

Михаил Николаевич ЧЕКАРДОВСКИЙ¹
Павел Юрьевич МИХАЙЛОВ²
Игорь Юрьевич ШАЛАГИН³

УДК 536.245; 536.255

ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООБМЕНА В НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ КАРКАСНО-ЩИТОВОГО ТИПА

¹ доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
Тюменский индустриальный университет
misha.tchekardovskij@yandex.ru

² кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры механики многофазных систем,
Тюменский государственный университет
rav84369437@yandex.ru

³ старший преподаватель кафедры
теплогазоснабжения и вентиляции,
Тюменский индустриальный университет
igor-shalagin@mail.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в сокращении энергопотребления жилых зданий на основе лабораторных исследований и совершенствовании методов расчета, позволяющих уточнить совместно происходящие процессы передачи теплоты и фильтрации воздуха в ограждающих конструкциях зданий каркасно-щитового типа.

Лабораторные исследования стеновых конструкций каркасно-щитового типа проводились с помощью климатической камеры тепло-холод-влаги марки REOCAM TCM-1000, принадлежащей кафедре теплогазоснабжения и вентиляции ФГБОУ ВО Тюменского

Цитирование: Чекардовский М. Н. Параметры теплообмена в наружных стеновых конструкциях каркасно-щитового типа / М. Н. Чекардовский, П. Ю. Михайлов, И. Ю. Шалагин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 2. С. 36–49.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-36-49

индустриального университета. Были испытаны два типа фрагментов каркасно-щитовых ограждающих конструкций. Экспериментальные данные использовались для совершенствования расчетной модели.

В результате проведенных исследований была усовершенствована и предложена для проектирования теплофизическая модель нестационарного теплопереноса в наружных стеновых конструкциях, позволяющая более точно отразить совместно протекающие процессы фильтрации воздуха и передачи теплоты. Использование теплофизической модели позволяет учесть потери теплоты и выполнить подбор эффективных материалов для стеновых конструкций.

Ключевые слова

Каркасно-щитовые конструкции, теплофизическая модель, фильтрация воздуха, теплоперенос, контрольный объем.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-36-49

Ресурсосбережение является одним из приоритетных направлений политики России. Данные различных исследований показывают, что потенциальные ресурсы энергосбережения жилых зданий составляют не менее 40% [2, 3].

В период эксплуатации здания в наружных стеновых конструкциях непрерывно происходят теплофизические процессы передачи теплоты, фильтрации воздуха и движения влаги. Поэтому каждый из процессов может внести существенные изменения в формирование общей картины теплового и воздушного режимов эксплуатации наружных стеновых конструкций.

Для проведения лабораторных исследований стеновых конструкций каркасно-щитового типа использовалась климатическая камера тепло-холод-влаги марки REOSAM TCM-1000 кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Тюменского индустриального университета. Климатическая камера представляет собой испытательную камеру, в которой можно испытывать конструкции в диапазоне температур от -60°C до $+100^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности от 20 до 98%.

Для измерения и регистрации плотности тепловых потоков и температур на поверхностях ограждения использовался прибор ИТП МГ 4.03/10(1) «ПОТОК» зав. № 695 (СКБ Стройприбор, Челябинск). Для измерения и регистрации температур на поверхностях и в слоях ограждения использовались термоэлектрические преобразователи ТХК 0006 с вычислителем ИТ-2-48 зав. № А02 (НПП ЭТАЛОН, Омск). Регистрация температуры и относительной влажности воздуха теплого отсека, а также перепад давлений между теплым и холодным объемами, выполнялась многофункциональным измерительным прибором Testo-480 зав. № 02817032. Технические характеристики вышеуказанных приборов указаны в работе [8].

В лабораторных условиях испытаны два типа фрагментов каркасно-щитовых ограждающих конструкций. Для каждого типа конструкции выполнялось по три цикла испытаний. Испытываемый фрагмент типа 2 представлен на Рис. 1.

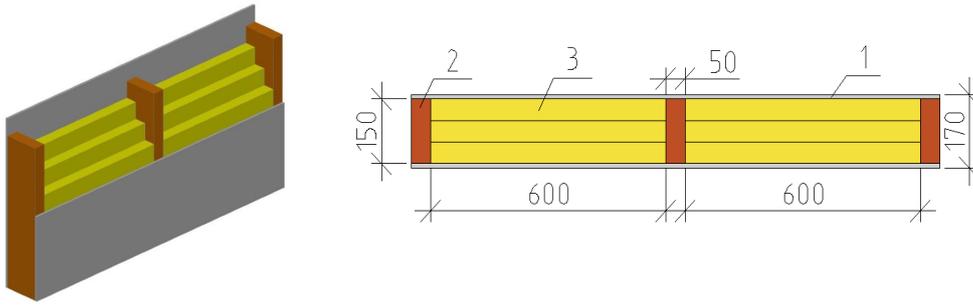


Рис. 1. Испытываемый фрагмент каркасно-щитового ограждения типа 1:
1 — гипсостружечная плита;
2 — деревянная стойка;
3 — минераловатный утеплитель

Fig. 1. The test fragment of the frame-panel fencing type 1:
1 — gypsum-chip board;
2 — wooden desk;
3 — mineral wool insulation

Изменение плотности кондуктивных тепловых потоков (q_1, q_2), а также температуры на внутренней (t_1, t_2, t_3) и наружной (t_4, t_5, t_6) поверхности в контролируемых точках за один цикл испытаний представлено на Рис. 2.

