

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49

¹. *Мерциев А.А., ¹Головинский П.А., ²Свиринов М.В., ²Семенов А.С.¹Воронежский государственный технический университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sasha_1990@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ С ДЕРЕВЯННЫМИ ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Аннотация. Рассмотрен нестационарный подход к расчету периодических по времени тепловых режимов малоэтажных зданий с ограждающими конструкциями, выполненными из деревянного бруса, оснащенных стеклопакетами. Применение предложенного метода позволяет определить нестационарную тепловую нагрузку системы кондиционирования воздуха для данного типа домов, а также требуемые компенсирующие мощности в течение суток. Дан анализ условий применимости плоскостных теплофизических расчетных схем при наличии пространственно неоднородного нагрева. Проведено уточнение процедуры усреднения коэффициентов конвективного теплообмена для вертикальных стен по периодическим колебаниям температуры. Предложен алгоритм расчета периодического теплового режима, основанный на представлении временных зависимостей в виде ряда Фурье. Показана роль в тепловом обмене и энергетической эффективности деревянного дома потока солнечного излучения через стеклопакеты. Предложенная математическая модель теплообмена помещения учитывает эффекты запаздывания распространения температурного поля в стенах при изменении температуры окружающего воздуха и динамическое изменение теплового потока от световых потоков снаружи и внутри помещения. Определено, что защита от прямого попадания солнечных лучей в помещение через оконный проем позволяет снизить пиковые затраты на кондиционирование воздуха в летний период на треть для пиковых режимов кондиционирования.

Ключевые слова: дом из дерева, экологическая чистота, нестационарная теплопередача, периодический тепловой режим, энергетическая эффективность.

Введение. При проектировании и возведении современных экологичных и энергоэффективных зданий важнейшую роль играет выбор материалов и проектных решений с использованием больших остекленных поверхностей [1–3]. При этом стараются максимально учесть тепловой обмен через остекленные поверхности и влияние инсоляции на тепловой режим в зависимости от ориентации строения. Остекление, выходящее на север, лучше подходит для улавливания солнечной энергии зимой, когда солнце низко в небе, и его легче затенять от прямых солнечных лучей летом, когда солнце в небе высоко. Для одноэтажных зданий несложно сделать карниз так, чтобы летнее солнце не вызывало перегрева, и давало дополнительный обогрев зимой, как показано на рис. 1. На нем схематически обозначены основные элементы помещения, включая прозрачную остекленную наружную поверхность, стены, потолок и освещаемый солнцем пол, а также направления основных радиационных и тепловых потоков [1].

Одним из вариантов пассивного управления тепловыми потоками является использование стены Тромба [4], предполагающей применение каменных и бетонных массивов для обеспечения тепловой инерции конструкции и выравнивания внутренних температурных колебаний в течение суток. Более простым способом получения теп-

лого дома является утепление стены с деревянным каркасом [5]. Существует широкий набор легкодоступных теплоизолирующих материалов [6], которые просто устанавливаются в полость между внутренней облицовкой и внешней облицовкой. Их типичным недостатком является недолговечность и необходимость замены через 10–15 лет эксплуатации. В связи с этим, особый интерес среди экологически чистых решений в рамках концепции энергетически эффективного жилища вызывают дома из деревянных конструкций [7–9]. Использование древесины, как и любого другого материала при проектировании ограждающих конструкций, требует проведения теплофизических расчетов для определения условий обеспечения комфортного проживания.

В настоящее время существуют различные стационарные и нестационарные методы расчета теплового режима в помещении [10]. Базовый подход основан на стационарных методах теории теплопереноса. Процесс расчета при этом прост, но погрешность результатов довольно значительна. Более сложный динамический анализ теплового режима основывается на теории нестационарного теплообмена и методах теплового баланса. С учетом растущего спроса на дома из дерева, представляет значительный практический интерес развитие эффективных инженерных методов расчета их теплового режима. Важ-

нейшим при этом является правильный учет одновременно инсоляции и конвективного теплообмена.

При теплообмене в ограниченном пространстве явления нагревания и охлаждения газа протекают вблизи друг от друга, и разделить их не всегда возможно. Вследствие ограниченности пространства и наличия восходящих и нисходящих потоков, условия движения усложняются, поскольку они зависят не только от температурного напора, но и от формы и геометрических размеров обтекаемых тел [11, 12].

Механизм конвекции существенно зависит от формы и размеров ограждения рассматриваемой ячейки. Такая конвекция в ограниченном

объеме помещения, вызванная только естественными силами (без вынужденной вентиляции), называется естественной. Одним из стандартных объектов исследований теплообмена в помещениях является модельная ячейка в форме параллелепипеда с различным расположением тепловых источников, в том числе периодических во времени [13]. Соответствующие теоретические и экспериментальные исследования показывают необходимость учета конкретных условий теплообмена на границах и наибольшую роль числа Рэлея в качестве определяющего параметра [14–17].

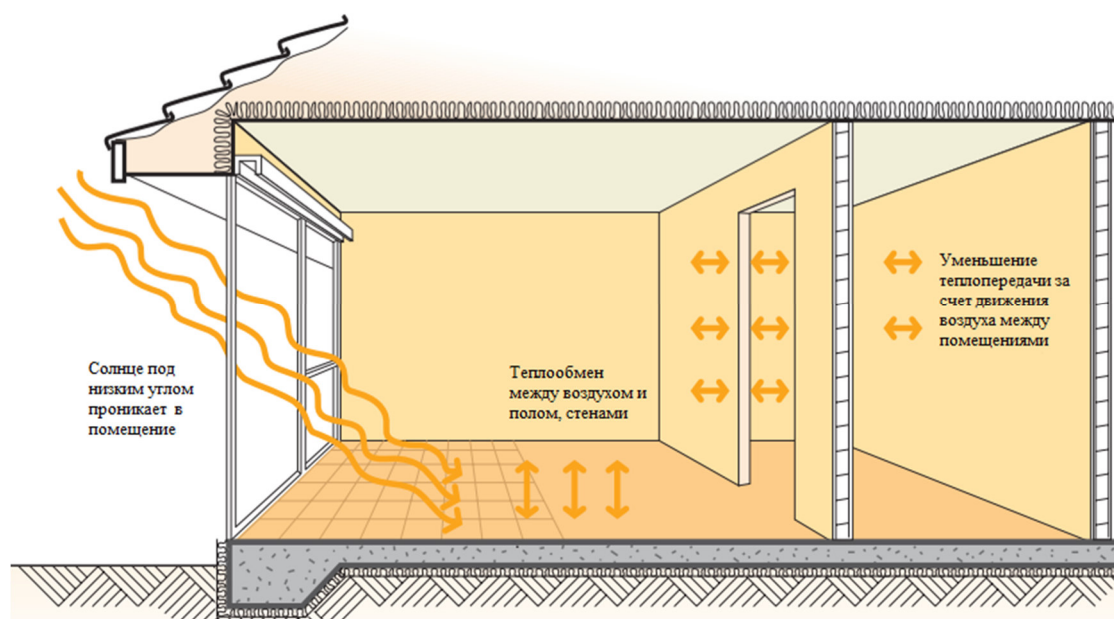


Рис. 1. Тепловые и радиационные потоки в помещении зимой [1]

При проведении конкретных расчетов требуются данные о тепловых характеристиках воздуха [18], которые описываются в интервале температур 300–350 К эмпирическими соотношениями [16] (в СИ): динамическая вязкость, плотность, теплопроводность, теплоемкость, кинематическая вязкость. Для экспериментального изучения конвективного теплообмена используются тестовые помещения также чаще всего в форме параллелепипеда с линейными размерами в несколько метров [14]. Выбор размеров определяется их близостью к размерам реальных помещений. При размерах помещения меньше ~1 м не будет проявляться турбулентная стадия конвективного теплообмена, в то время как существенно большие модели не только труднее изготовить, но в них не будет наблюдаться эффект стеснения конвективного потока в ограниченных объемах, характеризующий отличие естественной конвекции от свободной конвекции. В реальных помещениях идеальная картина свободного

конвективного теплообмена нарушается влиянием ограничения объема и наличием нескольких холодных и нагретых поверхностей теплообмена. Естественная конвекция в помещении вблизи нагретой стенки характеризуется наличием трех выраженных зон [19]: зоны ламинарного движения, зоны турбулентного движения и зоны торможения вблизи потолка. С учетом растущего спроса на дома из дерева, представляет значительный практический интерес развитие эффективных инженерных методов расчета их теплового режима. Важнейшим при этом является правильный учет одновременно инсоляции и конвективного теплообмена.

