

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ СТЕН

- **Клычев Ш.И.**, доктор техн. наук, Научно-технический центр с конструкторским бюро и опытным производством АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан
- **Бахрамов С.А.**, доктор физ.-мат. наук, Научно-технический центр с конструкторским бюро и опытным производством АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан
- **Абдурахманов Б.М.**, доктор техн. наук, Институт ионно-плазменных технологий АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан
- **Кенжаев И.Г.**, доктор техн. наук, Ошский государственный технический университет, г. Ош, Кыргызстан
- **Багышев А.С.**, Ошский государственный технический университет, г. Ош, Кыргызстан
- **Маразакوف Ш.А.**, Ошский государственный технический университет, г. Ош, Кыргызстан

NON-STATIONARY HEAT LOSSES AND TEMPERATURES OF THERMALLY INSULATED WALLS

- **Klychev Sh.I.**, D.Sc, Scientific and Technical Center with Design Bureau and Pilot Production, Tashkent, Uzbekistan
- **Bakhramov S.A.**, D.Sc, Scientific and Technical Center with Design Bureau and Pilot Production, Tashkent, Uzbekistan
- **Abdurakhmanov B.M.**, D.Sc, Institute of Ion-Plasma Technologies, Tashkent, Uzbekistan
- **Kenjaev I.G.**, D.Sc, Osh State Technical University, Osh, Kyrgyz republic
- **Bagyshev A.S.**, Osh State Technical University, Osh, Kyrgyz republic
- **Marazakov Sh.A.**, Osh State Technical University, Osh, Kyrgyz republic

Цель научного исследования – определение влияния теплоизоляции и её перераспределения на теплопотери и температуры стен из сырцового кирпича с учетом переменности температуры наружного воздуха и потоков падающего излучения. Объект исследования – многослойные теплоизолированные стены сырцового кирпича. Предмет исследования – нестационарные температурные поля в многослойных стенах, удельные тепловые потоки. Задачи исследования состоят в разработке методики распределения нестационарных температурных полей по толщине теплоизолированных многослойных стен. Научная новизна состоит в использовании уравнений метода конечных разностей для инженерных прогнозных расчетов. Теоретическая значимость состоит в определении модельных характеристик падающего солнечного излучения. Практическая значимость состоит в разработке программы расчета. Итогом исследования стали рекомендации по перераспределению теплоизоляции для стен с большой тепловой инерцией, что важно для обеспечения более комфортных температур на внутренней поверхности стены.

Ключевые слова: программа расчета, тепловые потери, тепловая инерция, солнечное излучение, температурное поле.

The purpose of the scientific research is to determine the effect of thermal insulation and its redistribution on heat losses and temperatures of walls made of adobe bricks, taking into account the variability of the outside air temperature and incident radiation

flows. The object of the study is multilayer thermally insulated walls of adobe bricks. The subject of the study is non-stationary temperature fields in multi-layer walls, specific heat flows. The objectives of the study are to develop a method for distributing non-stationary temperature fields across the thickness of thermally insulated multilayer walls. The scientific novelty lies in using the equations of the finite difference method for engineering predictive calculations. The theoretical significance lies in determining the model characteristics of incident solar radiation. The practical significance lies in developing a calculation program. The study resulted in recommendations for redistributing thermal insulation for walls with high thermal inertia, which is important for ensuring more comfortable temperatures on the inner surface of the wall.

Key words: calculation program, heat loss, thermal inertia, solar radiation, temperature field.

Введение

Экономия энергии на отопление и охлаждение важная задача энергосбережения [1-2]. Как известно одним из основных источников потерь тепла (холода) в зданиях являются ограждающие конструкции (стены) и эффективный способ их уменьшения, это теплоизоляция стен, обычно наружная. Расчеты теплозащитных параметров стен вследствие многопараметричности задачи (теплофизические параметры (ТФХ), толщина слоев, влияние тепловой инерции, температуры стен, условия гигроскопичности, комфортность и внешних параметры - температура и потоки излучения) ведутся для стационарного теплового режима и только для некоторых характерных внешних температур [3-5]. В частности, это также обусловлено и сложностью аналитического и численного решения задач нестационарной теплопередачи в многослойных ограждающих конструкциях.

