
**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТЕНЫ ТРОМБА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СО СТЕКЛОБЛОКОМ
ДЛЯ ХОЛОДНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

© 2023 г. С. А. Костиков^а *, М. С. Гринкруг^б, С. А. Гордин^б, J. Yiqiang^а

^аХарбинский политехнический университет (НПТ), Хидя, 92, г. Харбин, 150001 Китай

^бКомсомольский-на-Амуре государственный университет (КнАГУ), просп. Ленина, д. 27,
г. Комсомольск-на-Амуре, 681013 Россия

*e-mail: 300gloof@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 27.04.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Статья посвящена проблемам, возникающим при использовании стены Тромба в холодных климатических условиях. Такие стены имеют существенный недостаток в условиях холодного климата. При восходе солнца и попадании солнечной энергии через воздушную прослойку на стену Тромба воздух в прослойке очень быстро нагревается. Это приводит к недостаточному аккумулярованию тепла в стене Тромба и повышению потерь тепловой энергии в окружающий воздух из помещения через остекление. Основная цель исследования – разработка нового конструктивного решения для стены Тромба, которое позволит сократить тепловые потери через остекление при сохранении достаточного уровня аккумулирующей способности в холодных климатических условиях. Использование такой стены будет наиболее эффективно на территориях, расположенных в диапазоне широт от 40 до 50°. В работе представлено подробное описание и техническое обоснование нового конструктивного решения для стены Тромба. Разработана математическая модель процессов теплообмена и алгоритм решения, на основе которого проводился численный эксперимент. В течение всего отопительного периода средняя температура воздуха в исследуемом помещении поддерживалась в диапазоне значений, комфортных для постоянного пребывания человека. При использовании стены Тромба новой конструкции может быть сокращено годовое потребление внешних энергоресурсов и снижены выбросы CO₂ на 58%, т.е. их поступит в атмосферу на 18% меньше, чем при применении классической стены Тромба, в тех же климатических условиях. Таким образом, благодаря проведению данного исследования получена полезная информация о возможности улучшить тепловые характеристики стены Тромба в холодных климатических условиях.

Ключевые слова: улучшенная стена Тромба, аккумулирующая эффективность стены Тромба, комбинированная система теплоснабжения, энергосберегающие технологии, сокращение выбросов парниковых газов

DOI: 10.56304/S004036362312007X

Интересы мирового сообщества все более сдвигаются в сторону наращивания объемов производства электрической и тепловой энергии с использованием альтернативных источников энергии. Для жилищно-коммунального сегмента энергетики наиболее актуально развитие пассивных солнечных систем отопления. Одна из них – стена Тромба, включающая в себя остекление, воздушную прослойку, окрашенную в черный цвет массивную стену и вентиляционные каналы [1]. В стене Тромба падающее на нее солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию, которая аккумулируется в течение светового дня. В ночной период аккумулированная тепловая энергия передается в отапливаемое помещение

посредством конвективного теплообмена [1]. К основным проблемам использования стены Тромба в холодных климатических условиях можно отнести большие тепловые потери через остекление, недостаточное количество солнечного излучения и отсутствие математических моделей, которые учитывали бы комбинированную работу нескольких источников тепла [2]. Для повышения аккумулирующей способности стены Тромба используются материалы с фазовым переходом, которые, как правило, размещаются на наружной поверхности массивной стены [3]. На сегодняшний день в пассивных солнечных системах отопления наиболее часто применяются материалы двух типов с фазовым переходом: орга-

нические и неорганические. К последним относятся гидраты солей, а также их производные. Основные достоинства таких материалов – высокая теплоемкость и низкая стоимость. Данные материалы с фазовым переходом очень ограничены в применении, так как подвержены быстрому разрушению вследствие коррозии и переохлаждения [4].

К органическим материалам относятся парафин и жирные кислоты. Материалы такого типа наиболее часто используются в стене Тромба, так как они термически стабильны, не подвержены коррозии и переохлаждению и потому не оказывают негативного влияния на характеристики стены в процессе эксплуатации [4]. В целом, целесообразность выбора материалов с фазовым переходом в стене Тромба подтверждается тем, что аккумулирующая способность слоя из материала с фазовым переходом толщиной 3.5 см равняется аккумулирующей способности бетонной стены толщиной 15 см. Согласно [5], применение стены Тромба, в которой располагается материал с фазовым переходом, позволит сократить потребление внешних энергоресурсов на 15% относительно классической стены Тромба. Анализ опубликованных результатов исследований показал, что материалы с фазовым переходом в стене Тромба снижают годовое потребление энергии для обогрева помещения от 10 до 30% в зависимости от климатических условий [6].

Для уменьшения тепловых потерь через остекление стены Тромба было разработано новое конструктивное решение для использования ее в холодных климатических условиях.

Таким образом, основные задачи данной работы – создание математической модели и технико-экономическая оценка стены Тромба, в которой реализовано новое конструктивное решение, в климатических условиях г. Харбин.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СТЕНЫ ТРОМБА

Новое конструктивное решение стены Тромба (рис. 1) включает в себя два нововведения: замена обычного остекления на стеклоблок и оребрение из оргстекла на внутренней поверхности стеклоблока.

Основное преимущество стеклоблока заключается в том, что он имеет более низкую теплопередачу по сравнению с другими вариантами остекления для стены Тромба [7]. При этом стеклоблок пропускает через себя до 80% солнечного излучения. Основные параметры стеклоблока заимствованы из [8].

Согласно [2], использование принудительной вентиляции приводит к ускорению нагрева массивной стены. Однако при увеличении скорости подачи воздуха из помещения в воздушную прослойку значительно возрастает температура мас-

