

DOI 10.15826/rjct.2025.2.003

УДК 699.84:697.16:681.3.06

И. Д. Ржаников

Тюменский Индустриальный Университет, г. Тюмень, Россия

e-mail: ilyarzhana@gmail.com

АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕНА В ОКОННОМ БЛОКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК TEMPER 3D V 6.14

Аннотация. Сформулирована проблема проектирования светоотражающих ограждающих конструкций при стимулировании поиска решений проблем, связанных с энергоэффективностью, со стороны правительства. Приведены предмет и объект исследования, а также цель применения программ для анализа теплообмена в узлах оконных блоков. Определены особенности теплообмена через узлы оконных блоков, в числе которых особенности физические и конструктивные. Приведены нормативные требования к расчёту оконных блоков. Представлены иностранные и отечественные программные комплексы по теплотехническому моделированию и обоснован выбор применяемой программы. Поэтапно объяснено создание 3D модели в программном комплексе Temper 3D v. 6.14. Рассмотрено две модели узлов оконных блоков с применением разных утеплителей и слоёв ограждающих конструкций, выбранных для улучшения показателей энергоэффективности здания, с заданием граничных условий актуальных для города Тюмень. Проанализировав результаты, были получены сведения о эффективности применённых технологий по утеплению и доказана важность внедрения программных комплексов трёхмерного моделирования, для точного определения температур в узлах оконных блоков и рассмотрению мер по оптимизации их конструкций.

Ключевые слова: энергоэффективность, тепловая защита, трёхмерное моделирование, температурное поле, оконный блок, теплопотери, инновационные технологии, теплообмен

Для цитирования: Ржаников И. Д. Анализ теплообмена в оконном блоке с применением ПК TEMPER 3D V 6.14 // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – № 2. – 1102003. – DOI 10.15826/rjct.2025.2.003.

I. D. Rzhanikov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

e-mail: ilyarzhana@gmail.com

ANALYSIS OF HEAT EXCHANGE IN A WINDOW BLOCK USING PC TEMPER 3D V 6.14

Abstract. The problem of designing reflective enclosing structures is formulated while stimulating the search for solutions to problems related to energy efficiency on the part of the government. The subject and object of the study are given, as well as the purpose of using programs to analyze heat transfer in the nodes of window blocks. The features of heat exchange through the nodes of the window blocks are determined, including physical and structural features. The regulatory requirements for the calculation of window blocks are given. Foreign and domestic software complexes for thermal engineering modeling are presented

and the choice of the applied program is justified. The creation of a 3D model in the Temperature 3D v. 6.14 software package is explained in stages. Two models of window block assemblies using different insulation materials and layers of enclosing structures selected to improve the energy efficiency of the building are considered, with the setting of boundary conditions relevant to the city of Tyumen. After analyzing the results, information was obtained on the effectiveness of the applied insulation technologies and the importance of implementing three-dimensional modeling software systems for accurately determining temperatures in the nodes of window blocks and considering measures to optimize their structures was proved.

Key words: energy efficiency, thermal protection, 3D modeling, temperature field, window block, heat loss, innovative technologies, heat exchange

For citation: Rzhanikov I. D. (2025) Analysis of heat exchange in a window block using PC TEMPER 3D V 6.14. Russian Journal of Construction Science and Technology. 11(2). 1102003. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2025.2.003.

1. Введение

В настоящее время политика правительства Российской Федерации, направленная на увеличение энергоэффективности зданий, вынуждает искать решения проблем в области сохранения тепла в градостроительной сфере. Актуальные документы доказывают факт наличия проблем [1]. Углубляясь в проектирование ограждающих конструкций зданий и сооружений, можно отметить малое внимание к деталям расчёта оконных и балконных блоков, что чревато нарушением нормативных требований к температуре с внутренней стороны ограждающих конструкций или потере таковых качеств через непродолжительное время эксплуатации.

Цель применения программ для трехмерного моделирования температурных полей оконных блоков заключается в обеспечении точного анализа теплообмена, что позволяет оптимизировать конструкции окон для повышения их энергоэффективности и снижения теплопотерь, а также создать комфортные условия для пользователей, минимизируя холодные зоны и конденсацию влаги [2–4].

Предмет исследования – это анализ процессов теплообмена в оконном блоке с применением программного комплекса TEMPER 3D версии 6.14, включая моделирование температурных по-

лей и оценку параметров теплоизоляции.

Объект исследования – это оконный блок как элемент строительной конструкции, характеризующийся процессами теплообмена между внутренней и внешней средой [5–7].

2. Особенности теплопередачи через оконные блоки

Передача тепла через оконные блоки происходит преимущественно за счет трех механизмов: кондукции (прямой перенос тепла через материалы), конвекции (перемещение тепла воздушными потоками внутри и снаружи) и излучения (теплообмен между поверхностями путем инфракрасного излучения). В оконных конструкциях эти процессы взаимодействуют, что влияет на общую энергоэффективность здания. Сложность расчёта подобных конструкций заключается в этих трёх механизмах и их одновременном действии, поэтому зачастую при проектировании ограждающих конструкций не учитываются многие параметры, которые могут быть учтены при моделировании оконного блока в программном комплексе [8–10].

