

Технические науки: Архитектура и строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-02>

УДК: 699.86

МРНТИ: 65.33.35

Исследование влияния температурного перепада на пограничный слой ограждающей конструкции**¹ Языев Б.М., ² Аубакирова Б.М.**¹ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия² Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан*Автор-корреспондент e-mail: aubakirova.baxyt@mail.ru

Поступила: 12 апрель 2025
Рецензирование: 26 августа 2025
Принята в печать: 05 сентября 2025

Аннотация

В данной статье рассматривается влияние температурного перепада на формирование температурного пограничного слоя в ограждающих конструкциях зданий. Объектом исследования выбрана однородная стена из полнотелого керамического кирпича толщиной 510 мм. При неизменной температуре внутреннего воздуха (+18 °С) моделировались различные значения наружной температуры в диапазоне от –30 °С до +40 °С. Проведён расчёт термического сопротивления и теплового потока через стену с использованием нормативной методики. Особое внимание уделено локализации тепловых колебаний внутри конструкций и зависимости толщины температурного пограничного слоя от величины температурного перепада. Анализ показал, что при росте перепада температур активный тепловой поток концентрируется в ограниченной зоне стены, в то время как оставшаяся часть конструкции функционирует как теплоаккумулирующий массив. Также установлено, что при изменении направления теплового потока (в случае, когда наружная температура выше внутренней) происходит перераспределение температуры вглубь конструкции. Расчёты продемонстрировали значительную роль геометрических и теплотехнических параметров стены в определении её общей энергоэффективности. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании энергоэффективных ограждающих конструкций, особенно в климатических зонах с большими амплитудами температур, а также для оптимизации режимов эксплуатации зданий с целью снижения теплопотерь.

Ключевые слова: здание, сооружение, ограждение, энергоэффективность, термическое сопротивление, расчет

Языев Б.М.**Информация об авторах:**

Д.т.н., профессор, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5205-1446>
E-mail: byazyev@donstu.ru

Аубакирова Б.М.

К.т.н., ассоц.проф., ТОО «Международная образовательная корпорация», г. Алматы, Республика Казахстан. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3064-5876>
E-mail: aubakirova.baxyt@mail.ru

Техникалық ғылымдар: сәулет және құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-02>

ӨОЖ: 699.86

GTAMP: 65.33.35

Қоршау конструкциясының шекаралық қабатына температуралық айырманың ықпалын зерттеу**¹ Языев Б.М., ² Аубакирова Б.М.**¹ Дон мемлекеттік техникалық университеті, Ростов-на-Дону, Ресей² Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ, Қазақстан*Автор-корреспондент e-mail: aubakirova.baxyt@mail.ru

Мақала келді: 12 сәуір 2025
 Сараптамадан өтті: 26 тамыз 2025
 Қабылданды: 05 қыркүйек 2025

Түйіндеме

Бұл мақалада ғимараттардың қоршау конструкцияларындағы температуралық шекаралық қабаттың түзілуіне температура айырмасының әсері қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде қалыңдығы 510 мм болатын толық керамикалық кірпіштен жасалған біртекті қабырға алынған. Ішкі ауа температурасы тұрақты (+18 °С) болған жағдайда, сыртқы ауаның әртүрлі температура мәндері –30 °С-тан +40 °С-қа дейінгі ауқымда модельденді. Қабырға арқылы өтетін жылу ағыны мен жылу кедергісі нормативтік әдістеме бойынша есептелді. Жылулық тербелістердің конструкция ішінде шоғырлануына және температуралық шекаралық қабаттың қалыңдығының температура айырмасына тәуелділігіне ерекше назар аударылды.