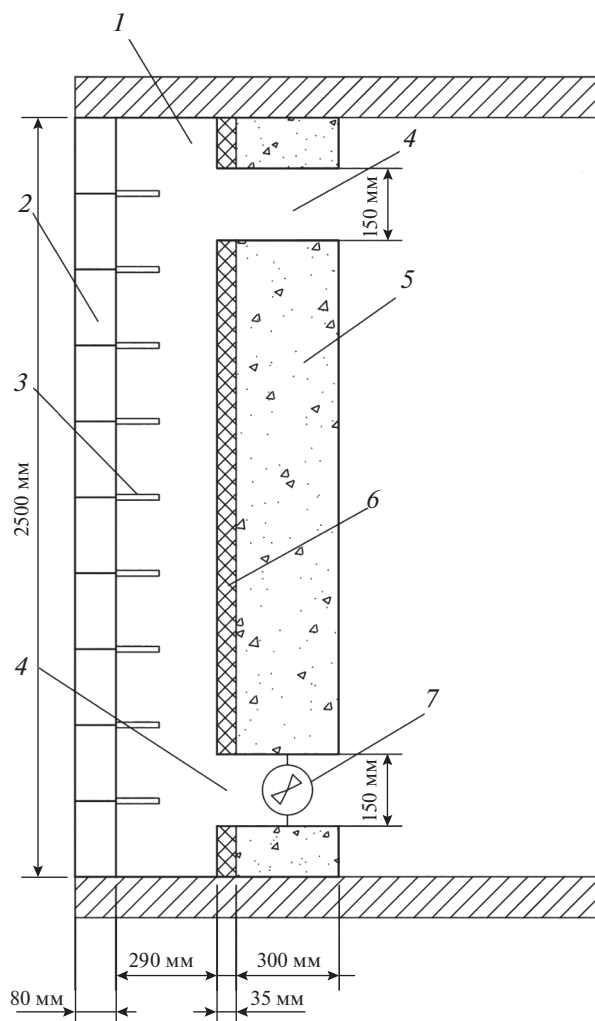


Рис. 1. Схема стены Тромба новой конструкции для холодных климатических условий.
1 – воздушная прослойка; 2 – стеклоблок; 3 – перемычка из оргстекла; 4 – горизонтальный вентиляционный канал; 5 – массивная стена; 6 – материал с фазовым переходом; 7 – вентилятор

сивной стены и стеклоблока. Так как стеклоблок не может аккумулировать в себе тепловую энергию, то тепловые потери в окружающую среду становятся больше, вследствие чего должна увеличиваться мощность основного источника тепла. Для решения этой проблемы необходимо снизить коэффициент конвективной теплоотдачи между внутренней поверхностью стеклоблока и воздухом в воздушной прослойке. Наиболее рациональный способ уменьшить конвективный теплообмен между внутренней поверхностью стеклоблока и воздухом в воздушной прослойке – снизить скорость воздушного потока вдоль внутренней поверхности стеклоблока. Для того чтобы осуществить это, было предложено следующее: выполнить на внутренней поверхности стеклоблока оребрение из оргстекла, которое опиралось бы на металлические стойки у наружных стен.

Следует отметить, что такое решение отличается от метода интенсификации теплообмена, при котором движение потока газов или жидкостей осуществляется вдоль оребренной поверхности теплообмена. В данном случае оребрение располагается перпендикулярно движению воздушного потока в воздушной прослойке. На оребренной поверхности стеклоблока скорость воздушного потока снижается, между ребрами образуются завихрения, в результате чего коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стеклоблока уменьшается.

Размеры листа оребрения составляют $0,1 \times 3,2$ м, толщина – 20 мм. Коэффициент пропускания света равен 92% [9].

Толщина воздушной прослойки соответствует 29 см. Согласно [4], для холодных климатических условий наиболее целесообразно использовать материалы с фазовым переходом органического типа, у которых температура плавления колеблется от 16 до 20°C. Такой выбор обусловлен тем, что в самые холодные месяцы отопительного периода стена Тромба не сможет нагреться выше этой температуры из-за недостаточного падающего на нее солнечного излучения и низких температур наружного воздуха. Также следует учитывать тот факт, что органические материалы с фазовым переходом не подвержены переохлаждению. Температура плавления уксусной кислоты находится в диапазоне 16–17°C [10].

Толщина массивной бетонной стены принята равной 30 см. В ней размещены три нижних и три верхних вентиляционных канала, размеры которых составляют 15×15 см. В нижних каналах установлены вентиляторы для подачи воздуха в воздушную прослойку. Основные характеристики тяжелого бетона приведены в [11], а уксусной кислоты – в [10]. Полезная площадь стены Тромба равна 8 м². Площадь отапливаемого помещения составляет 22 м².

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТЕНЫ ТРОМБА СО СТЕКЛОБЛОКОМ

Математическая модель стены Тромба со стеклоблоком строилась на основе составляющих ее основных элементов с учетом переноса энергии между ними.

Построение физической модели стены Тромба со стеклоблоком

В соответствии с [12] была разработана физическая модель процессов теплообмена, которые могут протекать в стене Тромба со стеклоблоком (рис. 2).

Ввиду того что в холодных климатических условиях солнечной энергии недостаточно для полноценного отопления помещения, принима-

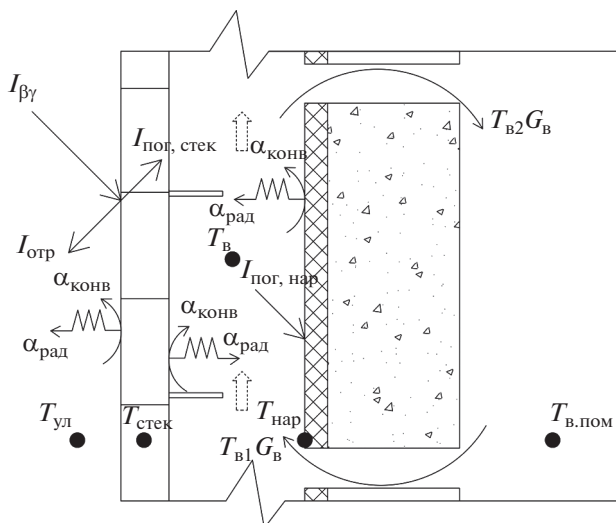


Рис. 2. Физическая модель стены Тромба со стеклоблоком.

$I_{\beta\gamma}$ – суммарное солнечное излучение, падающее на стену Тромба, Вт/м²; $I_{\text{пог.стек}}$, $I_{\text{пог.нар}}$ – тепловой поток солнечной радиации, поглощаемый стеклоблоком и массивной стеной соответственно, Вт/м²; $I_{\text{отр}}$ – отраженный от стеклоблока тепловой поток солнечной радиации, Вт/м²; $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м² · К); $\alpha_{\text{рад}}$ – коэффициент лучистого теплообмена, Вт/(м² · К); $T_{\text{в}}$ – средняя температура воздуха в воздушной прослойке, К; температура, К: $T_{\text{ул}}$ – наружного воздуха, $T_{\text{стек}}$ – стеклоблока, $T_{\text{нар}}$ – наружной поверхности массивной стены, $T_{\text{в.пом}}$ – воздуха в помещении, $T_{\text{в1}}$ – воздуха, поступающего в воздушную прослойку ($T_{\text{в1}} = T_{\text{в.пом}}$), $T_{\text{в2}}$ – воздуха, выходящего из воздушной прослойки; $G_{\text{в}}$ – производительность вентилятора, кг/с

ется, что воздух в помещении нагревается из-за конвективного теплообмена между массивной стеной и основным источником тепла.

