

$$\begin{aligned}
& +k_w G_w A_w \psi_2^2 + E_w J_{xw} \left( \frac{\partial \psi_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{w}{R^2} \right)^2 + \\
& + G_w J_{\text{кр} w} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{h_w}{R} \left( -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \right) \right]^2 + \\
& + \sigma_y A_w \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{w}{R^2} \right) w \Big|_{x=x_j} dy.
\end{aligned}$$

Определение критических напряжений на основе энергетического метода связано с выбором аппроксимирующих выражений для функций перемещений, описывающих деформированное состояние ребристого цилиндрического оболочечного покрытия при потере устойчивости и удовлетворяющих граничным условиям. Будем считать, что в точках опирания покрытия обеспечены условия шарнирного опирания и что до потери устойчивости оболочка сохраняет свою первоначальную (цилиндрическую) форму.

Расположив начало координат в торце покрытия (рис. 1), применим выражения для аппроксимирующих функций перемещений в виде:

$$\begin{aligned}
u &= a_{mn} \cos \frac{m \pi x}{L} \sin \frac{n y}{R}; \\
v &= b_{mn} \sin \frac{m \pi x}{L} \sin \frac{n y}{R}; \\
w &= c_{mn} \sin \frac{m \pi x}{L} \sin \frac{n y}{R}; \\
\psi_1 &= d_{mn} \cos \frac{m \pi x}{L} \sin \frac{n y}{R}; \\
\psi_2 &= e_{mn} \sin \frac{m \pi x}{L} \cos \frac{n y}{R},
\end{aligned} \quad (22)$$

где  $m, n$  – число полуволн вдоль образующей (вдоль оси  $X$ ) и окружности обшивки (вдоль криволинейной оси  $y$ );  $a_{mn}, b_{mn}, c_{mn}, d_{mn}, e_{mn}$  – неизвестные константы.

Подставляя аппроксимирующие функции перемещений (22) в выражения полной потенциальной энергии (21) и применяя к ней условие минимума энергии [4], можно получить систему разрешающих уравнений для определения критических нагрузок.

**Заключение.** В статье представлена постановка задачи расчета на устойчивость тонких подкрепленных цилиндрических покрытий при внешнем давлении, приведены соотношения упругости, получены геометрические соотношения, выражения усилий, полной потенциальной энергии ребристого покрытия в перемещениях. Приняты аппроксимирующие функции для перемещений, с использованием которых планируется решение задачи.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амбарцумян, С.А. Общая теория анизотропных оболочек. – М.: Наука, 1974. – 446 с.
2. Методы расчета оболочек: в 5 т. – Т. 2: Теория ребристых оболочек / И.Я. Амиро, В.А. Заруцкий – К.: Наукова думка, 1980. – 368 с.
3. Власов, В.З. Общая теория оболочек и её приложения в технике. – М.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
4. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
5. Вольмир, А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
6. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 432 с.
7. Тимошенко, С. П. Устойчивость упругих систем. – М.-Л.: Гостехиздат, 1946. – 532 с.

Материал поступил в редакцию 17.02.09

#### IGNATOV A.YU, IGNATIUK V.I. Some considerations in the stability analysis of thin cylindrical ribbed shells subjected to external pressure

The paper presents the general setting of the problem, elasticity ratios, as well as geometric ratios, stress expressions, total potential energy of a ribbed shell in displacements and approximating functions for displacements which have been respectively obtained and determined.

УДК 697.1, 691.86

Протасевич А.М., Крутилин А.Б.

### РАСЧЕТ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НАРУЖНЫХ СТЕН ЗДАНИЙ С ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ И ЗАЩИТНЫМИ ЭКРАНАМИ

**Введение.** Для повышения теплозащитных качеств наружных стен эксплуатируемых и вновь строящихся зданий в Республике Беларусь широко используется их наружная теплоизоляция. Теплоизоляция выполняется с использованием как “мокрых”, так и “сухих” технологий.

Преобладающей технологией ведения работ на настоящий момент являются “мокрые” способы теплоизоляции с легкими штукатурными системами, как наиболее дешевые. Основным недостатком указанных систем — недолговечность наружного укрывного штукатурного слоя [1 – 3].

Более долговечна в эксплуатации теплоизоляция стен зданий, выполненная по “сухой” технологии и в частности с вентилируемыми воздушными прослойками – “вентилируемый фасад”. Особенность данных способов утепления состоит в укрытии слоя теплоизоляции облицовочными экранами, защищающими ее от внешних атмосферных воздействий. Панели экрана размещаются на некотором расстоянии от теплоизоляции и образуют вентилируемую воздушную прослойку (далее ВВП). Экран монтируется на металлических кронштейнах подоблицовочной конструкции, закрепленных на стене. Изготавливаются экраны часто из металлического профилированного сайдинга.

