

ТЕХНИКА ИЛИМДЕРИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

Боронбаев Э.К., Касымова Г.Т., Абдылдаева А.М.

**ИМАРАТТАРДЫН БӨЛМӨЛӨРҮНҮН
ЖЫЛУУЛУК ЖАНА НЫМДУУЛУК РЕЖИМДЕРИНИН
МАТЕМАТИКАЛЫК МОДЕЛИ**

Боронбаев Э.К., Касымова Г.Т., Абдылдаева А.М.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО
РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ ЗДАНИЙ**

E.K. Boronbaev, G.T. Kasymova, A.M. Abdyldaeva

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL-HUMIDITY
MODE OF THE BUILDINGS PREMISES**

УДК: 699.86: 692.237

Макалa ички жана тышкы аба чөйрөсүнүн өзгөрүлмө таасириндеги имараттардын бөлмөлөрүн жылуулук-нымдуулук режиминин математикалык моделин иштеп чыгууга арналган. Сунушталган математикалык модель нымдуулук потенциал, жылуулук жана нымдуулук берилиш теорияларына негизделген. Бул модель сырткы тосмолордун жылуулук өткөрүмдүүлүк, ным өткөрүмдүүлүк теңдемелеринин негизделүүсүнө таянуу менен алардын чек ара шарттарына тиешелүү бөлмөнүн жылуулук жана ным теңдөө теңдемелерине байланыштырылган. Математикалык модель өзгөрүлмө ички жана тышкы таасириндеги бөлмөлөрдүн микроклиматынын жагымдуу, мүмкүндөлгөн жана оптималдуу параметрлерин камсыз кылууга ылайык ошол бөлмөлөрдүн жылуулук жана нымдуулук режимдеринин дурус шарттарын тандоого мүмкүнчүлүк берет. Математикалык моделди чечмелөө санариптик чектүү айырмалар усулу менен жүзөгө ашырылат. Математикалык моделдин негизиндеги компьютердик эсептөөнүн натыйжалары жылуулук жана ным бөлүнүүсү бир да-лай деңгээлдеги бөлмөдө ишке ашырылган температуранын жана нымдуулук потенциалынын өзгөрүлүү динамикасын анык турпатында изилдөө жыйынтыктары менен тап келерин көрсөтүштү.

Негизги сөздөр: температура, нымдуулуктун потенциалы, имараттын тосмолору, бөлмө, аба чөйрөсү, математикалык модель, жылуулук-нымдуулук режим, анык турпатын изилдөө, компьютердик эсептөөлөр.

Статья посвящена разработке математической модели тепловлажностного режима помещений зданий при переменных внутренних и внешних воздействиях воздушной среды. Предложенная математическая модель разработана на основе теории потенциала влажности и переноса теплоты и влаги. Эта модель основана на уравнениях теплопроводности и влагопроводности

в наружных ограждениях с граничными условиями, связанными с балансовыми уравнениями теплоты и влаги в помещении. Математическая модель позволяет осуществлять выбор целесообразных тепловлажностных режимов помещений зданий при переменных внутренних и внешних воздействиях с целью обеспечения приемлемых, допустимых и оптимальных параметров микроклимата в помещении. Решение математической модели проводится численными методами в конечных разностях. Результаты компьютерных расчетов, выполненных на основе разработанной математической модели, показали хорошую сходимость с результатами натурных исследований динамики изменения температуры и потенциала влажности в помещениях со значительными выделениями теплоты и влаги.

Ключевые слова: температура, потенциал влажности, ограждение, помещение, воздушная среда, математическая модель, тепловлажностный режим, натурные исследования, компьютерные расчеты.

This article devotes on development of a mathematical model of thermo-humidity regime of building's premises under variable internal and external air environment effects. The proposed mathematical model is developed on a base of the theory of moisture potential, heat and moisture transfer. This model is based on the equations of thermal conductivity and moisture conductivity in external enclosures with boundary conditions related to the balance equations of heat and moisture in premises. The mathematical model allows selecting appropriate thermo-humidity regimes of buildings premises under variable internal and external effects to ensure relevant, acceptable and optimal parameters of the indoor microclimate. The solution of the mathematical model is carried out by numerical methods in finite differences. The results of computer calculations, performed on the basis of the developed mathematical model, showed

good convergence with the results of field studies of the dynamics of changes of temperature and humidity potential in premises with intensive emissions of heat and moisture.