Анализ нәтижесі көрсеткендей, температура айырмасы артқан сайын жылу ағыны қабырғаның шектеулі аймағында шоғырланады, ал қалған бөлігі жылу жинақтаушы массив ретінде жұмыс істейді. Сондай-ақ, сыртқы температура ішкі температурадан жоғары болған жағдайларда жылу ағынының бағыты өзгеріп, температура қабырға қалыңдығына қарай қайта бөлінеді. Есептеулер қабырғаның геометриялық және жылу техникалық параметрлерінің жалпы энергия тиімділігін анықтаудағы маңызын көрсетті. Зерттеу нәтижелері температура ауытқуы жоғары аймақтарда энергия үнемдейтін қоршау конструкцияларын жобалауда және жылу шығындарын азайту мақсатында ғимараттарды пайдалануды оңтайландыруда қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: топырақ үстіндегі еден, плита, жылуөткізгіштік, жылуоқшаулау, полистирол, полиуретан көбігі, U жылу беру коэффициенті, жылы едендер

Языев Б.М.**Авторлар туралы ақпарат:**Т.ғ.д., профессор, Дон мемлекеттік техникалық университеті, Ростов-на-Дону, Ресей ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5205-1446>E-mail: byazyev@donstu.ru**Аубакирова Б.М.**Т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан Республикасы. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3064-5876> E-mail: aubakirova.baxyt@mail.ru

 Technical sciences: Architecture and construction
DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-02>

UDC: 699.86

IRSTI: 65.33.35

Study of the influence of temperature difference on the boundary layer of the building envelope

¹ Yazyev B., ^{*2} Aubakirova B.

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

² International Education Corporation, Almaty, Republic of Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: aubakirova.baxyt@mail.ru

Received: 12 April 2025
Peer-reviewed: 26 August 2025
Accepted: 05 September 2025

Abstract

This article examines the effect of temperature difference on the formation of the thermal boundary layer in building envelope structures. The object of the study is a homogeneous wall made of solid ceramic brick with a thickness of 510 mm. While maintaining a constant indoor air temperature (+18 °C), various outdoor temperature values were simulated within the range from –30 °C to +40 °C. The thermal resistance and heat flow through the wall were calculated using standard methods. Special attention was given to the localization of thermal fluctuations within the structure and the dependence of the boundary layer thickness on the magnitude of the temperature difference.

The analysis showed that as the temperature difference increases, the active heat flow concentrates within a limited zone of the wall, while the rest of the structure acts as a thermal accumulator. It was also found that when the direction of heat flow changes (i.e., when the outdoor temperature exceeds the indoor temperature), heat redistributes deeper into the wall structure. The calculations demonstrated the significant role of geometric and thermal parameters of the wall in determining its overall energy efficiency. The results can be applied in the design of energy-efficient building envelopes, especially in regions with large temperature fluctuations, and in optimizing building operation to reduce heat loss.

Keywords: slab-on-ground, floor-on-ground, thermal conductivity, insulation, polystyrene, polyurethane foam, U-value, underfloor heating

<i>Yazyev B.</i>	Information about authors: Doctor of Technical Sciences, professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5205-1446 E-mail: byazyev@donstu.ru
<i>Aubakirova B.</i>	Candidate of technical sciences, associate professor, LLP "International Educational Corporation", Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3064-5876 E-mail: aubakirova.baxyt@mail.ru

1. Введение

Рост цен на энергоресурсы делает энергосбережение в строительстве особенно актуальным. Рациональная теплозащита зданий является мощным социальным и экономическим фактором. С точки зрения социальной значимости она обеспечивает комфортные климатические условия, соответствующие санитарно-гигиеническим нормативам, а с экономической – оптимизирует соотношение капитальных затрат на строительство и эксплуатационных расходов на отопление и содержание здания на протяжении его жизненного цикла [1,2].

Строительная отрасль отреагировала на новые вызовы ужесточением нормативных требований к теплозащите: в действующих стандартах существенно возросли требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Введение этих новых теплотехнических норм стимулировало интенсивное развитие производства современных теплоизоляционных материалов и внедрение разнообразных конструктивных решений многослойных наружных стен повышенного уровня теплозащиты [3,4].

Эти изменения активизировали создание энергоэффективных многослойных стеновых конструкций с улучшенными теплотехническими характеристиками. Вместе с тем в профессиональной среде продолжается оживлённая дискуссия о целесообразности новых строгих стандартов теплозащиты: наряду с поддержкой ужесточения требований со стороны производителей теплоизоляционных материалов звучат призывы снизить действующие нормативы и вернуться к применению высокоэффективных однослойных ограждений.