Исследованиям теплотехнических особенностей ВВП и их влиянию на тепловлажностный режим наружных стен посвящено ряд работ [4 – 8]. В указанных работах решались частные вопросы, связанные с нормализацией тепловлажностного режима ограждающих конструкций, защиты их от перегрева и т.д. В то же время остались невыясненными вопросы расчета потока влаги, диффундирующей через ограждение и ее распределение по толще стены, ассимиляция ее воздухом в ВВП, условия конденсации водяного пара на внутренней поверхности экрана и др. Чтобы ответить на указанные вопросы были выполнены натурные экспериментальные исследования на эксплуатируемых зданиях с “вентилируемыми фасадами” [9, 10]. Результаты исследований позволили решить ряд вопросов проектирования теплоизоляции с ВВП, оценить влияние воздушного потока в прослойке на продольную и поперечную фильтрацию воздуха в слое теплоизоляции и др. Но они не дали ответа на вопрос о влиянии взаимосвязанных процессов переноса теплоты, влаги и воздуха на тепловлажностный режим системы “наружная стена + теплоизоляция “вентилируемый фасад”. Решение указанной задачи принято выполнять с использованием математического моделирования.

**1 Методика тепловлажностного расчета.** Схема переноса теплоты и влаги, положенная в основу решения задачи представлена на рисунке 1. Принято, что перенос влаги через наружную стену происходит в парообразной фазе, за счет разности парциальных давлений водяного пара. В теплозащитном слое из полужестких (жестких) минераловатных плит отсутствует продольная фильтрация воздуха, что подтверждено натурными исследованиями [10]. Водяной пар, поступивший в ВВП, ассимилируется потоком воздуха, движущимся в прослойке. В толще стены отсутствует конденсация водяного пара.

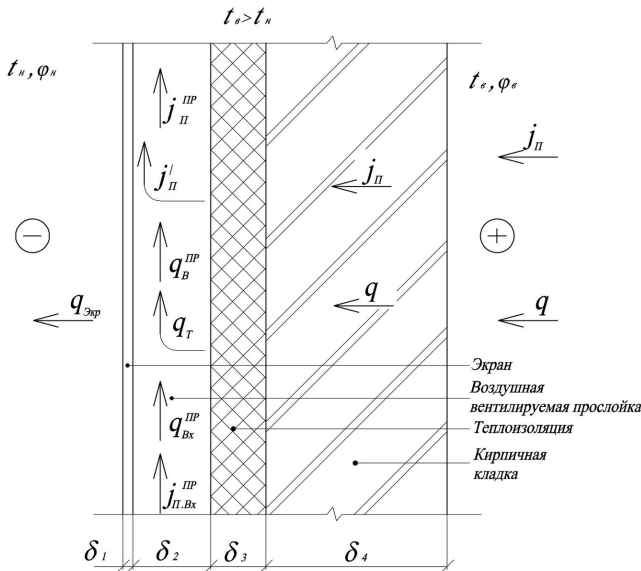


Рис. 1. Схема переноса теплоты и массы через наружную стену с ВВП  
 $q$  – удельный тепловой поток,  $j_p$  – удельный поток пара

$$j_p^{np} = j_{п.вх}^{np} + j_p^i; \quad q_B^{np} = q_T + q_{вх}^{np}.$$

Представленная одномерная задача переноса при граничных условиях III-рода описывается системой уравнений:

$$c_M \cdot \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, \tau) \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\xi \cdot \rho}{E} \cdot \frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu(x, \tau) \frac{\partial e}{\partial x} \right), \quad (2)$$

с граничными условиями:

$$\alpha_e (t_e(\tau) - t_{в.пос}(\tau)) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x_{x=0}}, \quad (3)$$

$$\alpha_{e.n.} (t_n(\tau) - t_{н.пос}(\tau)) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x_{x=n}}, \quad (4)$$

$$\beta_e (e_e(\tau) - e_{в.пос}(\tau)) = \mu \frac{\partial e}{\partial x_{x=0}}, \quad (5)$$

$$\beta_{e.n.} (e_n(\tau) - e_{н.пос}(\tau)) = \mu \frac{\partial e}{\partial x_{x=n}}. \quad (6)$$

Система уравнений "1 – 6" дополнена уравнением баланса переноса теплоты и массы в ВВП:

$$0,28 \cdot c_B \cdot \overline{\rho_{e.n.}} \cdot L dt = \overline{\alpha_{т.п.}} (\overline{\tau_T} - t_{e.n.}^h) dh - \overline{\alpha_{х.п.}} (t_{e.n.}^h - \overline{\tau_X}) dh, \quad (7)$$

где  $c_M$  – теплоемкость единицы массы материала, Дж/(кг·°C);

$c_B$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C).