Важной особенностью самих оконных блоков является их сложная структура: наличие многослойных стеклопакетов с разными наполнителями, рамы окон из разных материалов, многочис-

ленные «мосты холода», возникающие в местах монтажных швов и оконных откосов, солнечное излучение, нагревающее помещение через данную ограждающую конструкцию [11].

Также необходимо отметить частые нарушения технологии монтажа оконных блоков и утепления монтажных стыков, что ведёт к раннему износу конструкции с точки зрения сохранения тепла в помещении здания.

3. Нормативные требования

В нормативных документах [12] не описана отдельная методика определения приведённого сопротивления теплопередаче для светоотражающих конструкций. Предлагается методика расчёта по приложению Е [12] для любого фрагмента теплозащитной оболочки здания учитывающая линейные неоднородности, удельные потери тепла через неоднородности, количество точечных неоднородностей, удельные потери тепла через точечную неоднородность, площадь плоского элемента и коэффициент теплопередачи однородной части.

Сопротивление теплопередаче оконных блоков согласно [13] находится в результате исследований центральной части стеклопакета в аккредитованных лабораториях.

4. Программный комплекс

Рынок имеет достаточное количество программ для теплотехнических расчётов зданий как иностранных, так и российских.

Иностранные программы в основе представлены программами THERM и WINDOW (Lawrence Berkeley National Laboratory, США), которые позволяют выполнять 2D/3D-моделирование тепловых потоков в окнах, стенах и мостах холода. Учитывают конвекцию, радиацию и кондукцию.

COMSOL Multiphysics (COMSOL AB, Швеция) универсальный многодисциплинарный симулятор: включает мо-

дуль для теплопередачи (кондукция, конвекция, радиация) в 3D-моделях окон и зданий. Позволяет моделировать нестационарные процессы и интеграцию с CFD. Подходит для сложных геометрий.

Российские ПК представлены ELCUT – это ПК для моделирования физических процессов, разработанный компанией "Тор" (TOR Software, г. Санкт-Петербург). Он основан на методе конечных элементов (FEM) и предназначен для решения задач в электромагнетизме, теплопередаче, механике и гидродинамике а также оснащён данными для расчёта теплопередачи в окнах.

TEMPER 3D [14] – это уникальная российская программа, разработанная доцентом Федоровым Сергеем Витальевичем в СибАДИ, которая предназначена для расчета трёхмерных температурных полей и приведенного сопротивления ограждающих конструкций зданий и сооружений. В России аналогов такой программе нет, так как остальные программы рассматривают только плоские и стационарные конструкции.

Выбор изначально был между российскими ПК в рамках популяризации политики импортозамещения в Российской Федерации.

Окончательное решение было за TEMPER 3D ввиду его специализации на оконных конструкциях и мостиках холода с упрощённым интерфейсом без необходимости дополнительных настроек. Простота обучения по видеороликам автора программы, находящихся в открытом доступе.

5. Моделирование

5.1. Исходные данные

Исходными данными для моделирования принимается любой оконный блок или его узел. Необходимо знать состав ограждающей конструкции стен и формулу остекления оконного блока.

Работу в программе можно разделить на 4 этапа:

1. Двухмерное моделирование.
2. Задание граничных условий.
3. Задание коэффициентов теплопроводности.

4. Расчёт и обработка полученных данных.

1. Моделирование объекта (рис. 1). Моделирование начинается на плоскости по осям x и y , далее задаётся «глубина» по оси z .

