

УДК 662.997.621

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТИПОВОГО СЕЛЬСКОГО ДОМА

**Узаков Гулом Норбоевич** - доктор технических наук, профессор,

ORCID: 0009-0005-7386-8075, E-mail: [uzoqov66@mail.ru](mailto:uzoqov66@mail.ru)

**Ташмаматов Бобир Мансурович** - старший преподаватель,

ORCID: 0000-0001-7051-5307, E-mail: [bobur160189@mail.ru](mailto:bobur160189@mail.ru)

**Камолов Бехзод Илхомович** - докторант,

ORCID: 0009-0005-2119-3010, E-mail: [behzod0288@mail.ru](mailto:behzod0288@mail.ru)

Каршинский инженерно-экономический институт, г.Карши, Узбекистан

***Аннотация.** Системы теплоснабжения жилых зданий, в том числе типовых сельских домов, являются энергоемким потребителем тепловой и электрической энергии. Проведенные исследования показывают, что объем потребления энергоресурсов на обогрев 1,0 м<sup>2</sup> жилого помещения типового сельского дома в отопительный сезон составляет 12÷18 кубометров природного газа, 300÷380 кВт-час электроэнергии. В связи с этим обеспечение оптимального микроклимата в жилых зданиях с учетом изменчивости метеорологических параметров местности и рациональное использование ресурсов ВИЭ местности является актуальной.*

*В работе были использованы методы математического моделирования, теоретические основы теплотехники, теория подобия, экспериментальное исследование процессов теплообмена и обобщение результатов экспериментов.*

*Разработаны математические модели, основанные на уравнениях теплового баланса и теплового расчета типового сельского дома, позволяющие рассчитать температурный режим типовых сельских домов с гибридными системами теплоснабжения с учетом метеорологических характеристик местности, температуру внутреннего воздуха и изменение теплотехнических параметров конструкций стен здания.*

*Результаты моделирования температурного режима типового сельского дома показывают, что в зимний период (в условиях Каршинского района) при температуре внешнего воздуха -3 °С, для обеспечения требуемого температурного режима (+20 ÷ +22 °С) необходима солнечная радиация в пределах 500-600 Вт/м<sup>2</sup>. При температурах внешнего воздуха -10 °С, -13 °С и -26 °С требуется добавление дополнительных источников тепла.*

***Ключевые слова:** математическое моделирование, температурный режим, гибридная система теплоснабжения, основы теории подобия, уравнение теплового баланса.*

UO‘K 662.997.621

## NAMUNAVIY QISHLOQ UYINING ISSIQLIK REJIMINI MATEMATIK MODELASHTIRISH

**Uzoqov G‘ulom Norboyevich** – texnika fanlari doktori, professor

**Toshmamatov Bobir Mansurovich** – katta o‘qituvchi

**Kamolov Behzod Ilhomovich** – doktorant

Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

***Аннотация.** Yashash binolarining, jumladan, namunaviy qishloq uylarining issiqlik ta‘minoti tizimlari issiqlik va elektr energiyasining energiya iste‘molchisi hisoblanadi. O‘tkazilgan tadqiqotlar*

shuni ko'rsatadiki, namunaviy qishloq uylari uchun isitish mavsumida  $1 \text{ m}^2$  yashash maydonini isitish uchun sarflanadigan energiya miqdori  $12 \div 18 \text{ m}^3$  tabiiy gaz va  $300 \div 380 \text{ kVt}$ -soat elektr energiyasini tashkil qiladi. Shu munosabat bilan, yashash binolarida hududning meteorologik parametrlarning o'zgaruvchanligini hisobga olgan holda optimal mikroiklimni ta'minlash va hududdagi qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan oqilona foydalanish dolzarb masala bo'lib qolmoqda.

Ushbu ishda matematik modellashtirish usullari, issiqlik texnikasining nazariy asoslari, o'xshashlik nazariyasi, issiqlik almashinuvi jarayonlarini tajribaviy tadqiqot qilish va tajriba natijalarini umumlashtirish usullari qo'llanilgan.