В результате испытаний средняя плотность кондуктивных тепловых потоков при внутренней температуре воздуха $+25^\circ\text{C}$ и наружной (в камере) температуре воздуха -35°C при среднем значении перепада давлений внутреннего и наружного воздуха ± 5 Па составила $16,4$ Вт/м². В соответствии с действующими

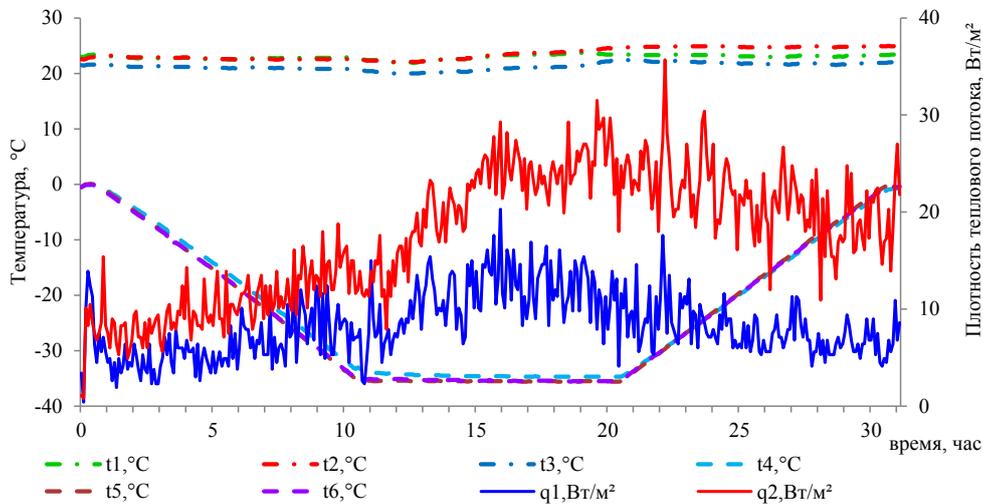


Рис. 2. Изменение плотности кондуктивных тепловых потоков и температуры на поверхностях фрагмента каркасно-щитового ограждения за один цикл испытаний

Fig. 2. The change in density of the conductive heat flow and temperature on the surface of the fragment frame-panel fencing during one test cycle

нормативными методиками был выполнен расчет фактического сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, которое составило 3,66 (м²·°С)/Вт [1]. Фактическое сопротивление теплопередаче удовлетворяет требованиям тепловой защиты зданий для условий г. Тюмень (нормируемое сопротивление теплопередаче составляет 3,5 (м²·°С)/Вт).

Экспериментальные данные использовались для совершенствования расчетной модели. В предложенной теплофизической модели тепломассопереноса пористый проницаемый строительный материал рассматривается как двухкомпонентная среда, состоящая из твердого недеформируемого скелета (минерального, органического) и воздуха, занимающего поровое пространство.

Тепломассоперенос описывается законом сохранения энергии, записанным для многофазной среды в интегральной форме. С учетом двухкомпонентности, одинаковой температуры фаз и аддитивности внутренней энергии уравнение записывается в виде [7]

$$\int_V \frac{\partial(\sum_{i=1}^2 \rho_i \cdot U_i)}{\partial t} \cdot dV = - \int_S (\rho_2 \cdot v_2^n \cdot U_2) \cdot dS - \int_S q^n \cdot dS, \quad (1)$$

где нижний индекс соответствует компоненту ($i = 1$ — скелет, $i = 2$ — воздух); ρ_i — приведенная плотность компонента; U_2 — удельная внутренняя энергия воздуха; q^n — удельный тепловой поток; $\rho_2 \cdot v_2^n$ — поток массы воздуха в единицу времени. Слева записано изменение внутренней энергии компонентов в конечном объеме V в единицу времени, первое слагаемое в правой части описывает перенос энергии компонента через замкнутую поверхность S , второе слагаемое — перенос тепловой энергии теплопроводностью через замкнутую поверхность S .

Массоперенос воздуха описывается уравнением неразрывности в интегральной форме, записанным для многокомпонентной среды. С учетом двухкомпонентности уравнение примет следующий вид [7]:

$$\int_V \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \cdot dV = - \int_S \rho_2 \cdot v_2^n \cdot dS. \quad (2)$$

Особенностями предложенной модели являются

- моделирование нестационарных тепломассообменных процессов, позволяющее анализировать нестандартные тепловые режимы здания;
- решение задачи в трехмерной постановке, позволяющее учитывать изменение температуры и давления воздуха по высоте ограждения.

Конечно-разностная аппроксимация описанных уравнений выполняется по методу контрольного объема. Нахождение неизвестных температур и давлений на $n+1$ временном шаге определяется по неявной схеме.