Key words: *temperature, humidity potential, enclosures, premises, air environment, mathematical model, thermo-humidity regime, site studies, computer calculations.*

Введение.

Тепловлажностный режим помещений зданий формируется под влиянием изменяющихся во времени внутренних и внешних тепловых и влажностных воздействий [1, 2]. Такой режим помещений зависит от характеристик их эксплуатации [3]. Они, в свою очередь, зависят, например, от особенностей технологических процессов производства, графиком пребывания людей в этих помещениях. Их суточная периодичность, дневные и ночные колебания погодных условий определяют динамику внутренних и внешних воздействий в виде потоков теплоты и влаги на термодинамическое состояние воздуха в помещении и его ограждений. К тому же, во влажных помещениях может происходить выпадение влаги воздуха на внутренних поверхностях ограждающих конструкций. Такие условия приводят не только к переувлажнению гигроскопичных материалов ограждений, но и к постепенному разрушению всей ограждающей конструкции. При длительных периодических тепловлажностных воздействиях в толще ограждающих конструкций зданий происходит накопление влаги, которое ухудшает их теплозащитные свойства. В связи с вышеизложенным, поставлена задача теоретического, вычислительного и натурного исследований тепловлажностного режима помещений, нацеленных на определение целесообразных режимов работы систем обеспечения микроклимата.

Выбор целесообразных тепловлажностных режимов помещений зданий при переменных внутренних и внешних воздействиях с целью обеспечения приемлемых, допустимых и оптимальных параметров микроклимата в помещении и повышения долговечности ограждающих конструкций здания является актуальной задачей [4, 5]. Решение такой задачи предполагает, в частности, создание математической модели, описывающей вышеуказанные процессы.

Предложенная математическая модель основана на уравнениях теплопроводности и влагопроводности в ограждающих конструкциях при граничных условиях, связанных с балансовыми уравнениями теплоты и влаги в помещении. При этом задача рассматривается с пози-

ции теории и параметра потенциала влажности [6, 7].

Математическая модель разработана на базе следующих допущений:

- потоки теплоты и влаги через ограждение считаются одномерными;

- температура и потенциал влажности воздуха в плане и по высоте помещения принимаются без градиентов, поскольку описание процессов основаны на уравнениях баланса теплоты и влаги воздуха.

Помещение принято с j – количествами ограждений, n – окон и r – массивных ограждений, часть которых соприкасается с наружной средой, а другая часть отделена от соседних помещений с аналогичными режимами.

Процесс передачи теплоты через ограждения, описывается системой одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$c_j \cdot p_j \frac{\partial t_j}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_j(x) \cdot \frac{\partial t_j}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

где: j – количество ограждений, шт.,

x – толщина ограждающей конструкции, м,

z – временная координата;

с граничными условиями для каждой составляющей с наружной стороны:

$$-\lambda_j^n \frac{\partial t_j}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_j^n (t_j - t_n) + p_j \cdot \beta_j \cdot q_j; \quad (2)$$

с внутренней стороны:

$$-\lambda_j^g \frac{\partial t_j}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_{kj} (t_j - t_g) + \sum \alpha_{nj \neq i} (t_j - t_i) - \frac{\beta_{1j} \cdot \beta_{2j} \cdot F_0 \cdot q_j}{F_0} - (1 - \rho_k) \frac{Q_{mx}}{F_0}; \quad (3)$$

и с начальными условиями:

$$t_{jo}(0, x) = \varphi_{jo}(x); \quad (4)$$

Процесс передачи влаги описывается, как и в теории теплопроводности, системой дифференциальных уравнений влагопроводности на основе потенциала влажности Θ , °В с граничными и начальными условиями:

$$\eta_j(\theta, t) \cdot \rho_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha(\theta, t) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right]; \quad (5)$$

граничные условия для каждой составляющей с наружной стороны:

$$-\alpha_j^n \cdot (\theta, t) \frac{\partial \theta_j}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta_{nj} (\theta_j - \theta_n); \quad (6)$$