Namunaviy qishloq uylari uchun hududning meteorologik parametrlari, ichki havo harorati va bino devor konstruksiyalarining issiqlik-texnik parametrlari o'zgarishini hisobga olgan holda, gibril issiqlik ta'minoti tizimlari harorat rejimini hisoblash imkonini beruvchi issiqlik balans tenglamalari va issiqlik hisoblash sxemalariga asoslangan matematik modellar ishlab chiqilgan.

Namunaviy qishloq uyining harorat rejimi bo'yicha o'tkazilgan modellashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki, qish davrida (Qarshi tumanidagi sharoitlar bo'yicha) tashqi havo harorati  $-3 \text{ }^\circ\text{C}$  bo'lganda, talab qilinadigan harorat rejimini ( $+20 \div +22 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ta'minlash uchun quyosh radiatsiyasi  $500 \div 600 \text{ Vt/m}^2$  doirasida bo'lishi kerak. Tashqi havo harorati  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-13 \text{ }^\circ\text{C}$  va  $-26 \text{ }^\circ\text{C}$  bo'lgan holatlarda qo'shimcha issiqlik manbalarini qo'shish zarurligi aniqlangan.

**Kalit so'zlar:** matematik modellashtirish, harorat rejimi, gibril issiqlik ta'minoti tizimi, o'xshashlik nazariyasi asoslari, issiqlik balans tenglamasi.

UDC 662.997.621

## MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL REGIME OF A TYPICAL RURAL HOUSE

**Uzakov, Gulom Norboevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor

**Tashmamatov, Bobir Mansurovich** – Senior Lecturer

**Kamolov, Behzod Ilhomovich** – Doctoral student (PhD)

Karshi Engineering-Economics Institute, Karshi city, Uzbekistan

**Abstract.** Heating systems of residential buildings, including typical rural houses, are energy-intensive consumers of thermal and electrical energy. Research shows that the energy consumption for heating  $1.0 \text{ m}^2$  of living space in a typical rural house during the heating season amounts to  $12 \div 18 \text{ m}^3$  of natural gas and  $300 \div 380 \text{ kWh}$  of electricity. Therefore, ensuring an optimal microclimate in residential buildings, considering the variability of local meteorological parameters and the rational use of renewable energy resources, is a relevant issue.

The study employed mathematical modeling methods, theoretical fundamentals of heat engineering, similarity theory, experimental investigation of heat exchange processes, and generalization of experimental results.

Mathematical models were developed based on heat balance equations and thermal calculation schemes for a typical rural house. These models allow for the calculation of the temperature regime of typical rural houses with hybrid heating systems, considering local meteorological characteristics, indoor air temperature, and changes in the thermal properties of the building's wall structures.

The results of modeling the temperature regime of a typical rural house show that during the winter period (in the conditions of the Karshi district) with an outside air temperature of  $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ , solar radiation within the range of  $500 \div 600 \text{ W/m}^2$  is necessary to ensure the required temperature regime ( $+20 \div +22 \text{ }^\circ\text{C}$ ). At external air temperatures of  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-13 \text{ }^\circ\text{C}$ , and  $-26 \text{ }^\circ\text{C}$ , additional heat sources are required.

**Keywords:** mathematical modeling, temperature regime, hybrid heat supply system, basics of similarity theory, heat balance equation.

## Введение

В нашей стране с целью экономии традиционных топливно-энергетических ресурсов расширяется внедрение энергосберегающих технологий с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Применение ВИЭ в отраслях экономики и социальных объектах обеспечить снижение расходов органического природного топлива в 2-3 раза. Поэтому задача энергосбережения и повышения энергоэффективности с использованием ВИЭ является актуальной [1]. В климатических условиях Кашкадарьинской области система теплоснабжения жилых зданий, в том числе типовых сельских домов, является энергоемким потребителем тепловой и электрической энергии. Проведенные исследования показывают, что объем потребления энергоресурсов на обогрев  $1,0 \text{ м}^2$  жилого помещения типового сельского дома в отопительный сезон составляет  $12 \div 18$  кубометров природного газа,  $300 \div 380$  кВт·час электроэнергии. В связи с этим обеспечение оптимального микроклимата в жилых зданиях с учетом изменчивости метеорологических параметров местности и рациональное использование ресурсов ВИЭ в местности является актуальной. Обеспечение стабильности системы теплоснабжения зависит от уровня комфорта в типовых сельских домах. Кроме того, комфорт внутреннего микроклимата в типовых сельских домах определяется применением новых энергоэффективных зеленых технологий на основе ВИЭ [2]. В настоящее время комфорт внутреннего микроклимата обеспечивается системами отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха [3].

