

УДК 621.181.7

Садыков Р.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: Sadykov_R_A@mail.ru,

Халиуллина Л.А. – студент

E-mail: Leisan_Haliullin@mail.ru

Ломоносова Я.Э. – студент

E-mail: Yano4ka@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Численные расчеты процессов теплопереноса
в отдельных узлах многослойных ограждающих конструкций**

Аннотация

Разработана математическая модель (ММ) процессов переноса в многослойных ограждающих конструкции (МОК). Найдены поля распределения температур и потоков количества теплоты методом сеток. Составлена программа расчета на языке Q-Basic, описаны размерности массивов, проанализированы результаты расчетов процессов переноса в ограждающих конструкциях здания при помощи программных продуктов Fluent и Elcut. Приводится описание реализации ММ процессов переноса в МОК в программе Q-Basic с последующей демонстрирующей её применения для практического инженерного проектирования. Проведены необходимые теплотехнические расчеты отдельных типовых узлов ограждающих конструкций и сооружений.

Ключевые слова: математическая модель, теплофизика, теплопроводность, программа, узел, функция, конструкция, строительство.

Инженерные решения зданий и ограждающих конструкций непрерывно совершенствуются. В последние годы наметилось сближение между обоснованными гигиеническими требованиями к тепловому состоянию жилых и других зданий и степенью выполнения этих требований при реальном строительстве. Об этом, в частности, свидетельствует более широкое применение конструктивных решений, обеспечивающих повышение эксплуатационных требований к качеству зданий [1]. Постоянный рост стоимости энергоресурсов обусловил большой интерес к изучению проблем теплофизики зданий, т.к. одним из самых огромных потребителей энергии в нашей стране является строительный комплекс. Как показывает опыт, возможностей экономии энергии, особенно в России, развивающейся на основе всестороннего изучения климатических данных отдельных ее районов, большое множество. На этапе проектирования зданий и сооружений одной из важнейших задач является предварительный теплотехнический расчет МОК, задачей которого является определение поля распределения температур, потоков количества теплоты, расчеты приведенного и термического сопротивления МОК, выбор толщин теплоизоляционного и гидроизоляционного слоев и ряда других характеристик.

Перенос тепловой энергии в ОК происходит через твердый скелет материала, жидкую и парообразную влагу, которые содержатся в капиллярно-пористых телах. Уравнение стационарного нелинейного переноса с учетом фильтрации (газа, парогазовой смеси, жидкости) и наличия внутренних объемных стоков (влаги) или ИТ при общепринятых допущениях в одномерном случае применительно к каноническим формам в соответствующих системах координат в общем случае может быть записано в виде обыкновенного дифференциального неоднородного уравнения второго порядка [2]:

$$[\lambda(t)t'] + \frac{\Gamma - f}{r} [\lambda(t)t] + \operatorname{sgn}[G]G(t)c_p(t)t + \operatorname{sgn}[I](t) = 0, \quad (1)$$

где t (r) – температура; r – текущая координата, $r = [0, h]$, h – толщина многослойной ОК; λ – коэффициент теплопроводности ОК (возможно с учетом её объемной пористости Π); Γ – постоянная формы ($\Gamma = 1; 2; 3$ – соответственно неограниченные плита, цилиндр или квадратный бруск, шар или куб); c_p – изобарная теплоемкость паровоздушной смеси; G – плотность потока паровоздушной смеси, здесь «+» означает процесс эксфильтрации, «-» – инфильтрации паровоздушной смеси; $I(t)$ – мощность внутреннего источника тепла (+) или стока (-); «'» (верхний штрих) – дифференцирование по r ; $\operatorname{sgn}[-]$ – (сигнум)

функция «знак». Если $I=const$, то в рассматриваемой области термических сопротивлений действует непрерывно равномерно распределенный положительный или отрицательный ИТ. Если $I(t) \neq const$, то в этой области действуют местные, сосредоточенные или распределенные положительные или отрицательные ИТ.

В работе проанализированы результаты расчетов стационарного теплопереноса в наиболее распространенных конструктивных элементах зданий, полученных с помощью программных продуктов Fluent [3], Elcut [4] и программы, написанной на Q-Basic. Работоспособность всех трех программ предварительно проверена на тестовых аналитических задачах, поэтому и в результаты вычислений одних и тех же реальных практических задач с их помощью имеют близкие значения. Температурные различия в рассмотренных узлах, с учетом теплофизических характеристик материалов, составляли десятичные или сотые доли градуса, в зависимости от координатного шага сетки узла (рис. 1).