Можно отметить, что в существующих нестационарных методиках расчета потоки собственного излучения учитываются только в виде добавки к коэффициенту конвективной теплоотдачи [6-13].

Приближенная нестационарная численная одномерная модель теплопередачи в многослойных стенах с учетом излучения была предложена в [14] и проведена оценка влияния толщины наружной теплоизоляции стены на удельные нестационарные тепловые потери, а в [15] на мощности отопления. Вопросы эффективности использования теплоизоляции (необходимость не только наружной, но и внутренней теплоизоляции (рис. 1)), а также их влияния на температуры стен не рассматривались.

Цель настоящей работы исследование влияния теплоизоляции и её перераспределения на тепло-

потери и температуры стен из сырцового кирпича (рис. 1) с учетом переменности температуры наружного воздуха и потоков падающего излучения.

Методика проведения исследований

Численная модель и разработанная программа расчета нестационарной теплопередачи в многослойной стене с учетом собственного излучения слоев основана на методе конечных разностей (МКР) [14,15].

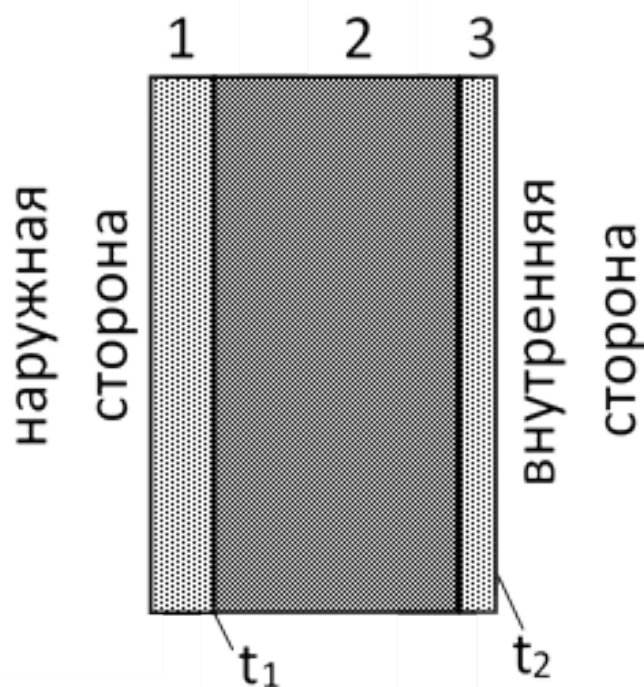


Рис. 1. Схема стенки:

1- наружная теплоизоляция, 2- несущая стена, 3- внутренняя теплоизоляция и t_1 , t_2 - температуры в характерных точках стены: t_1 - на наружной поверхности несущей стены, t_2 - на внутренней поверхности стенки

Анализ показывает, что возможность учета собственного излучения заложена в самом МКР, а для многослойной стенки между слоями вводятся малые зазоры Δh , что позволяет разделять слои и рассматривать их для каждого слоя отдельно.

Разделение слоев малыми зазорами позволяют применять МКР для каждого слоя отдельно (рис. 2), а в граничных условиях учитывается как конвекция, так отдельно и излучение. Схема разбиения слоев по МКР (рис. 2) на элементарные слои (ЭС) проводим по схеме, изложенной в [16].

Неявные конечно-разностные уравнения МКР [16] для внутренних ЭС отдельных слоев il (в программе число слоев NL может быть больше 10) имеют в модели стандартный вид

$$\rho c \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta \tau} = \lambda \frac{(T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j)}{\Delta x^2} \quad (1)$$

где i – номер ЭС ($i=1 \div N$, N – число разбиений слоя), $\Delta \tau$ – элементарный шаг времени, j – момент времени; ρ , c , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность слоя; $\Delta x = h_i/(N-1)$, толщина внутреннего ЭС (толщина граничных слоев равна $\Delta x/2$; T_i^j – температура ЭС i в момент времени j).