с внутренней стороны:

$$-\alpha_j^e \cdot (\theta, t) \frac{\partial \theta_j}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \beta_{ej} (\theta_j - \theta_e); \quad (7)$$

начальные условия:

$$\theta_{jo}(0, x) = F_{jo}(x), \quad (8)$$

где коэффициенты и обозначения, входящие в формулы (1-8):

$c_j, \rho_j, \lambda_j(x)$ - теплофизические характеристики материальных слоев ограждающих конструкций, соответственно: удельная теплоемкость в кДж/(кг·°C), плотность в кг/м³ и коэффициент теплопроводности в Вт/(м·°C);

$t_j(x)$ - температура конструкции, изменяющаяся по толщине в расчетный период времени, °C;

j_n - номер рассматриваемого ограждения;

λ_j^n - коэффициент теплопроводности наружного слоя j -го ограждения, Вт/(м·°C);

λ_j^e - коэффициент теплопроводности внутреннего слоя j -го ограждения, Вт/(м·°C);

α_{nj} - коэффициент теплообмена на наружной поверхности j -го ограждения, Вт/(м²·°C);

t_n - температура наружной среды, изменяющаяся во времени, °C;

β_j - коэффициент затенения j -го ограждения наружным солнцезащитным устройством;

ρ_j - коэффициент поглощения солнечной радиации наружной поверхностью j -го ограждения;

q_j - изменяющаяся во времени интенсивность суммарной солнечной радиации, облучающей наружную поверхность j -го ограждения, Вт/м²;

α_{kj} - коэффициент конвективного теплообмена на внутренней поверхности j -го ограждения, Вт/(м²·°C);

α_{ij-i} - коэффициент лучистого теплообмена между внутренними поверхностями j -го ограждения и любого другого i -го, с учетом угловой облученности j -го ограждения с i -тым и приведенного облучения, Вт/(м²·°C);

β_{1j} - коэффициент проникания солнечной радиации, через окно, учитывающий его конструкцию;

β_{2j} - коэффициент затенения окна солнцезащитным устройством;

F_o - площадь оконного проема, м²;

Дифференциальные уравнения баланса теплоты и влаги воздушной среды:

$$\rho_k \cdot Q_{c.o} + \rho_k \cdot Q_M + G_e \cdot C_e (t_{np} - t_e) + \sum \alpha_k \cdot F_j (t_j - t_e) = V_n \cdot \rho_e \cdot C_e \frac{\partial t_e}{\partial z}; \quad (9)$$

$$W_{mx} + G_e \cdot \eta_e(\theta, t) \cdot (\theta_e - \theta_{np}) + \sum \beta_j \cdot F_j (\theta_e - \theta_j) = V_n \cdot \rho_e \cdot \eta(\theta, t) \frac{\partial \theta}{\partial z}; \quad (10)$$

где: $Q_{c.o}$ - тепловой поток от систем обеспечения микроклимата, Вт;

Q_{mx} - конвективные и лучистые потоки теплоты от технологического оборудования, изменяющиеся во времени;

G_e - расход вентиляционного воздуха, кг/ч;

c_e - удельная теплоемкость воздушной среды, кДж/(кг·°C);

ρ_e - плотность воздушной среды, кг/м³;

F_j - площадь j -го ограждения, м²;

V_n - объем помещения, м³;

θ_{np} - потенциал влажности приточного воздуха, °B;

θ_j - потенциал влажности j -той поверхности конструкции, °B;

η_e - коэффициент влагоемкости воздушной среды, зависящий от температуры и потенциала влажности, кг/(кг·°B).