Распространение тепла в помещениях происходит не мгновенно, и если установление теплового равновесия в воздушной среде помещения происходит достаточно быстро, то тепловая инерция ограждения может приводить к существенному запаздыванию отклика системы на из-

менение внешней температуры. Поэтому необходимо учитывать роль запаздывания температурного поля в массиве дерева при различной толщине стены и использовать для решения задачи нестационарные методы расчета.

Цель исследований авторов состояла в поиске эффективного способа решения нестационарной задачи теплопроводности с учетом переменных граничных условий. Указанная цель предусматривает расчет динамики и общих затрат на кондиционирование воздуха в помещении для определения путей их снижения.

Задачи исследований заключались в выявлении влияния на тепловой режим особенностей конвективного теплообмена и переменного потока солнечного излучения.

Материалы и методы. Для проведения конкретных расчетов теплообмена помещения в рамках сформулированной модели необходимо

задать ряд геометрических и физических параметров, представленных в таблице 1. Следует учитывать, что материал дерева является сильно анизотропным, и теплопроводность древесины вдоль волокон выше на 40 %–90 %, чем поперек волокон, в зависимости от породы дерева. Надежные данные по теплофизическим свойствам древесины содержатся в справочнике [20]. Рассмотрим режим поддержания в помещении постоянной температуры 22 °С. В этом случае основной расчетной величиной является расход энергии на поддержание заданной температуры непосредственно в данном помещении. Остальные смежные помещения будем считать находящимися при такой же температуре за счет собственного кондиционирования воздуха. Основные параметры, необходимые для теплофизического расчета, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры расчетной модели

Наименование параметра	Числовое значение параметра
Теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_p	1,005 кДж/(кг·К)
Удельная плотность воздуха ρ	1,2041 кг/м ³
Объем помещения V	81,9 м ³
Коэффициент теплообмена внутренней поверхности стены α_w	3(стена противоположная стене с остеклением)
Коэффициент теплообмена внешней поверхности стены α_e	4,2 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплообмена поверхности пола α_f	3 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплообмена поверхности светового пятна α_s	4,2 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплообмена поверхности потолка α_p	2,8 Вт/(м ² ·К)
Размеры остекленной стены (высота* ширину):	(2 м x 1,7 м)х2
Тепловое сопротивление единицы площади поверхности остекления R	0,55 (м ² ·К/Вт)
Коэффициент воздухопроницаемости остекления β	5 кг/(м ² ·ч)
Максимальные значения светового потока для светового пятна q_0 (Вт/м ²)	980 Вт/м ²
Коэффициент поглощения света деревом ε	0,6
Размеры стен, смежных с остеклением (высота* ширина):	(2,8 м x 4 м)х2
Размеры светового пятна на полу:	0,9 м ²
Время освещения светового пятна t в ч.	4,5 ч
Толщина стен L	0,2 м
Толщина пола L_f	0,2 м
Толщина потолка L_p	0,2 м
Теплоемкость материала стены c_w	1,56 кДж/(кг·К)
Удельная плотность материала стены ρ_w	540 кг/м ³
Теплопроводность материала стены λ_w	0,15 Вт/(м·К)
Теплоемкость материала пола c_f	1,56 кДж/(кг·К)
Удельная плотность материала пола ρ_f	540 кг/м ³
Теплопроводность материала пола λ_f	0,15 Вт/(м·К)
Теплоемкость материала потолка c_p	1,56 кДж/(кг·К)
Удельная плотность материала потолка ρ_p	540 кг/м ³
Теплопроводность материала потолка λ_p	0,15 Вт/(м·К)

В качестве примера приведем расчет теплового режима в один из жарких дней июля 2021 года. По данным на 14.07.2021 погодного портала [21] максимальная температура воздуха со-

ставляла 33 °С в 17:00, а минимальная температура 16 °С в 5:00. Соответствующий суточный график температурной зависимости для воздуха от времени представлен на рис. 2. Средняя тем-

пература составляет $T_0 = 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$, амплитуда колебаний $\Delta T = 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Для определения потока тепла, поступающего в помещение, необходимо учесть доминирующий теплообмен через наружную стену и окна. В качестве исходного приближения будем считать, что поступающая через окно лучистая энергия поглощается фасадом с коэффициентом ε . Коэффициент пропускания

света трехслойным стеклопакетом примем в соответствии с ГОСТ 11-90 равным 73,4%. Отметим, что надежность определения коэффициентов теплообмена поверхностей зависит, в том числе, от скорости ветра, а сами их величины могут значительно отличаться в различных источниках [22].

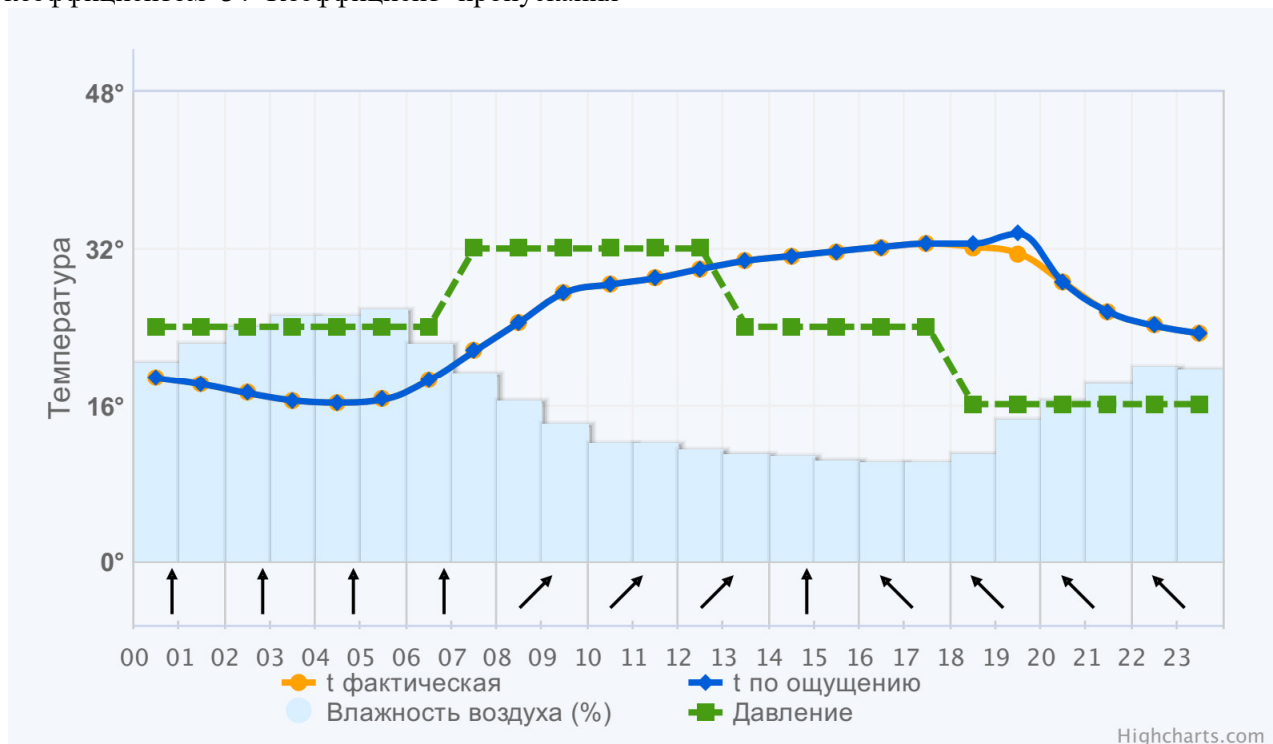


Рис. 2. Зависимость температуры воздуха по шкале Цельсия в Воронеже 14.07.2021 от времени