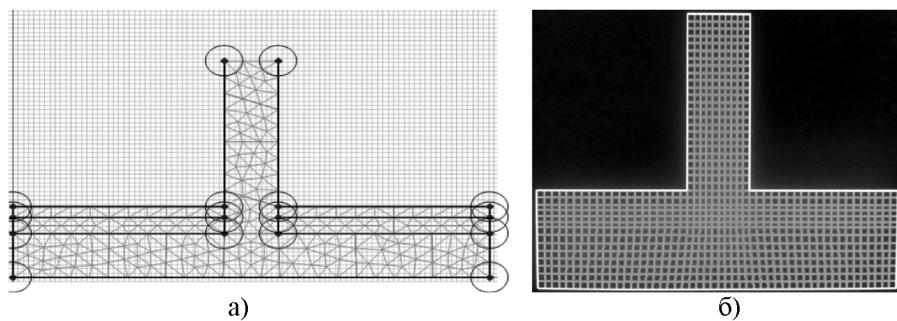


Рис. 1. а) разбиение сетки в программе Elcut, б) разбиение сетки в программе Fluent

В работе рассмотрено три конструктивных узла здания: 1 – пересечение внешней несущей стены с внутренней несущей стеной (рис. 2а), 2 – опора плиты перекрытия на несущую стену (рис. 2б), 3 – пересечение плиты перекрытия и балконной плиты (рис. 3в). Соответствующие им вычисленные поля температур так же представлены на рис. 2.