Учитывая изложенное, становится очевидным значение детального анализа формирования температурного пограничного слоя в стеновых ограждениях при значительных температурных перепадах. Предварительные расчёты показывают, что с увеличением разности температур между внутренней и наружной средой доля температурного пограничного слоя в общей толщине стены растёт. В настоящей статье проводится исследование влияния амплитуды температурного перепада на теплотехнические параметры стеновой конструкции и особенности формирования температурного пограничного слоя.

2. Материалы и методы

Объектом исследования служила однородная (однослойная) стена из полнотелого керамического кирпича толщиной 510 мм.

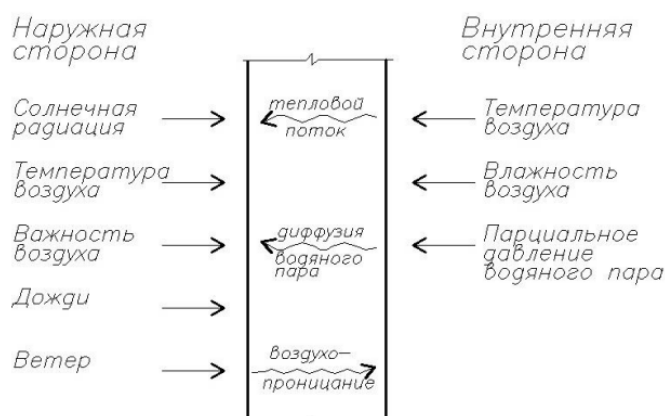


Рисунок 1. Однородная (однослойная) стена из полнотелого керамического кирпича [собственный материал]

Диапазон изменения температуры наружного воздуха составлял от -30 до $+40$ °С при постоянной температуре внутреннего воздуха $+18$ °С. Расчетное термическое сопротивление стеной конструкции, определенное по нормативам, составило $R = 0,9$ м² °С/Вт. Анализ температурного поля и теплового потока проводился с учётом изменения

внешних тепловых нагрузок (изменения температуры наружного воздуха) во времени. Тепловой поток через стену в стационарном режиме вычислялся по формуле $Q = \Delta t \cdot S / R_a$, где Δt — разность температур на поверхностях стены, S — площадь стены, R_a — активное термическое сопротивление. Отдача накопленного в стене тепла определялась по формуле $Q' = m \cdot c_{cp} \cdot (t_{hot} - t_0)$, где m — масса 1 м^2 стены, c_{cp} — средняя теплоёмкость материала стены, t_{hot} — температура горячей поверхности стены, t_0 — температура внутреннего воздуха. По результатам расчетов построены графики зависимости толщины температурного пограничного слоя стены от величины температурного перепада.

3. Результаты

Если рассматривать основные физические процессы, происходящие в ограждениях зданий, то общая схема физико-климатических воздействий на стены зданий выглядит таким образом (рис.1).

К воздействиям наружного климата относятся солнечная радиация, температура и влажность воздуха, дожди и ветер. Внутренние воздействия на ограждения зданий складываются из температуры и влажности внутреннего воздуха и парциального давления водяного пара [5,6].

В результате физико-климатических воздействий, в наружных стенах зданий возникают три основных физических процесса, которые следует учитывать при проектировании теплозащиты зданий: теплопередача, паропроницаемость и воздухопроницаемость [7].

Необходимо посчитать как будет себя вести стеновое ограждение и его теплотехнические характеристики при максимальном перепаде температур. Данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение теплотехнических параметров от внешней температуры

Температура, °С	$R_a, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	$R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	$R_r, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	$\delta_t, \text{ м}$
-30	0,528	0,829	0,301	0,255
0	0,297	0,466	0,169	0,095
+18	0,158	0,248	0,09	0*
+40	0,328	0,515	0,187	-0,116**

* При одинаковой температуре внутри и снаружи помещения, стена не реагирует на температурные колебания и температурный пограничный слой отсутствует

** Если температура снаружи больше, чем температура внутри помещения, то тепловой поток меняет направление и тепло направлено в помещение.