На рис.3 представлено распределение температур в помещении, полученное с использованием инфракрасного тепловизора. Оно подтверждает сделанное нами предположение о наличии больших плоских поверхностей с почти постоянной температурой и переходных областей с шириной порядка толщины пола. Так, температура холодной части пола и окна отличается примерно на градус, в то время, как неоднородность температуры в световом пятне составляет около $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Это позволяет далее придерживаться при численном расчете принятой нами составной одномерной модели, в которой теплообмен наружного ограждения помещения складывается из теплообмена через стену и теплообмена через окна с учетом солнечной радиации. Величина светового потока взята по результатам экспериментальных измерений [23] равной 980 Вт/м^2 . Восход солнца происходил в 4:22, а заход солнца – в 20:36. Астрономический полдень соответствовал $t_0 = 12:29$.

Теплофизическая характеристика стеклопакетов взята из работы [24] для двухкамерного

стеклопакета в виде полного термического сопротивления $R = 0,87 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ с учетом конвективного и радиационного теплообмена. Полный тепловой поток через наружное ограждение находится как сумма тепловых потоков через стену и остекленное пространство. При этом тепловая инерция стеклопакета мала, и мы ее не учитываем, рассчитывая плотность теплового потока через остекление по формуле (19). Тепловая инерция стены учитывается с помощью наложения тепловых волн, как это описано выше для нестационарной теплопередачи на основе нестационарного уравнения теплопроводности.

Большая часть практических теплофизических расчетов зданий проводится в рамках одномерных [25, 26] или двумерных стационарных и нестационарных моделей [27–32]. Для определения точности расчетов в рамках одномерной модели мы рассмотрели решение стационарной двумерной задачи о распространении тепла в однородной плоской панели толщиной L . Температура на одной поверхности панели с координатой $y = 0$ поддерживается постоянной и равной T_0 , а

на другой поверхности с координатой $y = L$ она отлична от T_0 только на конечном интервале $0 < x < A$, где равна T . Трехмерная реализация такой

двумерной постановки задачи означает, что область повышенной температуры на одной стороне панели имеет вид длинной полосы с постоянной шириной A .



Рис. 3. Тепловой портрет стеклопакета и светового пятна на деревянном полу (изображение с поворотом на 90°)

Замены переменных $y \rightarrow y\pi/L$, $x \rightarrow x\pi/L$, $u(x, y) = (T(x, y) - T_0)/T$, приводят исходное уравнение для распространения пятна нагрева к задаче Дирихле, решение которой имеет вид [33]:

$$u(x, y) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg \frac{e^{-x} - \cos y}{\sin y} \quad (1)$$

Анализ зависимости (1), показывает, что простое однородное линейное приближение для распределения температуры поперек панели воспроизводит интегральный поток, но не отражает деталей его поперечного распределения в переходной области. Такая переходная область неоднородности теплового потока имеет ширину порядка двойной толщины панели стены $2L$. Для деревянных домов толщина стен мала по сравнению с аналогичными параметрами для кирпичных стен с таким же тепловым сопротивлением, и эффектами поперечной неоднородности теплового потока в инженерных расчетах теплового баланса в большинстве случаев можно пренебречь. Это позволяет использовать в качестве основы для расчетов составные плоскостойкие модели.

Распространение тепла в плоском слое теплопроводящей среды описывается одномерным уравнением теплопроводности [34]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \chi = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (2)$$

Здесь λ – теплопроводность среды, c – удельная теплоемкость, ρ – объемная плотность. Уравнение (2) решается с учетом начальных и граничных условий. Они зависят от условий теплообмена с окружающей средой [35]. Учтем, что на границе конструкции поглощается дополнительный тепловой поток с плотностью $q_s(t)$, вызванной солнечным излучением. Тогда теплообмен на поверхности ограждения учитывается с помощью граничного условия:

$$\alpha(T_{ext}(t) - T(-0, t)) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0} + q_s(t) \quad (3)$$

Здесь $T_{ext}(t)$ может быть температурой наружного воздуха для внешней границы конструкции или температурой внутри помещения, λ – коэффициент теплопроводности материала ограждения. Поскольку коэффициент теплообмена α сам является нелинейной функцией температуры, то в последовательной постановке задача расчета теплообмена является нелинейной. Мы линеаризуем ее, считая известным диапазон изменения температур и проводя усреднение по времени с учетом гармонического изменения температуры в заданных пределах.

В качестве примера приведем расчет среднего значения эффективного коэффициента теплообмена α_{eff} вертикальной стены высотой $h=3$ м из условия равенства тепловых потоков за полупериод для переменного (зависящего от температуры) и постоянного эффективного коэффициентов теплообмена:

$$\int_0^{\pi/2} \alpha(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi = \int_0^{\pi/2} \alpha_{eff} \sin(\varphi) d\varphi. \quad (4)$$

Здесь фаза колебания $\varphi = \omega t$. Температуру воздуха примем равной $T_0 = 22$ °С. Возьмем теплопроводность воздуха равную $\lambda=0.0268$ Вт/(м·К), а его кинематическая вязкость $\nu=16.05 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Основной характеристикой самой конвективной теплопередачи является число Рэлея $Ra = \frac{g\theta L^3}{\nu\chi}$, где g – ускорение свободного падения, L – характерный размер задачи, θ – температурный перепад, T – температура воздуха, ν – его кинематическая вязкость, χ – температуропроводность. Формула для расчета коэффициента теплопередачи имеет вид [36]:

$$\alpha = \{0,825 + 0,3245 \cdot Ra^{1/6}\}^2 \frac{\lambda}{L}. \quad (5)$$

Усреднение производится интегрированием по фазе колебаний температуры. Таким образом, получаем:

$$\alpha_{eff} = \int_0^{\pi/4} \alpha(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi. \quad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость отношения $C(\theta) = \alpha_{eff}/\alpha(\theta)$ от амплитуды колебаний температуры θ . Тем самым коэффициент $C(\theta)$ показывает насколько эффективный коэффициент конвективного теплообмена меньше его максимального значения при гармоническом законе изменения температуры. Для дальнейших расчетов мы примем $C = 0,607$ и будем считать граничные условия линейными с заменой коэффициента теплообмена его средним значением.

Следствием линейности уравнения теплопроводности и принятых нами приближенных линейных граничных условий является принцип суперпозиции температурных возмущений [35]. Используя его, представим задачу в виде суммы двух более простых задач. Первая задача является стационарной и учитывает все стационарные составляющие в граничных условиях. Вторая задача описывает установившийся колебательный режим с учетом меняющейся со временем температуры наружного воздуха и потока солнечного излучения. Квазистационарный режим в слое толщиной L устанавливается спустя некоторое время переходного процесса t , определяемое коэффициентом Фурье $Fo = \frac{\lambda t}{\rho L^2} \sim 1$, за

которое начальное температурное распределение переходит в стационарное распределение.