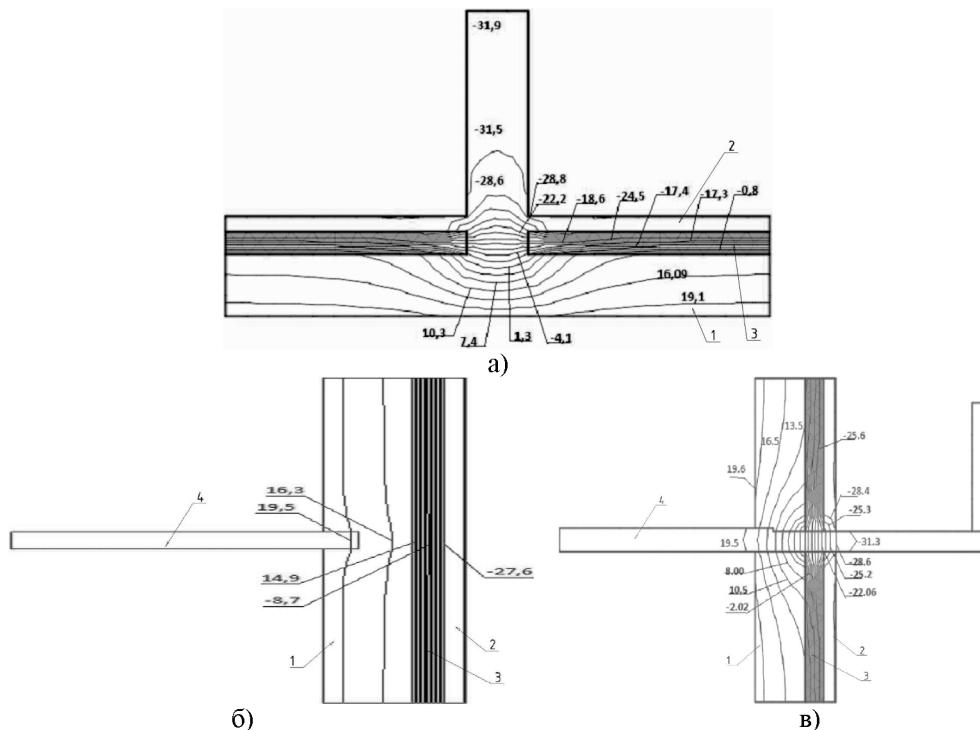


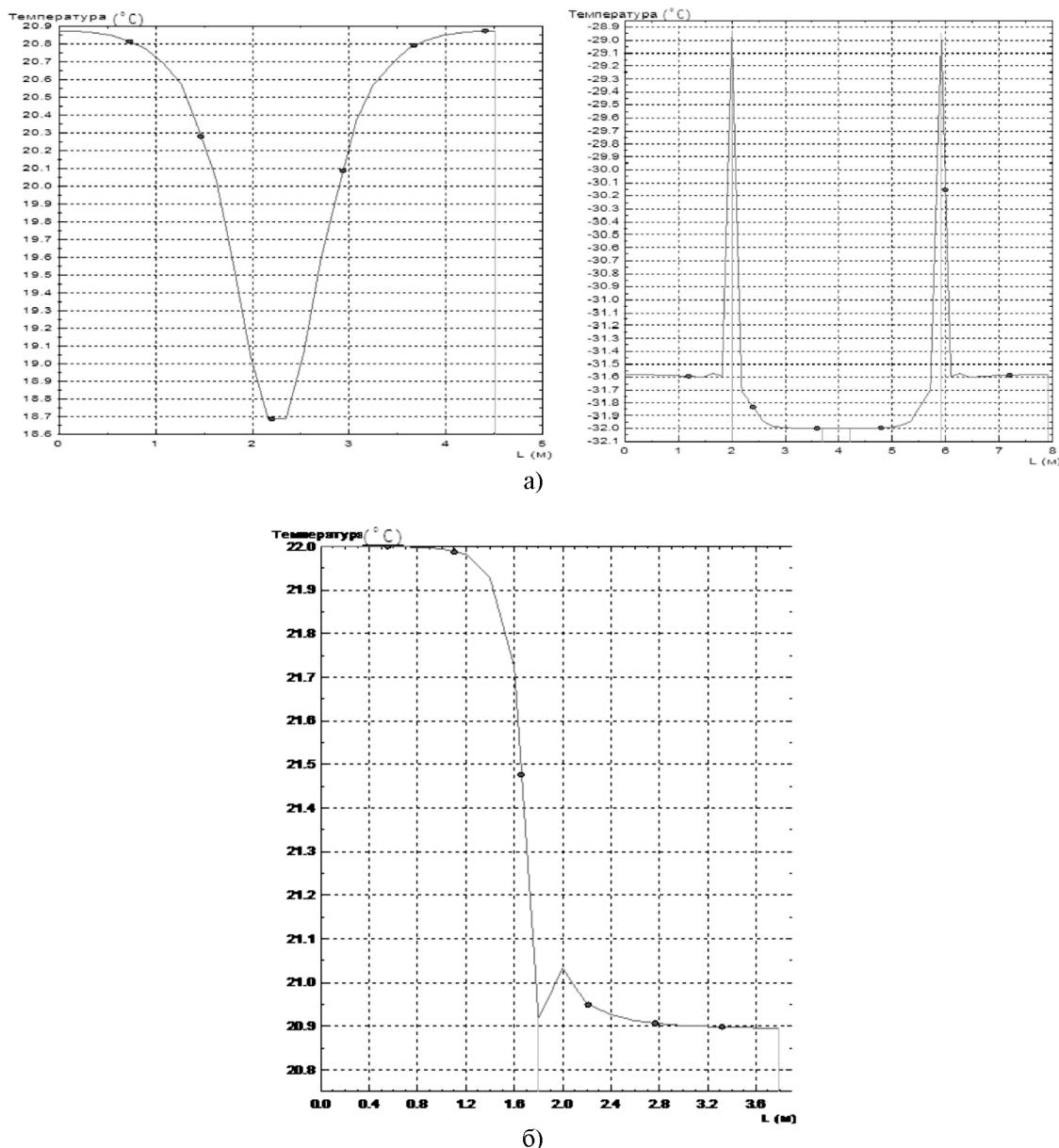
Рис. 2. а) пересечение внешней несущей стены с внутренней несущей стеной,
б) узел опоры плиты перекрытия на несущую стену,
в) пересечение плиты перекрытия и балконной плиты

Данные материалов, входящих в ограждающую конструкцию и в рассматриваемые узлы, сведены в таблицу.

Таблица
Теплотехнические характеристики материалов

№ п/п	Материал (слой)	Толщина, м	Плотность, кг/м ³	Расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
1	Кирпичная кладка из силикатного кирпича	0,51	1800	0,76
2	Облицовочный силикатный кирпич	0,12	1800	0,76
3	Теплоизоляционные плиты Rockwool	0,19	100	0,041
4	Плита железобетонная	0,22	2500	1,92

Графические зависимости распределения поля температур по контурам различных узлов показаны на рис. 3.



