

01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника  
01.04.14 Физикаи гармӣ ва назарияи техникаи гармӣ  
01.04. 14 The warm physics and the theory of warm technics

УДК 620.92:626.97  
ББК 31.15

**СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА  
АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛА  
ОГРАЖДАЮЩИМИ  
КОНСТРУКЦИЯМИ ЗДАНИЙ**

**Юсупова Мадина Зикруллоевна** - преподаватель кафедры общей физики и твердого тела ГОУ «ХГУ имени академика Б. Гафурова» (Республика Таджикистан, г. Худжанд), e-mail: [madinahon.yusupova@mail.ru](mailto:madinahon.yusupova@mail.ru).

**Мирзоқобилова Фирӯза Осимовна** - преподаватель кафедры общей физики и твердого тела ГОУ «ХГУ имени академика Б. Гафурова» (Республика Таджикистан, г. Худжанд), e-mail: [m\\_firuz\\_91@mail.ru](mailto:m_firuz_91@mail.ru)

**Назаров Раим Раҳмонович** - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и твердого тела, ГОУ «ХГУ имени академика Б. Гафурова» (Республика Таджикистан, г. Худжанд), e-mail: [raim\\_nazarov@mail.ru](mailto:raim_nazarov@mail.ru).

**Салиев Малик Абдулатипович** - кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра инновационного развития науки и новой технологии НАН Республики Таджикистан (Республика Таджикистан, г. Худжанд), e-mail: [malik.saliev@mail.ru](mailto:malik.saliev@mail.ru).

**ДИНАМИКАИ ШАБОНАҶУЗАИ  
ЗАХИРАИ ГАРМИИ СОҲТОРИ  
МАҲДУДКУНАНДАИ БИНО**

**Юсупова Мадина Зикруллоевна** - муаллимаи кафедраи физикаи умумӣ ва ҷисмҳои сахти МДТ “ДДХ ба номи академик Б. Гафуров” (Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд), e-mail: [madinahon.yusupova@mail.ru](mailto:madinahon.yusupova@mail.ru).

**Мирзоқобилова Фирӯза Осимовна** - муаллимаи кафедраи физикаи умумӣ ва ҷисмҳои сахти МДТ “ДДХ ба номи академик Б. Гафуров” (Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд), e-mail: [m\\_firuz\\_91@mail.ru](mailto:m_firuz_91@mail.ru).

**Назаров Раим Раҳмонович** - номзади илмҳои физика–математика, дотсенти кафедраи физикаи умумӣ ва ҷисмҳои сахти МДТ “Донишгоҳи давлатии Хучанд ба номи академик Б. Гафуров” (Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд), e-mail: [raim\\_nazarov@mail.ru](mailto:raim_nazarov@mail.ru).

**Салиев Малик Абдулатипович** - номзади илмҳои техникӣ, корманди пешбари илмии Маркази тараққиёти инноватсионии илм ва технологияҳои нави Академияи Миллии Илмҳои ҶТ (Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд), e-mail: [malik.saliev@mail.ru](mailto:malik.saliev@mail.ru).

**DAILY DYNAMICS OF HEAT  
STORAGE BUILDING  
ENCLOSURES**

**Yusupova Madina Zikrulloevna** - Teacher of the Department General Physics and Solid State under PEI «Khujand State University named after academician B.G.Gafurov» (Tajikistan Republic, Khujand), e-mail: [madinahon.yusupova@mail.ru](mailto:madinahon.yusupova@mail.ru).

**Mirzokobilova Firuza Osimovna** - Teacher of the Department General Physics and Solid State under PEI «Khujand State University named after academician B.G.Gafurov» (Tajikistan Republic, Khujand), e-mail: [m\\_firuz\\_91@mail.ru](mailto:m_firuz_91@mail.ru).

**Nazarov Raim Rahmonovich** - Candidate of Physics and Mathematical Sciences, Professor's Assistant of the Department General Physics and Solid State under PEI «Khujand State University named after academician B.Gafurov», (Tajikistan Republic, Khujand), e-mail: [raim\\_nazarov@mail.ru](mailto:raim_nazarov@mail.ru).

**Saliev Malik Abdulatovich** - Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher Center for Innovative Development of Science and Technology of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan (Tajikistan Republic, Khujand), e-mail: [malik.saliev@mail.ru](mailto:malik.saliev@mail.ru).