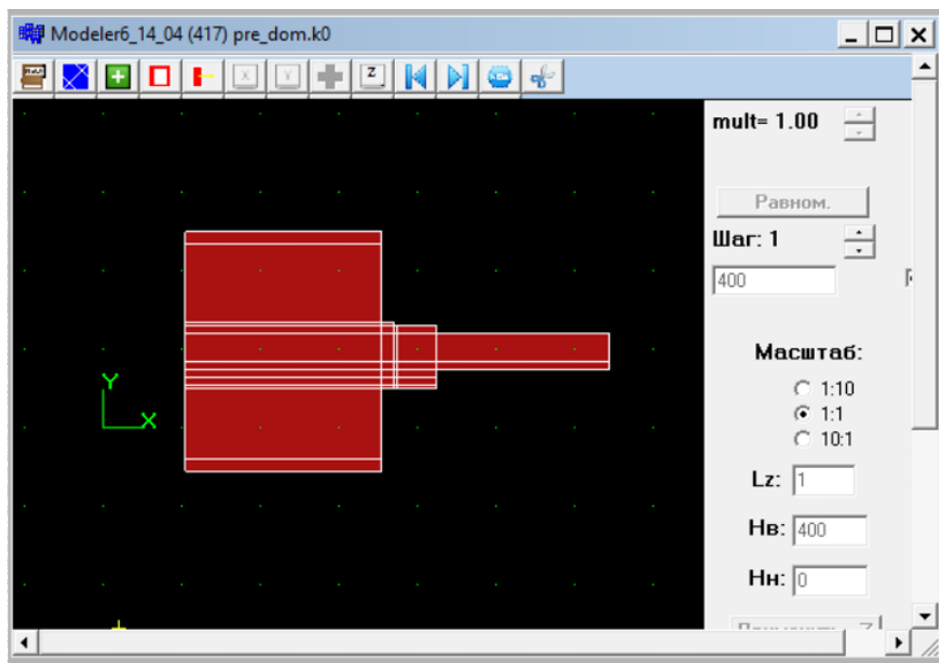


Рис. 1. Моделирование оконного блока

2. Задание граничных условий (рис. 2). Граничные условия задаются на внешней и внутренней стороне ограждающей конструкции, наружная температура задаётся в соответствии с [15] температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 для города Тюмень эта величина составляет -35°C , температура на внутренней поверхности задаётся в соответствии с [12] для расчёта была принята жилая комната в холодный период года при температуре холодной пятидневки обеспеченностью $0,92 \geq 31^{\circ}\text{C}$ её величина равна 21°C . После этого задаётся коэффициент теплоотдачи ограждающей конструкции для внутренней поверхности стены в соответствии с [12] он равен $8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ и внутренней стороне ограждающей конструкции, наружная

температура задаётся в соответствии с [15] температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 для города Тюмень эта величина составляет -35°C , температура на внутренней поверхности задаётся в соответствии с [12] для расчёта была принята жилая комната в холодный период года при температуре холодной пятидневки обеспеченностью $0,92 \geq 31^{\circ}\text{C}$ её величина равна 21°C . После этого задаётся коэффициент теплоотдачи ограждающей конструкции для внутренней поверхности стены в соответствии с [12] он равен $8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$, для окна $8,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$. На внешней стороне для стены и окна в соответствии с СП 50.13330.2024 значения равно $23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$.

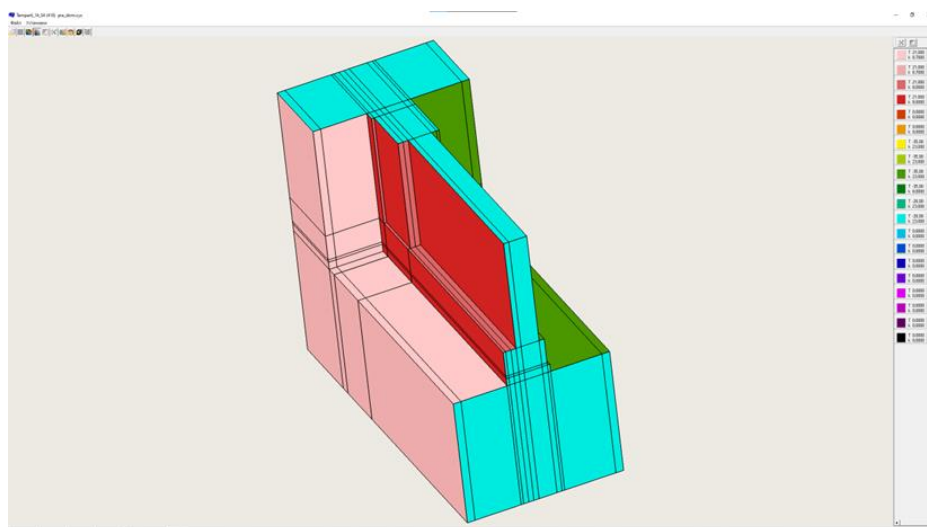


Рис. 2. Задание граничных условий

3. Задание коэффициентов теплопроводности (рис. 3). Коэффициент теплопроводности задаётся по слоям

блока в соответствии с [12] в зависимости от материала слоя.

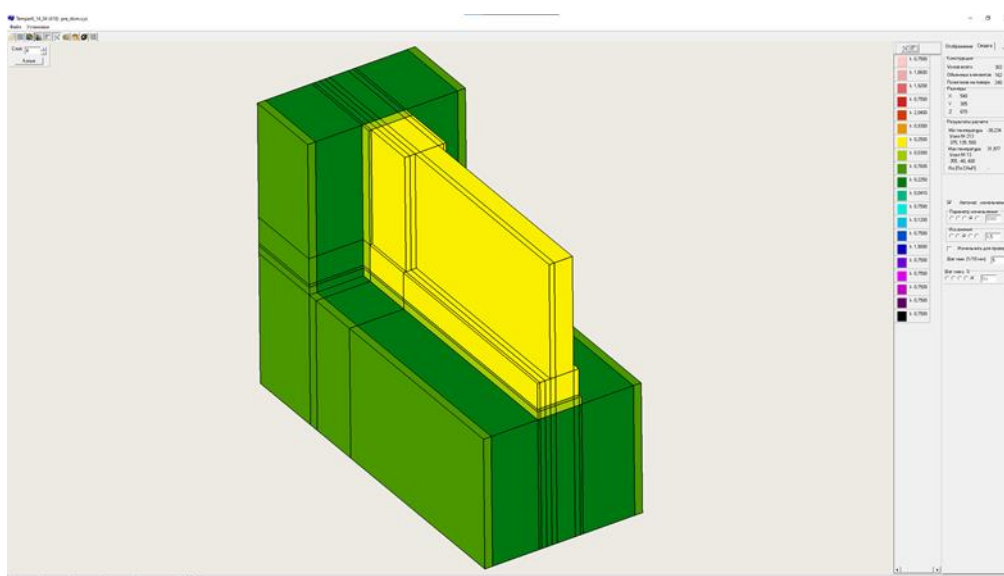


Рис. 3. Задание коэффициентов теплопроводности

4. Расчёт и обработка полученных данных (рис. 4). Расчёт выполняется на сервере программы. Обработка и визуальный осмотр полученных данных производится в отдельном модуле. Присутствует возможность определения температуры в любой точке модели, разные стили отображения температурных полей, а также наблюдение искажений.