Уравнение баланса массы в контрольном объеме [7] —

$$\frac{\rho_{\text{Вijk}}^{(n+1)} - \rho_{\text{Вijk}}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ijk} = - \sum_{l=1}^{l=4(6)} \rho_{\text{Вijk}} \cdot v_{\text{Вijk}}^n \cdot \Delta S_{ijkl}, \quad (3)$$

где верхний индекс (n) соответствует временному шагу; нижние индексы $k=1, 2, 3, 4$ при решении двумерных задач и $k=1, 2, \dots, 6$ для пространственных задач соответствуют W, E, S, N, H, O граням V_{ijk} контрольного объема (Рис. 3).

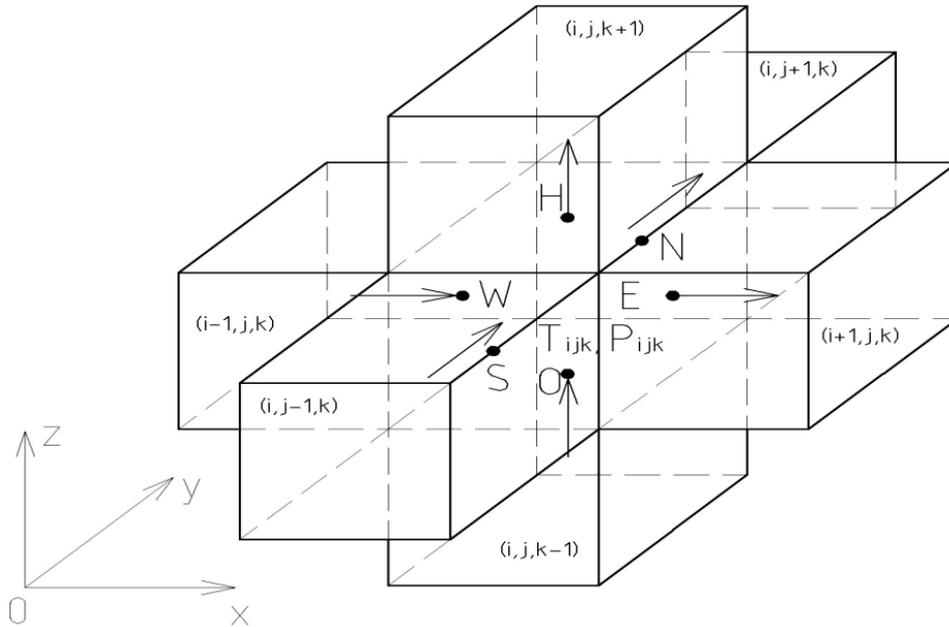


Рис. 3. К определению тепловых потоков и потоков массы воздуха через грани W, E, S, N, H, O контрольного объема V_{ijk}

Fig. 3. For determining the heat flows and flows of air masses through the edges of W, E, S, N, H, O of the control volume V_{ijk}

Поток массы $\rho_e \cdot v_e^n$ определяется в соответствии с принятым в строительной теплофизике способом [7]:

$$\rho_e \cdot v_e^n = g \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}, \quad (4)$$

где g — коэффициент воздухопроницаемости, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; ΔP — разность давлений воздуха между слоями, Па , находящимися на расстоянии Δx , м .

Удельный поток массы воздуха через грань S контрольного объема (i, j, k) (Рис. 1) находится как [7]:

$$(\rho_{e,l=1} \cdot v_{e,l=1})^{n+1} = - \frac{P_{ijk}^{n+1} - P_{i-1,jk}^{n+1}}{\Delta x / g_{ijk} + \Delta x / g_{i-1,jk}}. \quad (5)$$

Потоки массы через грани W, E, N, H, O находится аналогичным образом. Уравнение баланса энергии для контрольного объема в V_{ijk} [7]:

$$\frac{\sum_{i=1}^2 (\rho_i \cdot U_i)^{(n+1)} - \sum_{i=1}^2 (\rho_i \cdot U_i)^{(n)}}{\Delta \tau} \cdot V_{ijk} = - \sum_{l=1}^{l=6} (\rho_b \cdot v_{b,l} \cdot U_b)^{n+1} \cdot \Delta S_l - \sum_{l=1}^{l=6} q_l^{n+1} \cdot \Delta S_l. \quad (6)$$

Удельный тепловой поток через грань S контрольного объема (i, j, k) (Рис. 1) находится как [7]:

$$q_{l=1}^{n+1} = - \frac{T_{ijk}^{n+1} - T_{i-1,jk}^{n+1}}{\Delta x / \lambda_{ijk} + \Delta x / \lambda_{i-1,jk}} \quad (7)$$

Удельный тепловой поток через грани W, E, N, H, O находится аналогичным образом. Удельная внутренняя энергия [7]

$$\text{скелета } U_{ск} = C_{ск,ijk} \cdot T_{ijk}, \quad \text{воздуха } U_{в} = C_{в,ijk} \cdot T_{ijk}.$$

Совместное решение уравнений (4) и (7) проводится на основе следующих этапов расчета:

1. определяется поле давлений на $n+1$ шаге, а температура в контрольных объемах принимается по n -му временному шагу;
2. определяется поле температур на $n+1$ шаге, при этом значения в соответствующих контрольных объемах принимается на $n+1$ шаге.

С помощью предложенной теплофизической модели выполнено расчетно-параметрическое исследование влияния фильтрации воздуха на изменение полей температур и тепловых потоков в наружных стеновых конструкциях каркасно-щитового типа. В качестве расчетной области принят симметричный относительно вертикальной стойки каркаса фрагмент стеновой конструкции (Рис. 4).