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°C);

$\xi$  – относительная пароемкость материала, мг/кг;

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коэффициент паропроницаемости материала, мг/(м·ч·Па);

$E$  – максимальное парциальное давление водяного пара при данной температуре воздуха, Па;

$e$  – парциальное давление водяного пара, Па

$\alpha_{в.п.}, \alpha_{х.п.}$  – средние на участке  $dh$  прослойки коэффициенты тепловосприятости и теплоотдачи поверхностей, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$\overline{\tau_T}, \overline{\tau_X}$  – средние, за выбранный по высоте прослойки отрезок  $dh$ , температуры на "теплой" и "холодной" поверхностях в ВВП, °C;

$\beta_e, \beta_{e.n.}$  – коэффициенты массообмена внутренней поверхности и поверхности стены с воздухом ВВП соответственно, мг/(м<sup>2</sup>·ч·Па);

$\alpha_{e.n.}$  – коэффициент теплообмена внутренней поверхности стены, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$t_{e.n.}^h$  – температура воздуха в ВВП на высоте  $h$ , от входного отверстия, °C;

$L$  – объем воздуха, проходящего через ВВП, м<sup>3</sup>/ч.

Начальное распределение температуры и парциального давления принимаются в виде известных функций [7, 8].

Дифференциальные уравнения (1, 2) решаются методом прогонки по неявной схеме с использованием их дискретных аналогов (8, 9):

$$\rho_i c_i \frac{(t_i^{Z+1} - t_i^Z)}{\Delta Z} = \frac{1}{\Delta X_i} \left[ \frac{\lambda_{i/i+1} (t_{i+1}^{Z+1} - t_i^{Z+1})}{\delta x_{i/i+1}} - \frac{\lambda_{i-1/i} (t_i^{Z+1} - t_{i-1}^{Z+1})}{\delta x_{i-1/i}} \right], \quad (8)$$

где  $\Delta Z$  – шаг по времени, сек;

$t_i^Z$  – значение температуры в  $i$ -том узле в момент времени  $Z$ , °C;

$\lambda_{i/i+1}, \lambda_{i-1/i}$  – коэффициенты теплопроводности материала между точками  $i \dots i+1$  и  $i-1 \dots i$  соответственно, Вт/(м·°C).

$$\frac{\xi_i \cdot \rho_i}{E_i} \cdot \frac{(e_i^{Z+1} - e_i^Z)}{\Delta Z} = \frac{1}{\Delta X_i} \left[ \frac{\mu_{i/i+1} (e_{i+1}^{Z+1} - e_i^{Z+1})}{\delta x_{i/i+1}} - \frac{\mu_{i-1/i} (e_i^{Z+1} - e_{i-1}^{Z+1})}{\delta x_{i-1/i}} \right], \quad (9)$$

где  $e_i^Z$  – значение парциальных давлений в  $i$ -том узле в момент времени  $Z$ , Па;

$e_{i+1}^{Z+1}, e_{i-1}^{Z+1}, e_{i+1}^{Z+1}$  – значение парциальных давлений в  $i$ -том,  $i-1$ -вом и  $i+1$ -вом узле в момент времени  $Z+1$ , Па;

$\mu_{i/i+1}, \mu_{i-1/i}$  – коэффициенты паропроницаемости материала между точками  $i \dots i+1$  и  $i-1 \dots i$  соответственно, мг/(м·ч·Па).

В работах А.А. Самарского и А.В. Гулина [11, 12], Б.М. Берковского и Е.Ф. Ноготова [13] доказана безусловная устойчивость и сходимости выбранной конечно-разностной схемы при любых шагах по ординате и времени. Погрешность аппроксимации имеет порядок  $O(\tau + \Delta x^2)$ .

Дискретные аналоги (8, 9) дифференциальных уравнений (1, 2) схожи, поэтому остановимся на решении уравнения (1).