Для наглядного сравнения показаний расчётов температурных полей до утепления и после будут созданы модели двух узлов оконных блока, отличающихся составом ограждающей конструкции. Это покажет важность применения программных комплексов в реальном проектировании или при реконструкции зданий и сооружений.

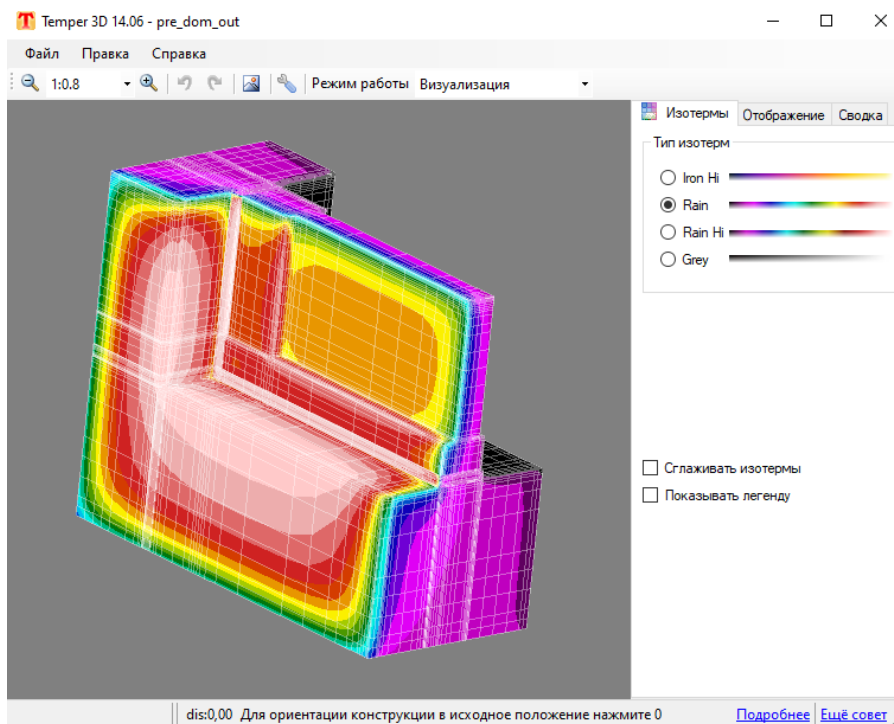


Рис. 4. Результат расчёта и температурные поля на модели

Для наглядного сравнения показаний расчётов температурных полей до утепления и после будут созданы модели двух узлов оконных блока, отличающихся составом ограждающей конструкции. Это покажет важность применения программных комплексов в реальном проектировании или при реконструкции зданий и сооружений.

5.2. Моделирование оконного блока до изменений

Исходными данными для моделирования принимается любой оконный блок или его узел. Необходимо знать состав ограждающей конструкции стен и формулу остекления оконного блока. Для моделирования взят оконный блок в многоквартирном жилом доме, расположенном по адресу г. Тюмень, ул. Флотская 15. Данные по составу ограждающих конструкций были получены из типовых серий и чертежей предоставленной управляющей компанией (рис. 5).

Ограждающая конструкция стены:

1. Цементно-песчаный раствор $\delta=10$ мм, $\lambda=0,76$ Вт/м·°С
2. Стеновая панель из ячеистого бетона $\delta=275$ мм, $\lambda=0,225$ Вт/м·°С
3. Цементно-песчаный раствор $\delta=15$ мм, $\lambda=0,76$ Вт/м·°С

Остекление оконного блока выполнено по формуле 4–16–4–16. Его эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле:

$$l_{ам,э\text{кв}} = \frac{b}{\left(R_0 - \frac{1}{\alpha_{в}} - \frac{1}{\alpha_{н}}\right)} = \frac{0,04}{\left(0,55 - \frac{1}{8,7} - \frac{1}{23}\right)} = 0,102 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{°С})}$$

где b – толщина стеклопакета, м;
 $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции;

$\alpha_{н}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции;

В качестве утеплителя применена монтажная пена с коэффициентом теплопроводности, $\lambda=0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{°С}}$ (рис. 6).