**Ключевые слова:** нестационарная теплопроводность, теплоустойчивость, теплопоступление, теплопроводность, тепловой поток, аккумулированная тепловая энергия, ограждающие конструкции зданий.

В данной работе предложен метод исследования тепловых потоков внутри ограждающих конструкций зданий на основе теории нестационарной теплопроводности при периодических гармонических колебаниях температуры воздуха. Процесс аккумулирования энергии, теплопоступление (приток тепла) и теплопотери (отток тепла) через ограждающие конструкции зданий исследуются как периодический гармонический процесс. Представлены результаты теоретических исследований тепловых потоков через плоские стены и крыши, ограждающих конструкций зданий в климатических условиях северного Таджикистана.

**Вожаҳои калидӣ:** гармигузаронии ғайрестатсионарӣ, муқовимати гармӣ, гармиворидшавӣ, гармигузаронӣ, сели гармӣ, захиракунии гармӣ, сохтори маҳдудкунандаи бино.

Кори мазкур усули омӯхтани сели гармиро дар дохили сохтори маҳдудкунандаи бино дар асоси назарияи гармигузаронии ғайрестатсионарӣ бо тағирёбии гармоникии даврии ҳарорати ҳаво пешниҳод мекунад. Раванди захираи энергия, гармиворидшавӣ (вуруди гармӣ) ва талафоти гармӣ (хуруҷи гармӣ) тавассути СМБ ҳамчун раванди гармоникии даврӣ омӯхта мешавад.

Натиҷаҳои таҳқиқоти назариявии динамикаи сели гармӣ тавассути деворҳо ва сақфҳои ҳамвори бино ва иншоот дар шароити иқлимии водиҳои шимолии Ҷумҳурии Тоҷикистон пешниҳод шудааст.

**Key words:** unsteady thermal conductivity, thermal stability, heat input, thermal conductivity, heat flux, accumulated thermal energy, building envelope.

This paper proposes a method for studying heat fluxes inside building envelopes based on the theory of non-stationary thermal conductivity with periodic harmonic fluctuations in air temperature. The process of energy storage, heat gain (heat inflow) and heat loss (heat outflow) through the building envelope are studied as a periodic harmonic process. The results of theoretical studies of heat flows through flat walls and roofs, enclosing structures of buildings in the climatic conditions of the northern valleys of the Republic of Tajikistan are presented.

Распределение температуры внутри плоской стенки теоретически определяется на основе решения общего уравнения теплопроводности [1]. При стационарной теплопроводности распределение температуры внутри стенки постоянно во времени и в пространстве. В реальных физических процессах имеет место нестационарная теплопроводность и происходит изменение температуры тела как в пространстве, так и во времени.

Аналитическое решение общего уравнения теплопроводности применимо к различным научным и техническим задачам представлено в работах, посвященных теории теплопередачи [1-3] и строительной теплофизике [4-6]. Численные методы решения задачи нестационарной теплопроводности приведены [2,7]. Нестационарные тепловые режимы отопления зданий и сооружений исследуются в [8,9], где отмечается необходимость разработки алгоритмов оптимального автоматического управления системами теплоснабжения с учетом реальных статических и динамических тепловых характеристик зданий для учета изменений температуры наружного воздуха.

В данной работе предложен метод исследования тепловых потоков внутри ограждающих конструкций зданий на основе теории нестационарной теплопроводности при периодических гармонических колебаниях температуры воздуха. Процесс аккумулирования энергии, теплопоступление (приток тепла) и теплопотери (отток тепла) через ограждающие конструкции зданий исследуются как периодический гармонический процесс.

Представлены результаты теоретических исследований тепловых потоков через плоские стены и крыши, ограждающих конструкций зданий в климатических условиях северных долин Республики Таджикистан.

Климатические и метеорологические условия в Центральной Азии в середине лета определяются антициклоном. При отсутствии облачности несколько недель устанавливается безветренная погода. Температура воздуха днем в тени достигает около 40 градусов. Мониторинг температуры воздуха и интенсивности солнечного излучения, проведенный нами в течении последних 5 лет показал, что период стабильной ясной погоды иногда длится несколько месяцев. Все лето устанавливается повторяющаяся динамика близкая к гармоническому закону колебания температуры воздуха с суточным периодом. Тепловое поле внутри стены зданий зависит от температуры воздуха местности, формы и ориентации зданий, скорости ветра и интенсивности прямой и рассеянной солнечной радиации [6].