Создание комфортных условий приводит к чрезмерному потреблению энергии за счет использования систем отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха. В этом случае важно рациональное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [4]. Решение этой инженерной задачи требуют проведение ряда исследований с применением современных методов моделирования.

## Методы и материалы

В данной работе разработана математическая модель нестационарного температурного режима типовых сельских домов, которая описывает динамику реальных процессов, происходящих в типовых сельских домах при переходе из одного состояния в другое, с учетом реальных особенностей тепловых характеристик конструкции здания и метеорологических параметров местности. Анализ тепловых режимов жилых одноэтажных типовых сельских домов показывает, что климатические параметры местности и теплотехнические характеристики ограждений во многом определяют расход тепловой энергии на отопление.

Для решения задач по энергетическому анализу теплового баланса типовых сельских домов, оптимизации температурного режима и повышения энергоэффективности важно использовать метод моделирования.

Методы математического моделирования теплового баланса зданий позволяют оценить основных теплотехнических и энергетических характеристик гибридных систем теплоснабжения с учетом теплофизических и метеорологических параметров местности.

Динамическая модель теплового баланса типового сельского дома учитывает взаимодействие между внутренним и наружным климатом, а также системами отопления и теплообмена [5]. Она позволяет прогнозировать температурные изменения в помещении, исходя из различных факторов, таких как тепловые нагрузки, теплопотери, радиационное тепло и т.п.

Динамическая модель теплового баланса и теплового режима типового сельского дома при нестационарном режиме с гибридной системой теплоснабжения (ГСТ) разработана согласно расчетной схеме теплового баланса (рис.1).

Математическое выражение теплообмена в типичном сельском доме является сложной задачей из-за наличия таких неизвестных величин, как коэффициент конвективного теплообмена, коэффициент теплопередачи и теплофизические свойства материалов,

использованных при строительстве здания, а также необходимость учета метеорологических особенностей местного климата, солнечной радиации, схемы освещения здания и влияния человеческого фактора.

Для математического моделирования теплового баланса типового сельского дома была разработана схема расчета теплового баланса, приведенная на рисунке 1. Температура внутреннего воздуха типового сельского дома регулируется в зависимости от ряда факторов. К этим факторам относятся удельные тепловые потоки, поступающие через стены, потолок и окна дома, вентиляция и инфильтрация воздуха, а также внутренние тепловые источники. При составлении теплового баланса типового сельского дома были учтены все вышеупомянутые величины (рис.1).

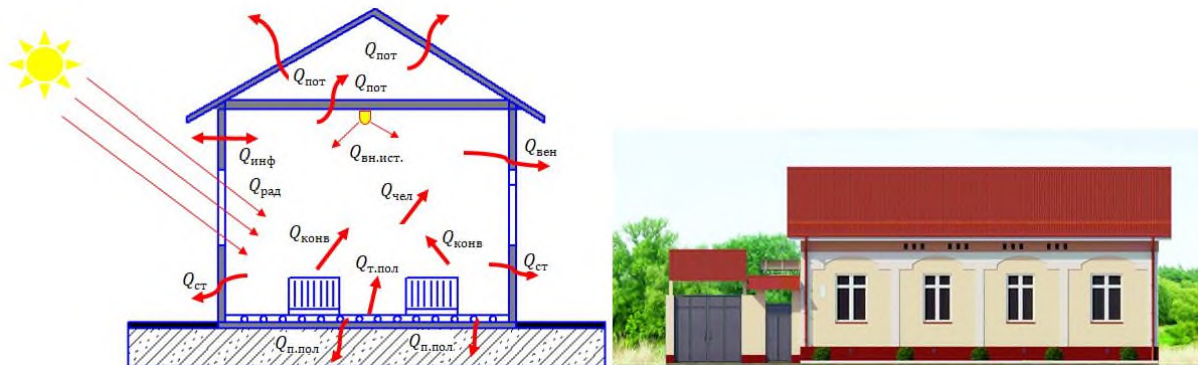


Рис.1. Расчетная схема теплового баланса типового сельского дома.