Запишем уравнение (8) в виде:

$$A_i t_i^{Z+1} = B_i t_{i+1}^{Z+1} + C_i t_{i-1}^{Z+1} + D_i, \quad (10)$$

$$A_i = \frac{\Delta X_i}{\Delta Z} \rho_i c_i + \frac{2\lambda_i \cdot \lambda_{i+1}}{\delta x_{i/i+1} (\lambda_i + \lambda_{i+1})} + \frac{2\lambda_{i-1} \cdot \lambda_i}{\delta x_{i-1/i} (\lambda_{i-1} + \lambda_i)},$$

$$B_i = \frac{2\lambda_i \cdot \lambda_{i+1}}{\delta x_{i/i+1} (\lambda_i + \lambda_{i+1})}, \quad C_i = \frac{2\lambda_{i-1} \cdot \lambda_i}{\delta x_{i-1/i} (\lambda_{i-1} + \lambda_i)},$$

$$D_i = t_i^Z \frac{\Delta X_i}{\Delta Z} \rho_i c_i.$$

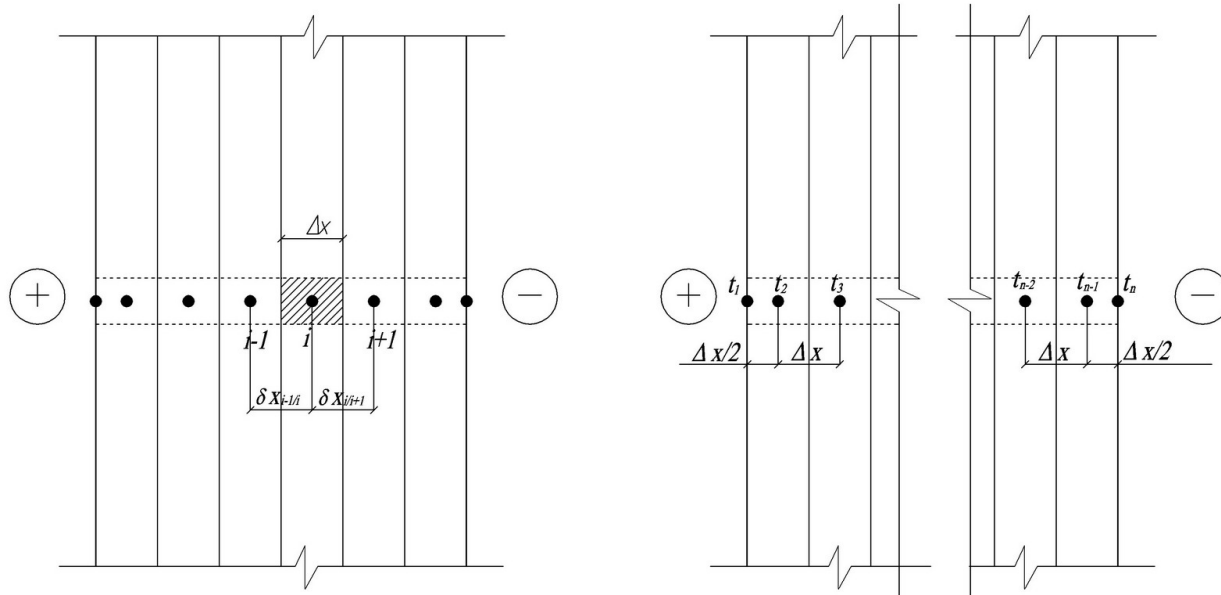


Рис. 2. Нумерация узлов внутри элементарных объемов и примыкающих к границам расчетной области

Аппроксимация граничных условий III-рода выполняется с использованием экстраполяции по Ричардсону, с учетом специального выбора коэффициентов в соответствии с [14], что обеспечивает четвертый порядок точности. Нумерация узлов, внутри элементарных объемов и примыкающих к границам расчетной области, показана на рисунке 2.

При приравнивании плотности притекающего и уходящего тепловых потоков получено:

$$t_1^{z+1} = t_2^{z+1} \frac{\left( \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} + \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}{3 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3)} \right)}{\left( \alpha_e \cdot \Delta X + \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} \right)} - \frac{\left( \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}{3 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3)} \right)}{\left( \alpha_e \cdot \Delta X + \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} \right)} + \frac{\Delta X \cdot \alpha_e \cdot t_e}{\left( \alpha_e \cdot \Delta X + \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} \right)} \quad (11)$$

Запишем уравнение (11) в виде:

$$t_1^{z+1} = p_1^Q \cdot t_2^{z+1} - v_1^Q \cdot t_3^{z+1} + s_1^Q, \quad (12)$$