Установлено, что колебания температуры наружного воздуха происходят циклически, подчиняются закону синусоиды и вызывают, в свою очередь, колебания фактической температуры на внутренней поверхности ограждения, которые также протекают гармонически по закону синусоиды.

Расчет теплоустойчивости наружных ограждений в теплый период проводится на основе строительных норм и правил (СНИП) с учетом климатических условий местности. Проверка наружных ограждений на теплоустойчивость осуществляется в районах со среднемесячной температурой воздуха в июле 21°C и выше [10]. Проведено сравнение результатов, полученных предлагаемым в данной работе методом моделирования аккумуляции тепла и расчета теплоустойчивости наружных ограждений для климатических условий г.Худжанд.

Теоретическое исследование тепловых потоков внутри стены здания проведем на основе формулы одномерного теплового поля в полуограниченном теле для периодического процесса теплопроводности.

Температура  $T_n$  поверхности  $x = 0$  полуограниченного тела изменяется по гармоническому закону [3],

$$\vartheta_n = T_n - \bar{T} = \vartheta_0 \cos(\omega\tau), \quad (1)$$

где  $\bar{T}$  - среднее значение температуры поверхности;  $\vartheta_0$  - амплитуда колебаний;  $\omega = 2\pi f$  - циклическая частота колебания температуры;  $f$  - количество колебаний в единицу времени.

Если подобные колебания продолжаются достаточно долго, то влияние начального распределения температуры на ход процесса исчезает и в теле устанавливается квазистационарное состояние, при котором температура в каждой точке совершает гармонические колебания около неизменного значения  $\bar{T}$ .

Распределение безразмерной температуры  $\Theta$  в этом случае имеет вид

$$\Theta = \vartheta/\vartheta_0 = \cos(\omega\tau - x\sqrt{\omega/2a})\exp(-x\sqrt{\omega/2a}), \quad (2)$$

где

$$\vartheta = T(x, \tau) - \bar{T}; \quad (3)$$

$T(x, \tau)$  - температура на расстоянии  $x$  от поверхности тела в момент времени  $\tau$ ;  $a$  - температуропроводность материала тела.

Амплитуда колебаний  $\vartheta_0 \exp(-x\sqrt{\omega/2a})$  быстро уменьшается с ростом  $x$  и на расстоянии, равном одной длине волны  $l = 2\pi\sqrt{2a/\omega}$ , составляет менее 0,2%  $\vartheta_0$ . Поэтому решение (2) можно с достаточной точностью использовать для пластины толщиной  $\delta > l$ .

Наряду с амплитудой изменяется и фаза колебаний температуры. В точках с координатой  $x$  момент, когда температура принимает свое среднее значение  $\bar{T}$ , наступает позднее чем на поверхности, на  $\Delta\tau = x/\sqrt{2a\omega}$