Математическая модель теплового баланса исследуемого типового сельского дома представлена следующими уравнениями.

### 1. Дифференциальное уравнение теплового баланса здания (по внутреннему воздуху):

Математическую модель теплового баланса типового сельского дома по рисунку 1 выражаем следующим уравнением:

$$\rho_v V_v C_v \frac{dt}{dt} = KF(t_{vv} - t_{nv}) + \rho_v G_v C_v (t_{vv} - t_{nv}) \cdot F + 1300G_v(t_{vv} - t_{nv}) \cdot F_n - q^\Sigma \tau F_i, \quad (1)$$

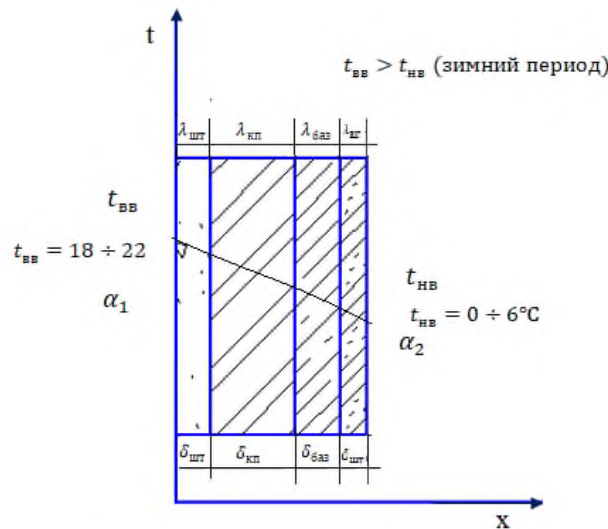
где  $\rho_v = 1,29$  — плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>),  $V_v$  — объем внутреннего воздуха (м<sup>3</sup>),  $C_v$  — удельная теплоемкость воздуха (Дж/(кг·°C)),  $K$  — коэффициент теплопередачи (Вт/(м<sup>2</sup>·K)),  $F$  — площадь поверхности теплопередачи (м<sup>2</sup>),  $t_{vv}$  — температура внутреннего воздуха (°C),  $t_{nv}$  — температура наружного воздуха (°C),  $1300$  — коэффициент, связанный с тепловыми характеристиками системы,  $V_r$  — объем газового отопительного устройства (м<sup>3</sup>),  $F_n$  — площадь отапливаемого здания, (м<sup>2</sup>),  $q^\Sigma$  — суммарный тепловой поток солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau$  — коэффициент излучения,  $F_i$  — площадь солнечного излучения (м<sup>2</sup>).

Коэффициент теплопередачи стенки здания можно рассчитать по следующей формуле [6-7]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{вн}$  — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности стены (Вт/(м<sup>2</sup>·°C)),  $\delta_i$  — толщина  $i$ -го слоя стены (мм),  $\lambda_i$  — теплопроводность  $i$ -го слоя стены (Вт/(м·°C)),  $\alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены (Вт/(м<sup>2</sup>·°C)).

Для расчета изменения температуры наружной стены дома составлена расчетная схема теплообмена, которая представлено на рис. 2.



**Рис.2. Схема теплообмена трехслойной плоской стены типового сельского дома.**

Рассмотрим дифференциальное уравнение теплового баланса по поверхности стенки здания и начальные условия для термодинамической системы «стена-окружающая среда».

**II. Дифференциальное уравнение теплового баланса по поверхности стенки здание:**

$$\rho_{ст} V_{ст} C_{ст} \frac{dt_{ст}}{d\tau} = Q_{рад} + Q_{ст} + Q_{конв}, \quad (3)$$

где  $\rho_{ст}$  – плотность материала стенки (кг/м<sup>3</sup>),  $V_{ст}$  – объем стенки (м<sup>3</sup>),  $C_{ст}$  – удельная теплоемкость материала стенки (Дж/(кг·°C)),  $dt_{ст}$  – температура стенки (°C),  $\tau$  – временной параметр (мин.),  $Q_{рад}$  – количество тепла, передаваемое радиацией (Вт),  $Q_{ст}$  – количество тепла, передаваемого через теплопроводность (Вт),  $Q_{конв}$  – количество тепла, теряемого из-за конвекции (Вт).