Уравнения МКР для граничных ЭС ($i=1$, или $i=N$), учитывая, что плотности потоков собственного излучения q_{cl} равны $q_{cl} = \epsilon_i \sigma (T_i^j)^4$ можно записать в виде (например, для $il=1$ и $i=1$)

$$\rho c \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_1^{j+1} - T_1^j)}{\Delta \tau} = \alpha_{k1}^j (T_{c1}^j - T_1^j) + \frac{\lambda}{\Delta x} (T_1^j - T_2^j) + \alpha_1 q_{p1} - q_{c1} \quad (2)$$

где α_{ji}^k – коэффициент собственно конвективного теплообмена, определяемый из известных критериальных зависимостей; T_{c1}^j , T_1^j , T_2^j – температуры среды и ЭС в j момент времени (далее, температуры с малыми t в $^\circ\text{C}$, а с большими T в K); α_p , ϵ_i – поглощательная и излучательная способность поверхностей граничных ЭС, предполагается, что $\alpha = \epsilon$, q_{p1} – суммарная плотность падающего наружного излучения (небо, земля, сооружений и Солнце), или излучение соседнего отдельного слоя. Уравнения, аналогичные (1) и (2) записываем для каждого отдельного слоя. Такая модель точная в плане учета собственного излучения и приближенная в плане учета многослойности позволяет унифицировать алгоритм решения задачи и существенно упростить процедуру определения прогоночных коэффициентов для слоев с различными ТФХ (оценки

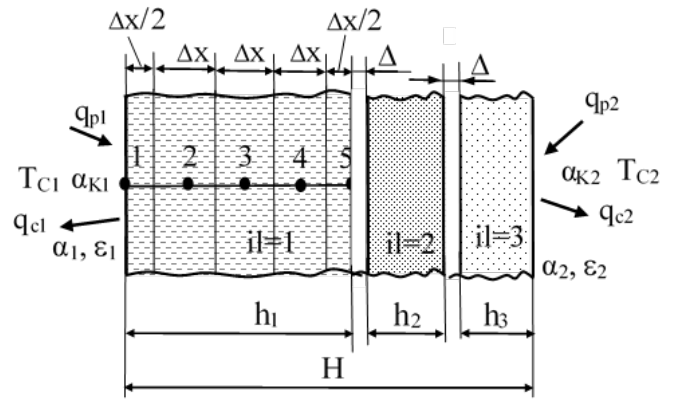


Рис. 2. Расчетная схема теплопередачи в многослойной стене

погрешности модели проводилась путем сравнения температур на поверхности и в центре многослойной (численное решение по программе) и однослойной пластин (аналитическое решение) одинаковой толщины и одинаковых граничных условиях, в частности получено, что различие в температурах для случая трехслойной стены в максимуме не превышает $\pm 0.25\%$).

На внутренней стороне стенки температура потоков падающего излучения определялись из условия $t_{r2} = t(NL, N)$, или $q_{p2} = \epsilon_2 \sigma (t_{r2} + 273)^4$ (для комнаты это означает, что температуры окружающих стен изменяются одинаково).

На рис.3 приведены модельные характеристики падающего солнечного излучения ЕС и температуры наружного воздуха t_{c1} в зимнее время.

Изменение ЕС определялось в виде

$$E_c = E_0 \cdot (c \cdot n) \quad (3)$$

где E_0 – плотность нормального солнечного излучения в полдень, Вт/м^2 , $c \cdot n$ – скалярное произведение единичных векторов Солнца (c) и нормали стенки (n). Температура воздуха t_{c1} моделировалась приближенно двумя периодическими функциями.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведены тепловые потери стены без теплоизоляции (сырцовый кирпич с штукатуркой 43 см ($\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$, $c = 880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$, $\lambda = 0.58 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$) в зимнее время для внешних условий на рис.3.