На рис.2 представлен разрез стены и где располагается температурный пограничный слой при отрицательной и положительной температурах снаружи помещения.

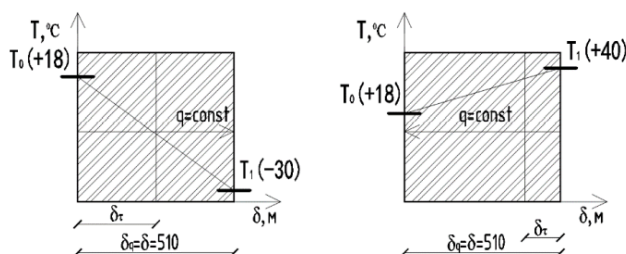


Рисунок 2. Разрез стенового ограждения Разрез стенового ограждения

Из расчетов можно построить график зависимости отношения температурного пограничного слоя к полной толщине стены к отношению температурных перепадов, представленных на рис.3

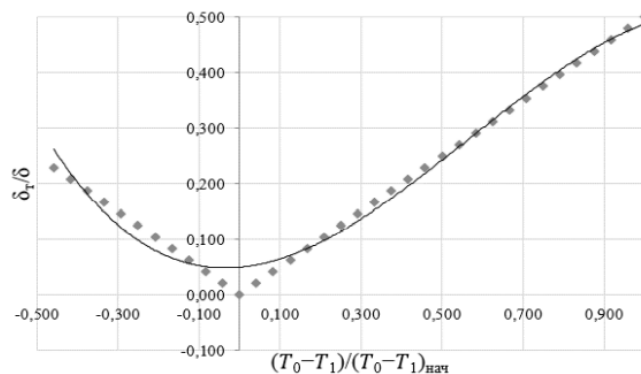


Рисунок 3. Отношение толщин от температурного перепада [собственный материал]

Исходя из расчетов, можно сделать вывод, что чем больше температурный перепад, тем больше температурный пограничный слой. То есть все температурные изменения происходят только в данном слое. Остальная часть стены работает как накопитель тепла [8].

При этом активное сопротивление будет падать при уменьшении температурного перепада и будет увеличиваться в случае, когда температура снаружи будет больше чем внутри (рис.4).

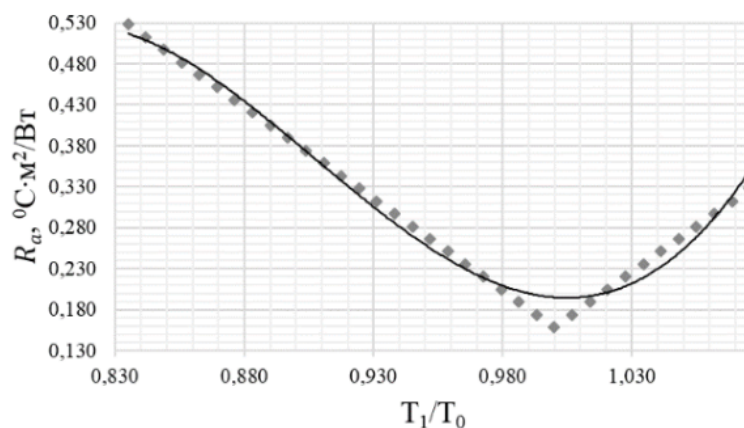


Рисунок 4. Зависимость активного сопротивления к отношению температур [собственный материал]

Температурные изолинии в стеновых конструкциях с достаточно сложной геометрической конфигурацией представляются двумерным температурным полем и, как правило, не параллельны поверхностям ограждения, а криволинейны [9].

4. Обсуждение

Внешние тепловые нагрузки (разность температур и их значения), в условиях установившейся теплопередачи, неизменны или учитываются таковыми с целью облегчения расчетов на процессы передачи тепла. Данные процессы без дополнительных погрешностей можно применять к установившемуся условиям теплопередачи. В реальных условиях внешние тепловые нагрузки, на примере наружных температур, изменяются во времени, что в свою очередь приводит к нестационарной теплопередаче и изменению температурного поля [10].