Для численного решения дифференциальных уравнений можно использовать метод Эйлера [8, 9]. В этом методе вычисления проводятся в несколько шагов, где на каждом шаге определяется изменение температуры на основе текущих значений [10-12].

Выражения 1-3 позволяют определить составляющие уравнения теплового баланса во внутренней среде объекта исследования.

Рассчитываем изменение температуры внутренней воздухе по следующей формуле:

$$\frac{dt_{вв}}{d\tau} = \frac{KF(t_{вв}-t_{нв}) + \rho_B G_B C_B (t_{вв}-t_{нв}) + 1300 G_B (t_{вв}-t_{нв}) \cdot F_n - q^{\Sigma} \tau F_i}{\rho_B V_B C_B} \quad (4)$$

Определяем температуру следующим образом.

$$t_{вв}(\tau + \Delta\tau) = t_{вв} + \left(\frac{dt_{вв}}{d\tau} \cdot \Delta\tau\right) \quad (5)$$

Для решения этого уравнения с использованием метода линейных дифференциальных уравнений первого порядка (метод Эйлера) на основе начального условия  $\tau = 0, t_{вв} = 20 \div 22$  °C. Таким образом, получено следующее уравнение

$$\frac{dt_{вв}}{d\tau} = \frac{KF + \rho_B G_B C_B + 1300 V_{\Gamma}}{\rho_B V_B C_B} \cdot t_B + \frac{KF + \rho_B G_B C_B + 1300 V_{\Gamma}}{\rho_B V_B C_B} \cdot t_{нв} + \frac{q^{\Sigma} F_i(\alpha\tau)}{\rho_B V_B C_B} \quad (6)$$