Предполагается, что рассматриваемая стена Тромба ориентирована строго на юг и поблизости нет построек, которые могли бы отбрасывать тень на ее поверхность. Расчет энергии от падающего солнечного излучения производится по методике, описанной в [13].

Тепловой анализ стены Тромба со стеклоблоком

Тепловой баланс стеклоблока рассчитывается следующим образом [14]:

если $I_{\beta\gamma} > 0$, то

$$q_{\text{стек}} = I_{\text{пог.стек}} + \varepsilon\sigma \left(T_{\text{нар}}^4 - T_{\text{стек}}^4 \right) - \varepsilon\sigma \left(T_{\text{стек}}^4 - T_{\text{ул}}^4 \right) - \alpha_{\text{стек-ул}} \left(T_{\text{стек}}' - T_{\text{ул}} \right) + \alpha_{\text{в-стек}} \left(T_{\text{в}} - T_{\text{стек}}' \right); \quad (1)$$

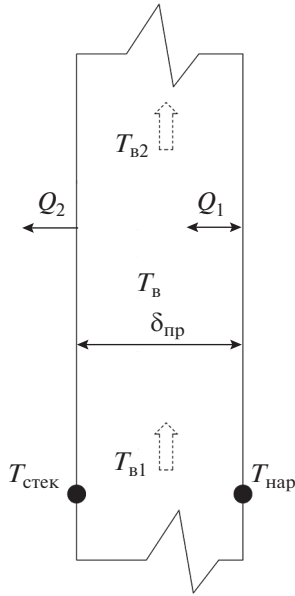


Рис. 3. Расчетная схема для определения температуры воздуха в воздушной прослойке. $\delta_{пр}$ – толщина воздушной прослойки, м; Q_1, Q_2 – тепловой поток, Дж

если $I_{\beta\gamma} = 0$, то

$$q_{стек} = \alpha_{в-стек} (T_v - T'_{стек}) + \varepsilon\sigma (T_{нар}^4 - T_{стек}^4) - \alpha_{стек-ул} (T'_{стек} - T_{ул}) - \varepsilon\sigma (T_{стек}^4 - T_{ул}^4);$$

$$Q_{стек} = c_{стек} m_{стек} (T_{стек} - T'_{стек});$$

$$Q_{стек} = q_{стек} S \tau; \quad T_v = \frac{T_{в2} + T_{в1}}{2},$$

где $q_{стек}$ – удельный тепловой поток, Вт/м²; ε – эффективная излучательная способность; σ – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м² · К⁴); $\alpha_{стек-ул}$ – коэффициент теплоотдачи между наружным воздухом и наружной поверхностью стеклоблока, Вт/(м² · К); $\alpha_{в-стек}$ – коэффициент теплоотдачи между воздухом в воздушной прослойке и внутренней поверхностью стеклоблока, Вт/(м² · К); $T'_{стек}$, $c_{стек}$ и $m_{стек}$ – исходная температура, К, удельная теплоемкость, Дж/(кг · К), и масса, кг, стеклоблока; $Q_{стек}$ – энергия, затрачиваемая на нагрев стеклоблока, Вт; S – площадь поверхности стены Тромба, м²; τ – время, с.

Подача воздуха в воздушный зазор осуществляется принудительно с помощью вентиляторов в нижних дефлекторах. Соответственно, температура воздуха в воздушной прослойке изменяется

только в вертикальном направлении. На рис. 3 представлена расчетная схема для определения средней температуры воздуха в воздушной прослойке.

С учетом рис. 3 уравнение теплового баланса воздуха в воздушной прослойке выглядит таким образом:

$$\rho_v \delta_{пр} c_v dT_v S = \alpha_{нар-в} (T_{нар} - T_v) S_{нар} \tau - \alpha_{в-стек} (T_v - T_{стек}) S_{стек} \tau = Q_1 - Q_2;$$

$$S = S_{нар} = S_{стек}; \quad dT_v = T_{в2} - T_{в1},$$

где ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; $\delta_{пр}$ – толщина воздушной прослойки, м; c_v – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг · К); $S_{нар}$ – площадь наружной поверхности стены Тромба, м²; $S_{стек}$ – площадь части поверхности стеклоблока, на которую попадает солнечная энергия, м²; $\alpha_{нар-в}$ – коэффициент теплоотдачи между воздухом в воздушной прослойке и наружной поверхностью массивной стены, Вт/(м² · К).

Подставив T_v и dT_v в уравнение (3), можно получить

$$\rho_v \delta_{пр} c_v (T_{в2} - T_{в1}) S = \alpha_{нар-в} \left(T_{нар} - \frac{T_{в2} + T_{в1}}{2} \right) S_{нар} \tau - \alpha_{в-стек} \left(\frac{T_{в2} + T_{в1}}{2} - T_{стек} \right) S_{стек} \tau,$$

тогда

$$\left(\rho_v \delta_{пр} c_v + \frac{\alpha_{нар-в} \tau}{2} + \frac{\alpha_{в-стек} \tau}{2} \right) T_{в2} = \alpha_{нар-в} \left(T_{нар} - \frac{T_{в1}}{2} \right) \tau - \alpha_{в-стек} \left(\frac{T_{в1}}{2} - T_{стек} \right) \tau + \rho_v \delta_{пр} c_v T_{в1}.$$

Для определения температуры $T_{в2}$ необходимо воспользоваться формулой

$$T_{в2} = \left[\alpha_{нар-в} \left(T_{нар} - \frac{T_{в1}}{2} \right) \tau - \alpha_{в-стек} \left(\frac{T_{в1}}{2} - T_{стек} \right) \tau + \rho_v \delta_{пр} c_v T_{в1} \right] / \left(\rho_v \delta_{пр} c_v + \frac{\alpha_{нар-в} \tau}{2} + \frac{\alpha_{в-стек} \tau}{2} \right). \quad (4)$$

Для упрощения рассматриваемой задачи можно пренебречь теплопередачей через массивную стену, так как она обладает большим термическим сопротивлением из-за своей толщины и массы и ее нагрев в течение светового дня будет незначительным. Для накопления тепловой энергии в течение светового дня применяется материал с фазовым переходом, который размещают на наружной поверхности массивной стены. Тогда для определения накопленной тепловой энергии этого материала при фазовом переходе необходимо использовать следующие соотношения:

если $T_{\text{нар}} = T_{\text{плав}}$, то

$$Q_{\text{нагр}} = \lambda_{\text{нар}} m_{\text{плав}}; \quad (5)$$

если $T_{\text{нар}} < T_{\text{плав}}$, то

$$Q_{\text{нагр}} = c_{\text{ТВ}} m_{\text{ТВ}} \Delta T_{\text{ТВ}}; \quad (6)$$

если $T_{\text{нар}} > T_{\text{плав}}$, то

$$Q_{\text{жидк}} = c_{\text{жидк}} m_{\text{жидк}} \Delta T_{\text{жидк}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{плав}}$ – температура плавления, К; $Q_{\text{нагр}}$ – тепловая энергия, аккумулированная в массивной стене, Дж; $\lambda_{\text{нар}}$ – удельная теплота плавления материала с фазовым переходом, Дж/кг; $m_{\text{плав}}$ – масса расплавленного материала с фазовым переходом, кг; $c_{\text{ТВ}}$ и $c_{\text{жидк}}$ – удельная теплоемкость твердой и жидкой фазы материала, Дж/(кг · К); $m_{\text{ТВ}}$ и $m_{\text{жидк}}$ – масса твердой и жидкой фазы материала, кг; $\Delta T_{\text{ТВ}}$ и $\Delta T_{\text{жидк}}$ – температура нагрева твердой и жидкой фазы материала, К.