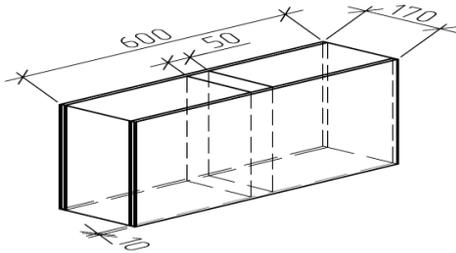


Рис. 4. Расчетная область фрагмента стеновой конструкции каркасно-щитового типа

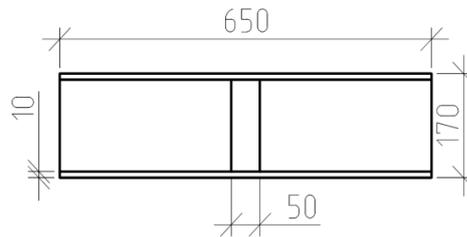


Fig. 4. Computational domain of the wall structure fragment of the frame-switchboard type

Для численного исследования был задан ряд параметров, приведенных ниже.

1. Значения абсолютных давлений воздуха вблизи наружной и внутренней поверхности рассматриваемого фрагмента конструкции:

- а) значение абсолютного давления вблизи наружной поверхности больше значения вблизи внутренней поверхности (инфильтрация);
- б) значение абсолютного давления вблизи наружной поверхности меньше значения вблизи внутренней поверхности (эксфильтрация).

2. Температуры и удельные плотности тепловых потоков воздуха вблизи поверхностей наружной стеновой конструкции при начальных условиях:

— для тепловой задачи задается начальное распределение температур по всей расчетной области: $T = T(x, y, z, \tau)$ при стационарном режиме (СР);

— для фильтрационной задачи задается начальное распределение давлений воздуха по всей расчетной области: $P = P(x, y, z, \tau)$ при СР.

3. Температуры и удельные тепловые потери воздуха вблизи поверхностей наружной стеновой конструкции при граничных условиях:

— для тепловой задачи (условия 3 рода): $-\lambda \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=y_{nc}} = \alpha \cdot (T_e - T_{nc})$ при СР;

— для фильтрационной задачи (условия 1 рода): $P = P(y = y_{nc}, \tau)$ при СР.

По справочным данным [7] задаются теплофизические характеристики материалов наружной стеновой конструкции. Для проверки достоверности усовершенствованной программы выполнено сравнение полей температуры с результатами расчета коммерческого пакета Elcut и удельного кондуктивного теплового потока с экспериментальными данными.

Для проверки достоверности усовершенствованной программы выполнено сравнение полей температуры с результатами расчета коммерческого пакета Elcut и экспериментальными данными, а также сравнение удельного кондуктивного теплового потока с экспериментальными данными.

Расчеты без учета фильтрации воздуха выполнялись на условия наружной и внутренней температуры -35°C и $+20^{\circ}\text{C}$. Временной период формирования теплообменных процессов составляет 10 часов. Результаты распределения полей температуры в установившемся тепловом режиме и изменение удельного кондуктивного теплового потока за расчетный период по усовершенствованной программе представлены на Рис. 5 и 6.

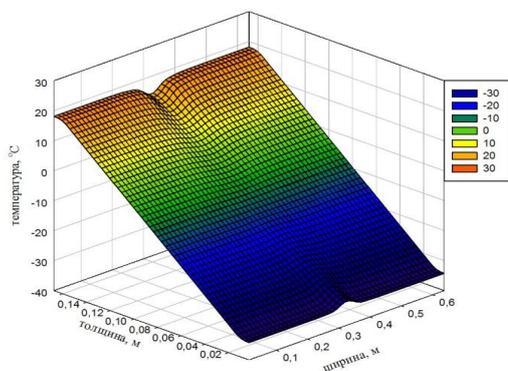


Рис. 5. Расчетные данные распределения температур по сечению наружной стеновой конструкции при отсутствии фильтрации воздуха по результатам эксперимента

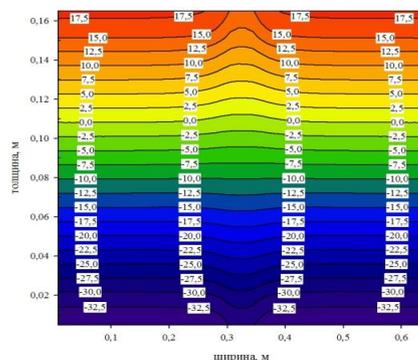


Fig. 5. Calculated temperature distribution data on the cross section of the outer wall structure in the absence of air filtration according to the results of the experiment