Рис. 5. Оконный блок жилого многоквартирного дома по ул. Флотская, 15

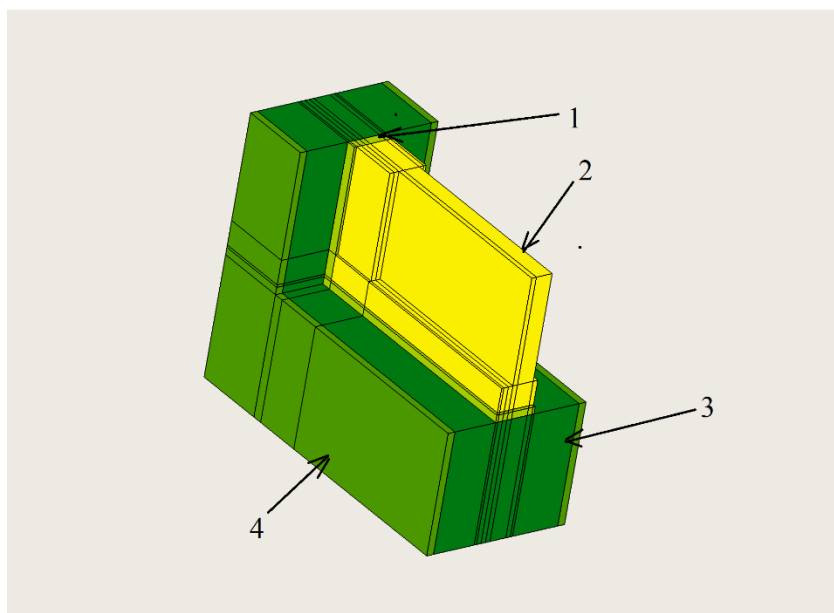


Рис. 6. Оконный блок до утепления: 1 – монтажная пена; 2 – оконный блок; 3 – ячеистый бетон; 4 – штукатурка

В результате расчёта температура в углу узла оконного блока составила 1,86 °С. Это означает что оконный блок

имеет проблемы с продуванием и в помещении около окна будет создаваться дискомфортный микроклимат. Также

важно отметить что эта температура ниже температуры точки росы определяемой при влажности 45% и внутренней температуре помещения 21 °С в со-

ответствии с [16] это будет чревато образованием конденсата в оконном блоке (рис. 7).

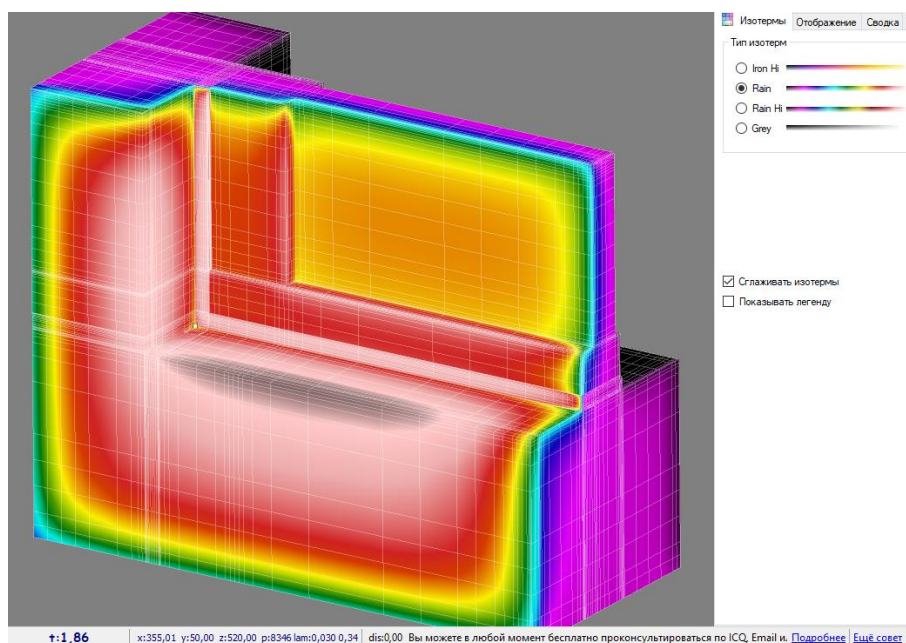


Рис. 7. Показания расчётов оконного блока до утепления

5.3. Моделирование оконного блока с утеплением

В качестве мер по утеплению применена технология мокрого фасада с использованием минераловатного утеплителя. Также было принято решение заменить монтажную пену инновационным утеплителем, так как у монтажной пены есть множество недостатков, такие как: выветривание, уничтожение птицами при неправильном монтаже, вымывание осадками. В качестве утеплителя будет выступать аэрогель.

Дополнительно к уже существующему слоям ограждающей конструкции стены добавляются:

1. Утеплитель $\delta = 80$ мм,
 $\lambda = 0,034 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$
2. Штукатурка минеральная F75
 $\delta = 10$ мм, $\lambda = 0,7 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$
3. Силикатная краска $\delta = 5$ мм,
 $\lambda = 0,8 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$

Теплотехнические свойства аэро-

геля были изучены [17] и коэффициент теплопроводности составил $\lambda = 0,013 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$. Что в теории позволит решить проблему продувания, а также ввиду простоты монтажа будут исключены ошибки при его выполнении (рис. 8–9).

При сравнении рисунков 7 и 9 видна разница температурных полей в углу узла оконного блока, проанализировав его можно сделать вывод о улучшении показателей при применении технологий по утеплению фасада здания. Температура, выявленная в углу оконного блока, выше температуры точки росы, что также важно отметить при проектировании ограждающих конструкций здания.