Для решения системы уравнений (1-10) применена конечно-разностная аппроксимация производных во времени и по толщине с последующим решением методом прогонки. Общий вид аппроксимационных формул для решения уравнений (1-8) описывается следующей системой уравнений:

$$A_n \cdot Y_{n-1} - C_n \cdot Y_n + B_n \cdot Y_{n+1} = -F_n; \quad (11)$$

$$Y_0 = X_1 \cdot Y_1 + \mu_1; \quad (12)$$

$$Y_{Nj} = X_2 \cdot Y_{n-1j} + \mu_2 + \sum_{i \neq j}^j a_{ij} \cdot Y_{Ni}; \quad (13)$$

Коэффициенты, входящие в формулы (11-13) для тепловой и влажностной задачи, имеют следующие зависимости:

для уравнения теплопроводности:

$$A_n = \left(\frac{\lambda_j}{c_j \cdot \rho_j} \right) / h^2 ;$$

$$B_n = \left(\frac{\lambda_j}{c_j \cdot \rho_j} \right) / h^2 ;$$

$$C_n = A_n + B_n + \frac{1}{\Delta z} ;$$

$$F_n = \frac{1}{\Delta z} \cdot Y_n^m ;$$

$$X_1 = \frac{\lambda_{1j}^n}{\lambda_{1j}^n - \alpha_{ju} \cdot h} ;$$

$$\mu_1 = \frac{(\alpha_j^n \cdot t_n + \beta_{1j} \cdot \beta_{2j} \cdot q_{1j}) \cdot h}{\lambda_{1j}^n - \alpha_{ju} \cdot h} ;$$

$$X_2 = \frac{\alpha_j^n}{\frac{\lambda_{Nj}}{h} + \sum \alpha_{nj-i} + \alpha_{kj}} ;$$

$$a_{ij} = \frac{\alpha_{li-j}}{\frac{\lambda_j^n}{h} + \sum \alpha_{li-j} + \alpha_{kj}} ;$$

$$\mu_2 = \frac{\alpha_{kj} \cdot t_e + \sum (\beta_{1j} \cdot \beta_{2j} \cdot F_{ok} \cdot q_{ij}) + \frac{q_{mx}}{F_o}}{\frac{\lambda_{Nj}}{h} + \sum \alpha_{nj-i} + \alpha_{kj}} ;$$

для уравнения влагопроводности (5-8):

$$A_{\theta n} = (\alpha_j^n(\theta) / (\eta_j(\theta, t) \cdot \rho_j)) / h^2 ;$$

$$B_{\theta n} = (\alpha_j^e(\theta) / (\eta_j(\theta, t) \cdot \rho_j)) / h^2 ;$$

$$C_{\theta n} = A_{\theta n} + B_{\theta n} + \frac{1}{\Delta z} ;$$

$$F_{\theta n} = \frac{1}{\Delta z} \cdot Y_{\theta n}^m ;$$

$$X_{1\theta} = (\alpha_{1j}^n(\theta)) / (\alpha_{1j}^n(\theta) - \beta_{1u} \cdot h) ;$$

$$\mu_{1\theta} = (h \cdot \beta_j^n \cdot \theta_n) / (\alpha_{1j}^n(\theta) - \beta_{ju} \cdot h) ; \quad (15)$$

$$X_{2\theta} = (\alpha_{Nj}(\theta)) / (\alpha_{Nj}(\theta) + \beta_{\theta j} \cdot h) ;$$

$$\mu_{2\theta} = (\beta_j^e \cdot \theta_e + \frac{W_{mx}}{F_o}) \cdot h / (\alpha_{Nj}(\theta) + \beta_{\theta j} \cdot h) ;$$

Уравнения баланса теплоты и влаги воздуха являются обыкновенными дифференциальными уравнениями с известным аналитическим решением. Решение уравнения баланса теплоты воздуха (9) имеет следующий вид:

$$t_{\theta z} = t_{\theta, z-1} \cdot e^{a\Delta z} + \frac{1}{a} (-1 - e^{a\Delta z}) \cdot \left(\frac{\sum \alpha_{kj} \cdot t_j \cdot F_j + q_k + q_c}{c_e \cdot \rho_e \cdot V} + \frac{L}{V} t_{np} \right) \quad (16)$$