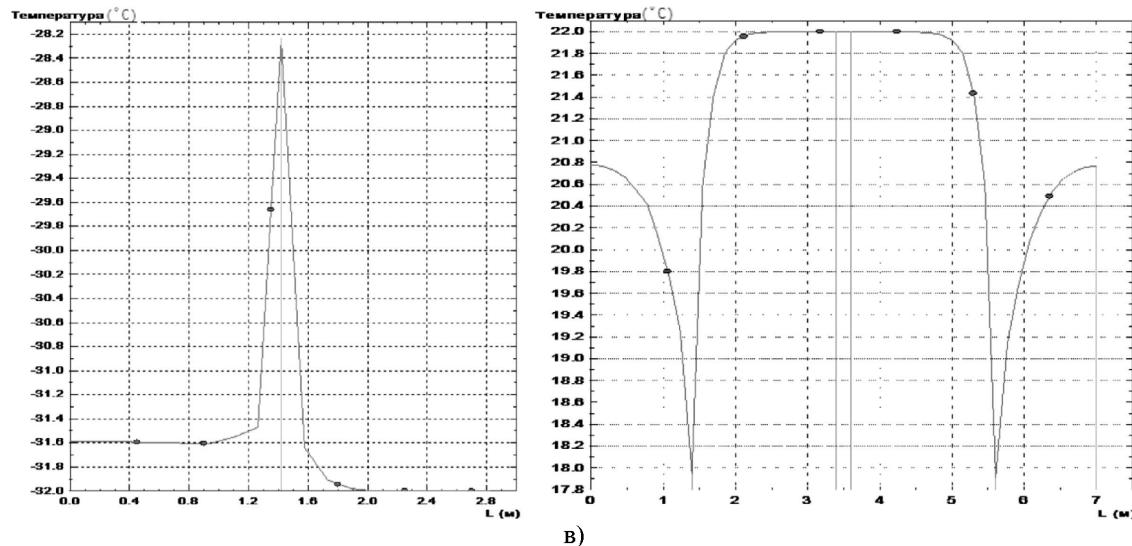


Рис. 3. а) график распределения температуры по контуру:
внутренняя и внешняя сторона стены соответственно узла 1;

б) график распределения температуры по контуру:
плита перекрытия + часть внутренней поверхности ограждающей конструкции узла 2;

в) график распределения температуры узла 3 по контуру:
внешняя сторона стены + балконная плита и внутренняя сторона стены + плита перекрытия

Из графика рис. За видно, что в зонестыка по контуру внутренней стороны стены температура 18,6 градуса и в зонестыка по контуру внешней стороны стены в углах наблюдается температура -29 градусов, в то время как внестыка, на внешней поверхности стены температура -31,6 градусов. Из графика рис. 3б видно, что температура по внутренней ограждающей конструкции от 22 до 20,98 градусов, а настыке плиты перекрытия и внутренней ОК составляет 20,9 градусов, что вполне допустимо для данной конструкции. Из графика рис. 3в видно, что в зонестыка по контуру внешней стороны стены и балконной плиты температура -28,3 градуса и в зонестыка по контуру внутренней стороны стены в углах наблюдается температура 18 градусов, в то время как по всей толщине плиты перекрытия сохраняется температура 22 градуса.

В узле 3 была добавлена минеральная вата «rockwool» между балконной и межэтажной плитой перекрытия (рис. 4).