В результате проведенного исследования и сравнения расчётов температурных полей в программе Temper3D температура в углу оконного блока увеличилась в $1,86/8,3 = 4,5$ раза.

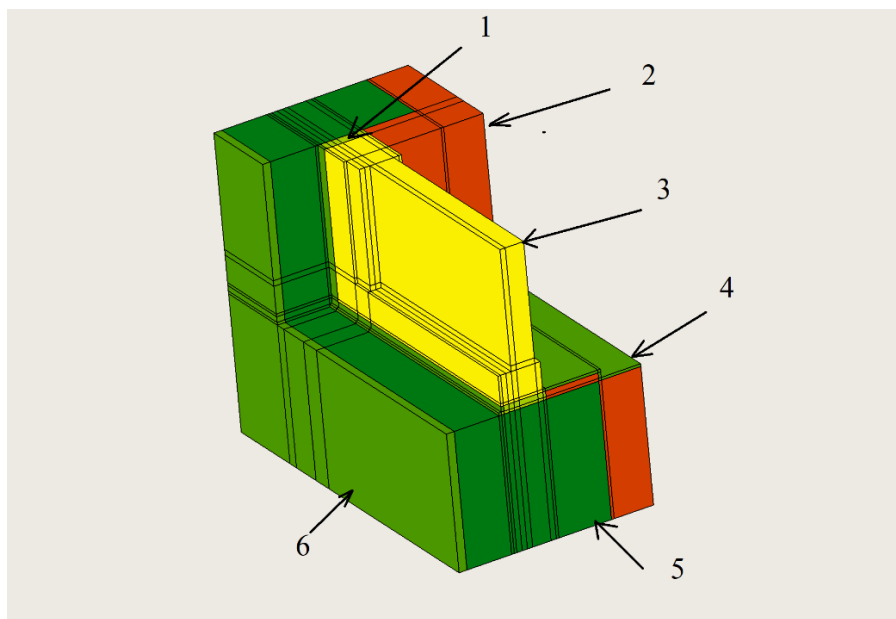


Рис. 8. Оконный блок после утепления: 1 – аэрогелевый утеплитель; 2 – минераловатный утеплитель; 3 – оконный блок; 4 – зашивка; 5 – ячеистый бетон; 6 – штукатурка.

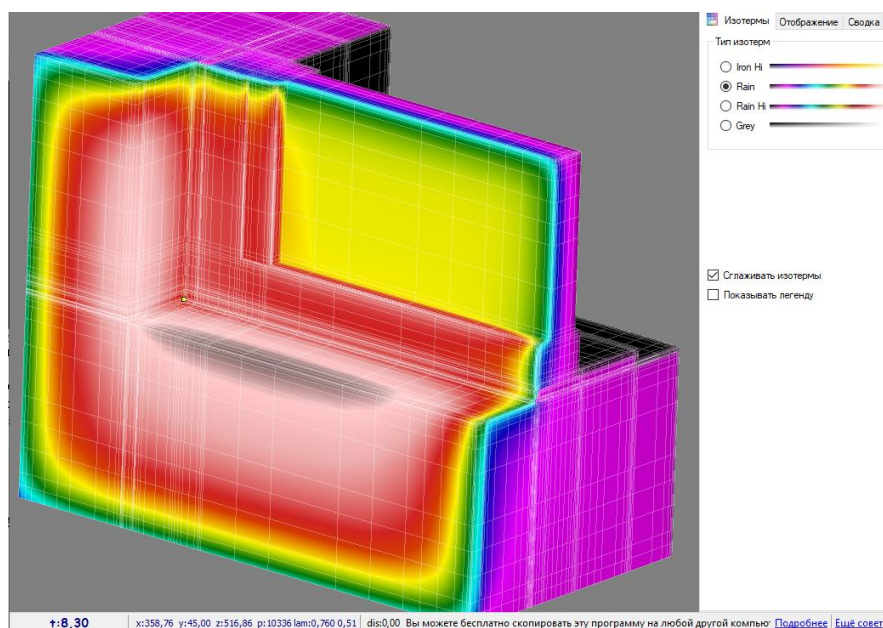


Рис. 9. Показания расчётов оконного блока после утепления

6. Заключение

Проведенная работа по изучению программ для трёхмерного теплотехнического моделирования теплообмена в оконном блоке доказывает необходимость более глубокого изучения вопроса сохранения тепла в узлах оконных блоков и важность применения, внедрения и популяризации

подобных программ в образовательном процессе для обучения молодых специалистов комплексному подходу к теплотехническому расчёту и анализу теплообмена в ограждающих конструкциях. Также подобные программы упрощают процесс определения проблемных точек в конструкции.

По итогу исследований было выяснено, что теплопотери через узлы

оконных блоков оказывают значительное влияние на энергоэффективность всего здания. Благодаря моделированию имеется возможность на

этапе проектирования предусмотреть решения для недопущения тепловых потерь в ограждающих конструкциях, в частности оконных блоках.