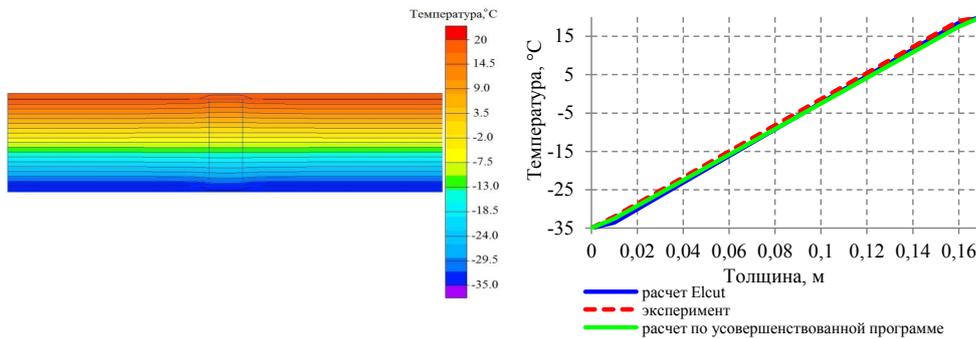


Рис. 6. Распределение температуры по сечению наружной стеновой конструкции при отсутствии фильтрации воздуха по программе Elcut

Fig. 6. The temperature distribution over the cross section of the outer wall structure in the absence of air filtering according to the “Elcut” program

Рис. 7 иллюстрирует выход фрагмента каркасно-щитовой ограждающей конструкции на стационарный тепловой режим. Установившийся удельный кондуктивный тепловой поток, определенный экспериментальным и расчетным способом, наблюдается через 6 часов.

Анализ Рис. 5, 6 и 7 показывает совпадение результатов расчета полей температуры с результатами расчета распределения температуры по сечению в программе Elcut, а также удельного кондуктивного теплового потока с экспериментальными данными, что подтверждает корректность разработанного программного кода в частном случае. В естественных условиях формирование тепловых режимов ограждающих конструкций происходит под действием различных факторов (ветер, разность объемных весов воздуха и т. д.) [6].

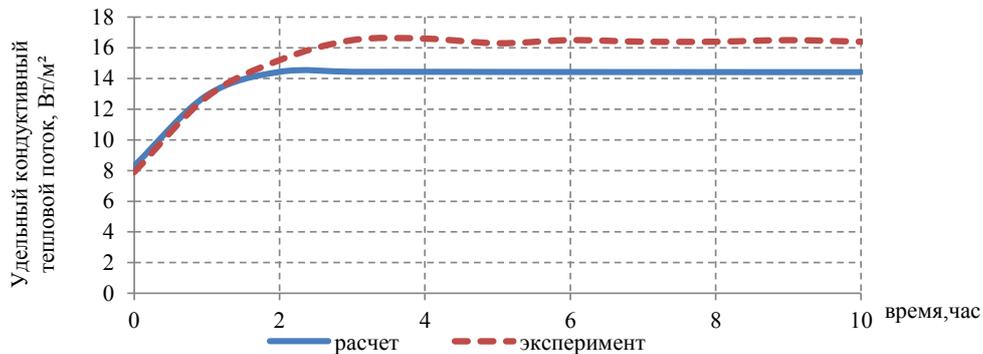


Рис. 7. Изменение удельного кондуктивного теплового потока от времени при отсутствии фильтрации воздуха

Fig. 7. Changing the proportion of conductive heat flow from time to time in the absence of air filtration

Моделировалось ступенчатое разрежение (инфильтрация) и избыточное давление воздуха (эксфильтрация) в здании [4, 5]. На Рис. 8 представлены результаты распределения полей температуры по сечению ограждающей конструкции при перепаде давлений 50 Па.

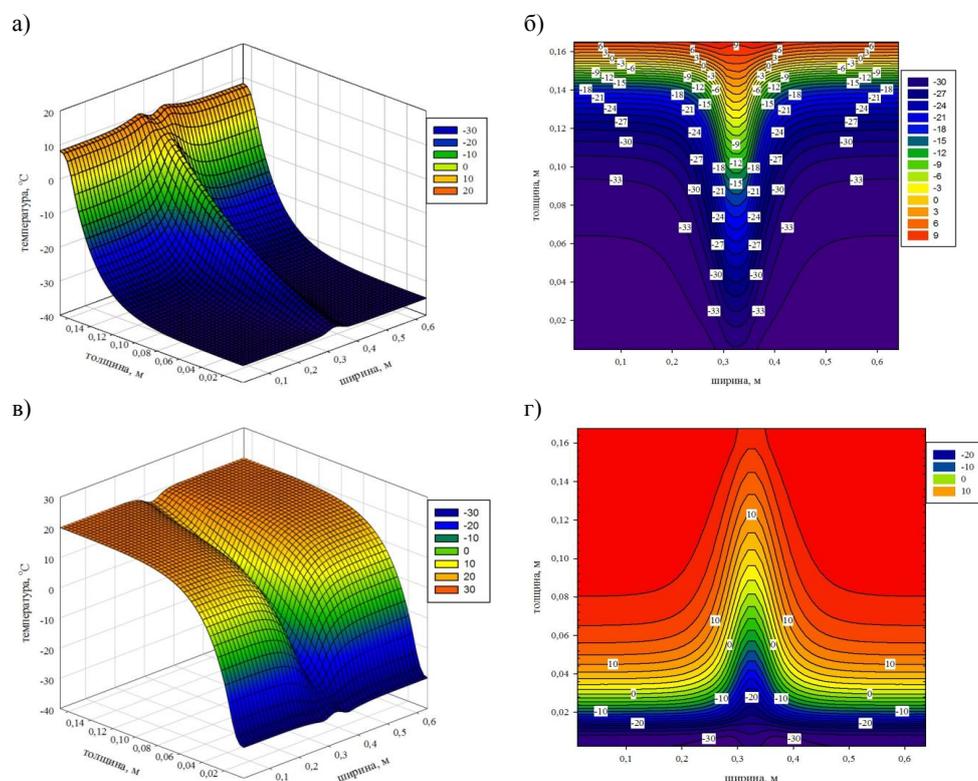


Рис. 8. Распределение температуры по сечению конструкции при перепаде давлений 50 Па:

