iss. 6. – P. 673–681.

#### References

1. Naymushina V. O. Adaptivnye fasadnye sistemy: tendentsii primeneniya [Adaptive façade systems: application trends]. *Prioritetnie nauchnie napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority Scientific Directions: from Theory to Practice]. 2016, no. 28, pp. 7–11.
2. Shmarov I. A., Zemtsov V. A., Zemtsov V. V., Kozlov V. A. Obnovlennaya metodika rascheta prodolzhitel'nosti insolyatsii pomeshchenii zhilikh i obshchestvennykh zdaniy i territorii po insolyatsionnim grafikam [Updated methodology for calculating the duration of insolation of residential and public buildings and territories based on insolation graphs]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018, no. 6, pp. 24–31.
3. Naymushina V. O. Tipologiya adaptivnykh fasadnykh sistem [Typology of adaptive façade systems]. *Prioritetnie nauchnie napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority Scientific Directions: from Theory to Practice]. 2016, no. 28, pp. 12–16.

4. Generalova Ye. M. Rol fasadnikh sistem v borbe za energoeffektivnost [The Role of Facade Systems in the Fight for Energy Efficiency]. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, kondi-tsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika* [AVOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. 2017, no. 8, pp. 48–53.
5. Kupriyanov V. N. K raschetu velichini solnechnogo faktora solntsezashchitnikh ustroystv [On calculating the solar factor of sun protection devices]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021, no. 11, pp. 40–45. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-11-40-45.
6. Pinus B. I., Kazharsky V. V., Korneeva I. G. *Zhelezobetonnii i kamennii konstruksii: Raschet i konstruirovaniye elementov perekritii mnogoetazhnogo zdaniya* [Reinforced Concrete and Masonry Structures: Calculation and Design of Floor Elements of a Multi-Story Building]. Irkutsk: Irkutskii natsionalnii issledovatel'skii tekhnicheskii universitet; 2023. 98 p.
7. Fokin K. F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdanii* [Construction thermal engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow: Stroyizdat; 1973.
8. Vasilenko A. N., Spivak I. Ye. *Tekhnologicheskie protsessy v stroitel'stve* [Technological processes in construction]. Voronezh: Voronezhskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet; 2023. 76 p.
9. Zemtsov V. A., Shmarov I. A., Zemtsov V. V., Kozlov V. A. Metodika rascheta prodolzhitel'nosti insolyatsii pomeshchenii zhi-lich i obshchestvennykh zdaniy i territoriy po solnechnym kartam [Methodology for calculating the duration of insolation of premises of residential and public buildings and territories using solar maps]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018, no. 7, pp. 32–37.
10. Zolina T. V., Kupchikova N. V. Tsifrovie keisi kak instrument tsifrovoy transformatsii proektnoi deyatelnosti [Digital cases as a tool for digital transformation of project activities]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 86–91. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-86-91.
11. Kupchikova N. V., Batalov M. A. Tsifrovizatsiya v realizatsii investitsionno-stroitel'nogo proekta kritogo gorno-lizhnogo kompleksa «Ledyanoe serdtse» s masshtabirovaniem v regione Rossiiskoi Federatsii [Digitalization in the implementation of the investment and construction project of the indoor ski resort "Ice Heart" with scaling to the regions of the Russian Federation]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 1 (47), pp. 32–37. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-32-37.
12. Zolina T. V., Kupchikova N. V., Kulebyanov A. V. Konstruktivnie resheniya obshchestvennogo sooruzheniya pri terrori-sticheskikh ugrozakh na primere realizatsii investitsionno-stroitel'nogo proekta [Structural Solutions for Public Facilities under Terrorist Threats: An Example of an Investment and Construction Project]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 2 (48), pp. 118–122. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-48-2-118-122.
13. *GOST R 51379-2019. Energoberezhenie. Energeticheskii pasport potrebitelya toplivno-energeticheskikh resursov. Osnovnie polozeniya* [Energy Saving. Energy Passport for a Consumer of Fuel and Energy Resources. Basic Provisions]. Moscow: Standartinform; 2019.
14. Generalova E. M., Generalov V. P. Special Features and Development Prospects of Social Rental Housing in Russia. *Architectural, Construction, Environmental and Digital Technologies for Future Cities*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2022, vol. 227, pp. 363–374. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5\_28.
15. Stec W., van Paassen A. H. C. Definition of the thermal comfort and energy performance of a building with dynamic solar shading. *Energy and Buildings*. 2007, vol. 39, iss. 6, pp. 673–681.

© Н. П. Умнякова, Н. В. Купчикова, К. В. Любавина

#### Ссылка для цитирования:

Умнякова Н. П., Купчикова Н. В., Любавина К. В. Разработка и верификация активно регулируемой фасадной системы для физкультурно-оздоровительного комплекса с купольным светопрозрачным покрытием // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 75–81.

УДК 699.812.2

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-81-86

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛЕГКОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

*В. С. Федоров, Д. Р. Асмаловский, В. Е. Левитский*

**Федоров Виктор Сергеевич**, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0906-716X; e-mail: fvs\_skzs@mail.ru;

**Асмаловский Даниил Романович**, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация;

**Левитский Валерий Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Объект исследования – легкий высокопрочный бетон плотностью 1950–1980 кг/м<sup>3</sup> и прочностью на сжатие 62 МПа. Актуальность – недостаточная изученность теплофизических свойств бетонов необходимых для расчетной оценки огнестойкости конструкций. Ранее авторами была опубликована программа планирования эксперимента [21]; настоящая работа представляет результаты ее реализации. Метод – определение коэффициента теплопроводности при стационарном тепловом режиме на десяти образцах-плит (250 × 250 × 50 мм) с использованием измерителя ИТП-МГ4. Результаты – среднее значение теплопроводности составило 0,946 Вт/(м·К), диапазон 0,880–1,038 Вт/(м·К), коэффициент вариации – 5,2 %, 95%-й доверительный интервал – 0,911–0,981 Вт/(м·К). Установлено статистически значимое снижение теплопроводности на 21 % относительно тяжелого бетона (1,2 Вт/(м·К)) при сохранении высокой прочности. Выводы: легкий высокопрочный бетон занимает промежуточное положение между конструкционным тяжелым и теплоизоляционным керамзитобетоном; полученные данные могут служить основой для расчетов огнестойкости и развития нормативной базы.