Стационарная часть расчета производится с учетом перепада температур внутри и снаружи панели и условия постоянства потока тепла на границе. Решение ищется в виде линейной функции $T(x) = ax + b$. Подставляя это решение в граничные условия, получим систему линейных уравнений для определения постоянных коэффициентов a, b . Для решения нестационарной части задачи при $T_{ext}(t) = \Delta T \cos(\omega t)$ перейдем к комплексному представлению [48] и ищем решение в виде комплексной функции $u(x)$:

$$\theta(x, t) = u(x)e^{i\omega t}, \quad (7)$$

где $u(x)$ – пространственная часть тепловой волны, ω – частота теплового возмущения. Пространственная часть решения внутри однородной панели имеет вид

$$u(x) = A \exp(-\gamma x) + B \exp(\gamma x). \quad (8)$$

После подстановки граничных условий возникает пара линейных уравнений для определения коэффициентов A и B . В окончательном решении делается переход к действительной форме, путем выделения действительной части полученной зависимости.

Основная часть. Ключевой характеристикой для проведения теплофизических расчетов помещения при инсоляции является величина потока прямого солнечного излучения, которая может быть определена экспериментально [23]. Полное теоретическое описание солнечной радиации в зданиях представляет собой отдельную сложную теплофизическую задачу [38], решение которой зависит от многих факторов. Первичный солнечный поток зависит от высоты и азимута Солнца, а также состояния атмосферы. Поток солнечной энергии, падающий на здание, зависит от рельефа местности, а также затенения от окружающей застройки и зеленых насаждений. Проникающее в помещение излучение, как отмечалось выше, зависит также от ориентации остекления по сторонам света, влияния солнцезащитных элементов и величины пропускной способности стекла.

Имея в виду сложный характер задачи и большую вариативность параметров, целесообразно задавать основные характеристики инсоляции при построении математической модели теплообмена в обобщенном виде. Конкретные данные могут быть получены заранее путем натуральных измерений, с помощью физической модели освещенности или расчетным путем. Мы будем

учитывать конечный временной интервал действия светового потока через световой проем и его плотность с помощью зависимости:

$$q_S(t) = kq_0 \sin\left(\pi \frac{t-t_0}{\tau}\right), \quad (9)$$

где k – коэффициент пропускания остекления, q_0 – амплитуда плотности светового потока, t_0 – начальный момент освещения, τ – длительность освещения. Формула (9) описывает временную зависимость светового потока на интервале полупериода ($t_0, t_0 + \tau$), за пределами которого поток считается равным нулю. Ее параметры будут далее считаться заданными, как исходные для расчетной модели [39-41]. Кроме того, мы будем считать заданными углы падения на поверхности пола и стен, а также размеры световых пятен. Эти геометрические параметры потребуются для определения величины конвективного теплообмена нагретых солнцем участков.

Суточный ход температуры воздуха [42] хорошо воспроизводится гармонической зависимостью:

$$T_{ext}(t) = T_0 + \Delta T \cdot \cos(\omega t). \quad (10)$$

Что касается функции (9), то она задана на конечном интервале и не является гармонической, поэтому прямое применение изложенного выше метода гармонических волн невозможно. Для его использования необходимо сначала разложить функцию (9) в ряд Фурье по гармоническим функциям с периодом в $\Delta t = 2\pi/\omega$ (сутки):

$$q_S(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp(i\omega n t). \quad (11)$$

где

$$c_n = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} q_S(t) \exp(-i\omega n t) dt, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2. \quad (12)$$

Для временной зависимости в виде (9) получим:

$$c_n = \frac{kq_0}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\tau} \sin\left(\pi \frac{t-t_0}{\tau}\right) \exp(i\omega n t) dt. \quad (13)$$

Вычисление этого интеграла приводит к выражению:

$$c_n = \frac{\Omega k q_0}{\Delta t (\Omega^2 - \beta^2)} \exp(-i\beta t_0) (\exp(-i\beta \tau) + 1), \quad (14)$$

где введено обозначение $\beta = \omega n$.

Разложение в ряд Фурье (11) позволяет свети задачу о тепловом отклике помещения на нестационарный солнечный поток с суточным периодом к совокупности задач с гармоническими граничными условиями. Поскольку мы рассмотрели основные факторы, влияющие на тепловой обмен помещения, можно представить более полную математическую модель, учитывающую теплообмен через все граничные поверхности помещения в форме параллелепипеда. Мы будем

считать одну из стен выполненной с использованием стеклопакета, в то время как все стены сложены из бруса одинаковой толщины. Пол и потолок будем считать выполненными так же из дерева. Температуру на внешней поверхности деревянных конструкций будем считать соответствующей температуре окружающего воздуха, которая меняется по гармоническому закону в течение суток. Принудительное охлаждение или нагрев воздуха в помещении поддерживают постоянство температуры. Через остекление проникает поток солнечной энергии, который проецируется на пол и стены в виде солнечных пятен определенной освещенности и длительности. Поверхность пола частично поглощает и частично рассеивает излучение, которое мы считаем полностью и равномерно распределяется по всем внутренним поверхностям помещения, внося дополнительный тепловой поток.

Нагретые солнечным излучением участки поверхности имеют температуру, отличную от теневых областей соответствующих поверхностей и вносят основной вклад в конвективный теплообмен. В качестве коэффициентов теплообмена выбраны средние значения коэффициентов для исследуемых диапазонов колебаний температуры. Мы будем считать, что процессы теплообмена в воздушной среде помещения и в воздушном промежутке между стеклами происходят быстро по сравнению с суточными колебаниями температуры воздуха и временем нагрева за счет светового пятна. В то же время, тепловую инерцию в материале стен, пола и потолка необходимо учитывать в виде тепловых волн.

Таким образом, нагрев воздуха внутри помещения мы будем учитывать с помощью уравнения теплового баланса, выражающего закон сохранения энергии. Сумма тепловых потоков равна скорости изменения тепловой энергии массы M воздуха в помещении, так что [43]:

$$c_p M \frac{dT}{dt} = \sum_j Q_j, \quad (15)$$

Здесь c_p – теплоемкость воздуха, T – температура воздуха в помещении, Q_j – тепловые потоки, идущие внутрь и наружу помещения через ограждающие поверхности, а также внутренние тепловые источники. Тепловые потоки через ограждающую поверхность внутри помещения можно записать в виде:

$$Q_j = S_j q_j + s_j p_j, \quad (16)$$

где q_j – плотность теплового потока на границе освещенной солнцем участка поверхности ограждения с номером j и площадью S_j , p_j – плотность теплового потока на границе неосвещенной поверхности.

щенной солнцем участке поверхности ограждения с номером j и площадью s_j . Нагретые солнцем и теневые участки ограждения имеют разную температуру поверхности, которую мы обозначим как $T_j^S(0)$ и $T_j^S(0)$ соответственно. Плотность тепловых потоков внутри помещения определяются разностью температур поверхности стены и температуры воздуха в помещении:

$$q_j = \alpha_j^S (T_j^S(0) - T), \quad (17)$$

$$p_j = \alpha_j^S (T_j^S(0) - T). \quad (18)$$

В уравнениях (17), (18) учтено, что солнечные и теневые участки поверхности могут иметь разные коэффициенты конвекционного теплообмена из-за разной степени нагрева. Теплообмен через остекленную поверхность мы опишем с помощью теплового сопротивления R единицы площади поверхности в виде уравнения:

$$q_G = \Theta(1 + \beta)/R, \quad (19)$$

где β – коэффициент, учитывающий инфильтрацию воздуха.