а, б — при инфильтрации;
в, г — при эксфильтрации

Fig. 8. The temperature distribution on the cross section of the structure at a differential pressure of 50 Pa:

а, б — during the infiltration;
в, г — during the exfiltration

На Рис. 9 представлены результаты изменения удельных (кондуктивного, q_p , и фильтрационного, q_{ϕ}) тепловых потоков при различном перепаде давлений (инфильтрации) воздуха.

На Рис. 10 представлены результаты изменения удельных (кондуктивного, q_p , и фильтрационного, q_{ϕ}) тепловых потоков (в установившемся режиме) при различном перепаде давлений (эксфильтрации) воздуха.

Как видно из Рис. 9 и 10, удельные фильтрационные потери теплоты в исследованных каркасно-щитовых ограждающих конструкциях превышают нормативные значения (более 30%). Для доведения удельных фильтрационных потерь теплоты до нормативных значений выполнена модернизация существующих ограждающих конструкций, заключающаяся в применении дополнительных обшивных

слоев с меньшим коэффициентом воздухопроницаемости. Теплофизические характеристики дополнительных обшивных слоев представлены в Таблице 1.

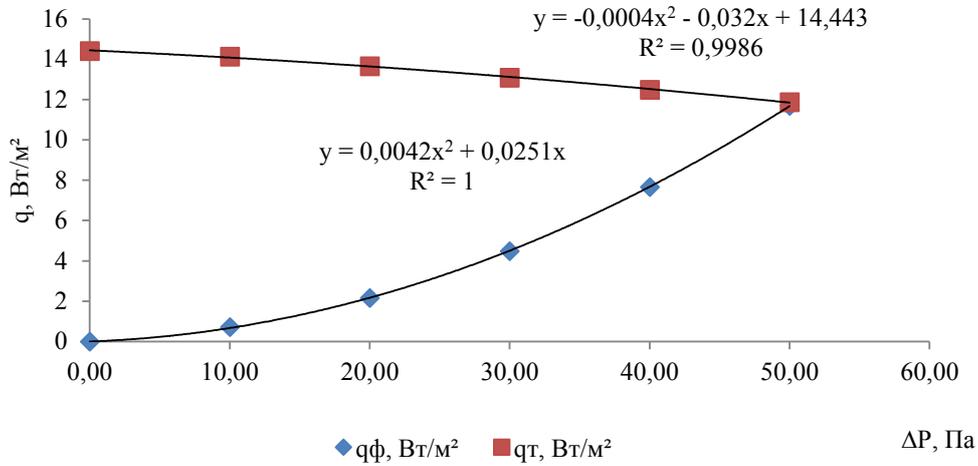


Рис. 9. Удельные кондуктивные (q_t) и фильтрационные (q_ϕ) тепловые потоки в установившемся режиме при различном перепаде давления (инфильтрации)

Fig. 9. Specific conductive (q_t) and filtration (q_ϕ) heat flows in steady state operation at various differential pressure (infiltration)

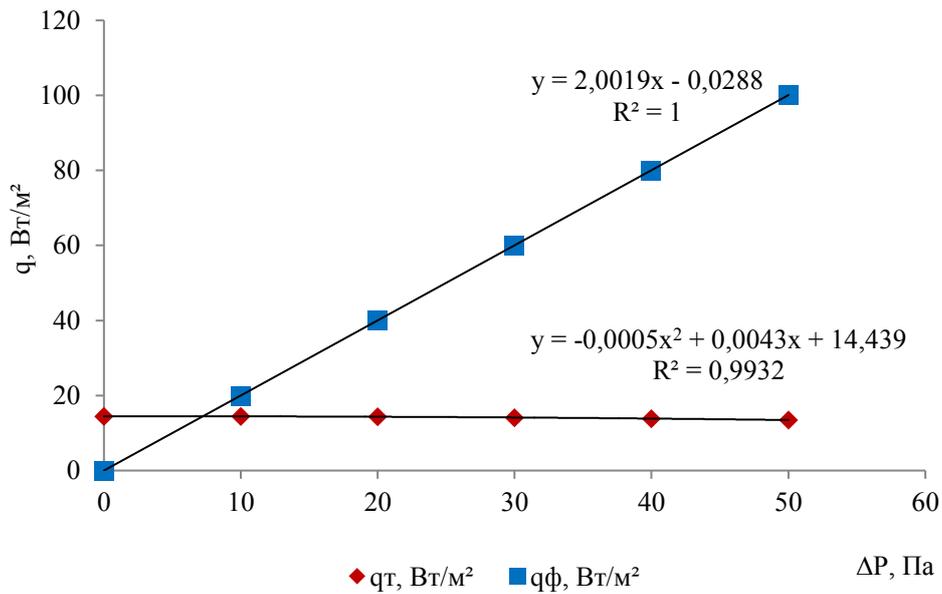


Рис. 10. Удельные кондуктивные (q_t) и фильтрационные (q_ϕ) тепловые потоки в установившемся режиме при различном перепаде давления (эксфильтрации)