Скорость распространения тепловой волны  $u$  рассчитывается как

$$u = \frac{x}{\Delta\tau} = \sqrt{2a\omega}. \quad (4)$$

Плотность теплового потока  $q_{x=0}$  на поверхность полуограниченного тела

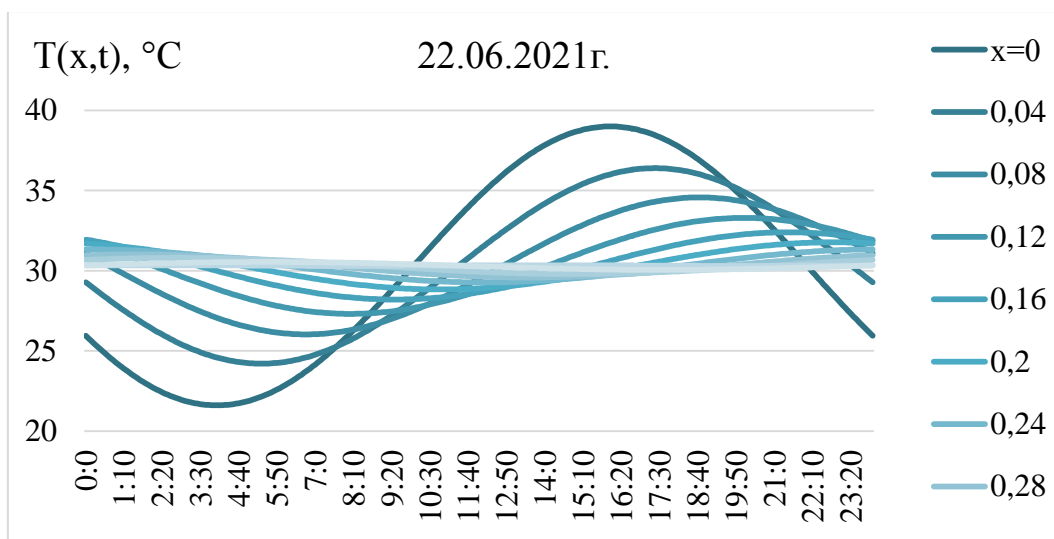
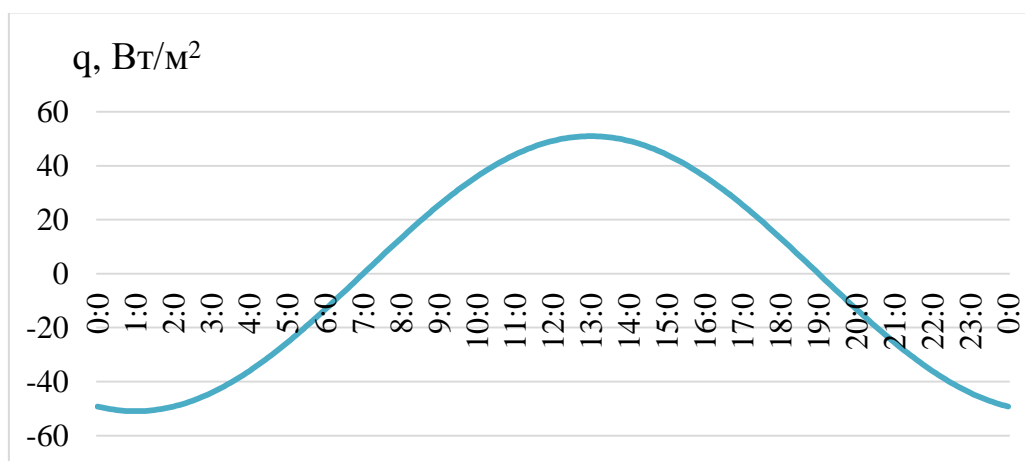
$$q_{x=0} = \lambda\vartheta_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (5)$$

Колебания температуры поверхности (1) отстают по фазе на  $\pi/4$  от колебания плотности теплового потока (5).

Моделирование суточной динамики температуры внутри стены здания проведено на основе описанной выше теории периодических процессов.

Результаты расчета температуры стены  $T(x, t)$  показаны на рис.1.

Расчеты проведены с учетом параметров (средних и экстремальных) по данным мониторинга температуры воздуха и поверхности стены, полученных для климатических условий г.Худжанд на дату 22.06.2021г.

Рис.1. Суточная динамика температуры стены  $T(x, t)$  летомРис.2. Суточная динамика плотности теплового потока  $q_{x=0}$ .

Как видно, амплитуда колебаний температуры  $T(x, t)$  по мере удаления от наружной поверхности стены ( $x=0$ ) уменьшается. Одновременно происходит сдвиг фазы максимума амплитуды колебаний  $T(x, t)$ . Запаздывание максимума амплитуды составило 13,58 часов на внутренней поверхности стены  $x=0,4$ м, почти половина суток. Результаты расчета плотности теплового потока на поверхности стены представлены на рис.2.

Плотность теплового потока дается выражением

$$q_{x=0} = 50,9 \text{ Вт/м}^2 * \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right)$$

Интеграл от величины  $q_{x=0}$  по времени  $\tau$  для периодических процессов равен нулю. В этом случае, суточные суммы оттока и притока энергии ОК равны и составили  $\pm 390 \text{ Втч/м}^2$ .

Мгновенная плотность теплового потока на поверхности ОК из кирпичной стены достигает  $50,9 \text{ Вт/м}^2$ .