Параметр $Q_{\text{нагр}}$ при различных эксплуатационных условиях определяется следующим образом:

при $I_{\text{пог.нар}} > 0$

$$I_{\text{пог.нар}} S \tau - \varepsilon_{\text{пр}} C_0 (T_{\text{нар}}^4 - T_{\text{стек}}^4) S \tau + \alpha_{\text{в-нар}} (T_{\text{в}} - T_{\text{нар}}) S \tau = Q_{\text{нагр}}; \quad (8)$$

при $I_{\text{пог.нар}} = 0$

$$-\varepsilon_{\text{пр}} C_0 (T_{\text{нар}}^4 - T_{\text{стек}}^4) S \tau + \alpha_{\text{в-нар}} (T_{\text{нар}} - T_{\text{в}}) S \tau = -Q_{\text{нагр}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{в-нар}}$ – коэффициент теплоотдачи между воздухом в воздушной прослойке и наружной поверхностью массивной стены, Вт/(м² · К).

Внутренняя поверхность массивной стены не рассматривается ввиду того, что она обладает большим термальным сопротивлением, что не позволит полностью ее нагреть падающим солнечным излучением в течение светового дня. В рассматриваемой задаче температура внутренней поверхности массивной стены равна температуре воздуха в помещении.

При определении нагрева воздуха в помещении принимают, что тепло передается только от воздуха, выходящего из воздушной прослойки, и дополнительного источника тепла, которым является теплый пол. Считается, что внутренние стены помещения не взаимодействуют с наружным воздухом. Поэтому в расчете учитываются тепловые потери только через стену из стеклоблока [формулы (1), (2)]. Тепловой баланс воздуха в помещении можно представить следующим образом [15]:

$$\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} L_{\text{пом}} S d T_{\text{в.пом}} / d \tau = P_{\text{осн}} + G_{\text{в}} c_{\text{в}} (T_{\text{в2}} + T_{\text{в1}}), \quad (10)$$

где $L_{\text{пом}}$ – длина помещения, м; $P_{\text{осн}}$ – средняя тепловая мощность основного источника тепла для расчетного дня месяца, Вт; $G_{\text{в}}$ – производительность вентилятора, кг/с.

Производительность вентилятора устанавливается исходя из соотношения между нормативной температурой воздуха в помещении и температурой наружной поверхности массивной стены, где располагается материал с фазовым переходом. Так, если температура воздуха в помещении ниже нормативной, тогда необходимо увеличить производительность вентилятора. Это приводит к повышению коэффициента теплоотдачи у наружной поверхности массивной стены и росту температуры воздуха в воздушной прослойке. Далее нагретый воздух поступает в помещение через верхний вентиляционный канал, смешиваясь с менее теплым воздухом внутри помещения, тем самым нагревая его. Во избежание перегрева помещения в момент, когда температура воздуха в нем равна температуре наружной поверхности стены, необходимо отключить вентилятор и остановить подачу воздуха в воздушную прослойку.

Требуемое количество тепловой энергии за расчетный месяц вычисляется следующим образом [16]:

$$Q_0^{ci} = \left[Q_0^p (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}^{ci}) / (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}^p) \right] \frac{k_t (t_{\text{н}}^{ci})}{k_t (t_{\text{н}}^p)} n_i, \quad (11)$$

где Q_0^p – суммарные тепловые потери за расчетный месяц, Вт; $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутри отапливаемого помещения, °С; $t_{\text{н}}^{ci}$ – средняя температура наружного воздуха, °С; $t_{\text{н}}^p$ – расчетная температура наружного воздуха за отопительный период, °С; k_t – коэффициент, учитывающий влияние температуры наружного воздуха на тепловые потери, обусловленные инфильтрацией; n_i – длительность i -го месяца, с.

Суммарные расчетные тепловые потери определяются так [16]:

$$Q_0^p = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{инф}} - \sum Q_{\text{пом}}, \quad (12)$$

где $Q_{\text{огр}}$ – тепловые потери через ограждающие конструкции, Вт; $Q_{\text{инф}}$ – тепловые потери с инфильтрацией, Вт; $Q_{\text{пом}}$ – суммарные тепловыделения в помещении, Вт.

Для вычисления коэффициента k_t использовалась следующая формула [16]:

$$k_t = 1 + \beta_{\text{инф}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}^p)^{1.667} / \left[(t_{\text{в}} + 273) (t_{\text{н}}^p + 273) \right]^{0.667}, \quad (13)$$

где $\beta_{\text{инф}}$ – показатель инфильтрации.

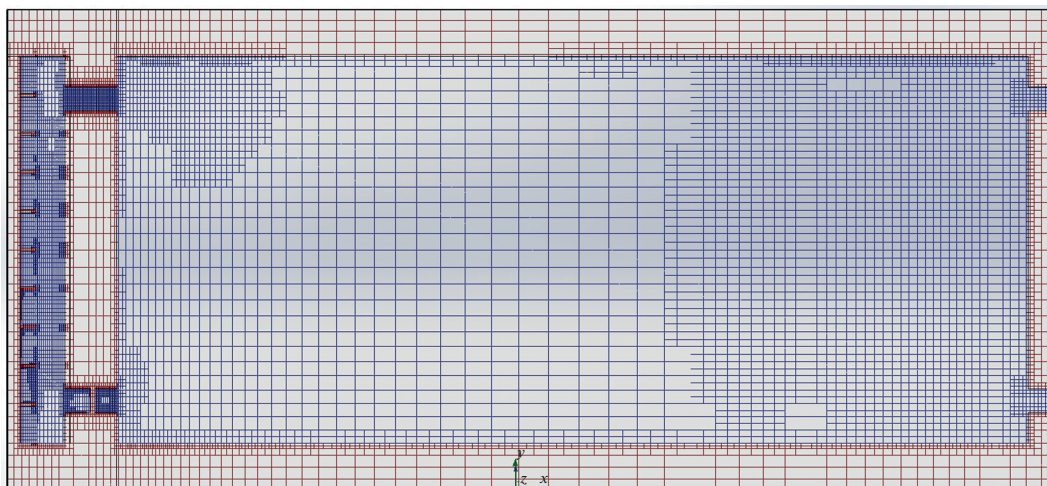


Рис. 4. Расчетная модель исследуемого помещения со стеной Тромба

Среднюю тепловую мощность основного источника тепла с учетом тепловых поступлений от стены Тромба для расчетного месяца можно найти по выражению