Таким образом, граничные условия на поверхностях раздела задаются уравнением (3), а уравнение температуропроводности имеет вид (2). Световой поток на освещенных участках поверхностей в зависимости от времени представляется в виде сумм гармонических зависимостей с помощью ряда Фурье (11). Задача об установившемся периодическом за сутки теплообмене сводится к совокупности отдельных задач с периодическими граничными условиями. Для каждого плоского выделенного участка ограждающей конструкции периодическое установившееся решение ищется в виде (7), (8). С учетом граничных условий такая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений. Суммируя полученные решения и переходя к действительным числам, мы получим зависимость температуры воздуха в помещении как функцию времени.

Результаты соответствующего расчета теплового потока в течение суток представлены на рис.4.

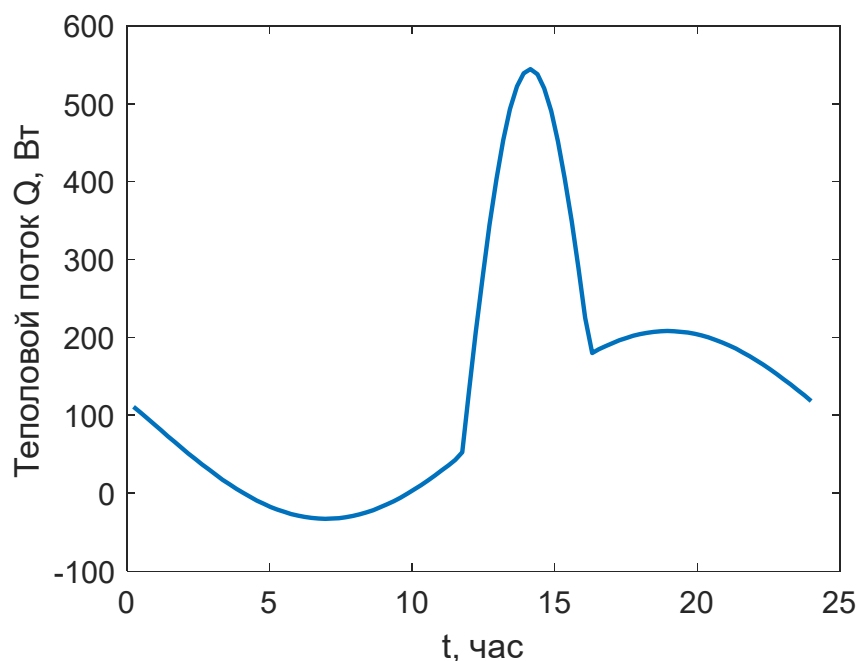


Рис. 4. Тепловой поток через наружное ограждение в течение суток с учетом солнечной инсоляции через оконный проем

Из полученной зависимости видно, что наиболее резко поток энергии нарастает в период прямого солнечного освещения помещения через оконный проем. Полная компенсируемая за счет кондиционирования воздуха тепловая энергия за сутки составляет 3,57 кВтч. С учетом холодильного коэффициента охлаждения 3, затрачиваемая электрическая мощность составляет около

1,2 кВтч. С учетом тарифов для садового некоммерческого товарищества 2,55 руб. за 1 кВтч, суточная стоимость составит около 3 руб. для одной комнаты. Для сравнения нами проведен расчет для случая, когда солнечное излучение не падает на стеклопакет, а отклоняется защитным экраном. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

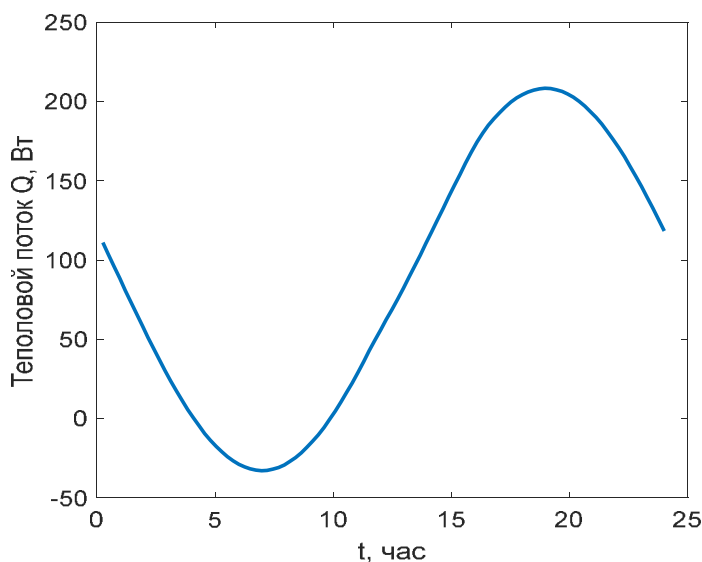


Рис. 5. Тепловой поток через наружное ограждение в течение суток без солнечной инсоляции через оконный проем

Наглядно видно исчезновение характерного пика, связанного перед этим с поступлением прямых солнечных лучей в помещение. Полная компенсируемая тепловая энергия за сутки в этом случае составляет 2,3 кВтч. С учетом коэффициента охлаждения, затрачиваемая электрическая мощность составляет около 0,8 кВтч. С учетом тарифов для садового некоммерческого товарищества, суточная стоимость составит около 2 руб. для одной комнаты, т.е. снижется на треть по сравнению с вариантом открытой инсоляции.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что правильные мероприятия по

затенению оконных проемов с солнечной стороны здания позволяет существенно уменьшить расходы на кондиционирование воздуха в помещениях. Как видно из результатов расчетов, эффективный коэффициент теплообмена всегда ниже максимального значения, и их отношение остается почти постоянным (рис. 6). Получено значение среднего за период температурных колебаний коэффициента конвекции 0,607, отличается от имевшегося ранее значения 0,64 [44], с учетом его нелинейной зависимости от разности температур.

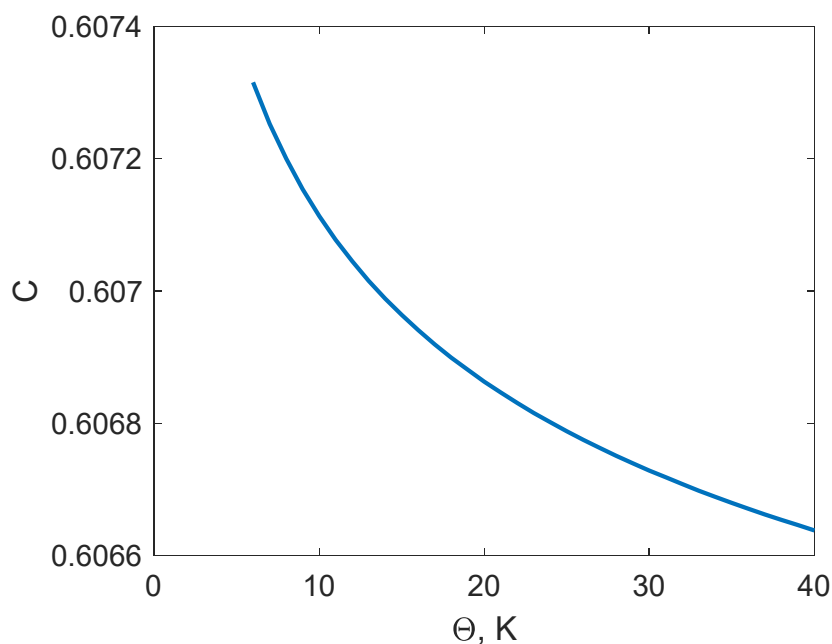


Рис. 6. Зависимость отношения эффективного коэффициента теплообмена к его значению при амплитудном значении температуры от амплитуды температурных колебаний

Выводы. Развита в работе математическая модель расчета нестационарных тепловых потоков внутри помещения с учетом колебаний температуры наружного воздуха и инсоляции позволяет рассчитывать периодическое в течение суток изменение условий кондиционирования воздуха в помещении.