Суточная динамика температуры внутри стены показана на рис.3 (а) с 0 до 8 часа утра, (б) днем с 9 до 16 часов и (в) ночью с 17 до 24 часов. Как видно, ночью идет процесс охлаждения наружной части стены. Днем начиная с 6 до 16 часов идет нагрев, а после снова охлаждение стены. Колебание температуры стены с наружной стороны практически не влияет на температуру стены с внутренней стороны, так как она близка к средней суточной температуре воздуха местности  $30^\circ\text{C}$ . Как отмечалось выше, моделирование распределения температуры ограждающих конструкций проведено для стены зданий, находящейся в тени в течении всего дня.

Длина волны теплового поля в кирпичной стене согласно проведенному нами расчету составляет 80 см. При толщине стены равной длине тепловой волны амплитуда колебаний составляет  $0,2\% \vartheta_0$  [3]. Толщина кирпичной стены по нормативу СНиП составляет 40 см для г.Худжанд, т.е. равна полуволне теплового поля, в этом случае амплитуда колебаний около  $3\% \vartheta_0$ .

Предложенный здесь метод расчета распределения температуры внутри ОК зданий позволяет теоретически исследовать динамику тепловых процессов внутри ограждающих конструкций зданий.

Получена аналитическая формула для определения среднеинтегральной температуры стены, которая используется для исследования динамики аккумуляции энергии материалом стены. Ниже исследуется суточная динамика процесса аккумуляции тепловой энергии в материале стен, расположенных в тени, т.е. при отсутствии прямого солнечного излучения.