$$P_{\text{осн}} = Q_0^p - Q_{\text{солн}} k_{\text{пот}}, \quad (14)$$

где $Q_{\text{солн}}$ – суммарное количество падающего солнечного излучения на стену Тромба, Вт; $k_{\text{пот}}$ – коэффициент, учитывающий потери солнечного излучения, падающего на массивную стену.

Определение коэффициентов теплоотдачи

Согласно [17], коэффициенты теплоотдачи определялись по критериальным уравнениям подобия по формулам для вынужденной $\overline{Nu} = f(Re, Pr)$ и свободной конвекции $\overline{Nu} = f(Gr, Pr)$. При расчете коэффициента теплоотдачи на оребренной поверхности стеклоблока требуется учитывать геометрические характеристики ребер с помощью коэффициента эффективности оребренной поверхности [17]. Ввиду того что вдоль внутренней оребренной поверхности стеклоблока протекает сложный лучисто-конвективный теплообмен, для определения скорости воздушного потока вдоль оребренной поверхности стеклоблока применялся расчетный программный комплекс ANSYS Fluent. Полагалось, что движение воздушного потока в воздушной прослойке преимущественно турбулентное. Опираясь на результаты исследований [18–22], авторы приняли решение использовать для моделирования воздушного потока стандартную k – ϵ -модель турбулентности с пристеночной функцией. Несмотря на недостатки этой модели, такой выбор обусловлен тем, что k – ϵ -модель позволяет обеспечить численную устойчивость, ограниченные требования по ко-

личеству расчетных ячеек и быструю сходимость, что значительно упрощает проведение расчета. На рис. 4 представлена расчетная модель для программного комплекса ANSYS Fluent. Для решения соответствующих уравнений теплообмена применялся метод SIMPLEC. С помощью внутренних инструментов программного обеспечения была сгенерирована сеточная модель исследуемого помещения (см. рис. 4) с использованием малой, не адаптированной к поверхности прямоугольной сетки. Качество сеточной модели высокое – 0.95.

Методика расчета в программном комплексе ANSYS Fluent приведена в [23].

Методика расчета

Для изучения тепловых процессов, протекающих в стене Тромба новой конструкции со стеклоблоком, была разработана программа расчета в среде MATLAB, основанная на использовании метода последовательных приближений. Для определения скорости воздушного потока и уточнения коэффициента теплоотдачи для внутренней оребренной поверхности стеклоблока применялся расчетный программный комплекс ANSYS Fluent. Погодные условия для г. Харбин были получены из базы данных метеостанции [24]. Почасовой расчет проводился за один самый холодный день в январе и марте. Шаг времени при моделировании составлял 10 мин. Начальной и конечной точкой расчета принимался такой час, когда солнце уже полностью зашло за линию горизонта; соблюдалось условие $I_{\beta\gamma} = 0$.

Алгоритм проведения численного решения был следующим:

введение исходных климатических данных: почасового изменения температуры наружного

воздуха согласно [24] и количества падающего солнечного излучения за расчетный день согласно [13];

определение тепловой нагрузки для основного источника тепла без стены Тромба по формулам (11)–(13) и со стеной Тромба по соотношению (14);

установление исходных температур: стеклоблока ($T'_{\text{стек}} = T_{\text{в}}$), воздуха в воздушной прослойке ($T_{\text{в}} = 288.15 \text{ К}$), наружной поверхности массивной стены ($T_{\text{нар}} = T_{\text{в}}$), воздуха внутри помещения ($T_{\text{в.пом}} = 291.15 \text{ К}$), воздуха, входящего в воздушную прослойку ($T_{\text{в1}} = T_{\text{в.пом}}$);

расчет количества расплавленного вещества материала с фазовым переходом (150 кг);

вычисление $T_{\text{стек}}$ по формулам (1), (2) и $T_{\text{в2}}$ по формуле (4);

расчет количества расплавленного или кристаллизованного вещества с фазовым переходом по соотношениям (5)–(9);

определение $dT_{\text{в.пом}}$ и нового значения $T_{\text{в1}}$ по формуле (10).

Далее три последних действия повторялись до тех пор, пока не было достигнуто условие $T_{\text{в.пом. } j} - T_{\text{в.пом. } i-j} \leq 1 \text{ К}$. Обычно для каждого расчетного часа требуются три-четыре приближения.

Валидация модели

Для валидации разработанной модели применялись исходные данные (температура наружного воздуха, значение падающего солнечного излучения), полученные в середине марта в г. Юйчжун (провинция Ганьсу, Китай) [15]. Согласно результатам расчета, для температуры наружной поверхности массивной стены значения абсолютной (MAE) и среднеквадратической ошибки (RMSE) составили 0.7 и 1.069 К соответственно. Температура воздуха в помещении при использовании разработанной математической модели превышает данные контрольного исследования, в котором для MAE и RMSE были получены значения 0.65 и 1.1 К соответственно.

Исходные данные для валидации расчета точечной модели в ANSYS Fluent заимствованы из исследования, проведенного в г. Сус (Тунис) [22]. Согласно результатам расчета, выполненного в ANSYS Fluent, для температуры воздуха в помещении значения MAE и RMSE составляли 1.22 и 1.54 К соответственно.

Проведя сравнительный анализ, можно сделать вывод, что результаты, полученные с помощью разработанного метода моделирования и методики расчета тепловых характеристик стены Тромба, с достаточной точностью совпадают с экспериментальными данными и могут быть использованы в практических расчетах при проекти-

ровании объектов. Для проверки эффективности применения стены Тромба новой конструкции были выполнены расчетные исследования двух вариантов стены Тромба: классической и с измененным устройством.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение метеорологических данных в расчетные дни

Исследование стены Тромба новой конструкции проводилось в климатических условиях г. Харбин (Китай). На рис. 5 и 6 представлены графики изменения метеорологических данных, которые были приняты при расчете. С использованием рис. 5, 6 и формул (11)–(13) была определена мощность основного отопительного источника в один расчетный день месяца отопительного сезона, которая без поступления солнечной энергии составила в январе 1741 Вт и в марте 1064 Вт.