1. Показано, что для описания тепловых потоков в домах из дерева можно с контролируемой точностью использовать составные одномерные модели теплообмена и теплопередачи.

2. Уравнения теплообмена содержат нелинейные граничные условия, которые можно приближенно заменить линейными средними соотношениями.

3. Предложено установившиеся решения с периодическими граничными условиями находить методом наложения тепловых волн с использованием комплексных переменных. Наличие периодического нагрева помещения солнечной радиацией можно учесть с помощью разложения временной зависимости в ряд Фурье.

4. Сформулированная математическая модель теплообмена помещения учитывает эффекты запаздывания распространения температурного поля в стенах при изменении температуры окружающего воздуха и динамическое изменение теплового потока от световых потоков снаружи и внутри помещения.

5. Использование затенения световых проемов с солнечной стороны позволяет получить снижение затрат на одну треть для пиковых режимов кондиционирования.

Источник финансирования. Исследования выполнены по гранту Президента РФ для ведущей научной школы (проект НШ-25.2022.4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donn M.R., Thomas G., Joyce R., Hawkins T., Brown L. Designing comfortable homes: Guidelines on the use of glass, mass and insulation for energy efficiency. Cement & Concrete Association of New Zealand. Wellington, 2001. 78 p.
2. Fitton R., Swan W., Hughes T., Benjaber M. The thermal performance of window coverings in a whole house test facility with single-glazed sash windows // Energy Efficiency. 2017. Vol. 10. Pp.1419–1431. Doi 10.1007/s12053-017-9529-0.
3. Борискина И.В. Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. С-Петербург: Инженерно-информационный Центр Оконных Систем, 2012. 400 с.
4. Dabaieh M., Elbably A. Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofit-

ting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates // Solar Energy. 2015. Vol. 122. Pp. 820–833.

5. Canadian wood-frame house construction. Ottawa - Ontario: Canada Mortgage and Housing Corporation, 2013. 335 p.

6. Bisegna F., Mattoni B., Gori P., Asdrubali F., Guattari C., Evangelisti L., Sambuco S., Bianchi, F. Influence of Insulating Materials on Green Building Rating System Results // Energies. 2016. № 9. Pp. 712–728. Doi 10.3390/en9090712.

7. Mitterpach J., Štefko J. An Environmental Impact of a Wooden and Brick House by the LCA Method // KEM. 2016. Vol. 688. Pp. 204–209.

8. Dokka T.H., Hemstad K. Energy efficient residential buildings for the future – a handbook for designing passive houses and low energy residential buildings, IEA SHC Task 28/ECBCS Annex 38 Sustainable Solar Housing (in Norwegian). 2006. 105 p.

9. Simonson C.J., Salonvaara M., Ojanen T. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Technical Research Center of Finland, ESPOO. Vuorimiehentie, 2001. 298 p.

10. Ma L., Shao N., Zhang, J., Zhao T. The Influence of Doors and Windows on the Indoor Temperature in Rural House // Procedia Engineering, 2015. Vol. 121. Pp. 621–627.

11. Mohammed A.A., Khudheyer A.F. Natural convection heat transfer inside enclosure with various geometries and enhancement methods a review // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7 (4). Pp. 4892–4898.

12. Kamiyo O.M., Angeli D., Barozzi G.S., Collins M.W., Olunloyo V., Talabi S. A Comprehensive Review of Natural Convection in Triangular Enclosures // Applied Mechanics Reviews. 2010. Vol. 63(6). 13 p.

13. Rahimi A., Dehghan Saeed A., Kasaeipoor A., Hasani Malekshah E. A comprehensive review on natural convection flow and heat transfer: The most practical geometries for engineering applications // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2019. Vol. 29 (3). Pp. 834–877. Doi 10.1108/HFF-06-2018-0272.

14. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces // Energy and Buildings. 1999. Vol. 30(3). Pp. 233–244.

15. Ramesh N., Venkateshan S.P. Effect of Surface Radiation on Natural Convection in a Square Enclosure // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1999. Vol. 13 (3). Pp. 299–301.

16. Dimassi N., Dehmani L. Natural Convection of a Solar Wall in a Test Room under Tunisian Climate // International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy. 2012. Vol. 2012. 9 p.

17. Zohuri B., Fathi N. Natural or Free Convection // *Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors*, 2015. Pp. 287–309. doi: 10.1007/s12209-019-00208-9.
18. Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (4th edition). NY: John Wiley & Sons, 1996.
19. Богословский В.Н. *Строительная теплофизика*. М.: Высшая школа, 1982. 414 с.
20. Wood handbook: wood as an engineering material. General technical report FPL; GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p. doi: 10.2737/FPL-GTR-113.
21. Архив погоды на 21 июля в г. Воронеж [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/voronezh/14-july/> (дата обращения: 01.03.2022)
22. Jayamaha S.E.G., Wijesundera N.E., Chou S.K. Measurement of the heat transfer coefficient for walls // *Building and Environment*. 1996. Vol. 31(5). Pp. 399–407. Doi: 10.1016/0360-1323(96)00014-5.
23. Мершиев А.А., Шепс Р.А., Лобанов Д.В., Шашин А.В. Определение величины потока прямого солнечного излучения, направленного на горизонтальную поверхность // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. №4. С. 137–143.
24. Басок Б.И., Новиков В.Г., Давыденко Б.В., Беляева Т.Г., Новицкая М.П., Сороковой Р.Я. Радиационно-конвективный теплообмен здания с окружающей средой при воздействии солнечного излучения // *ИФЖ*. Том 93. № 1. 2020. С. 48–57.
25. Lienhard J.H., Lienhard J.H. *A heat transfer textbook*. Phlogiston Press, Cambridge Mass., 2006. 749 p.
26. Полежаев В.И., Вerezуб Н.А., Простомолотов А.И. *Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса*. М.: Наука. 1987. 272 с.
27. Скларов К.А., Мелькумов В.Н., Климентов А.В. Математическая модель вентиляционных процессов в помещениях сложной конфигурации // *Вестник ВГТУ. Сер. Энергетика*. 2006. Т.2 (6). С. 53–55.
28. Мелькумов В.Н., Кузнецов С.Н., Павлюков С.П., Кузнецов Р.Н. Формирование конвективных воздушных потоков при действии в помещении источника тепла // *Вестник ВолГАСУ. Сер.: Стр-во и архит.* 2008. Вып. 12 (31). С. 76–80.
29. Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Шеремет М.А. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии // *Прикладная механика и техническая физика*. 2013. Т. 54. №4. С. 86–95.
30. Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Математическое моделирование ламинарного режима сопряженного конвективного теплообмена в замкнутой полости с источником энергии в условиях поверхностного излучения // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т.86. №1. С. 107–115.
31. Унаспеков Б.А., Сабденов К.О., Ерзада М., Ауелбеков С.Ш., Таубалдиева А.С., Сейтказиев О.Д. Исследование свободного конвективного движения воздуха в отопляемом помещении // *ИФЖ*. 2020. Том 93. № 1. С. 170–177.
32. Zhou L., Liu J., Huang Q. Analysis of Combined Natural Convection and Radiation Heat Transfer in a Partitioned Rectangular Enclosure with Semitransparent Walls // *Trans. Tianjin Univ.* 2019. Vol. 25. Pp. 472–487.
33. Пикулин В.П., Похожаев С.И. *Практический курс по уравнениям математической физики*. М.: МЦНМО, 2004. 208 с.
34. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. М.: МГУ, 1999. 798 с.
35. Минко В.А., Подпоринов Б.Ф., Семиренко А.С. *Комплексное проектирование установок центрального водяного отопления зданий жилищно-гражданского назначения* // Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 203 с.
36. Böckh P., Wetzel T. *Heat Transfer. Basics and Practice*. Springer, Karlsruhe, 2012. 276 p.
37. Харкевич А.А. *Спектры и анализ*. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 240 с.
38. Gustavsen A., Jelle V.P., Arasteh D., Kohler C. State of the Art Highly Insulating Window Frames // *Research and Market Review. United States: N.p.*, 2007.
39. Харкнесс Е., Мехта М. *Регулирование солнечной радиации в зданиях*. М.: Стройиздат, 1984. 176 с.
40. *Методическое пособие. Расчеты теплопотуплений в здании от проникающей солнечной радиации за отопительный период*. Москва, 2017. 111 с.
41. СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты». М.: Минстрой России, 2017. 51 с.
42. Погосян Х.П. *Воздушная оболочка Земли*. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1962. 294 с.
43. Mendes N., Gustavo H.C., de Araújo O. H. Building thermal performance analysis by using matlab/simulink // *Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil*. 2001. Pp. 473–480.