Уравнение баланса влаги воздуха, подобно уравнению (9) описывается следующей формулой:

$$\theta_{\theta z} = \theta_{\theta, z-1} \cdot e^{a_{\theta}\Delta z} + \frac{1}{a_{\theta}} (-1 - e^{a_{\theta}\Delta z}) \cdot \left(\frac{W_{mx}}{V_n \cdot \eta(\theta, t) \cdot \rho_e} + \frac{L_{\theta}}{V_n} \cdot \theta_{np} \right) + (-1 - e^{a_{\theta}\Delta z}) \frac{\sum \beta_{\theta j} \cdot F_j \cdot \theta_j}{a_{\theta} \cdot V_n \cdot \eta(\theta, t) \cdot \rho_e} \quad (17)$$

Система уравнений порядка N-1 в виде трехдиагональной матрицы решается с помощью метода прогонки. Идея метода прогонки заключается в сведении разностного уравнения 2-го порядка баланса теплоты и влаги воздуха к системе линейных алгебраических уравнений (при наличии трех диагоналей) для вычисления последовательности коэффициентов прогонки, которые позволяют на обратном ходу вычислять температуру и потенциал влажности в узлах сетки.

Коэффициенты трехдиагональной матрицы при такой постановке задачи имеют следующие зависимости:

для теплового режима помещений и конструкций:

$$S'_{oj} = \frac{S_0}{1 - X_2 \cdot \alpha_{Nj}} ;$$

$$Z_j = \frac{X_2 \cdot \beta_{Nj}}{1 - X_2 \cdot \alpha_{Nj}} + \frac{\gamma}{1 - X_2 \cdot \alpha_{Nj}} ;$$

$$K_{j-i} = \frac{\sum a_{j-i}}{1 - X_2 \cdot \alpha_{Nj}} ;$$

$$\alpha_j = \left(e^{a_o \cdot \Delta z} - 1 \right) \frac{\alpha_{kj} \cdot F_j}{a_o \cdot c_\epsilon \cdot \rho_\epsilon \cdot V_n};$$

$$\omega = t_{ez-1} \cdot e^{a_o \Delta z} + \frac{1}{a_o} \left(e^{a_o \Delta z} - 1 \right) \cdot \left(\frac{q_{mx}}{c_\epsilon \cdot \rho_\epsilon \cdot V_n} + \frac{L}{V_n} t_{np} \right);$$
(18)

для влажностного режима помещения и конструкций:

$$\left. \begin{aligned} S'_{\theta j} &= \frac{S_\theta}{1 - X_{2\theta} \cdot \alpha_{\theta Nj}}; \\ Z_{\theta j} &= \frac{X_{2\theta} \cdot \beta_{\theta Nj}}{1 - X_{2\theta} \cdot \alpha_{\theta Nj}} + \frac{\gamma}{1 - X_{2\theta} \cdot \alpha_{\theta Nj}}; \\ \alpha_{\theta j} &= \left(e^{a_\theta \cdot \Delta z} - 1 \right) \frac{\beta_n \cdot F_j}{a_\theta \cdot \eta_\epsilon(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon \cdot V_n}; \\ \omega_\theta &= \theta_{ez-1} \cdot \left(e^{a_\theta \Delta z} \right) + \frac{1}{a_\theta} \left(e^{a_\theta \Delta z} - 1 \right) \cdot \left(\frac{W_{mx}}{\eta_\epsilon(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon \cdot V_n} + \frac{L}{V_n} \cdot \theta_{np} \right) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Решение задачи тепловлажностного режима помещения при заданных значениях температуры и потенциала влажности воздушной среды осуществляется следующим образом. Учитывая, что в принятых условиях $t_\epsilon = const$, $\theta = const$, производные по времени данных функций равны нулю, т.е. $\frac{dt_\epsilon}{dt} = 0$ и $\frac{d\theta_\epsilon}{dt} = 0$, уравнения

теплового и влажностного баланса принимают вид:

$$\begin{aligned} & - \sum \alpha_{kj} \cdot Y_{Nj} \cdot F_j + Q_k + L \cdot c_\epsilon \cdot \rho_\epsilon (t_\epsilon - t_{np}) + \\ & + \sum \alpha_{kj} \cdot F_j \cdot t_\epsilon = Q_c \quad (20) \\ & - \sum \beta_{\theta kj} \cdot \theta_{Nj} \cdot F_j + W_{mx} + L \cdot \eta_\epsilon(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon (\theta_\epsilon - \theta_{np}) + \\ & + \sum \beta_{\theta kj} \cdot F_j \cdot \theta_\epsilon = 0 \quad (21) \end{aligned}$$