Результаты расчета тепловых характеристик стены Тромба

На рис. 7 представлены результаты расчета тепловых характеристик стены Тромба для самого холодного дня каждого из двух расчетных месяцев. Один месяц выбран как самый холодный в году, второй – как самый теплый в отопительном периоде. При проведении численного эксперимента отслеживались температуры наружного воздуха ($T_{\text{ул}}$), стеклоблока ($T_{\text{стек}}$), наружной поверхности массивной стены ($T_{\text{нар}}$) и воздуха в помещении ($T_{\text{в}}$).

Оценка влияния новых конструктивных решений на тепловые характеристики стены Тромба

На рис. 8 показаны результаты анализа тепловых характеристик стены Тромба с новыми кон-

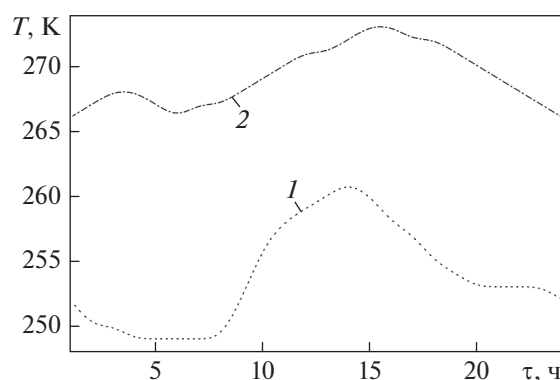


Рис. 5. Суточное изменение температуры наружного воздуха в январе (1) и марте (2) [24]

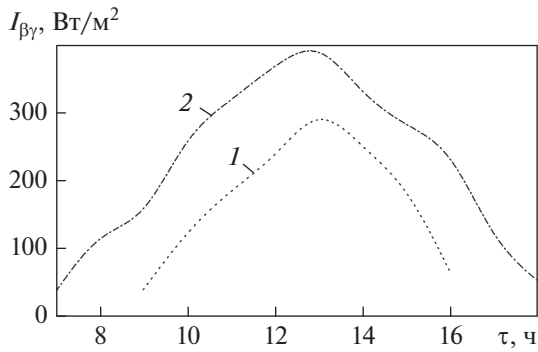


Рис. 6. Суточное изменение солнечного излучения, падающего на стену Тромба в январе (1) и марте (2)

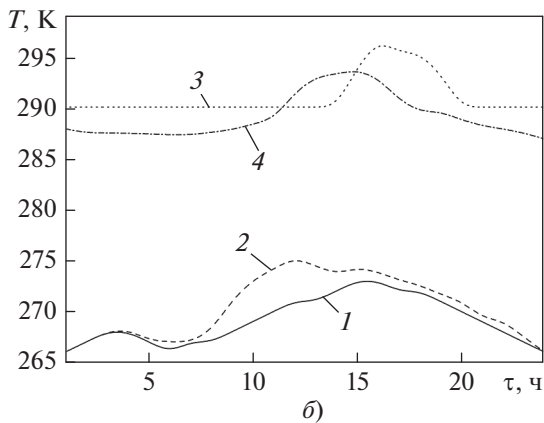
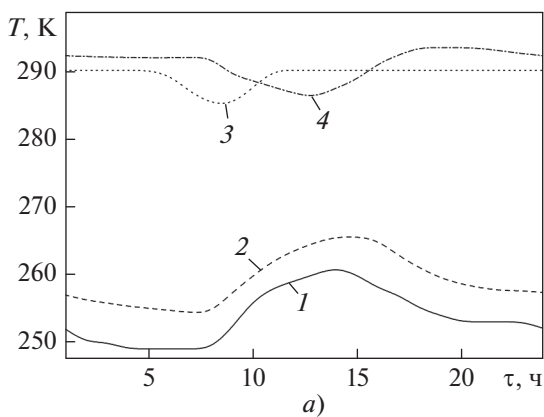


Рис. 7. Результаты расчета тепловых характеристик стены Тромба в январе (а) и марте (б). Температура: 1 – $T_{ул}$; 2 – $T_{стек}$; 3 – $T_{нар}$; 4 – $T_{в}$

структивными решениями и без них, при этом сравнивались температуры воздуха в помещении в январе и марте.

Согласно полученным результатам (см. рис. 8, а), при отсутствии оребрения на внутренней поверхности стеклоблока температура воздуха в помещении в январе была меньше на 3.9 К в среднем за сутки, в марте (см. рис. 8, б) – на 3 К, чем при использовании стены Тромба с оребрением. Снижение температуры воздуха внутри здания обусловлено увеличением тепловых потерь через стеклоблок, так как из-за отсутствия оребрения возрастает коэффициент теплоотдачи между воздухом в воздушной прослойке и внутренней поверхностью стеклоблока.

Согласно результатам расчета тепловых характеристик классической стены Тромба [1], при ее применении в климатических условиях г. Харбин наблюдается снижение температуры воздуха в исследуемом помещении (см. рис. 8, 9). Разница между среднесуточными температурами воздуха в помещении при использовании классической стены Тромба и с новыми конструктивными решениями колеблется от 2.9 до 3.2 К.

Из-за роста тепловых потерь через остекление стены Тромба и необходимости учитывать требования по обеспечению комфортного пребывания людей в помещении, следует увеличить тепловую мощность основного источника тепла. В соответствии с [16] был произведен перерасчет тепловой мощности основного источника тепла, результаты которого представлены в таблице.

Экономическая эффективность стены Тромба

Экономическую эффективность определяли для котла, работающего как на природном газе, так и на электрической энергии. Согласно результатам расчета (рис. 10), благодаря новому конструктивному решению стены Тромба в климатических условиях г. Харбин появится возможность сократить годовые расходы на энергоресурсы и выбросы CO₂ на 59 и на 19% относительно затрат при использовании классической стены Тромба. При стоимости 187 дол. за 1 м² исследуемой стены Тромба период окупаемости составит приблизительно 7 лет.