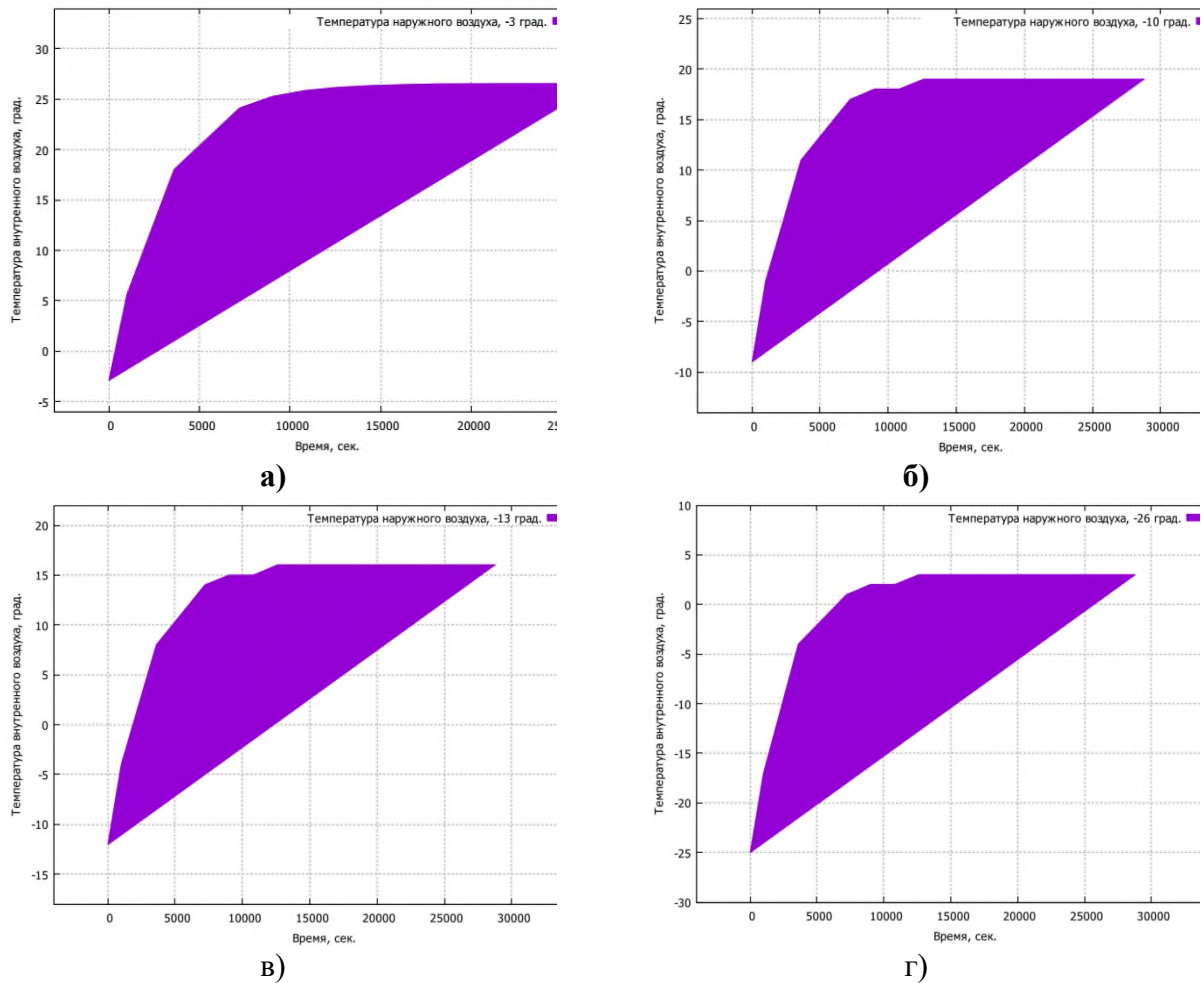
Таким образом,

$$t_B = t_{нв} + \frac{q^{\Sigma} F_i(\alpha\tau)}{KF + \rho_B G_B C_B + 1300 V_{\Gamma}} \left(1 - e^{-\frac{\rho_B G_B C_B + 1300 V_{\Gamma}}{\rho_B V_B C_B} \tau}\right) \quad (7)$$

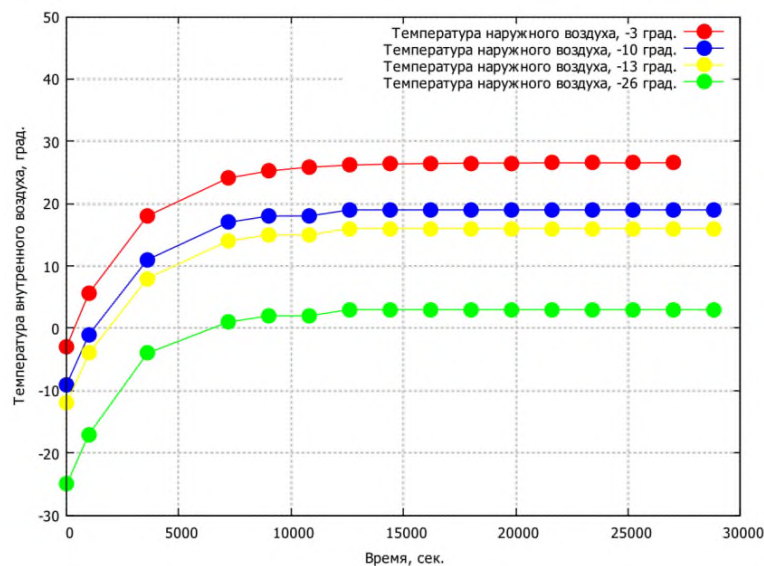
**Результаты**

Результаты расчета моделирования теплового баланса типового сельского дома в стационарном режиме показаны на рисунках 3-5.