Необходимо посчитать какое количество тепла необходимо стеновому ограждению и сколько тепла стена может выделить (отдать) при разном значении разности температур внутри и снаружи помещения [11]. Поток тепла Q , проходящий через любое сечение

однородной конструкции, прямо пропорционален произведению разности температур Δt на ее поверхностях и площади стенового ограждения и обратно пропорционален активному термическому сопротивлению. В расчетах указывается R_a , так как режим стационарный. Формула будет иметь вид:

$$Q = \Delta t \cdot S / R_a \tag{1}$$

Также необходимо посчитать какое количества тепла может отдавать нагретая стена (аккумулируемое тепло) в помещение или наружу:

$$Q' = m \cdot c_{cp} \cdot (t_{hot} - t_0) \tag{2}$$

где m – масса 1 м² стены;

c_{cp} – средняя теплоемкость стены;

t_0 – минимальная комфортная температура внутри жилого помещения.

Необходимо обратить внимание на температуру t_{hot} – температура на горячей поверхности стены (внутри помещения). Она рассчитывается двумя способами: если тепловой поток идет из помещения $t_{hot} = t_0 - Q / \alpha_{int}$, если тепловой поток идет с улицы в помещение $t_{hot} = t_0 + Q / \alpha_{int}$.

В табл. 2 приведены расчеты требуемого количества тепла и отдача тепла стеной. Температуру воздуха внутри (t_0) принимаем также равной плюс 18°C.

Таблица 2. Расчетное значение количества тепла

Температура t_{ext} , °C	Q , Вт/м ²	t_{hot} , °C	Q' , кДж/м ²
-30	90,91	+7,55	7700,83
0	60,60	+11,03	5133,62
+18	0	+18	0
+40	-67,11*	+25,71	5684,94

* Отрицательное значение количества тепла показывает, что стена не нуждается в дополнительной теплоте и справляется с температурным перепадом, при значении температуры снаружи помещения больше, чем внутри помещения

Из таблицы видно, что 1м² стены при сильных перепадах (при отрицательных температурах снаружи) будет возвращать максимальное количества тепла в помещение при отключении отопления. Это говорит о том, что данная кирпичная стена будет иметь максимальное значение денежных затрат на отопление [1]. Для двумерной стены зависимость толщины температурного пограничного слоя от толщины стены представлено на рис.5.

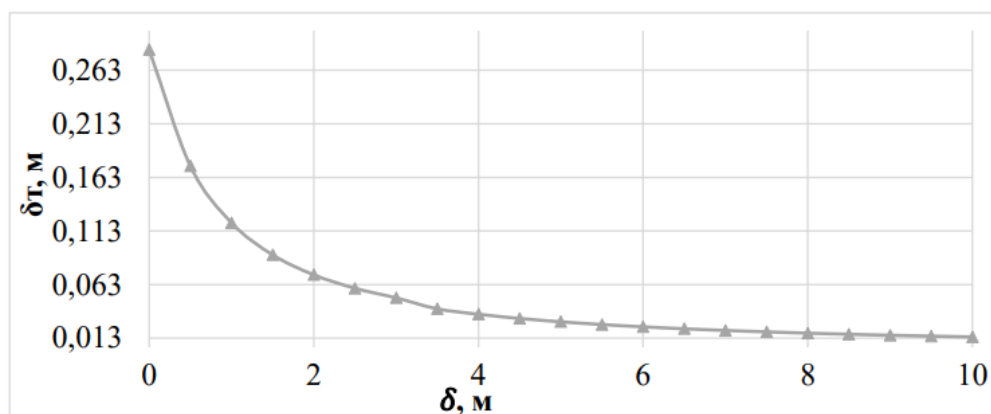


Рисунок 5. Отношение толщины стены к толщине температурного пограничного слоя [собственный материал]

Как видно, с увеличением толщины стены доля толщины, занимаемая пограничным слоем, монотонно уменьшается. Для периодического по времени, с периодом t_0 , изменения температуры, «температурные волны», затухание амплитуды колебаний температуры в толще стены показано на рис.6 на глубине равной $4\sqrt{a} \cdot t_0$ температурное поле стены становится «стационарным».