Мощности основного отопительного источника, кВт

Основной отопительный источник, кВт	Январь	Март
Без стены Тромба	1.74	1.06
Со стеной Тромба:		
классической	1.50	0.45
новой конструкции	1.32	0.25

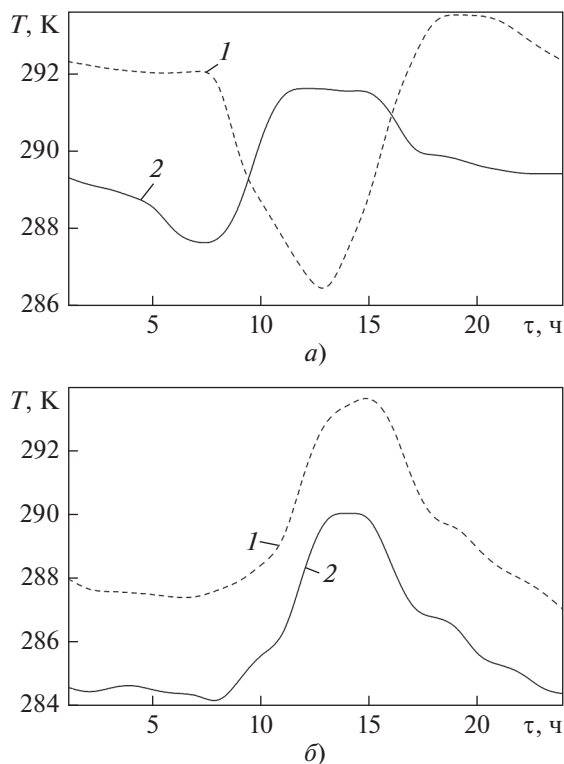


Рис. 8. Температуры воздуха в помещении в январе (а) и марте (б) при использовании оребрения на стеклоблоке стены Тромба (1) и без него (2)

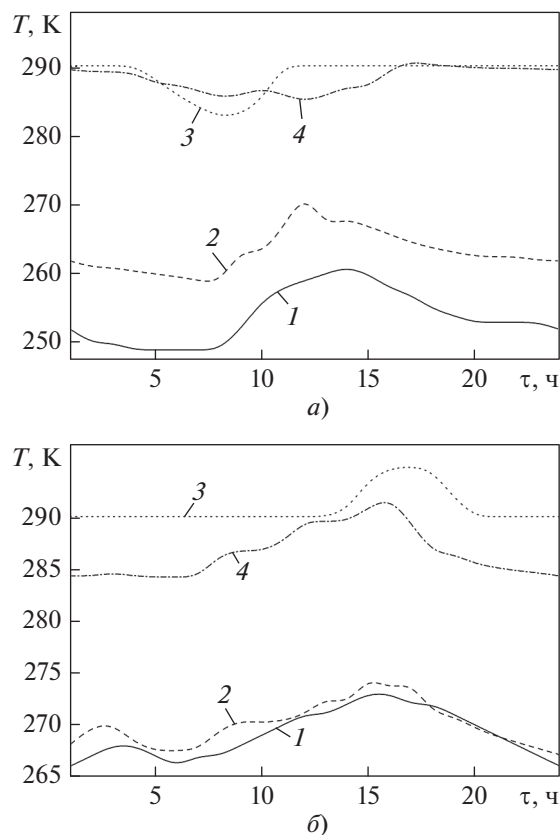


Рис. 9. Результаты расчета тепловых характеристик классической стены Тромба для января (а) и марта (б). Обозначения см. рис. 7

ВЫВОДЫ

1. Расчетное количество расплавленного вещества, используемого для аккумуляции тепла в стене Тромба, колеблется в пределах от 100 до 300 кг. Так, за расчетный день января оно составляет 100 кг, а за расчетный день февраля – 300 кг. Требуемое количество материала с фазовым переходом необходимо рассчитывать таким способом, при котором учитывались бы все протекающие в стене Тромба процессы теплообмена.

2. Для обеспечения комфортной температуры воздуха в помещении нужно регулировать значения коэффициентов конвективной теплоотдачи между воздушной прослойкой и наружной поверхностью массивной стены как за одни сутки, так и в течение всего отопительного периода. В таком случае наиболее целесообразным решением является использование устройств, регулирующих сечения проходных каналов воздуха, или вентиляторов, скорость вращения лопастей которых можно варьировать.

3. Применение стены Тромба новой конструкции в комбинированной системе теплоснабжения здания при климатических условиях г. Харбин приводит к сокращению годового потребления внешних энергоресурсов и выбросов CO_2 на 59% за весь отопительный период, что на 19% меньше,

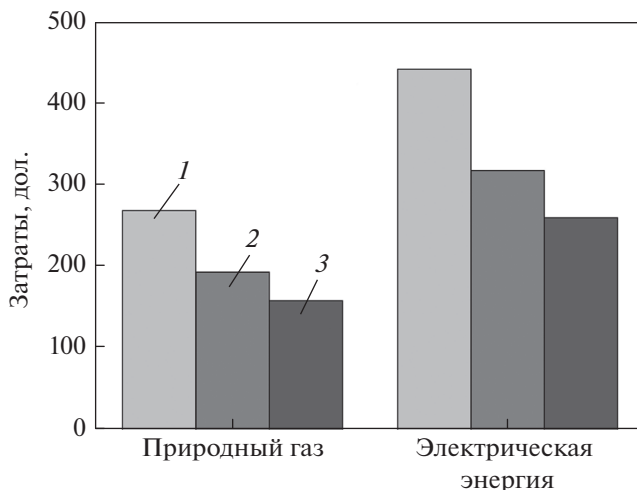


Рис. 10. Затраты на покупку необходимого количества энергоресурсов для обогрева помещения со стеной Тромба и без нее. 1 – без стены Тромба; со стеной Тромба: 2 – классической; 3 – с внесенными в нее конструктивными изменениями

чем при выборе классической стены Tromba. Период окупаемости составит около 7 лет.

4. В климатических зонах, в которых количества энергии падающего солнечного излучения недостаточно для полного обогрева здания, требуется наличие источника тепла. Для увеличения экономической эффективности стены Tromba целесообразно использовать такой источник тепла, мощность которого можно было бы регулировать, поскольку она должна меняться в течение всего отопительного сезона в соответствии с изменениями интенсивности падающего солнечного излучения.