44. Самарин О.Д. О коэффициенте конвективного теплообмена на поверхностях огражде-

ний помещений при периодическом тепловом режиме // Энергоснабжение и энергоподготовка. 2010. №1 (63). С. 48–49.

Информация об авторах

Мерщиев Александр Александрович, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства. Воронежский государственный технический университет. E-mail: sasha__1990@mail.ru. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Головинский Павел Абрамович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры инноватики и строительной физики. E-mail: golovinski@bk.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Свирин Максим Валерьевич, инженер кафедры теплогаснабжения и вентиляции. E-mail: svirinmv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Семенов Артем Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогаснабжения и вентиляции. E-mail: seminenko.as@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 02.03.2022 г.

© Мерщиев А.А., Головинский П.А., Свирин М.В., Семенов А.С., 2022

^{1,*}*Merschiev A.A.*, ¹*Golovinski P.A.*, ²*Svirin M.V.*, ²*Semenenko A.S.*

¹*Voronezh state technical University*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

**E-mail: sasha__1990@mail.ru*

SIMULATION OF A NON-STATIONARY THERMAL MODE OF PREMISE WITH THE WOOD ENCLOSING STRUCTURES

Abstract. *A non-stationary approach to the calculation of periodic thermal regimes of low-rise buildings with enclosing structures made of wooden beams equipped with double-glazed windows is considered. The application of the proposed method allows to determine the non-stationary thermal load of the air conditioning system for this type of house, as well as the required compensating capacities during the day. The conditions of applicability of plane-layered thermophysical calculation schemes in the presence of spatially inhomogeneous heating are analyzed. A refinement of the procedure for averaging convective heat transfer coefficients for vertical walls by periodic temperature fluctuations is carried out. An algorithm for calculating the periodic thermal regime based on the representation of time dependencies in the form of a Fourier series is proposed. The role of solar radiation flow through double-glazed windows in the heat exchange and energy efficiency of a wooden house is shown. The proposed mathematical model of room heat exchange takes into account the effects of the delay in the propagation of the temperature field in the walls when the ambient temperature changes and the dynamic change in heat flux from light flows outside and inside the room. It is determined that protection from direct sunlight entering the room through the window opening allows reducing peak air conditioning costs in the summer by a third for peak air conditioning modes.*

Keywords: *wooden house, environmental friendliness, non-stationary heat transfer, periodic thermal regime, energy efficiency.*

REFERENCES

1. Donn M.R., Thomas G., Joyce R., Hawkins T., Brown L. Designing comfortable homes: Guidelines on the use of glass, mass and insulation for energy efficiency. Cement & Concrete Association of New Zealand. Wellington, 2001. 78 p.

2. Fitton R., Swan W., Hughes T., Benjaber M. The thermal performance of window coverings in a whole house test facility with single-glazed sash windows. Energy Efficiency. 2017. Vol. 10. Pp.1419–1431. DOI: 10.1007/s12053-017-9529-0.

3. Boriskina I.V. Buildings and structures with translucent facades and roofs [Zdaniya i sooruzheniya so svetoprozrachnymi fasadami i krovlyami. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya svetoprozrachnykh konstrukcij]. Engineering Information Center of Window Systems, St. Petersburg, 2012. 400 p. (rus)

4. Dabaieh M., Elbably A. Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofit-

ting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates. *Solar Energy*. 2015. Vol. 122. Pp. 820–833.

5. Canadian wood-frame house construction. Ottawa - Ontario: Canada Mortgage and Housing Corporation, 2013. 335 p.

6. Bisegna F., Mattoni B., Gori P., Asdrubali F., Guattari C., Evangelisti L., Sambuco S., Bianchi, F. Influence of Insulating Materials on Green Building Rating System Results. *Energies*, 2016. No. 9. Pp. 712–728. doi:10.3390/en9090712.

7. Mitterpach J., Štefko J. An Environmental Impact of a Wooden and Brick House by the LCA Method KEM, 2016. Vol. 688. Pp. 204–209.

8. Dokka T.H., Hemstad K. Energy efficient residential buildings for the future – a handbook for designing passive houses and low energy residential buildings. IEA SHC Task 28/ECBCS Annex 38 Sustainable Solar Housing (in Norwegian). 2006. 105 p.

9. Simonson C.J., Salonvaara M., Ojanen T. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Technical Research Center of Finland, ESPOO. Vuorimiehentie, 2001. 298 p.

10. Ma L., Shao N., Zhang, J., Zhao T. The Influence of Doors and Windows on the Indoor Temperature in Rural House. *Procedia Engineering*, 2015. Vol. 121. Pp. 621–627.

11. Mohammed A.A., Khudheyer A.F. Natural convection heat transfer inside enclosure with various geometries and enhancement methods a review. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4). Pp. 4892–4898.

12. Kamiyo O.M., Angeli D., Barozzi G. S., Collins M. W., Olunloyo V., Talabi S. A Comprehensive Review of Natural Convection in Triangular Enclosures. *Applied Mechanics Reviews*, 2010. Vol. 63(6). 13 p.

13. Rahimi A., Dehghan Saeed A., Kasaeipoor A., Hasani Malekshah E. A comprehensive review on natural convection flow and heat transfer: The most practical geometries for engineering applications. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2019. Vol. 29 (3). Pp. 834–877. doi: 10.1108/HFF-06-2018-0272.

14. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*. 1999. Vol. 30(3). Pp. 233–244.

15. Ramesh N., Venkateshan S.P. Effect of Surface Radiation on Natural Convection in a Square Enclosure. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1999. Vol. 13 (3). Pp. 299–301.

16. Dimassi N., Dehmani L. Natural Convection of a Solar Wall in a Test Room under Tunisian Climate. *International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy*. 2012. Vol. 2012. 9p.

17. Zohuri B., Fathi N. Natural or Free Convection. *Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors*. 2015. Pp. 287–309. doi: 10.1007/s12209-019-00208-9.

18. Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (4th edition). NY: John Wiley & Sons, 1996.