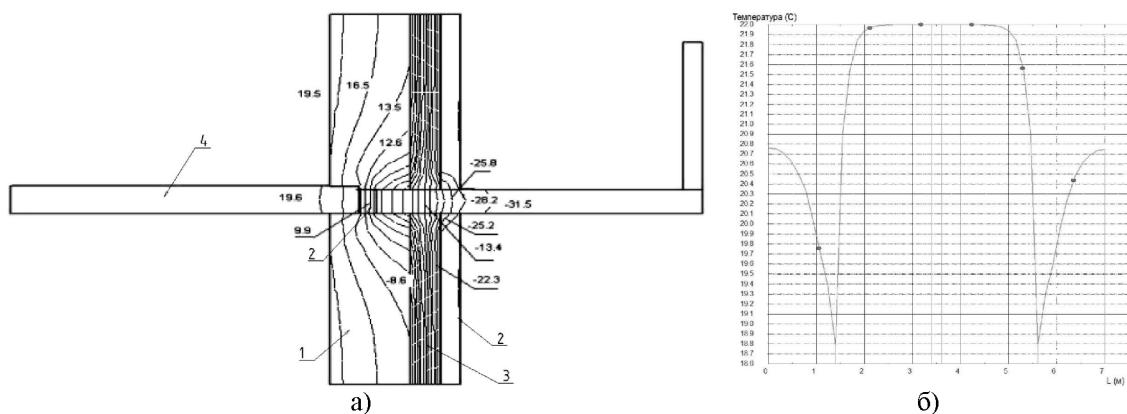


Рис. 4. а) температурное поле узла 3 после модернизации;

б) график распределения температуры по контуру: внутренняя сторона стены + плита перекрытия

Из графика видно, что после модернизации узла «Пересечение плиты перекрытия с внешней несущей стеной», в зонестыка по контуру внутренней стороны стены в углах значение температуры стало 18,8 градусов, вместо 18.

Общее условное сопротивление теплопередаче несущей МОК, состоящей из силикатного кирпича, слоя теплоизоляции и облицовочного силикатного кирпича найдено по формуле [5]:

$$R_o^{ycl} = \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h}, \quad (2)$$

где α_e , α_h – соответственно коэффициенты теплоотдачи от наружной и внутренней поверхностей ограждения; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя материала; δ_i – толщина i -го материала и составила $5,62 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bm}$. Потери количества теплоты через стеновую панель, облицованную кирпичом, по результатам вычислений температурного поля (Bm/m) составили: $Q=47,91$.

Потери количества теплоты через участок однородной стены той же площади определялись по формуле:

$$Q_{usl} = (t_b - t_h) / R_o^{ycl} \cdot l_{узл}, \quad (3)$$

и составили $28,82 \text{ Bm/m}$.

Дополнительные потери теплоты через линейный элемент составляют:

$$\Delta Q = \pm (Q - Q_{usl}), \quad (4)$$

и составили $19,08 \text{ Bm/m}$.

Удельные линейные потери теплоты через линейный элемент определяются по формуле:

$$\Psi = \Delta Q / (t_b - t_h), \quad (5)$$

и составили $0,35 \text{ Bm/m} \cdot \text{°C}$.

Приведенное сопротивление теплопередаче R_o^{np} было найдено по формуле:

$$R_o^{np} = \frac{1}{\sum U_i a_i + \sum \Psi_j l_j + \sum \chi_k n_k}, \quad (6)$$

где l_j , n_k – геометрические характеристики элементов, Ψ_j , χ_k – удельные потери теплоты через элементы, U_i – коэффициент теплопередачи однородной i -той части фрагмента теплозащитной оболочки здания (удельные потери теплоты через плоский элемент i -го вида, a_i – площадь плоского элемента конструкции i -го вида, приходящаяся на 1 m^2 фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции получилось равным $2,89 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/Bm}$, которое меньше требуемого согласно СНиП 23-02-2003, а после модернизации узла стал равным $3,08 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/Bm}$. Коэффициент теплотехнической однородности конструкции рассчитанный по формуле:

$$r = \frac{R_o^{np}}{R_o^{ycl}}, \quad (7)$$

$r = 3,08 / 5,62 = 0,54$.

В связи с тем, что наибольшую долю общего потока теплоты составляет поток теплоты через пересечение плиты перекрытия и балконной плиты, мы произвели модернизацию именно узла 3.

Ценность программы, написанной на языке Q-Basic по сравнению с программами Elcut и Fluent в её наглядности, поэтому достаточно элементарных знаний в области информатики, чтобы запрограммировать, продемонстрировать физико-математическое описание процессов переноса в МОК с целью теплотехнических расчетов для практического инженерного проектирования.

На языке Q-Basic реализуется решение поставленной практической задачи с разбиением программы на три части: на основную программу и две вспомогательные подпрограммы.

В основной программе предусмотрено: описание размерности массивов, присваивание фактических значений переменным, вычисление массивов и обращение к вспомогательным подпрограммам. Подпрограмма выполняет этапы решения задачи стационарного переноса.