Fig. 10. Specific conductive (q_t) and filtration (q_ϕ) heat flow in steady state at different pressure drop (exfiltration)

Таблица 1

Характеристики материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Воздухопроницаемость, кг/(м·ч·Па)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Стоимость, руб/м ²
Гипсостружечная плита	0,41	5×10^{-4}	0,098	165,6
Строительный картон	0,15	$2,03 \times 10^{-5}$	0,083	25,2
Фанера клееная	0,15	$1,03 \times 10^{-6}$	0,02	204,7
Полиэтиленовая пленка	0,25	не проницаем	0,001	14,2

Table 1

Materials characteristics

Результаты расчета коэффициента удельных тепловых потерь из-за фильтрации воздуха с выбранными материалами представлены на Рис. 11.

Таким образом, наиболее рациональным решением ($q_{\phi} \leq 30\%$) при выборе материала, снижающего удельные затраты теплоты с фильтрующимся воздухом, будет применение строительного картона в качестве дополнительных слоев между наружным и теплоизоляционным слоем.

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. разработана теплофизическая модель пространственного процесса тепло-массопереноса в ограждающих конструкциях зданий;
2. разработана и реализована в виде компьютерного кода программа расчета температурных полей и тепловых потоков при наличии кондуктивного и конвективного переноса теплоты через ограждающие конструкции;

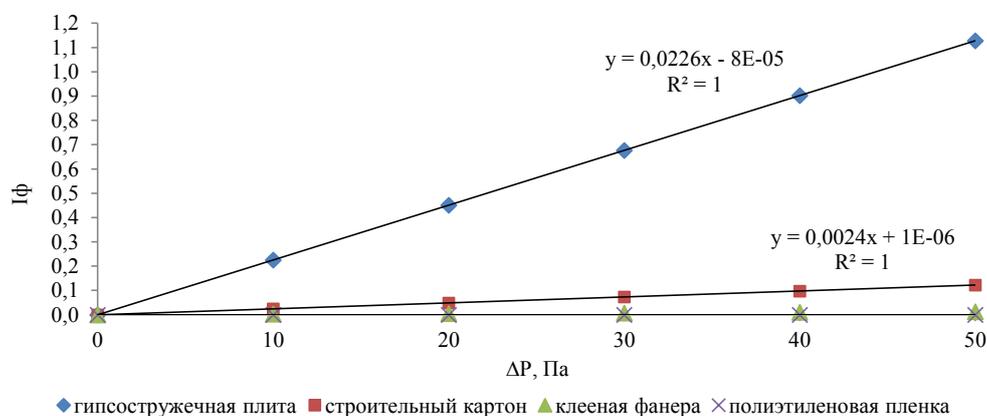


Рис. 11. Изменение коэффициента удельных тепловых потерь из-за фильтрации воздуха различных материалов при различных перепадах давлений (эксфильтрации) воздуха

Fig. 11. Changing the ratio of specific heat losses due to air filtration of various materials at various differential pressures (exfiltration) of air

3. спроектирован и изготовлен рабочий участок, содержащий реальную конструкцию экспериментальной установки стеновой панели каркасно-щитового типа, и создана автоматизированная система тепловых измерений, позволяющая управлять термобарическими параметрами процессов;
4. выполненные экспериментальные и расчетные исследования параметров показывают, что ряд конструкций каркасно-щитового типа не удовлетворяют требованиям эффективной тепловой защиты из-за повышенного конвективного переноса теплоты при фильтрации воздуха;
5. одним из рациональных решений при выборе материала, обеспечивающим ограничения потери теплоты ($q_{\phi} \leq 30\%$) из-за фильтрации воздуха и снижающим удельные затраты теплоты, будет применение материалов с низким коэффициентом воздухопроницаемости в качестве дополнительного слоя между наружным и теплоизоляционным слоем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнов Д. В. Определение дополнительных потоков теплоты через элементы фрагмента ограждающей конструкции / Д. В. Крайнов, Р. А. Садыков // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 10–12.
2. Крайнов Д. В. Расчет термического сопротивления ограждающих конструкций с интегральным учетом их воздухопроницаемости и источников теплоты / Д. В. Крайнов, Р. А. Садыков // Материалы X международного симпозиума «Энергоэффективность и энергосбережение». Казань, 2009. С. 187–195.
3. Савин В. К. Энергоэффективность наружных конструкций зданий / В. К. Савин // Энергосбережение. 2002. № 6. С. 63–65.
4. Труды института. Выпуск 22. Строительная теплофизика / под ред. Ф. В. Ушкова, А. П. Кротова. М.: Госстрой, 1979. 132 с.
5. Ушков Ф. В. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен / Ф. В. Ушков // Строительная промышленность. 1951. № 8. С. 16–19.
6. Ушков Ф. В. Исследование температурных полей стыков трехслойных панелей / Ф. В. Ушков; Гос. ком. по гражд. строительству и архитектуре при Госстрое СССР. Науч.-исслед. ин-т теории, истории и перспективных проблем советской архитектуры. М.: 1966. 44 с.
7. Шабаров А. Б. Тепломассоперенос в нефтегазовых и строительных технологиях. Учебное пособие / А. Б. Шабаров, А. А. Кислицын, Б. В. Григорьев, П. Ю. Михайлов, Л. А. Пульдас, У. Ю. Шастунова. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2014. 332 с.
8. Shalagin I. Yu. Heat Transfer in the Filtration Conditions in Heterogeneous Building Envelopes / I. Yu. Shalagin, N. I. Kurilenko, R. R. Davlyatchin // MATEC Web of Conferences. 2015. Vol. 23. DOI: 10.1051/mateconf/20152301042