Как видно, тепловые потери стены растут во времени и только к третьим суткам могут прийти в регулярное состояние. В связи с переменностью внешних условий и те-

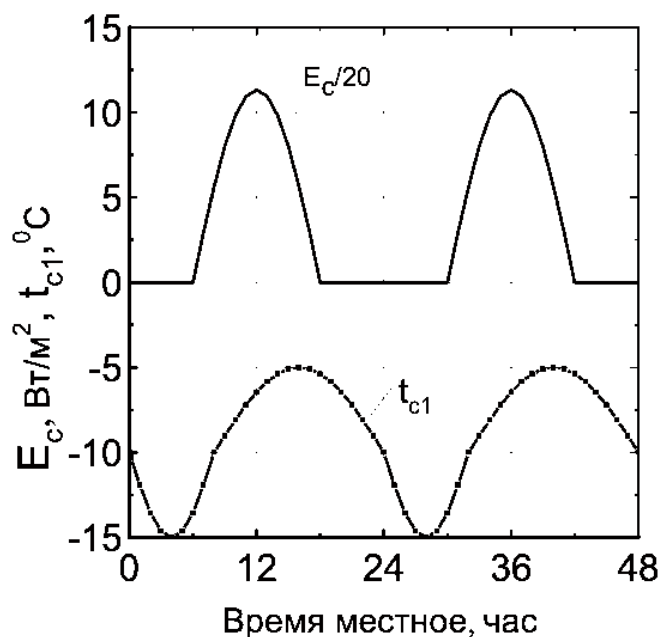


Рис. 3. Модельные характеристики падающего солнечного излучения и температуры наружного воздуха в зимнее время

пловой инерцией стены заметно и влияние α .

На рис. 5 (а) показаны характерные теплопотери теплоизолированной стены в зимнее время (определяются потоком на внутренней стороне стенки q_2 , при $q_2 < 0$ стенка воспринимает тепло, при $q_2 > 0$ стенка отдает тепло) в зависимости от толщины и распределения теплоизоляции, а на рис. 5 (б) температуры на внутренней поверхности стенки t_2 .

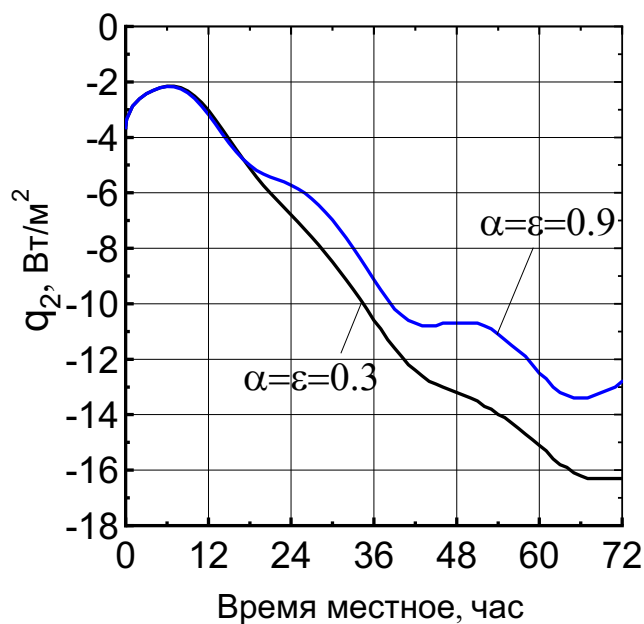


Рис. 4. Стена без теплоизоляции, зимнее время при различных $\alpha=\epsilon$

Теплоизоляция - пенополиуретан (ППУ, $\rho=150$ кг/м³, $c=1470$ Дж/кг К, $\lambda=0,029$ Вт/м·К). Начальные температуры слоев стены $t_0=19^\circ\text{C}$, температура неба $t_{r1}=0^\circ\text{C}$, нормальная плотность солнечного излучения в полдень $E_0=500$ Вт/м², $\alpha_f=0,3$, температура воздуха на внутренней стороне стенки t_{c2} постоянна и равна 20°C .