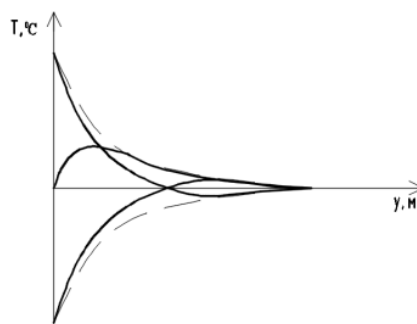


Рисунок 6. Затухание колебания температуры по толщине стены [собственный материал]

Колебание температуры не проходят внутрь твердого тела и локализованы внутри температурного пограничного слоя. Термическое сопротивление R_a локализовано в пограничном слое температурного поля, определяемом как носитель распределения температуры. Если граничная температура $T_w(t, x)$ не зависит от x (температура распределена по граням стены равномерно), то толщина температурного пограничного слоя определяется по формуле:

$$\delta(t) = \partial_t^{-1/2} T_w(t)/T_w(t) \quad (3)$$

а для двумерного пограничного слоя эта формула сохраняет смысл только вместо $T_w(t)$ используется интегральное преобразование температуры $T_w(t, x)$ по продольной координате x .

Таким образом, эффект включений, провоцирующих неоднородность температурного поля теплового потока, обусловлен не только неоднородностью материала стенового ограждения, но и ее размерами, поперечным и продольными [2]. Включения трактуются как факторы искажения одномерного распространения теплоты. Аналогично и увеличение размерности области строительного ограждения, занятой теплопроводной средой, можно трактовать как геометрическое включение. В этом состоит смысл геометрического включения как фактора, обусловленного увеличением размерности области, заполненной однородной изотропной средой.

5. Заключение

Проведенное исследование подтвердило значительное влияние температурного перепада на формирование температурного пограничного слоя в ограждающих конструкциях зданий. Выявлено, что с увеличением разности температур между внутренней и наружной средой наблюдается рост толщины пограничного слоя, в котором сосредотачиваются основные тепловые изменения. При этом остальная часть стены функционирует преимущественно как тепловой аккумулятор.

Результаты расчетов показали, что в условиях отрицательных температур наружного воздуха однородные стены из полнотелого кирпича обладают высокой теплоемкостью и способны временно компенсировать снижение теплоступлений за счёт отдачи накопленного тепла. Однако это сопровождается увеличенными эксплуатационными затратами на отопление в холодный период.

Таким образом, выбор конструктивного решения ограждающих элементов должен учитывать не только нормативные требования к термическому сопротивлению, но и поведение температурного поля при нестационарных условиях эксплуатации. Полученные данные могут быть использованы при разработке более эффективных систем теплозащиты зданий, особенно в регионах с выраженными сезонными колебаниями температур.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Аубакирова Б.М. Исследование влияния температурного перепада на пограничный слой ограждающей конструкции // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2025; 3 (11). <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-02>

Cite this article as: Aubakirova B.M. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo perepada na pogranichnyj sloj ogradhayushchej konstrukcii // Vestnik Kazahskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2025; 3 (11). <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-02>