Mikhail N. CHEKARDOVSKIY¹
Pavel Yu. MIKHAILOV²
Igor Yu. SHALAGIN³

**PARAMETERS OF HEAT TRANSFER
IN THE EXTERIOR WALL STRUCTURES
OF FRAME-PANEL TYPE**

¹ Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Department of Heat, Ventilation and Gas Supply,
Industrial University of Tyumen
misha.tchekardovskij@yandex.ru

² Cand. Sci. (Phys-Math.), Associate Professor,
Department of Multiphase Systems Mechanics,
Physics and Technical Institute,
Tyumen State University
pav84369437@yandex.ru

³ Associate Professor, Department of Heat,
Ventilation and Gas Supply,
Industrial University of Tyumen
igor-shalagin@mail.ru

Abstract

The purpose of the study is to reduce the energy consumption of residential buildings with the help of laboratory studies on the improvement of calculation methods, which could specify together the processes of heat transfer and air filtration in the building envelope of the frame-panel type.

Laboratory tests of wall structures of the frame-type switchboard have been carried out with the help of the climatic heat-cold-moisture chamber REOCAM TCM-1000 belonging to the Department of Heat and Ventilation of Industrial University of Tyumen. Two types of skeleton-shield walling fragments have been tested. The experimental data were used to improve the computational model.

Citation: Chekardovskiy M. N., Mikhailov P. Yu, Shalagin I. Yu. 2016. “Parameters of Heat Transfer in the Exterior Wall Structures of Frame-Panel Type”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 2, pp. 36–49.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-36-49

As a result of the research, it has been refined and offered to design a thermophysical model of non-stationary heat and mass transfer in external wall structures, allowing to more accurately reflect together the processes under the air filter and heat transfer. Using thermophysical model allows to take into account the heat loss and to perform the selection of efficient materials for wall construction.

Keywords

Frame-panel structures, thermophysical model, air filtration, heat-and-mass transfer, control volume.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-36-49

REFERENCES

1. Kraynov D. V., Sadykov R. A. 2009. “Raschet termicheskogo soprotivleniya ogradhdayushchikh konstruksiy s integralnym uchetom ikh vozdukhopronitsaemosti i istochnikov teploty” [Calculation of Thermal Resistance Fencing Structures with an Integral View of Their Air Permeability and Heat Sources]. Proceedings of the 10th international symposium “Energoeffektivnost i energosberezhenie”, pp. 187–195. Kazan.
2. Kraynov D. V., Sadykov R. A. 2012. “Opredelenie dopolnitelnykh potokov teploty cherez elementy fragmenta ogradhdayushchey konstruksii” [Identification of Additional Heat Flows through the Building Envelope Elements of the Fencing Structure Fragment]. Housing Construction, no 6, pp. 10–12.
3. Savin V. K. 2002. “Energoeffektivnost naruzhnykh konstruksiy zdaniy” [Energy Efficiency of the External Building Structures]. Energosberezhenie, no 6, pp. 63–65.
4. Shabarov A. B., Kislitsyn A. A., Grigorev B. V., Mikhaylov P. Yu., Puldal L. A., Shastunova U. Yu. 2014. *Teplomassoperenos v neftegazovykh i stroitelnykh tekhnologiyakh. Uchebnoe posobie* [Heat and Mass Transfer in the Oil and Gas and Construction Technologies: A Handbook]. Tyumen: Tyumen State University.
5. Shalagin I. Yu., Kurilenko N. I., Davlyatchin R. R. 2015. “Heat Transfer in the Filtration Conditions in Heterogeneous Building Envelopes”. MATEC Web of Conferences, vol. 23. DOI: 10.1051/mateconf/20152301042.
6. Ushkov F. V. 1951. “Vliyanie vozdukhopronitsaemosti na teplozashchitu sten” [The Impact of Air Permeability on the Walls’ Thermal Protection]. *Stroitel'naya promyshlennost*, no 8, pp. 16–19.
7. Ushkov F. V. 1966. “Issledovanie temperaturnykh poley stykov trekhslonnykh paneley” [Investigation of Temperature Fields Joints of Sandwich Panels]. Moscow: State Committee on Civil Construction and Architecture under State Committee for Construction of the USSR. Scientific-Research Institute of Theory, History, and Prospective Issues of the Soviet Architecture.
8. Ushkov F. V., Krotova A. P. (eds). 1979. *Trudy instituta* [The Institute’s Works]. Vol. 22. *Stroitel'naya teplofizika* [Construction Thermal Physics]. Moscow: Gosstroy.