Из уравнения (20) при заданном воздухообмене L или предварительно приняв его равным $L=0$, определяется нагрузка на систему обеспечения микроклимата Q_c :

$$Q_c = Q_k + L \cdot c_\epsilon \cdot \rho_\epsilon \cdot (t_\epsilon - t_{np}) + \sum \alpha_{kj} \cdot F_j \cdot t_\epsilon - \sum \alpha_{kj} \cdot F_j \cdot Y_{Nj} \quad (22)$$

Решая уравнение (21) относительно L_{pac} , получим:

$$L_{pac} = \frac{\sum \beta_{\theta kj} \cdot F_j \cdot \theta_\epsilon}{\eta(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon (\theta_\epsilon - \theta_{np})} + \frac{W_{mx}}{\eta(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon (\theta_\epsilon - \theta_{np})} - \frac{\sum \beta_{\theta kj} \cdot F_j \cdot \theta_{Nj}}{\eta(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon (\theta_\epsilon - \theta_{np})}; \quad (23)$$

Коэффициенты, входящие в трехдиагональную матрицу при такой постановке задачи имеют следующие значения:

для теплового режима помещения и ограждений:

$$S'_{oj} = \frac{S_o}{1 - X_2 \cdot \alpha_{Nj}};$$

где $S_o = \frac{ks}{F_o \left(\frac{\lambda_j}{h_j} + \alpha_{kj} + \sum \alpha_{nj-i} \right)}$; (24)

$$d_j = -\alpha_{kj} \cdot F_j;$$

$$\omega = L \cdot c_\epsilon \cdot \rho_\epsilon \cdot (t_\epsilon - t_{np}) + \sum \alpha_{kj} \cdot F_j \cdot t_\epsilon - Q_k;$$

для влажностного режима помещения и ограждений:

$$d_{\theta j} = - \frac{\beta_{\theta kj} \cdot F_j}{\eta(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon \cdot (\theta_\epsilon - \theta_{np})}; \quad (25)$$

$$\omega_{\theta j} = \frac{\sum \beta_{\theta kj} \cdot F_j \cdot \theta_\epsilon}{\eta(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon \cdot (\theta_\epsilon - \theta_{np})} + \frac{W_{mx}}{\eta(\theta, t) \cdot \rho_\epsilon (\theta_\epsilon - \theta_{np})};$$

Для решения задачи тепловлажностного режима помещения при переходном режиме работы системы обеспечения микроклимата определяется ее нагрузка и требуемый воздухообмен для нагрева (охлаждения) помещения до заданного уровня температуры и потенциала влажности после отключения этой системы [10, 11]. В этом случае система за заранее установленное время нагрева τ_n должна поднять температуру воздуха от значения t_o (до которой помещение остыло при отключении системы) до заданной температуры t_ϵ (которую система должна поддерживать в дальнейшем неизменной). Рассчитывается необходимый воздухообмен, при котором поддерживается потенциал влажности внутреннего воздуха на заданном уровне. В результате расчета рассматривается изменение температуры и потенциала влажности на внутренних поверхностях ограждающих конструкций с целью выявления наличия конденсата, а также

поддержание температуры и потенциала влажности воздуха в допустимых пределах.

При решении задачи тепловлажностного режима помещения в такой постановке возникают зависимости, которые являются линейными для процесса нагревания от t_o до t_6 , а для случая изменения потенциала влажности – от θ_o до θ_6 . Изменение температуры и потенциала влажности описываются следующими формулами:

$$t_{6z} = \frac{t_6 - t_o}{z_n} \cdot z + t_o; \quad (26)$$

$$\theta_{6z} = \frac{\theta_6 - \theta_o}{z_n} \cdot z + \theta_o; \quad (27)$$

где z – текущее время переходного режима.