Решение предлагаемой задачи теплопереноса, базирующийся на интегрально – интерполяционном методе (метод элементарных балансов), сущность которого состоит в том, что разностная схема строится на основе интегральных законов сохранения. В результате получается разностной аналог закона сохранения баланса энергии для всех

ячеек сетки. Алгоритм реализованный в программе Q-Basic представлен в виде укрупненной блок-схемы (рис. 5).

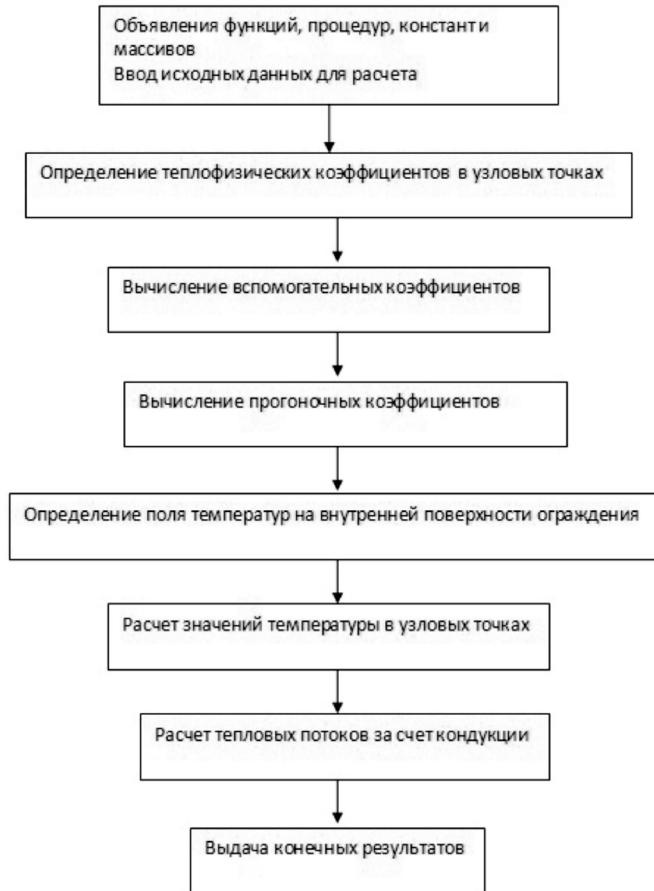


Рис. 5. Блок-схема расчета задачи интегрально-интерполяционным методом

Закономерности теплопередачи непосредственным образом связаны с распределением температур и особенностями температурного поля. При определенных теплофизических свойствах рассматриваемой конструкции или материальной среды в установившейся разности температур, вызывающей процесс теплопередачи, значение температуры в любой произвольной точке конструкции является функцией только координат пространства [7].

В строительной теплофизике пространственные температурные поля рассматриваются сравнительно редко, поскольку для практических целей в большинстве случаев достаточно изучить двумерное температурное поле, возникающее в одной из проекций, т.е. в плане или разрезе конструкции. В этом случае, при установившихся условиях теплопередачи, температура в каждой точке проекции конструкции является функцией двух координат: $t=(x,y)$. Во всех возможных случаях разработки приближенных инженерных методов расчета предпочтение отдается самым простым и основанным на рассмотрении закономерностей стационарного температурного поля. Иногда это приводит к некоторому повышению запасов теплофизической надежности рассчитываемых ограждающих конструкций, поскольку внешние воздействия, влияющие на распределение температур, приходится принимать наиболее благоприятными из числа закономерно возможных. В практике проектирования важно знать, будут ли отличаться в рассматриваемом конкретном случае условия теплообмена или других физических процессов от уже известных и изученных ранее для сходных условий теоретическими методами или условиями экспериментальных исследований [8].

Выводы

Проанализированы результаты расчетов процессов переноса в ограждающих конструкциях зданий при помощи программных продуктов Fluent, Elcut. Приводится описание реализации в программе на Q-Basic MM процессов переноса в МОК. Были предприняты меры по модернизации и улучшению теплозащитных характеристик узла «Пересечение плиты перекрытия с внешней несущей стеной». Сделано это было по причине того, что температура в этом месте была ниже температуры точки росы. Добавив между плитами перекрытия минеральную вату «rockwool», мы добились того, что уменьшилось количество тепла проходящего через узел. А значение приведенного сопротивления теплопередаче стало $R_o^{pp}=3,08\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Необходимо отметить, что конструктивные особенности данного узла, не позволяют при модернизации существенно увеличить значение сопротивления теплопередаче.