где  $p_1^Q = \frac{\left( \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} + \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}{3 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3)} \right)}{\left( \alpha_e \cdot \Delta X + \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} \right)}, v_1^Q = \frac{\left( \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}{3 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3)} \right)}{\left( \alpha_e \cdot \Delta X + \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} \right)},$

$$s_1^Q = \frac{\Delta X \cdot \alpha_e \cdot t_e}{\left( \alpha_e \cdot \Delta X + \frac{8 \cdot \lambda_2}{3} \right)}.$$

Решение совместно уравнений (10) и (12) при выделении температуры в узле 2 в момент времени Z+1 имеет вид:

$$t_2^{z+1} = t_3^{z+1} P_2^Q + S_2^Q, \quad \text{где } P_2^Q = \frac{(B_2 - C_2 v_1^Q)}{(A_2 - C_2 p_1^Q)},$$

$$S_2^Q = \frac{(C_2 s_1^Q + D_2)}{(A_2 - C_2 p_1^Q)}. \quad (13)$$

Решение совместно уравнения (10) и уравнения (13) при выделении температуры в узле 3 в момент времени Z+1 дает выражение:

$$t_3^{z+1} = t_4^{z+1} \frac{B_3}{(A_3 - C_3 P_2^Q)} + \frac{(C_3 S_2^Q + D_2)}{(A_3 - C_3 P_2^Q)}. \quad (14)$$

С учетом подстановок  $P_3^Q = \frac{B_3}{(A_3 - C_3 P_2^Q)}$  и

$S_3^Q = \frac{(C_3 S_2^Q + D_2)}{(A_3 - C_3 P_2^Q)}$  уравнение (14) запишется аналогично выражению (13):  $t_3^{z+1} = t_4^{z+1} P_3^Q + S_3^Q.$

Переходом последовательно от узла к узлу, получается зависимость для определения температуры в (n-1) узле:

$$t_{n-1}^{z+1} = t_n^{z+1} P_{n-1}^Q + S_{n-1}^Q, \quad P_{n-1}^Q = \frac{B_{n-1}}{(A_{n-1} - C_{n-1} P_{n-2}^Q)},$$

$$S_{n-1}^Q = \frac{(C_{n-1} S_{n-2}^Q + D_{n-1})}{(A_{n-1} - C_{n-1} P_{n-2}^Q)}. \quad (15)$$

Для определения температуры в n-ном узле в момент времени Z+1 в явном виде решается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} t_n^{z+1} = p_n^Q t_{n-1}^{z+1} - v_n^Q t_{n-2}^{z+1} + s_n^Q \\ t_{n-2}^{z+1} = t_{n-1}^{z+1} P_{n-2}^Q + S_{n-2}^Q \\ t_{n-1}^{z+1} = t_n^{z+1} P_{n-1}^Q + S_{n-1}^Q \end{cases}, \quad (16)$$

из которой получено:

$$t_n^{z+1} = \frac{S_{n-1}^Q (p_n^Q - v_n^Q \cdot P_{n-2}^Q) - v_n^Q \cdot S_{n-2}^Q + s_n^Q}{(1 - p_n^Q \cdot P_{n-1}^Q + v_n^Q \cdot P_{n-2}^Q \cdot P_{n-1}^Q)}. \quad (17)$$

Зная  $t_n^{z+1}$  легко найти  $t_{n-1}^{z+1}, t_{n-2}^{z+1}$  и т.д. определив температурное поле конструкции в момент времени Z+1.

Аналогичным образом рассчитывается поле парциальных давлений в момент времени Z+1, что, позволяет определить величину потока водяного пара поступающего в ВВГ.

Интегрирование уравнения (7) и решение его относительно  $t_{e,n}^h$  дает зависимость:

$$t_{e,n}^h = t_n - (t_n - t_{ex}) \cdot e^{-\frac{h(\alpha_{B,n} + \alpha_{X,n})}{0,28 \cdot \rho_{e,n} \cdot L}}, \quad (18)$$