Уравнение теплового баланса воздушной среды при таких условиях принимает вид:

$$\frac{t_6 - t_o}{z_n} \left(1 + \frac{z}{T}\right) = \frac{\sum \alpha_{kj} \cdot F_j \cdot t_j}{c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_n} + \frac{Q_k + Q_c}{c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_n} + \frac{L}{V_n} \cdot t_{np} \quad (28)$$

откуда:

$$Q_c = \sum -\alpha_{kj} \cdot F_j \cdot t_j + c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_n \left(1 + \frac{z}{T}\right) \cdot \frac{t_6 - t_o}{z_n} - Q_k - L \cdot c_6 \cdot \rho_6 \cdot t_{np} \quad (29)$$

$$\text{где: } T = \frac{c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_n}{\sum \alpha_{kj} \cdot F_j + L \cdot c_6 \cdot \rho_6}.$$

Уравнение баланса влаги воздушной среды при подстановке значения θ_{6z} принимает вид:

$$L \left(\frac{(\theta_6 - \theta_o)}{V_n \cdot z_n} - \frac{\theta_{np}}{V_n} \right) = \frac{(\theta_6 - \theta_o)}{z_n} (-z \cdot T_o + 1) - \frac{W_{mx}}{\eta_6(\theta, t) \cdot \rho_6 \cdot V_n} + \frac{\sum \beta_{\theta kj} \cdot \theta_j \cdot F_j}{\eta_6(\theta, t) \cdot \rho_6 \cdot V_n}; \quad (30)$$

откуда:

$$L_{рас} = \frac{(\theta_6 - \theta_o) \cdot (1 - z \cdot T_o)}{z_n \cdot A'} + \frac{W_{mx}}{A' \cdot A_o} + \frac{\sum \beta_{\theta kj} \cdot F_j \cdot \theta_j}{A' \cdot A_o}; \quad (31)$$

$$\text{где: } A' = \frac{(\theta_6 - \theta_o) \cdot z}{V_n \cdot z_n} - \frac{\theta_{np}}{V_n};$$

$$T_o = \frac{\sum \alpha_{kj} \cdot F_j}{V_n \cdot \rho_6 \cdot \eta(\theta, t)}; \quad A_o = \eta_6(\theta, t) \cdot V_n \cdot \rho_6.$$

В данном варианте коэффициенты, входящие в трехдиагональные матрицы имеют следующие зависимости:

Для теплового режима помещения и ограждающих конструкций:

S'_{oj} равен выражению из (24); d_j равен выражению из (24)

$$\omega_{\theta j} = c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_n \left(1 + \frac{z}{T}\right) \cdot \frac{t_6 - t_o}{z_n} - Q_k - L \cdot c_6 \cdot \rho_6 \cdot t_{np} \quad (32)$$

Для влажностного режима помещения и ограждающих конструкций:

S'_{oj} равен выражению из случая при известных поступлениях влаги в помещение, коэффициент $z'_{\theta j}$ подобен коэффициенту для первого случая тепловлажностного режима помещения. Коэффициент $d_{\theta j}$ при решении задачи тепловлажностного режима помещения в такой постановке подобен коэффициенту $d_{\theta j}$ из системы (25), а коэффициент $\omega_{\theta j}$, входящий в трехмерную матрицу влажностной задачи описывается как:

$$\omega_{\theta j} = \frac{\left(\frac{\theta_6 - \theta_o}{z_n}\right) \cdot (1 - z \cdot T_o)}{A'} - \frac{W_{mx}}{A' \cdot A_o}; \quad (33)$$

Авторами разработана компьютерная программа для выбора целесообразных тепловлажностных режимов здания при переменных внутренних и внешних воздействиях воздушной среды.

Программа предназначена для: а) выбора тепловой нагрузки на систему обеспечения микроклимата и воздухообмена; б) расчета нестационарного тепловлажностного режима помещений; в) изучения динамики изменения температуры и влажности в помещениях.

Для оценки достоверности результатов расчета по математической модели тепловлажностного режима проведены натурные исследования изменения параметров воздушной среды при периодических внешних и внутренних воздействиях на тепловлажностный режим ограждающих конструкций [12, 13].

Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных натурными исследованиями, и расчетов, осуществленных на основе разработанной математической модели, показал допустимую их сходимость. Расхождение между данными натурных исследований и результатов

расчетов по предлагаемой математической модели тепловлажностного режима помещения составило около $\pm 15\%$. Оно вызвано принятыми допущениями рассматриваемого сложного пространственного и нестационарного процесса. Соответственно, такие расчеты пригодны для выбора целесообразных тепловлажностных режимов помещения здания при переменных внутренних и внешних воздействиях [13].

Выводы:

1. Математическая модель, описывающая тепловлажностный режим помещений на основе теории потенциала влажности, с достаточной точностью обоснована теоретически и подтверждена натурными исследованиями.

2. Разработанная математическая модель позволяет осуществить выбор целесообразных тепловлажностных режимов помещения при переменных внешних и внутренних воздействиях теплоты и влаги воздушной среды.

3. Сравнительный анализ результатов расчета по математической модели с результатами натуральных экспериментальных исследований помещения показал допустимую их сходимость.

Литература:

1. Строительные нормы и правила Кыргызской Республики 23-01:2013. Строительная теплотехника (Тепловая защита зданий) [Текст]: утв. Госстроем КР: взамен СНиП КР 23-01:2009: дат введения 01.07. 2013. - Бишкек, 2013. - 58 с.
2. Богословский В.Н. К определению потенциала влажности наружного климата [Текст] / В.Н. Богословский, Б.В. Абрамов. // Сб. трудов МИСИ, 1980. - Вып. 176. - С. 33-41.
3. Богословский В.Н. Оптимизация систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплогазоснабжения.[Текст] / Богословский В.Н., Жирнов Н.И., Ионин А.А. - Москва, 1980. - С. 203.
4. Богословский В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий [Текст] / Под редакцией В.Г. Гагарина. - Москва: 2013. - С.112.
5. Богословский В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий: монография. / [Текст] / В.Н. Богословский под ред. В.Г. Гагарина; М-во образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет; МГСУ, 2013. - 112 с.
6. Боронбаев Э.К. Натурные исследования суточного изменения температуры на внешней и внутренней поверхностях наружных стен здания [Текст] / Э.К. Боронбаев // Промышленное и гражданское строительство. - 2011. - №2. - С. 57-58.
7. Боронбаев Э.К. Концепция оптимизации «ножниц» потерь и поступлений теплоты здания [Текст] / Э.К. Боронбаев // Объединенный научный журнал. - М.: Тезарус, 2002. - №31 (54). - С. 64-67.
8. Касымова Г.Т. Исследования теплозащитных качеств ограждающих конструкций и стыковых соединений панельных и кирпичных жилых домов [Текст] /Абдылдаева А.М // Вестник КГУСТА. - 2018. - №4 (62). - С. 145-153.
9. Касымова Г.Т. Сравнение результатов натурных исследований с математической моделью тепловлажностного режима помещения при нестационарных внутренних и внешних воздействиях [Текст] / Абдылдаева А.М. / Вестник КГУСТА. - 2018. - №4(62). - С. 154-164.
10. Боронбаев Э.К. Энергосберегающая архитектура: энергоэффективные формы и ориентации жилого здания и его ограждений [Текст] / Э.К. Боронбаев, Ю.В. Поляков, Ж.Б. Бокоева, А.С. Санатбекова / Вестник КГУСТА. - 2018. - №4(62). - С. 118-124.
11. Боронбаев Э.К. Стратегия реконструкции здания относительно его идеальной энергоэффективности [Текст] / Э.К. Боронбаев. / Республиканский научно-теоретический журнал «Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, №2. - Бишкек, 2001. - №2. - С. 57-61.
12. Боронбаев Э.К. Энергосберегающая реконструкция зданий и особенности дополнительной теплоизоляции стен [Текст] / Э.К. Боронбаев. / Республиканский научно-теоретический журнал «Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана», №2. - Бишкек, 2001. - С. 136-139.
13. Боронбаев Э.К. Энергосберегающая архитектура индивидуального жилого дома в районах с жарким климатом [Текст] / Э.К. Боронбаев, Ю.В. Поляков, А.С. Санатбекова, Ж.Б. Бокоева./ Вестник КГУСТА. 2018. - №4 (62). - С. 124-130.

Рецензент: к.т.н. Каримов Т.Х.