Как видно, влияние теплоизоляции на теплопотери существенно, причем эффектив-

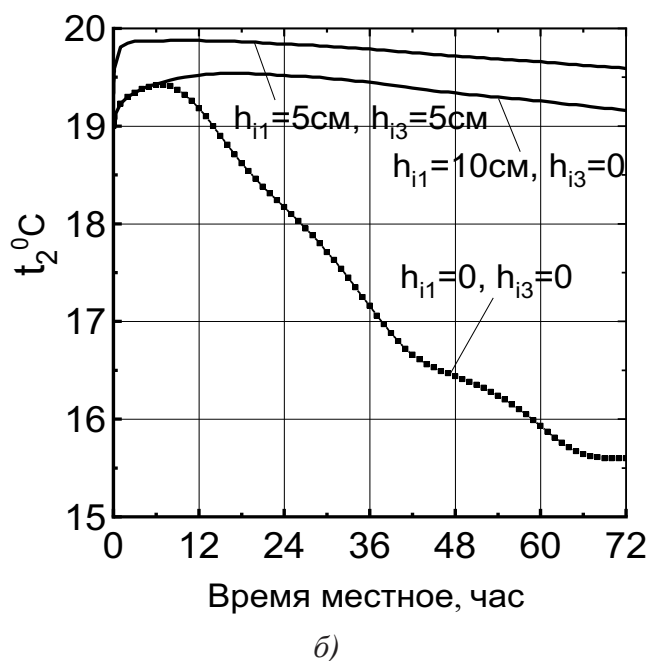
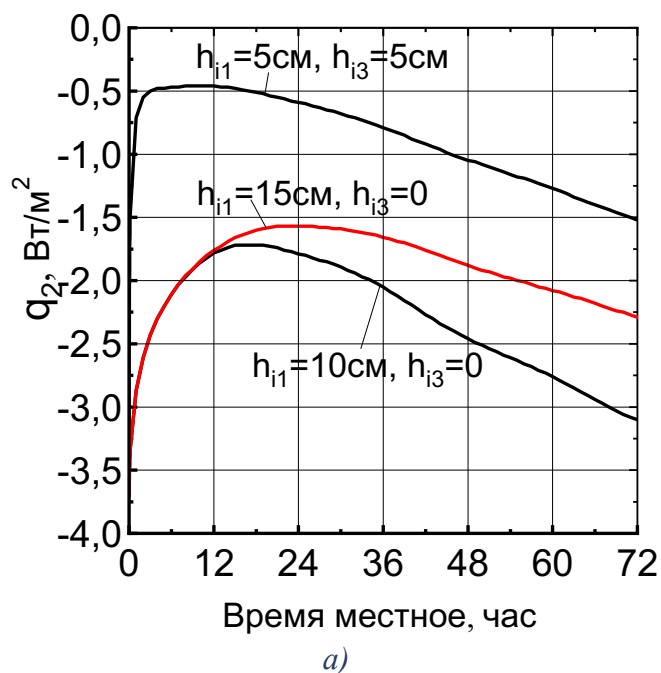


Рис. 5. Влияние толщины теплоизоляции и её перераспределения на теплопотери (а) и температуру внутренней поверхности стенки (б) в зимнее время (рис. 1)