Применяя программу Q-Basic, выявлены следующие недостатки:

- 1) Невозможность использования на современных 64-х разрядных операционных системах, используемых в большинстве вычислительной технике нового поколения (планшеты, ноутбуки, ПК).
- 2) Неудобный ввод исходных данных: для ввода параметров, необходимо редактировать текст программы.
- 3) Итоговые вычисления выводятся только на экран в режиме просмотра.
- 4) Не предусмотрена возможность хранения исходных данных и вычисленных результатов для анализа и сравнения.

Но в то же время программа Q-Basic дает нам наглядность использования формул теплофизики в программировании. Рекомендуется в будущем перенести основную вычислительную часть программы, например, на встроенный в стандартный Microsoft Excel дополнительный язык программирования Visual Basic Application. В результате получим более удобное, лишенное вышеперечисленных недостатков, новое программное обеспечение. При этом появится возможность не только использования данного программного обеспечения на любой вычислительной технике, где функционирует стандартный Microsoft Office, но и добавятся такие возможности как создание презентаций, тиражируемость, модульность, а самое главное – появится возможность дальнейшего совершенствования методов расчета и их апробации к реальным объектам.

Список библиографических ссылок

1. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 2004. – 320 с.
2. Садыков Р.А. Теория процессов стационарного нелинейного переноса с учетом фильтрации воздуха, конденсации или испарения парообразной влаги // Известия КГАСУ, 2011, № 3. – С. 268-276.
3. ELCUT студенческий. URL: <http://elcut.ru/crack/index.htm>. (дата обращения: 21.01.2014).
4. FLUENT. URL: <http://www2.sccc.ru/PPP/Flun-Dscr.htm>. (дата обращения: 21.01.2014).
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
6. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Аз-book, 2009. – 469 с.
7. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 535 с.

Sadykov R. A. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: Sadykov_R_A@mail.ru

Khaliullina L.A. – student

E-mail: leisan_haliullin@mail.ru

Lomonosova Y.E. – student

E-mail: yanina.6str@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zeienaya st., 1

Numerical calculations of heat transfer processes in the individual nodes multilayer walling

Resume

In the article «Numerical calculations of heat transfer processes in the individual nodes multilayer walling» explores wall consisting of: masonry of silicate bricks, sand-lime brick cladding, insulation board «rockwool» and reinforced concrete slab. The study sites was derived problem area. It was the fact that the calculated temperatures were obtained below the dew point. Was upgraded to a given node. Solved the problem by adding an extra layer of insulation, then the calculated temperature returned to normal. The article carried the necessary thermal calculations walling, there are fields of temperature distribution, the quantity of heat flows by the grid method, the thickness of the investigated materials are selected. Calculation of multilayer enclosing structure was performed using the program Q-Basic. Under this program was made basic block diagram, which presents an algorithm for solving the problem. Solution of the problem of heat transfer is based on the integral – interpolation method, it is called – the method of elementary balances. Was also analyzed the results of calculations of transport processes in the building envelope using Fluent software and Elcut.

Keywords: mathematical model, thermal physics, thermal conductivity, a program, node, function, design and construction.

Reference list

1. Il'inskii V.M. Building thermal physics. – M.: Higher School, 2004. – 320 p.
2. Sadykov R.A. The theory of stationary nonlinear processes taking into account the transfer of air filtration, evaporation or condensation of moisture vapor // News of the KSUAE, 2011, № 3. – P. 268-276.
3. ELCUT student. URL: <http://elcut.ru/crack/index.htm> (reference date: 21.01.2014).
4. FLUENT. URL: <http://www2.sccc.ru/PPP/Flun-Dscr.htm>. (reference date: 21.01.2014).
5. Theological V.N. Building thermal physics. – M.: Higher School, 1982. – 415 p.
6. Nashchokin V.V. Engineering Thermodynamics and Heat Transfer. – M.: Az-book, 2009. – 469 p.
7. Marchuk G.I. Methods of Computational Mathematics. – M.: Nauka, 1980. – 535 p.