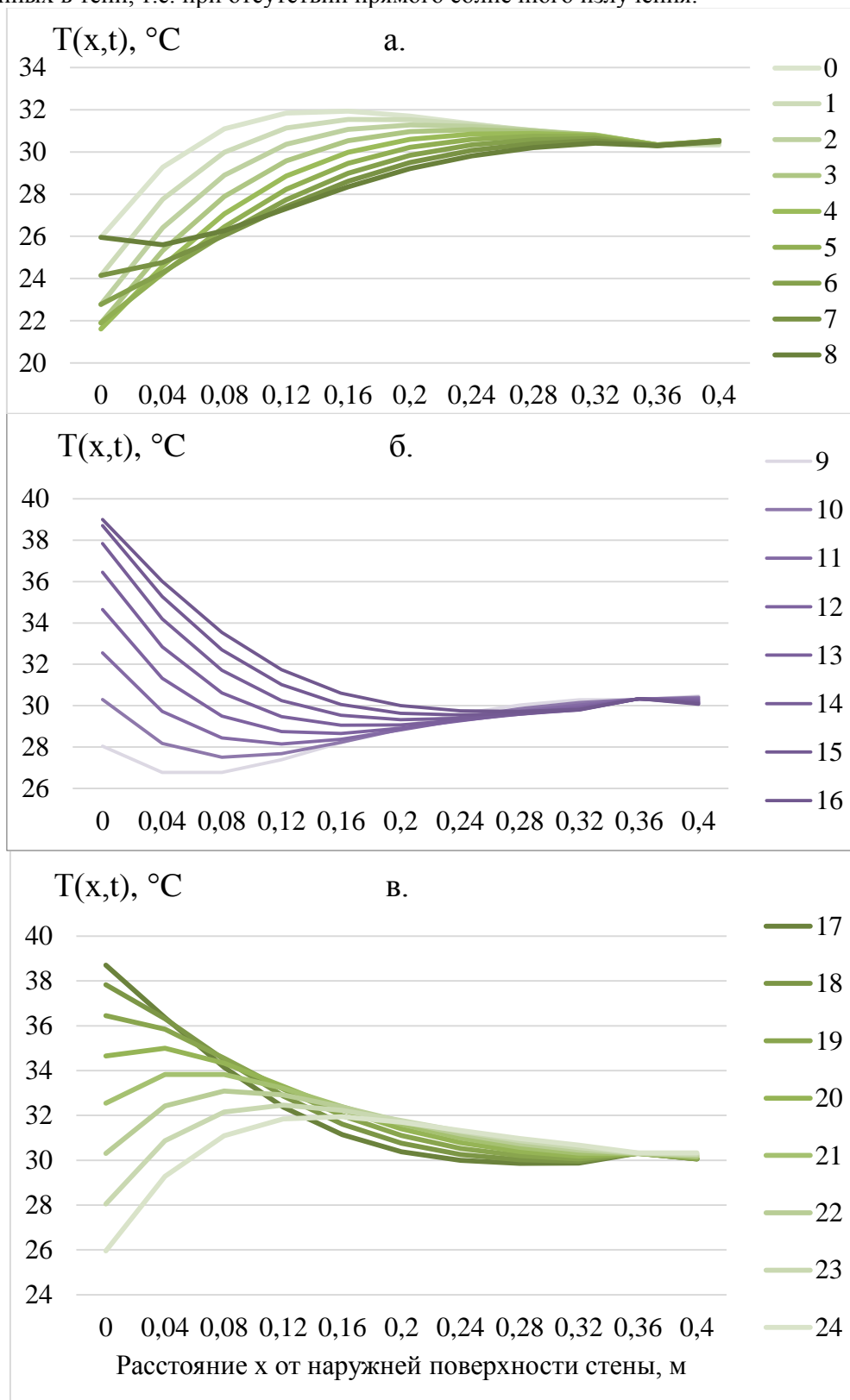


Рис.3. Динамика температуры внутри стены утром(а), днем (б) и ночью (в).

Процесс теплопередачи через плоскую стенку определяется метеопараметром – температурой воздуха местности и тепловыми характеристиками материала стены, например, строительного кирпича.

Общее количество аккумулированного тепла может быть найдено интегрированием распределения температуры по объему стены [9]. В условиях несимметричного теплообмена плоская стена толщиной  $\delta$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , удельной теплоемкостью  $c$ , плотностью  $\rho$  с внутренней поверхности омывается средой с температурой  $T_1$ , с внешней поверхности омывается средой с температурой  $T_2$ .

В общем случае, происходит теплообмен внутренней поверхности с воздухом внутри здания, имеющего температуру  $T_{вн}$ , наружной поверхности – с наружным воздухом с температурой  $T_{нар}$ . Температуры внутренней и наружной поверхностей рассматриваемой стенки  $T_{1ст}$  и  $T_{2ст}$  при нестационарном режиме меняются от  $T_n$  до  $T_k$ .

Аккумулированное тепло определяется выражением [9]

$$W_{акк} = \int_V \rho c * (T_k - T_n) dV \quad (6)$$

Среднеинтегральная по объему температура

$$T_{инт} = 1/V \int_V T dV \quad (7)$$

позволяет определить аккумулированное тепло

$$W_{акк} = c\rho V (T_{инт.к} - T_{инт.н}) \quad (8)$$

Для одномерного поля в стене с толщиной  $\delta$

$$T_{инт} = 1/\delta \int_0^\delta T(x, \tau) dx \quad (9)$$

Мощность, необходимая для изменения температуры стены, выражается через производную по времени от аккумулированного тепла

$$Q_{акк} = dW_{акк} / d\tau \quad (10)$$

Аккумулированное тепло  $W_{акк}$  в материале стены от начала до конца интервала притока определяется выражением [7]

$$W_{акк} = c\rho V (T_{инт.к} - T_{инт.н}) \quad (11)$$

Тепловой поток (мощность притока)  $Q_{акк}$  определяется выражением

$$Q_{акк} = dW_{акк} / d\tau \quad (12)$$

Аккумулирование энергии в течении  $i$ -того часа определяется

$$\Delta W_{акк} = c\rho V (T_{инт.i} - T_{инт.i-1}) \quad (13)$$

Суточная динамика производной аккумулированного тепла  $dW_{акк}/d\tau$  стены показана на рис.4. Расчет проведен по выражению (11) и (12). Параметры кирпичной стены: площадь  $S = 1 \text{ м}^2$ ; толщина  $\delta = 0,4 \text{ м}$ ; объём  $V = 0,4 \text{ м}^3$ ; плотность  $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$ ; теплоемкость  $c = 837 \text{ Дж/(кг.град)}$ .