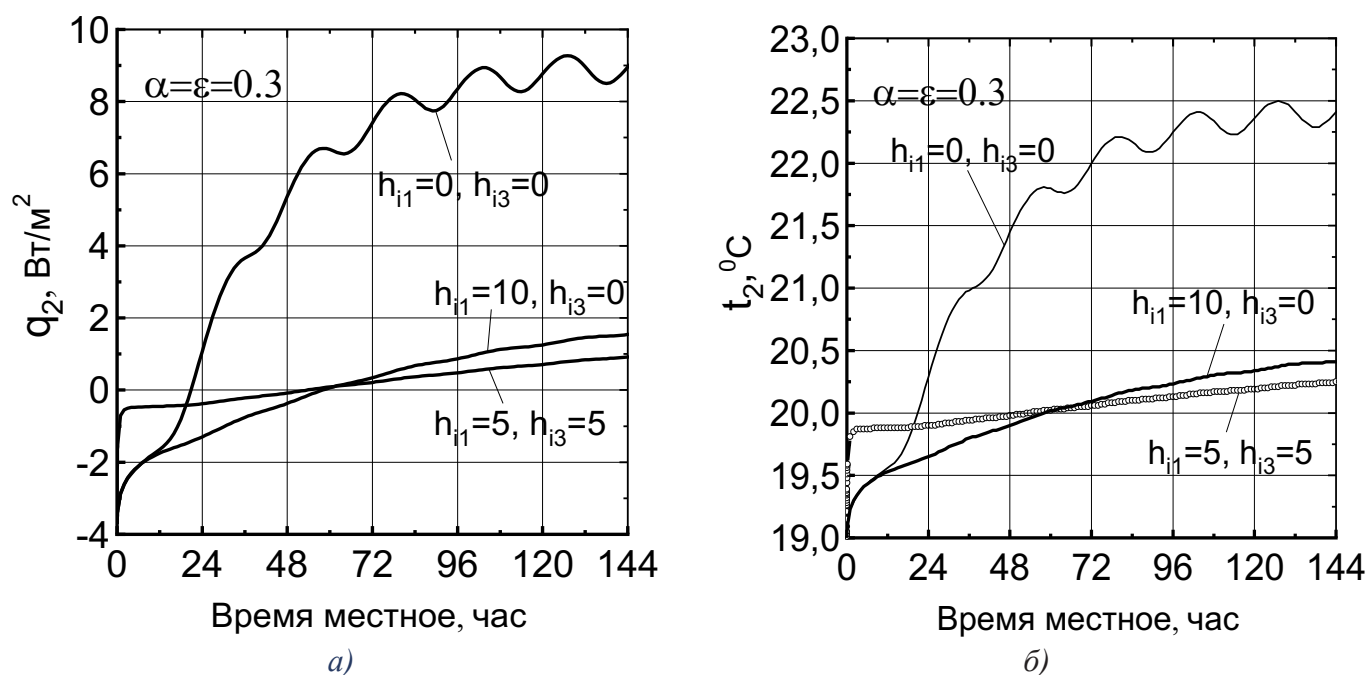


Рис. 6. Влияние толщины теплоизоляции и её перераспределения на теплоступления (а) и температуру внутренней поверхности стены (б) в летний период времени

но перераспределение теплоизоляции. Можно отметить, что выход на регулярный режим теплопотерь q_2 и температур t_2 для стены с теплоизоляцией существенно больше трех суток.

Начальное уменьшение теплопотерь (рис. 5 (а)) объясняется вначале ростом t_2 и далее её снижением (рис. 5 (б)).

На рис. 6 (а, б) приведены теплоступления через стену в летнее время (t_{cl} изменяется от 45°C до 20°C).

Как и ожидалось теплоизоляция существенно уменьшает теплоступления, однако здесь эффект её перераспределения меньше и зависит от начальной температуры стены, предыстория которой заметна до 2,5 суток, далее она может несколько уменьшить теплоступления.

Выводы

Итогом проведения научного исследования стала программа расчета нестационарной теплопроводности многослойных теплоизолированных стен, а основные выводы сведены к следующему:

1. Перераспределение теплоизоляции достаточно эффективно с точки зрения, как теплопотерь, так и теплоступлений для стен с большой тепловой инерцией (толщиной), а также обеспечения более комфортных температур на внутренней поверхности стены.

2. Разработанная программа может быть использована не только для выбора теплоизоляции, но и для исследования сезонных теплопотерь (теплоступлений) при заданных сезонных изменениях внешних условий.