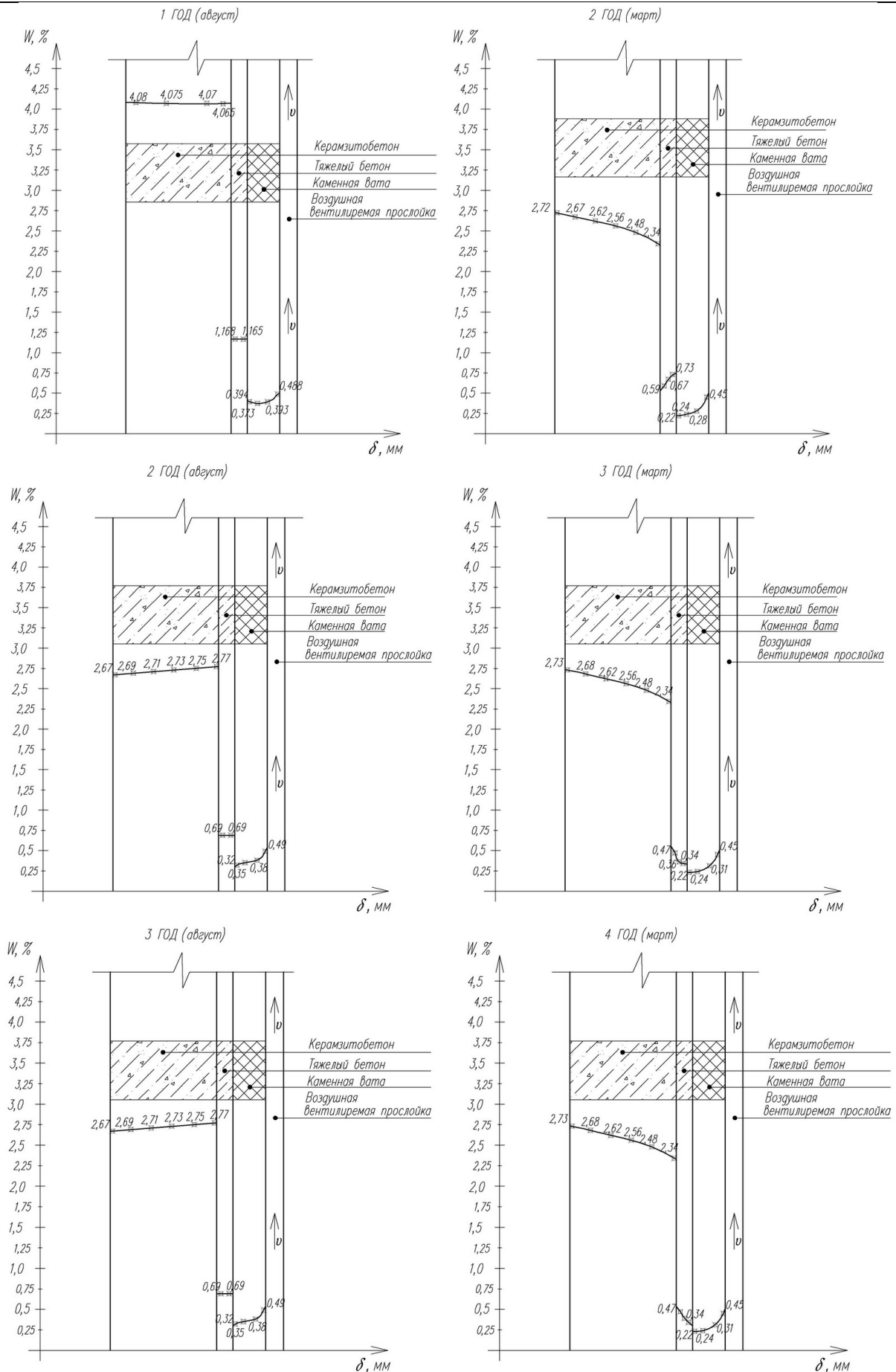


Рис. 3. Распределение массовой влажности по толще наружной стены

$$\text{где } t_h = \frac{t_e \cdot R_{нар} + t_n \cdot R_{вн}}{R_{нар} + R_{вн}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$t_{ex}, t_n, t_e$  – температуры воздуха, соответственно, входящего в прослойку, наружного и внутреннего,  $^\circ\text{C}$ ;

$R_{нар}, R_{вн}$  – сопротивление теплопередачи наружной и внутренней частей "вентилируемого фасада",  $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

Для расчета конвективной составляющей коэффициентов тепловосприятости и теплоотдачи с холодной и теплой поверхностями ВВП используется критериальное уравнение свободной конвекции для турбулентного движения воздуха вдоль вертикальной стенки [15]:

$$Nu_{нж} = 0,15 (Gr_{нж} \cdot Pr_{ж})^{0,33}, \quad (19)$$

где  $Nu_{нж}, Gr_{нж}$  и  $Pr_{ж}$  – критерии, соответственно, Нуссельта, Гразгофа и Прандтля.