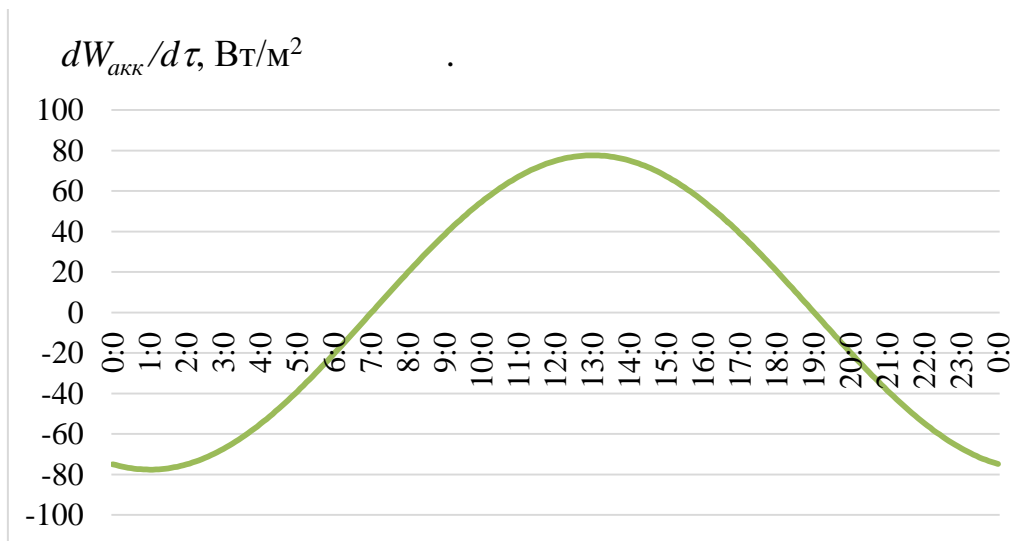


Рис.4. Суточная динамика производной аккумулированного тепла  $dW_{акк}/dt$

Разность  $T_{инт.к} - T_{инт.н}$  для начала (7.00) и конца (19.00) интервала притока составляет  $3,5^\circ\text{C}$  по результатам наших расчетов. В этом интервале величина  $dW_{акк}/dt$  имеет положительные значения (см.Рис.4). Таким образом,

$$W_{акк} = c\rho V (T_{инт.к} - T_{инт.н}) = (837 \text{ Дж/(кг.град)}) * (1800 \text{ кг/м}^3) * 0,4 \text{ м}^3 * 3,5^\circ\text{C}$$

$$W_{акк} = 2109240 \text{ Дж для площади стены } 1 \text{ м}^2.$$

Суточная динамика интегральной плотности потока тепла и её составляющих на наружных ( $x=0$ ) и внутренних ( $x=0,4\text{м}$ ) поверхностях стены представлены на рис.5.

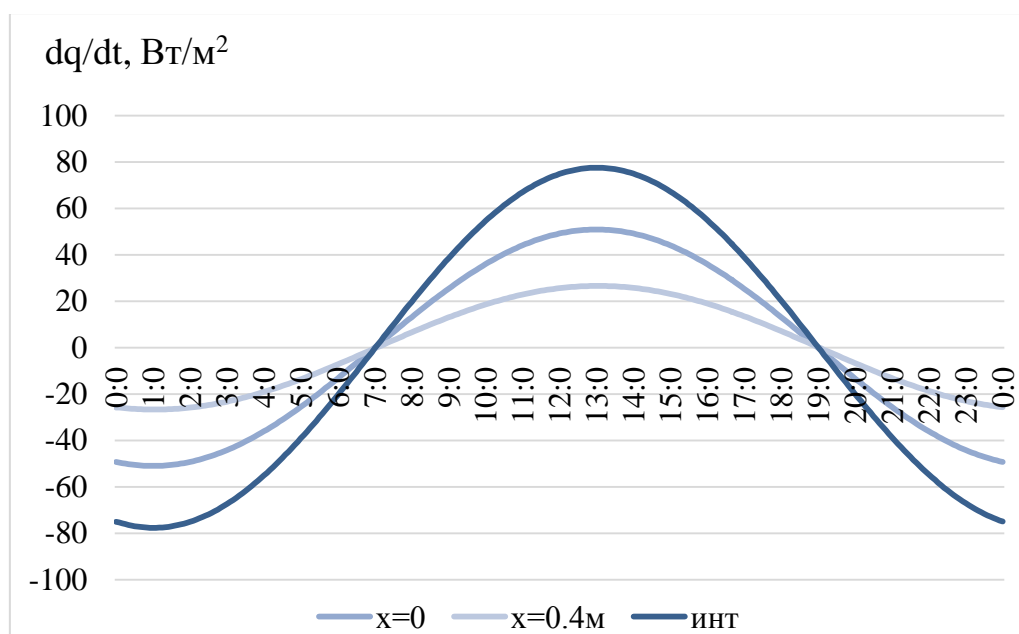


Рис.5. Суточная динамика интегральной плотности потока тепла и её составляющих на наружных ( $x=0$ ) и внутренних ( $x=0,4$  м) поверхностях стены.