Литература

1. Waheeb, R. (2023). 'Energy Saving by Using Thermal Insulation Works in Buildings'. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4447979>.
2. Alsaffar, A., & Alwan, Q. (2023). Energy Savings in Thermal Insulations for Sustainable Buildings. *Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2014.06.05>.
3. Jezierski, W., Sadowska, B., & Pawłowski, K. (2020). Impact of Changes in the Required Thermal Insulation of Building Envelope on Energy Demand, Heating Costs, Emissions, and Temperature in Buildings. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14010056>.
4. Tukhtamisheva, A., & Adilova, D. (2025). Study of properties of multilayer reflective thermal insulation materials for improving energy efficiency of buildings. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*. <https://doi.org/10.51488/1680-080x/2025.1-15>.
5. Xue, Y., Fan, Y., Wang, Z., Gao, W., Sun, Z., & Ge, J. (2022). Facilitator of moisture accumulation in building envelopes and its influences on condensation and mould growth. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112528>.
6. Ibrahim, A., Zangana, D., Liu, S., Samuelson, H., & Yang, L. (2024). Impacts of Climate Change on Energy-Saving Sensitivity of Residential Building Envelope Design Parameters in Three Hot-Dry Cities. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.111481>.
7. Al-Awadi, H., Alajmi, A., & Abou-Ziyan, H. (2022). Effect of Thermal Bridges of Different External Wall Types on the Thermal Performance of Residential Building Envelope in a Hot Climate. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12030312>.
8. Musorina, T., Gamayunova, O., Petrichenko, M., & Soloveva, E. (2019). Boundary Layer of the Wall Temperature Field. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_42.
9. Li, Z., Xing, W., Sun, J., Feng, X., & Wang, H. (2024). Thermal network model for anisotropic heat transfer in 3D printed complex geometry structures. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111381>.
10. Mostafavi, A., & Jain, A. (2022). Theoretical analysis of unsteady convective heat transfer from a flat plate with time-varying and spatially-varying temperature distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122061>.
11. Yi, J., Xu, M., Ren, Q., Zhang, H., Liu, M., Fei, Y., Li, S., Nie, H., Li, Q., Ni, X., & Wang, Y. (2025). Effects of Land Use Conversion from Upland Field to Paddy Field on Soil

Temperature Dynamics and Heat Transfer Processes. *Land*.
<https://doi.org/10.3390/land14071352>.

References

1. Waheeb, R. (2023). 'Energy Saving by Using Thermal Insulation Works in Buildings'. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4447979>.
2. Alsaffar, A., & Alwan, Q. (2023). Energy Savings in Thermal Insulations for Sustainable Buildings. *Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2014.06.05>.
3. Jezierski, W., Sadowska, B., & Pawłowski, K. (2020). Impact of Changes in the Required Thermal Insulation of Building Envelope on Energy Demand, Heating Costs, Emissions, and Temperature in Buildings. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14010056>.
4. Tukhtamisheva, A., & Adilova, D. (2025). Study of properties of multilayer reflective thermal insulation materials for improving energy efficiency of buildings. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*. <https://doi.org/10.51488/1680-080x/2025.1-15>.
5. Xue, Y., Fan, Y., Wang, Z., Gao, W., Sun, Z., & Ge, J. (2022). Facilitator of moisture accumulation in building envelopes and its influences on condensation and mould growth. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112528>.
6. Ibrahim, A., Zangana, D., Liu, S., Samuelson, H., & Yang, L. (2024). Impacts of Climate Change on Energy-Saving Sensitivity of Residential Building Envelope Design Parameters in Three Hot-Dry Cities. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111481>.
7. Al-Awadi, H., Alajmi, A., & Abou-Ziyan, H. (2022). Effect of Thermal Bridges of Different External Wall Types on the Thermal Performance of Residential Building Envelope in a Hot Climate. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12030312>.
8. Musorina, T., Gamayunova, O., Petrichenko, M., & Soloveva, E. (2019). Boundary Layer of the Wall Temperature Field. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_42.
9. Li, Z., Xing, W., Sun, J., Feng, X., & Wang, H. (2024). Thermal network model for anisotropic heat transfer in 3D printed complex geometry structures. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111381>.
10. Mostafavi, A., & Jain, A. (2022). Theoretical analysis of unsteady convective heat transfer from a flat plate with time-varying and spatially-varying temperature distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122061>.
11. Yi, J., Xu, M., Ren, Q., Zhang, H., Liu, M., Fei, Y., Li, S., Nie, H., Li, Q., Ni, X., & Wang, Y. (2025). Effects of Land Use Conversion from Upland Field to Paddy Field on Soil Temperature Dynamics and Heat Transfer Processes. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land14071352>.