Средняя температура воздуха по высоте ВВП определяется интегрированием уравнения (18):

$$\frac{t_{с.п.}^h}{h} = \frac{\int_0^h t_{с.п.}^h dh}{h} = t_n - \frac{(t_h - t_{ex}) \cdot (1 - e^{-\frac{h(\alpha_{в.п.} + \alpha_{х.п.})}{0,28 \cdot \rho_{с.п.} \cdot L}})}{h \cdot \frac{(\alpha_{в.п.} + \alpha_{х.п.})}{0,28 \cdot \rho_{с.п.} \cdot L}}. \quad (20)$$

Нахождение скорости воздуха выполняется для условий движения его в ВВП за счет гравитационного давления:

$$\Delta P_{гп} = 9,81 \cdot h \cdot (\rho_{ex} - \rho_{с.п.}). \quad (21)$$

Потери давления при движении воздуха в прослойке определяются как:

$$\sum \Delta P_{пр} = R_h + \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \frac{\rho \cdot v_{пр}^2}{2}, \quad (22)$$

где  $v_{пр}$  – скорость движения воздуха в прослойке,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$R_h$  – потери давления на трение по высоте прослойки,  $R_h = R_l \cdot h$ , Па;

$R_l$  – удельные потери на трение, Па;

$\sum \xi_i$  – сумма местных сопротивлений.

Расход воздуха через ВВП определяется по формуле:

$$L = 3600 \cdot v \cdot F_{свч}. \quad (23)$$

Количество водяного пара, ассимилируемого движущимся воздухом через воздушную вентиляруемую прослойку, рассчитывается по формуле:

$$J_{п\_уд} = L \cdot (d_{вых} - d_{ex}) \cdot \rho_{ср} \cdot 1000 \cdot \Delta Z, \quad (24)$$

где  $d_{вых}$  – влагосодержание воздуха на выходе из прослойки,  $\text{г}/\text{кг с.в.}$ ;

$d_{ex}$  – влагосодержание воздуха на входе в прослойку,  $\text{г}/\text{кг с.в.}$

Поток водяного пара, диффундирующего в вентиляруемую прослойку определяется как:

$$J_{п\_пр} = \beta_{с.п.} \cdot (e_n^{Z+1} - e_{с.п.}^{Z+1}) \cdot h \cdot b \cdot \Delta Z, \quad (25)$$

где  $\beta_{с.п.}$  – коэффициент массообмена поверхности стены с воздухом ВВП,  $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ .

$h$  – высота вентиляруемой прослойки от входного отверстия до выходного,  $\text{м}$ ;

$b$  – ширина участка прослойки,  $\text{м}$ .

Для исследований тепловлажностного режима "вентилируемых фасадов" по вышеизложенной методике составлена программа на языке программирования Object Pascal. Программа позволяет производить расчеты для различных конструкций наружных стен с ВВП и климатических данных, в том числе в многолетнем режиме эксплуатации.

**2 Пример расчета.** Пример расчета влажностного режима стены здания из керамзитобетонных панелей с наружной теплоизоляцией в трехгодичном цикле эксплуатации представлен на рисунке 3.

Начальное распределение влаги по толще конструкции принято на основании тепловлажностного расчета в соответствии с [16] для климатических параметров июля (1 год эксплуатации). Слой керамзитобетона ( $\rho = 1200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) толщиной  $\delta_1 = 260 \text{ мм}$  имеет начальную массовую влажность  $W_1 = 5 \%$ , слой тяжелого бетона ( $\rho = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) толщиной  $\delta_2 = 40 \text{ мм}$  —  $W_2 = 2 \%$ , а каменная вата плотностью  $\rho = 140 \text{ кг}/\text{м}^3$  и толщиной слоя  $\delta_3 = 80 \text{ мм}$  —  $W_3 = 0,6 \%$ . Величины массовой влажности приняты для условий эксплуатации ограждений "А".

Климатические параметры наружного воздуха в многолетнем цикле эксплуатации принимались помесячно, как средние величины, по [17].

Результаты расчета указывают на изменение характера распределения влаги по сечению стены в зависимости от поры года и продолжительности эксплуатации. При этом наблюдается определенная цикличность, связанная с наружными климатическими условиями "зима – лето". Массовая влажность материалов изменяется как по величине, так и по характеру распределения по сечению отдельных слоев, что вызвано их физическими особенностями и условиями подвода и отвода теплоты и массы на внутренней поверхности стены и поверхности вентиляруемой прослойки.