В заключении приведем основные полученные результаты.

Аккумулированная тепловая энергия стеной площадью 1 м<sup>2</sup> и толщиной 0,4 м из строительного кирпича составляет 2,11 мДж для интервала притока с 7.00 по 19.00 за день 22.06.21г. Ночью происходит отток этой энергии через наружную и внутреннюю поверхность стены.

Интервал притока тепла и её аккумуляции в материале стены находится в области  $dq/dt > 0$ . Разность температуры  $T_{\text{инт}}$  в начале и конце интервала 3,5°C. При этом температура наружной поверхности стены колеблется от 22°C до 39°C, разность температуры достигает более 17°C.

Согласно теоретическому расчету при гармонических колебаниях, средние суточные температуры на наружной поверхности стены и на внутренней поверхности стены равны 30,3°C. Полученные теоретические результаты совпадают с данными мониторинга температуры стены с наружной и внутренней стороны находящихся в тени стен. При поступлении прямого солнечного излучения на поверхность стены необходимо применение численных методов расчета теплового поля, учет скорости изменения температуры наружной и внутренней стороны стен.

Проведено сравнение полученных результатов суточной динамики теплоступления стен на основе разработанного метода и данными расчета теплоустойчивости наружных ограждений по СНиП [10].

Разработанный метод для теоретического исследования и моделирования процесса теплопередачи, аккумуляции тепловой энергии в материале ограждающих конструкций зданий использован при разработке и создании многослойных пассивных стен и крыш зданий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В., Федоров Д.Г. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений. Вестник Чувашского университета. 2015. № 1, С.20-28.
2. Богословский В.Н., Щеглов В.П., Разумов Н.Н. Отопление и вентиляция. М., Стройиздат, 1980, 296с.
3. Богославский В.Н., Сканава А.Н. Отопление. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.
4. ГНиП РТ23.01-2018 «Строительная климатология». Комитет по архитектуре и строительству при правительстве Республики Таджикистан. –Душанбе:Издательство ГУП «НИИСА»,«Издательский центр»,2018г.-34с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.Энергия, 1973, 370с.
6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Под общей ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина. М.,Энергоатомиздат, 1983, 552 с.
7. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: Абок-Пресс, 2002.194 с.
8. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопередачи // Региональная энергетика: проблемы и решения: сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. Вып. 9. С. 128–144.

9. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочное пособие. Под общей ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина. Энергоатомиздат, М.,1988, 560 с.
10. Ф.Крейт, У.Блек. Основы теплопередачи. М., Мир, 1983, 512 с.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Tarasov V.A., Tarasova V.V., Fedorov D.G. Investigation of non-stationary thermal regimes of heating buildings and structures. Bulletin of the Chuvash University. 2015. No. 1, P.20-28.
2. Bogoslovsky V.N., Shcheglov V.P., Razumov N.N. Heating and ventilation. М., Stroyizdat, 1980, 296p.
3. Bogoslavsky V.N., Skanavi A.N. Heating. Moscow: Stroyizdat, 1991, 735 p.
4. GNIП RT 23.01-2018 "Construction climatology". Committee for Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan. –Dushanbe: Publishing House of State Unitary Enterprise "NIISA", "Publishing Center", 2018-34 p.
5. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Basics of heat transfer. М. Energy, 1973, 370p.
6. Industrial heat power engineering and heat engineering. Under the general ed. V.A. Grigoriev and V.M. Zorin. М., Energoatomizdat, 1983, 552 p.
7. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings. Moscow: Abok-Press, 2002, 194 p.
8. Tarasova V.V. Mathematical modeling of non-stationary heat transfer processes // Regional power engineering: problems and solutions: collection of articles. scientific. tr. Cheboksary: Chuvash Publishing House. un-ta, 2013. Issue. 9. P.128–144.
9. Theoretical foundations of heat engineering. Heat engineering experiment. Reference manual. Under the general ed. V.A. Grigoriev and V.M. Zorin. Energoatomizdat, М., 1988, 560 p.
10. F. Craith, W. Black. Basics of heat transfer. М., Mir, 1983, 512 p.