Список используемых источников

1. Об утверждении требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений : приказ Министерства строительства Российской Федерации от 17 ноября 2017 г. № 1550 // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru. — 26 марта 2018 г. — № 0001201803260032.
2. Павлова, М.О., Захаров, В.А., Квардакова, А.М. Исследование теплопотерь через узел оконного откоса // Строительная механика и расчёт сооружений. — 2023. — № 3. — С. 36–45. — URL: <https://elcut.ru/publications/kvardakova1.pdf> (дата обращения: 12.04.2025). — DOI: 10.37538/0039-2383.2023.3.36.45. — Текст : электронный.
3. Насонова, А.Е. Энергоэффективные дома глазами потребителей // Библиотека научных статей АВОК. — 2024. — URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4941 (дата обращения: 12.09.2024). — Текст : электронный.
4. Кривошеин, А.Д., Фёдоров, С.В. К вопросу о расчете приведённого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Инженерно-строительный журнал. — 2010. — № 8. — С. 21–27. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15502189> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
5. Ingeli, R. Detection of thermal bridges in the building. — URL: https://www.researchgate.net/publication/329916338_Detection_of_thermal_bridges_in_the_building (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
6. Holm, A., Nilsson, Å. Thermal bridges in window frames: simulations and measurements // Energy and Buildings. — 2005. — Vol. 37, № 2. — P. 145–154. — URL: https://www.researchgate.net/publication/361942816_Experimental_Investigation_of_Thermal_Bridges_and_Heat_Transfer_through_Window_Frame_Elements_at_Achieving_Energy_Saving (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
7. Van Den Bossche, N., Janssens, A. Thermal optimization of window frames // Proceedings of the 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. — URL: https://www.researchgate.net/publication/290003545_Thermal_Optimization_of_Window_Frames (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
8. Verichev, K., Garcia-Ruiz, A., Díaz-López, C., Valdenegro, F. Window frame design optimization analysis based on hygrothermal performance and the level(s) framework // Buildings Journal. — 2025. — Vol. 15, № 12. — P. 2126. — URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/12/2126> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
9. Baldineli, G., Lechowska, A., Bianchi, F., Schnotale, J. Sensitivity analysis of window frame components effect on thermal transmittance // Energies. — 2020. — Vol. 13, № 11. — P. 2957. — DOI: 10.3390/en13112957. — URL: <https://doi.org/10.3390/en13112957> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
10. Basok, B., Novikov, V., Pavlenko, A., Davydenko, B., Koshlak, H., Goncharuk, S., Lysenko, O. CFD Simulation of Heat Transfer through a Window Frame // Rocznik Ochrona Środowiska. — 2024. — № 26. — URL: <https://doi.org/10.54740/ros.2024.006> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
11. Рыбаков, М.М. Факторы, влияющие на теплопередачу через узел оконного откоса // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». — 2016. — Т. 8, № 2. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/55TVN216.pdf> (дата обращения: 12.04.2025). — DOI: 10.15862/55TVN216.
12. СП 50.13330.2024 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий»: сайт. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
13. СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные». Введен в действие приказом Минстроя России от 15 мая 2018 г. — М. : Стандартинформ, 2018. — 51 с. — Текст : непосредственный.
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «TEMPER-3D» №2006610359 от 20 января 2006 г. (правообладатель Фёдоров С.В.). — URL: <https://www.temper3d.ru/publish/raschet> (дата обращения: 16.11.2024). — Текст : электронный.

15. СП 131.13330.2020 «Строительная климатология». Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* / Минрегион России. Введен в действие с 25 июня 2021 г. — М. : ФАУ «ФИЦС», 2021. — 146 с. — Текст : непосредственный.
16. СП 23.101.2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»: сайт. — URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294813/4294813064.pdf?ysclid=mah0kmwhpc460525290> (дата обращения: 12.09.2024). — Текст : электронный.
17. Тхазаплизева, А.М., Нагоева, А.О. Инновации в строительстве: аэрогелевая изоляция // Научно-практический электронный журнал «Аллея науки». — 2019. — № 2(29). — URL: https://alleyscience.ru/domains_data/files/21February2019/INNOVACII%20V%20STROITELSTVE%20AE ROGELEVAYa%20IZOLYaCTYa.pdf (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
18. Ismaeel, W.S.E., Nessim, A.A. Sustainable indoor thermal comfort optimization in public buildings and its impact on occupants' wellbeing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2025. — Vol. 1530, № 1. — P. 012014. — DOI: 10.1088/1755-1315/1530/1/012014. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1530/1/012014/pdf> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
19. Choi, Y., Ozaki, A., Lee, H. Impact of window frames on annual energy consumption of residential buildings and its contribution to CO2 emission reductions at city scale // Energies. — 2022. — Vol. 15, № 10. — P. 3692. — DOI: 10.3390/en15103692. — URL: <https://doi.org/10.3390/en15103692> (дата обращения: 12.04.2025). — Текст : электронный.
20. Heydari, A., Sadati, S.E., Gharib, M.R. Effects of Different Window Configurations on Energy Consumption in Building: Optimization and Economic Analysis // Journal of Building Engineering. — 2021. — Vol. 35. — P. 102099.
21. Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K.K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview // Energy and Buildings. — 2010. — Vol. 42, № 10. — P. 1592–1600.