19. Bogoslovsky V.N. *Building Thermophysics [Stroitel'naya teplofizika]*. Moscow: Higher School, 1982. 414 p. (rus)

20. Wood handbook: wood as an engineering material. General technical report FPL; GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p. doi:10.2737/FPL-GTR-113.

21. Weather archive for July 21 in Voronezh [Arhiv pogody na 21 iyulya v g. Voronezh]. Internet Explorer. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/voronezh/14-july/> (date of treatment: 01.03.2022)

22. Jayamaha S.E.G., Wijesundera N.E., Chou S.K. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*. 1996. Vol. 31(5). Pp. 399–407. doi: 10.1016/0360-1323(96)00014-5.

23. Mershchiev A.A., Sheps R.A., Lobanov D.V., Shashin A.V. Determination of the magnitude of the flux of direct solar radiation directed at the horizontal surface [Opredelenie velichiny potoka pryamogo solnechnogo izlucheniya, napravlenno na gorizonta'nuyu poverhnost']. *Regional Architecture and Construction*. 2020. No. 4. Pp. 137–143. (rus)

24. Basok B.I., Novikov V.G., Davydenko B.V., Belyaeva T.G., Novitskaya M.P., Sorokovoj R.Ya. Radiation and Convective Heat Exchange of a Building with the Environment under the Exposure to Solar Radiation [Radiacionno-konvektivnyj teploobmen zdaniya s okruzhayushchej sredoj pri vozdejstvii solnechnogo izlucheniya]. *IFJ*. Vol. 93. No. 1. 2020. Pp. 48–57. (rus)

25. Lienhard J.H., Lienhard J.H. *A heat transfer textbook*. Phlogiston Press, Cambridge Mass., 2006. 749 p.

26. Polezhaev V.I., Verezub N.A., Prostmolotov A.I. Mathematical modeling of convective heat and mass transfer based on Navier-Stokes equations [Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teplomassoobmena na osnove uravnenij Nav'e-Stoksa]. Moscow: Nauka, 1987. 272 p. (rus)

27. Sklyarov K.A., Melkumov V.N., Klimentov A.V. Mathematical Model of Ventilation Processes in Complex Configuration Rooms [Matematicheskaya model' ventilyacionnyh processov v pomeshcheniyah slozhnoj konfiguracii]. *Vestnik VGTU. Ser. of Power Engineering*. 2006. Vol.2(6). Pp. 53–55. (rus)

28. Melkumov V.N., Kuznetsov S.N., Pavlyukov S.P., Kuznetsov R.N. The Formation of Convective Air Flows under the Action of a Heat Source in the Room [Formirovanie konvektivnykh vozdushnykh potokov pri dejstvii v pomeshchenii istochnika tepla]. VolgGASU Bulletin. Volgograd State University of Civil Engineering and Architecture. 2008. Vol. 12 (31). Pp. 76–80. (rus)
29. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. Natural convection in a closed parallelepiped in the presence of a local source of energy [Estestvennaya konvekciya v zamknutom parallelepipede pri nalichii lokal'nogo istochnika energii]. Applied mechanics and technical physics. 2013. Vol. 54. No. 4. Pp. 86–95. (rus)
30. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Mathematical Modelling of Laminar Mode of Conjugate Convective Heat and Mass Transfer in a Closed Cavity with an Energy Source under Surface Radiation [Matematicheskoe modelirovanie laminarnogo rezhima sopryazhennogo konvektivnogo teplomassoperenosa v zamknutoj polosti s istochnikom energii v usloviyah poverhnostnogo izlucheniya]. Journal of Engineering and Physics. 2013. Vol. 86. No. 1. Pp. 107–115. (rus)
31. Unaspekov B.A., Sabdenov K.O., Erzada M., Auelbekov S.S., Taubaldieva A.S., Seitkaziev O.D. Study of free convective air movement in the heated room [Issledovanie svobodnogo konvektivnogo dvizheniya vozduha v otaplivaemom pomeshchenii]. IFJ. 2020. Vol. 93. No. 1. Pp. 170–177. (rus)
32. Zhou L., Liu J., Huang Q. Analysis of Combined Natural Convection and Radiation Heat Transfer in a Partitioned Rectangular Enclosure with Semitransparent Walls. Trans. Tianjin Univ. 2019. Vol. 25. Pp. 472–487.
33. Pikulin V.P., Pokhozhaev S.I. A Practical Course in the Equations of Mathematical Physics [Prakticheskij kurs po uravneniyam matematicheskoy fiziki]. Moscow: MSCI, 2004. 208 p. (rus)
34. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. The equations of mathematical physics [Uravneniya matematicheskoy fiziki]. Moscow State University, 1999. 798 p. (rus)
35. Minko V.A., Podporinov B.F., Seminenko A.S. Integrated design of central water heating installations for residential and civil buildings [Kompleksnoe proektirovanie ustanovok central'nogo vodyanogo otopeniya zdaniy zhilishchno-grazhdanskogo naznacheniya]. Belgorod: BSTU, 2013. 203 p.
36. Böckh P., Wetzel T. Heat Transfer. Basics and Practice. Springer, Karlsruhe, 2012. 276 p.
37. Kharkevich A.A. Spectra and Analysis [Spektry i analiz]. Moscow: LKI Publishing House, 2007. 240 p. (rus)
38. Gustavsen A., Jelle B.P., Arasteh D., Kohler C. State of the Art Highly Insulating Window Frames. Research and Market Review. United States: N.p., 2007.
39. Harkness E., Mehta M. Regulation of Solar Radiation in Buildings [Regulirovanie colnechnoi radiacii v zdaniyah]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 176 p. (rus)
40. Methodical Guide. Calculations of heat gain in the building from penetrating solar radiation during the heating period [Metodicheskoe posobie. Raschety teplopostuplenij v zdanie ot pronikayushchej solnechnoj radiacii za otopitel'nyj period]. Moscow, 2017. 111 p. (rus)
41. SP 345.1325800.2017 Residential and Public Buildings. Design rules for thermal protection [Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Pravila proektirovaniya teplovoj zashchity]. Moscow: Minstroy Rossii, 2017. 51 p. (rus)
42. Pogosyan Kh.P. The Air Shell of the Earth [Vozdushnaya obolochka Zemli]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1962. 294 p. (rus)
43. Mendes N., Gustavo H.C., de Araújo O. H. Building thermal performance analysis by using matlab/simulink. Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil. 2001. Pp. 473–480.
44. Samarin O.D. On the Coefficient of Convective Heat Exchange on the Surfaces of Premises during Periodic Thermal Operation. [O koefficiente konvektivnogo teploobmena na poverhnostyah ograzhdenij pomeshchenij pri periodicheskom teplovom rezhime]. Energosnabzhenie i energopodgotovka. 2010. No. 1 (63). Pp. 48–49. (rus)

Information about the authors

Mershchiev, Alexander A. Senior Lecturer, Department of Housing and Communal Services. Voronezh State Technical University. E-mail: sasha__1990@mail.ru. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-letiya Oktyabrya, 84.

Golovinski, Pavel A. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Innovation and Building Physics. E-mail: golovinski@bk.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-letiya Oktyabrya, 84.

Svirin, Maksim V. Engineer E-mail: svirinmv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Semenenko, Artem S. PhD. E-mail: semenenko.as@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 02.03.2022

Для цитирования:

Мершчиев А.А., Головинский П.А., Свирин М.В., Семиненко А.С. Моделирование нестационарного теплового режима помещения с деревянными ограждающими конструкциями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49

For citation:

Mershchiev A.A., Golovinski P.A., Svirin M.V., Seminenko A.S. Simulation of a non-stationary thermal mode of premise with the wood enclosing structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49