Финансирование

Работа выполнена в рамках бюджетного и грантового финансирования Академии наук Республики Узбекистан.

Список литературы

1. Сергеев, Н.Н. Теоретические аспекты энергосбережения и повышения энергетической эффективности промышленных предприятий / Н.Н. Сергеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2013. – №. 1. – С. 29-36.
2. Использование солнечной энергии для повышения энергоэффективности жилых зданий: справочное пособие / исполн.: В.В.Покотилов, М.А.Рутковский. – Минск : 2014. – 51 с.
3. Об утверждении градостроительных норм и правил ГНП 2.01.18-24 «Нормы энергозатрат на отопление, проветривание и кондиционирование зданий и сооружений»
4. Повышение тепловой защиты зданий при новом строительстве, капитальном ремонте и ре-

конструкции: методические указания для самостоятельной работы / О.Л. Викторова, С.А. Холькин; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 47 с.

5. Расчеты тепловой защиты зданий. Методическое пособие. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве» Москва 2017. – 94 с.

6. Семенов, Б.А. Нестационарная теплопередача и эффективность теплозащиты ограждающих конструкций зданий / Б.А. Семенов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 1996. – 176 с.

7. Нагорная, А.Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий, автореф. к.т.н. – Челябинск, 2008. – 18 с.

8. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродяч. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

9. Математическое моделирование процесса нестационарной теплопередачи через строительные ограждающие конструкции в условиях прерывистого отопления / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, М.Е. Сапарёв. *International Research Journal*. – 2016. – №6 (48). – Часть 2. – С. 42-48.

10. Математическое моделирование теплопередачи через ограждающую конструкцию / А.А. Гражданкин, В.Т. Иванченко, А.В. Письменский // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2020. – № 6. – С. 29-39. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-29-39.

11. Ибрагимов, А.М. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях, автореф. д.т.н. – М., 2007. – 46 с.

12. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций, автореф. д.т.н. – Волгоград, 2018. – 35 с.

13. Решение задач нестационарной теплопроводности в многослойных конструкциях методом конечных разностей / А.Н. Токарева, В.Н. Литвинов, С.В. Панченко, М.С. Демченко / Методические указания – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донской ГАУ, 2021. – 22 с.

14. Теплозащита зданий при солнечном отоплении / Ш.И. Клычев, И.Г. Кенжаев, М.М. Захидов, Ш.А. Маразаков, Ш.С. Ташева // Проблемы

энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2022. – №3. – С. 185-192.

15. Heating Capacity of Single-Story Passive Solar Houses / Sh. I. Klychev, S. A. Bakhramov, M. M. Zahidov, I. G. Kenzhaev, Zh. Zh. Tursunbaev, Sh. A. Marazakov, Sh. S. Tasheva // *Applied Solar Energy*, 2024. – Vol. 60.- No. 5. – Pp. 736-742.

16. Леонтьев, А.И. Теория тепломассообмена / А.И. Леонтьев. – М., Высшая школа, 1979. – 495 с.

References

1. Sergeev, N.N. Theoretical aspects of energy saving and increasing the energy efficiency of industrial enterprises / N.N. Sergeev // *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economy*. - 2013. - No. 1. - P. 29-36.

2. Using solar energy to improve the energy efficiency of residential buildings: a reference manual / compiled by: V.V. Pokotilov, M.A. Rutkovsky. - Minsk: 2014. - 51 p.

3. On approval of urban planning norms and rules GNP 2.01.18-24 «Energy consumption standards for heating, ventilation and air conditioning of buildings and structures»

4. Improving thermal protection of buildings during new construction, major repairs and reconstruction: guidelines for independent work / O.L. Viktorova, S.A. Kholkin; under the general editorship of Doctor of Engineering Sciences, Professor Yu.P. Skachkov. - Penza: PSUAS, 2015.