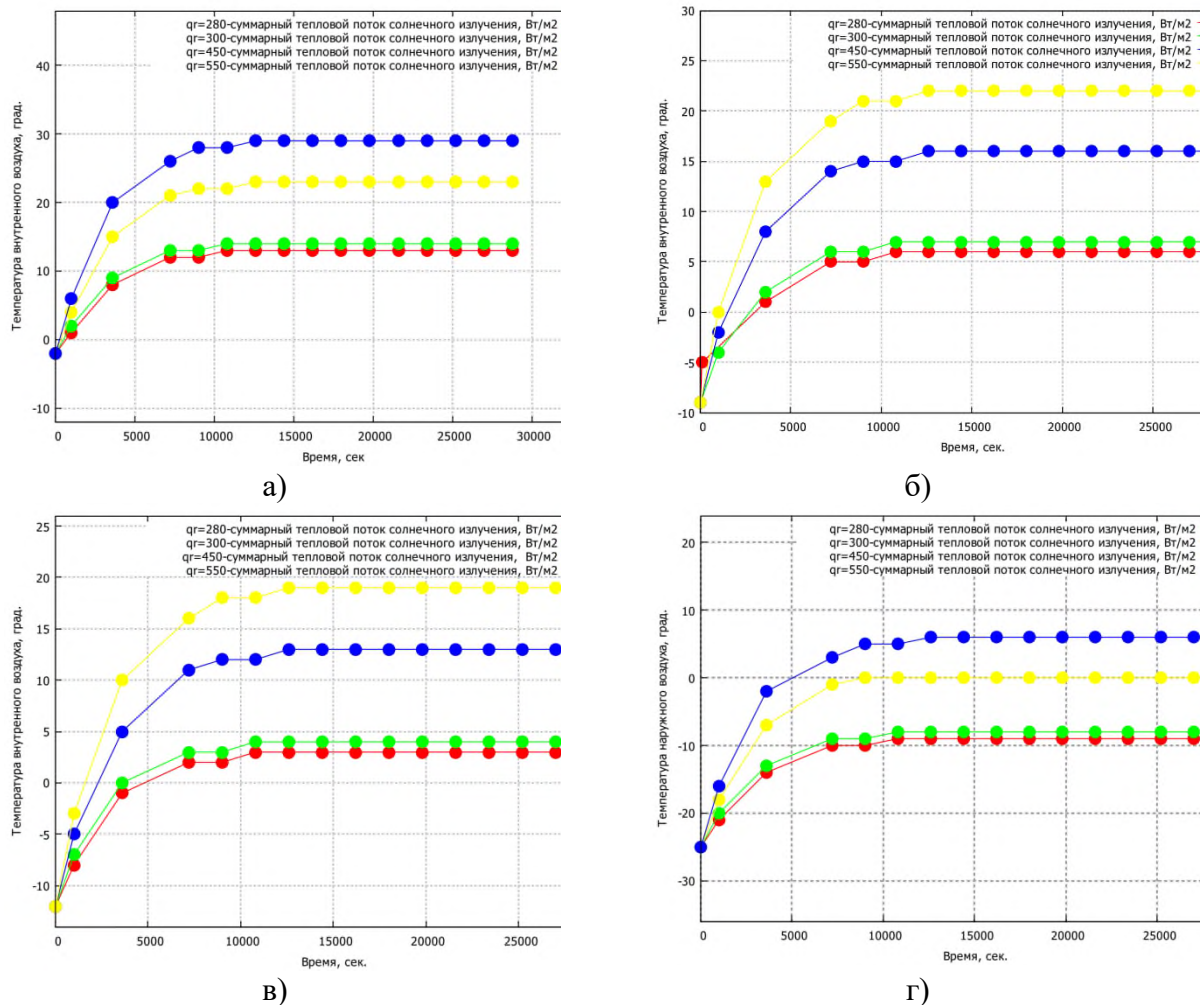


**Рис.3. Графики изменения температуры внутреннего воздуха сельского типового дома в стационарном режиме при температурах внешнего воздуха -3 °С (а), -10 °С (б), -13 °С (в), -26 °С (г).**



**Рис. 4. График изменения температуры внутреннего воздуха типового сельского дома в зависимости от температуры наружного воздуха.**

Результаты расчета температуры внутреннего воздуха типового сельского дома в стационарном режиме при изменении солнечной радиации и температуре внешнего воздуха в диапазоне от -3 до -26 °С показаны на рисунках 5 а, б, в, г.