References

1. Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation No. 1550 of November 17, 2017. Requirements for energy efficiency of buildings, structures, and constructions. Legal Information Portal www.pravo.gov.ru, March 26, 2018. Doc. No. 0001201803260032.
2. Pavlova, M.O., Zakharov, V.A., Kvardakova, A.M. (2023). Study of heat losses through the node of a window jamb. *Construction Mechanics and Structure Calculation*, (3), 36–45. <https://elcut.ru/publications/kvardakova1.pdf> (Accessed April 12, 2025). DOI: 10.37538/0039-2383.2023.3.36.45
3. Nasonova, A.E. (2024). Energy-efficient homes from consumers' perspective. *AVOK Library of Scientific Articles*. Retrieved from https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4941 (Accessed September 12, 2024)
4. Krivoshchin, A.D., Fyodorov, S.V. (2010). The issue of calculation of reduced thermal resistance of enclosing structures. *Engineering and Construction Journal*, (8), 21–27. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=15502189> (Accessed April 12, 2025)
5. Ingeli, R. (n.d.). Detection of thermal bridges in the building. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/329916338_Detection_of_thermal_bridges_in_the_building (Accessed April 12, 2025)
6. Holm, A., Nilsson, Å. (2005). Thermal bridges in window frames: Simulations and measurements. *Energy and Buildings*, 37(2), 145–154. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/361942816_Experimental_Investigation_of_Thermal_Bridges_and_Heat_Transfer_through_Window_Frame_Elements_at_Achieving_Energy_Saving (Accessed April 12, 2025)
7. Van den Bossche, N., Janssens, A. (2015). Thermal optimization of window frames. *Proceedings of the 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/290003545_Thermal_Optimization_of_Window_Frames (Accessed April 12, 2025)
8. Verichev, K., García-Ruiz, A., Díaz-López, C., Valdenegro, F. (2025). Window frame design optimization analysis based on hygrothermal performance and the level(s) framework. *Buildings Journal*, 15(12), 2126. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/12/2126> (Accessed April 12, 2025)
9. Baldineli, G., Lechowska, A., Bianchi, F., Schnotale, J. (2020). Sensitivity analysis of window frame components effect on thermal transmittance. *Energies*, 13(11), 2957. DOI: 10.3390/en13112957

10. Basok, B., Novikov, V., Pavlenko, A., Davydenko, B., Koshlak, H., Goncharuk, S., Lysenko, O. (2024). CFD Simulation of Heat Transfer through a Window Frame. *Rocznik Ochrona Środowiska*, (26). Retrieved from <https://doi.org/10.54740/ros.2024.006> (Accessed April 12, 2025)
11. Rybakov, M.M. (2016). Factors influencing heat transfer through the node of a window jamb. *Internet Journal NAUKOVEDENIE*, 8(2). Retrieved from <http://naukovedenie.ru/PDF/55TVN216.pdf> (Accessed April 12, 2025). DOI: 10.15862/55TVN216
12. Code SP 50.13330.2024. THERMAL PROTECTION OF BUILDINGS (SNiP 23-02-2003). Retrieved from <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (Accessed April 12, 2025)
13. Code SP 345.1325800.2017. RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS. Effective since May 15, 2018. Moscow: Standardinform, 2018. 51 pages.
14. Certificate of official registration of computer program "TEMPER-3D" No. 2006610359 dated January 20, 2006 (copyright holder: Fyodorov S.V.). Retrieved from <https://www.temper3d.ru/publish/raschet> (Accessed November 16, 2024)
15. Code SP 131.13330.2020. CONSTRUCTION CLIMATOLOGY. Updated version of SNiP 23-01-99*. Effective since June 25, 2021. Moscow: FAU "FCS", 2021. 146 pages.
16. Code SP 23.101.2004 DESIGNING THE THERMAL INSULATION OF BUILDINGS. Retrieved from <https://meganorm.ru/Data2/1/4294813/4294813064.pdf?ysclid=mah0kmwhpc460525290> (Accessed September 12, 2024)
17. Thkhazaplizheva, A.M., Nagoeva, A.O. (2019). Innovations in construction: aerogel insulation. *Alley of Science Journal*, (2)(29). Retrieved from https://alleyscience.ru/domains_data/files/21February2019/INNOVACII%20V%20STROITELSTVE%20AEROG ELEVAYa%20IZOLYaCIYa.pdf (Accessed April 12, 2025)
18. Ismaeel, W.S.E., Nessim, A.A. (2025). Sustainable indoor thermal comfort optimization in public buildings and its impact on occupants' well-being. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1530(1), 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1530/1/012014
19. Choi, Y., Ozaki, A., Lee, H. (2022). Impact of window frames on annual energy consumption of residential buildings and its contribution to CO2 emission reductions at city scale. *Energies*, 15(10), 3692. DOI: 10.3390/en15103692
20. Heydari, A., Sadati, S.E., Gharib, M.R. (2021). Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. *Journal of Building Engineering*, 35, 102099.
21. Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K.K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600.

Получено: 06.11.25

Прошла рецензирование: 15.12.25

Принята к публикации: 26.12.25

Доступно он-лайн: 29.12.25

Received: 06.11.25

Revised: 15.12.25

Accepted: 26.12.25

Available on-line: 29.12.25