5. Calculations of Thermal Protection of Buildings. Methodological Guide. Federal Autonomous Institution «Federal Center for Normation, Standardization and Conformity Assessment in Construction» Moscow 2017. - 94 p.

6. Semenov, B.A. Non-stationary Heat Transfer and Efficiency of Thermal Protection of Building Enclosing Structures / B.A. Semenov. - Saratov: Saratov State Tech. University. 1996. - 176 p.

7. Nagornaya, A.N. Mathematical Modeling and Study of Non-stationary Thermal Regime of Buildings, author's abstract of Candidate of Engineering Sciences. – Chelyabinsk, 2008. - 18 p.

8. Tabunshchikov, Yu.A. Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings / Yu.A. Tabunshchikov, M.M. Brodach. - M.: AVOK-PRESS, 2002. - 194 p.

9. Mathematical modeling of the process of non-stationary heat transfer through building enclosing structures under intermittent heating conditions

/ Yu.S. Vytchikov, I.G. Belyakov, M.E. Saparev. International Research Journal. - 2016. - No. 6 (48). - Part 2. - P. 42-48.

10. Mathematical modeling of heat transfer through the enclosing structure / A.A. Grazhdankin, V.T. Ivanchenko, A.V. Pismensky // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. - 2020. - No. 6. - P. 29-39. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-29-39.

11. Ibragimov, A.M. Non-stationary heat and mass transfer in multilayer enclosing structures, author's abstract of Doctor of Engineering Sciences. - M., 2007. - 46 p.

12. Kornienko, S.V. Increasing the energy efficiency of buildings by improving the methods for calculating the temperature and humidity conditions of enclosing structures, author's abstract of Doctor of Engineering Sciences. - Volgograd, 2018. - 35 p.

13. Solving problems of non-stationary thermal

conductivity in multilayer structures using the finite difference method / A.N. Tokareva, V.N. Litvinov, S.V. Panchenko, M.S. Demchenko / Methodical instructions - Zernograd: Azov-Black Sea Engineering Institute - branch of the Don State Agrarian University, 2021. - 22 p.

14. Thermal protection of buildings with solar heating / Sh. I. Klychev, I. G. Kenzhaev, M. M. Zakhidov, Sh. A. Marazakov, Sh. S. Tasheva // Problems of energy and resource saving. - Tashkent, 2022. - No. 3. - P. 185-192.

15 Heating Capacity of Single-Story Passive Solar Houses / Sh. I. Klychev, S. A. Bakhramov, M. M. Zahidov, I. G. Kenzhaev, Zh. Zh. Tursunbaev, Sh. A. Marazakov, Sh. S. Tasheva // Applied Solar Energy, 2024. - Vol. 60.- No. 5. – Pp. 736-742.

16. Leontiev, A.I. Theory of heat and mass transfer / A.I. Leontiev. - M., Higher School, 1979. - 495 p.

Сведения об авторах

Клычев Шавкат Исхакович – доктор технических наук, с.н.с., директор Научно-технического центра с конструкторским бюро и опытным производством Академии наук РУз, klichevsh@list.ru.

Бахрамов Сагдулла Абдуллаевич – доктор физико-математических наук, академик АН РУз, заведующий лабораторией «Лазеров и лазерных технологий» Научно-технического центра с конструкторским бюро и опытным производством АН РУз, bakhramov@mail.ru.

Абдурахманов Борис Маликович – доктор технических наук, с.н.с., старший научный сотрудник Института ионно-плазменных технологий АН РУз, bogarabdu@gmail.com.

Кенжаев Идирисбек Гуламович – доктор технических наук, проф., зав. лаб. Ошский государственный технический университет, kenjaevig@rambler.ru.

Багышев Алтынбек Сартмаматович – с.н.с. Ошского государственного технического университета, oshtu.adyshev@mail.ru.

Маразакوف Шавкат Адылбекович – с.н.с. Ошского государственного технического университета, marazakov.shavkat@mail.ru.

Дата поступления рукописи: 08.05.2025

Дата принятия рукописи: 16.06.2025