**Рис.5. Графики изменения температуры внутреннего воздуха типового сельского дома в зависимости от солнечной радиации и температуры наружного воздуха -3 °C (а), -10 °C (б), -13 °C (в), -26 °C (г).**

### Заключение

Разработана математическая модель теплового баланса типового сельского дома для нестационарного температурного режима с учетом изменений основных теплотехнических параметров окружающей среды.

Результаты моделирования температурного режима типового сельского дома показывают, что в зимний период (в условиях Каршинского района) при температуре внешнего воздуха -3 °C, для обеспечения требуемого температурного режима (+20 - +22 °C) необходима солнечная радиация в пределах 500-600 Вт/м<sup>2</sup>. При температурах внешнего воздуха -10 °C, -13 °C и -26 °C требуется добавление дополнительных источников тепла (рисунки 3 б, в, г).

На основе результатов моделирования, представленных на рисунках 1-5, можно рассчитать необходимую тепловую нагрузку для системы отопления типового сельского дома при различных температурах внешнего воздуха и солнечной радиации для обеспечения требуемого температурного режима. Таким образом, математическая модель температурного режима внутреннего воздуха типового сельского дома позволяет корректировать внутреннюю температуру в зависимости от изменения солнечной радиации и температуры внешнего воздуха. В предложенной гибридной системе необходимое количество дополнительного тепла обеспечивается за счет солнечных коллекторов, инсоляции и теплонасосной утилизации тепла от низкопотенциальной канализации.

## Литература

- [1] Указ Президента Республики Узбекистан «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы» от 28.01.2022 г. № УП-60.
- [2] Узakov Г.Н., Давланов Х.А., Тошмаматов Б.М. Анализ гибридных систем отопления жилых зданий, использующих ВИЭ//Альтернативная энергетика. Научно-технический журнал. 2023. Т. 8. № 1. С. 9-15.
- [3] Узakov Г. Н., Базаров О. Ш., Давланов Х. А., Тошмаматов Б. Научно-инновационные разработки Каршинского инженерно-экономического института по использованию возобновляемых источников энергии Беларусь-Узбекистан: формирование рынка инновационной продукции. Сборник материалов научно практической конференции (Минск, 14–15 марта 2023 г.), стр. 353-356.
- [4] Узakov Г.Н., Давланов Х.А., Камолов Б.И., Тошмаматов Б.М. Интегрированные автономные системы энергоснабжения объектов, расположенных в сельской местности//Алтернативная энергетика. Научно-технический журнал. №2, 03.07.2023-г. Стр. 9-14.
- [5] Kudratov J., Toshmamatov B. Justification of heat-technical parameters of hybrid heat and hot water supply system // European international journal of multidisciplinary research and management studies Volume 03 Issue 2023 . p. 35-45.
- [6] Харченко В.В., Чемяков В., Тихонов П., Адомавичюс В. Теплоснабжение дома от теплонасосной системы, использующей возобновляемые источники энергии// Научные труды Литовской академии прикладных наук. Клайпеда, 2012, №7. – с. 45-52.
- [7] Овчаров С.В., Стребков А.А., Буряк А.В. Разработка комбинированной системы отопления жилых домов и коммунальных объектов в сельской местности//Энергетика, Энергосберегающие технологии и оборудование. № 1/1(21), 2015. – с. 46-51.
- [8] Каваленко Е.В., Тягунов М.Г. Гибридные энергетические комплексы с когенерацией в изолированных энергетических системах//Альтернативная энергетика и экология. №10-11, 2015, 167-177 с.
- [9] Путилов С.С. Метод расчета норматива удельного расхода топлива на отпущенную тепловую энергию от котельной//Univesum. Технический наук. №7 (112). 2023 г.
- [10] Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Хуторной А.Н. Автоматизированная дуальная система горячего водоснабжения с использованием энергии солнца и газового котла// Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. с. 163-173.
- [11] Чемяков В.В. Обоснование параметров системы автономного теплоснабжения сельского дома с использованием возобновляемых источников энергии: автореф. дис. канд. тех. наук. – Москва.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. – 27 с.
- [12] Uzakov G.N., Charvinski V.L., Ibragimov U.Kh., Khamraev S.I., Kamolov B. I. Mathematical modeling of the combined heat supply system of a solar house//Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 65, No 5 (2022), pp. 412–421.