5. Применение стены Tromba новой конструкции со стеклоблоком весьма перспективно в России на территориях, расположенных в диапазоне широт от 40° до 50°, так как именно на таких широтах низкие температуры наружного воздуха сочетаются с достаточным уровнем солнечной активности в зимний период. В таких широтах находятся города Курск, Белгород, Хабаровск, Волгоград и др. В частности, климатические условия г. Харбин схожи с таковыми городов Приморского края: Уссурийска, Владивостока, Находки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Classification**, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls / D. Wang, L. Hu, H. Du, Y. Liu, J. Huang, Y. Xu, J. Liu // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2020. V. 124. P. 109772. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109772>
2. **Kostikov S., Chao S., Yiqiang J.** A review of the current work potential of a Trombe wall // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2020. V. 130. P. 109947. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109947>
3. **Omara A.A.M., Abuelnuor A.A.A.** Trombe walls with phase change materials: A review // *Energy Storage.* 2020. V. 2. Is. 5. P. 123. <https://doi.org/10.1002/est2.123>
4. **A review** on passive and active solar still using phase change materials / P. Negi, R. Dobriyal, D.B. Singh, G.K. Badhotiya // *Mater. Today: Proc.* 2021. V. 46. Part 20. P. 10433–10438. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.996>
5. **Numerical** investigations on performance of phase change material Trombe wall in building / N. Zhu, S. Li, P. Hu, F. Lei, R. Deng // *Energy.* 2019. V. 187. P. 116057. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116057>
6. **Zhou Y., Yu C.W.** The year-round thermal performance of a new ventilated Trombe wall integrated with phase change materials in the hot summer and cold winter region of China // *Indoor Built Environ.* 2019. V. 28. Is. 2. P. 195–216. <https://doi.org/10.1177/1420326X18807451>
7. **Sacht H.M., Bragança L., Almeida M.G.** Trombe wall and glazings facades: Energy efficiency for different Portuguese climates // *Informes de la Construcción.* 2013. V. 65. P. 11–22. <https://doi.org/10.3989/ic.11.152>
8. **Seves glass block: Energy saving.** [Электрон. ресурс.] <https://catalogs.edilportale.com/Energy-Saving-it-en-fr-de-es-Seves-Glassblock-0-cat5ddd348f.pdf>
9. **Plexiglass solar energy and visible light transmittance.** [Электрон. ресурс.] <https://www.eplastics.com/blog/plexiglass-solar-energy-visible-light-transmission>
10. **Compound summary: Acetic Acid.** Pubchem. [Электрон. ресурс.] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetic-Acid>
11. **Numerical** study on thermal performance of PCM Trombe wall / S. Li, N. Zhu, P. Hu, F. Lei, R. Deng // *Energy Procedia.* 2019. V. 158. P. 2441–2447. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.317>
12. **Simões N., Manaia M., Simões I.** Energy performance of solar and Trombe walls in Mediterranean climates // *Energy.* 2021. V. 234. P. 121197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121197>
13. **Kostikov S.A., Yiqiang J., Grinkrug N.V.** Employment of a Trombe wall in modern heating systems // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 753. Chapter 1. P. 022017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022017>
14. **Comparative** study on the annual performance of three types of building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system / Z. Hu, W. He, J. Ji, D. Hu, S. Lv, H. Chen, Z. Shen // *Appl. Energy.* 2017. V. 194. P. 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.018>
15. **Effects** of external insulation component on thermal performance of a Trombe wall with phase change materials / Y. Liu, L. Hou, Y. Yang, Y. Feng, L. Yang, Q. Gao // *Solar Energy.* 2020. V. 204. P. 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.010>
16. **Данилов О.Л., Костюченко П.А.** Практическое руководство по выбору и разработке энергосберегающих проектов. М.: Технопромстрой, 2006.
17. **Сулов В.А.** Тепломассообмен: учеб. пособие. Ч. 1. СПб.: СПбГУПТД ВШ ТиЭ, 2016.
18. **Assessment** of various Trombe wall geometries with CFD study / D. Fidaros, C. Baxevanou, M. Markousi, A. Tsan-grassoulis // *Sustainability.* 2022. V. 14. Is. 9. P. 4877. <https://doi.org/10.3390/su14094877>
19. **Effect** of air gap depth on Trombe wall system using computational fluid dynamics / E.F. Abbas, A. Al-Abady, V. Raja, H.A.Z. Al-Bonsrulah, M. Al-Bahrani // *Int. J. Low-Carbon Technol.* 2022. V. 17. P. 941–949. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac063>
20. **Behbahani P.M., Kazerouni R.B., Davar H.** Optimization of air channel geometry on Trombe wall for transmitting excessive heat // *Indian J. Fundamental and Appl. Life Sci.* 2014. V. 4. No. S3. P. 877–889.
21. **Numerical** investigation of air flow and temperature distribution in a Trombe wall system: A CFD study / V. Bharath, K.M.V., Puneeth B.M. Preetham, Shashikanth // *Int. J. Eng. Technol.* 2017. V. 9. No. 3S. P. 489–495. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i3/170903S075>

22. **Numerical** study on the thermal performance of Trombe wall for passive solar building in semiarid climate / M. Dhahri, N. Khalilpoor, H. Aouinet, A. Issakhov, H. Sammouda, S. Emani // *Int. J. Photoenergy*. 2021. V. 2021. Special Issue: Thermal Management and Efficiency Enhancement of Solar Systems P. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/6630140>
23. **ANSYS** Fluent Theory Guide Release, 2011. [Электрон. ресурс.] <https://chromeextension://efaidnbmn-nnibpcajpcglclefindmkaj/https://kargo-sha.com/file/attach/201705/2812.pdf>
24. **NASA** Prediction of Worldwide Energy Resources: Data Access Viewer [Электрон. ресурс.] <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Numerical Investigation of Thermal Performance of a Trombe Wall of a New Design with Glazing for Cold Climatic Conditions

S. A. Kostikov^{a, *}, M. S. Grinkrug^b, S. A. Gordin^b, and J. Yiqiang^a

^a *Harbin Institute of Technology (HIT), Harbin, 150001 China*

^b *Komsomolsk-on-Amur State University (KnASU), Komsomolsk-on-Amur, 681013 Russia*

**e-mail: 300gloof@mail.ru*

Abstract—The paper is devoted to the problems arising in using a Trombe wall under cold climatic conditions. These walls have a considerable disadvantage in cold climates. After sunrise, the solar energy falls on a Trombe wall through the air and heats up the air in it very quickly. This results in insufficient heat storage in the Trombe wall and an increase in thermal energy losses to the ambient air from the room through the glazing. The main purpose of the study is to develop a new design solution for the Trombe wall, which will reduce heat losses through the glazing while maintaining a sufficient level of heat storage capacity in cold climates. Application of this wall will be most effective in areas located in the range of latitudes from 40° to 50°. A detailed description and engineering substantiation of the new design solution for the Trombe wall are presented. A mathematical model of heat-transfer processes and a solution algorithm used as the basis for the numerical experiment were developed. During the entire heating period, the average air temperature in the studied room was kept in the range comfortable for continuous attendance. Introduction of the newly designed Trombe wall will reduce the annual consumption of external energy resources and cut down CO₂ emission by 58%, i.e., its amount entering the atmosphere will be decreased by 18% as compared to the classical Trombe wall under the same climatic conditions. Thus, this study has yielded meaningful information about measures that can be used for improvement of the thermal performance of the Trombe wall for its proper operation in a cold climate.

Keywords: improved Trombe wall, heat-storage effectiveness of a Trombe wall, combined heat supply system, energy-saving technologies, greenhouse gas emission reduction