Основными факторами, влияющими на распределение массовой влажности по толще конструкции, являются параметры микроклимата внутреннего воздуха. Квазистационарный режим наружной стены наступает на 3 год эксплуатации. Массовые влажности материалов слоев находятся в зоне сорбционного увлажнения материалов, что хорошо согласуется с натурными данными [10].

#### Заключение:

1. Предложена математическая модель переноса теплоты и влаги для стен с наружной теплоизоляцией "вентилируемый фасад". Составлена компьютерная программа, позволяющая производить расчеты тепловлажностного режима теплоизолированных стен "вентилируемый фасад".

2. На примере расчета керамзитобетонной стеновой панели с наружной теплоизоляцией каменной ватой по системе "вентилируемый фасад" установлено, что наружная стена по распределению массовой влажности на 3 год эксплуатации выходит на квазистационарный режим с сохранением поля влажности для каждого расчетного периода. Массовые влажности материалов слоев в процессе эксплуатации ограждения снижаются вследствие отсутствия накопления влаги в конструкции.

3. Устройство системы утепления "вентилируемый фасад" улучшает влажностный режим конструкций, снижает массовые влажности материалов слоев и обеспечивает их эксплуатацию в зоне сорбционного увлажнения, что позволяет обеспечивать высокие теплотехнические характеристики наружных стен в целом.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лобов О.И., Ананьев А.И. "Физические основы проектирования фасадных систем зданий". Материалы научно-технической конференции "Современные фасадные системы: эффективность и долговечность". – М.: МГСУ, 2008. – С. 66-80.
2. Гагарин В.Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем. Температурно-влажностные воздействия и долговечность систем теплоизоляционных фасадов с тонким штукатурным слоем. / АВОК 2007. – №6. – С. 82-90.
3. Гагарин В.Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем. / АВОК 2007. – №7. – С. 66-74.
4. Хомутов А.Ф. Теплоизоляционные свойства наружных ограждений комплексного типа с применением монопанелей. Диссертация на соискание степени канд. техн. наук. – М., 1981.
5. Козлов В.А. Наружные ограждающие конструкции зданий с повышенной влажностью воздуха внутри помещений. Автореферат диссертации – М., 1997. – 34 с.
6. Лукьянов В.И. Метод расчета влажностного состояния наружных ограждений с вентиляруемой воздушной прослойкой для произ-

- водственных зданий. В сб. "Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий". - М., 1980. - С. 84-93.
7. Богословский В.Н. Строительная теплотехника. - М.: Высшая школа, 1982. - 415 с.
  8. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. - М.: Стройиздат, 1973. - 287 с.
  9. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Тепловой режим вентилируемых воздушных прослоек фасадных систем. / Жилищное строительство 2007. - №6. - С. 13-15.
  10. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. "Натурные исследования наружных стен зданий, теплоизолированных по системе "вентилируемый фасад". Материалы научно-технической конференции "Современные фасадные системы: эффективность и долговечность". - М.: МГСУ, 2008. - С. 212-217.
  11. А.А. Самарский. Введение в теорию разностных схем. - М., 1971. - 522 с.
  12. А.А. Самарский, А.В. Гулин. Устойчивость разностных схем. - М., 1973. - 287 с.
  13. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. - Мн.: Наука и техника, 1976. - 182 с.
  14. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. - 504 с.
  15. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1977. - 344 с.
  16. ТКП 45-2.04-43-2006 Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. - Мн., 2007.
  17. СНБ 2.04.02-2000 Строительная климатология. - Мн., 2001.

Материал поступил в редакцию 09.01.09

**PROTASEVICH A.M., KRUTILIN A.B. Exterior wall heat-and- moisture operation calculation of buildings with safety screens and vent air space**

Heat and moisture transit mathematical model for walls with external insulation "ventilated facade" is represented in this paper. Computer program, which allows to clear heat-and- moisture operation of given walls was composed. Bulk humidity distributions of wall panel with external insulation of stone wool by the system "ventilated facade" were determined by the calculations. Warming system technology "ventilated facade" improves moisture conditions of structures, declines bulk humidity of the materials and supports their maintenance in sorption damping area.

УДК 624.1+624.015:725.4

**Пойта П.С., Невейков А.Н., Шведовский П.В., Шалобьта Т.П.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ УСТРОЙСТВЕ СВАЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ В ГРУНТЕ

**Введение.** Сопротивление грунта по боковой поверхности свай, изготавливаемых в грунте, зависит от давления грунта на контакте системы «свая-грунт» и прочностных характеристик грунта, окружающего ствол сваи.

Как известно, в процессе бетонирования сваи, а именно укладки бетонной смеси и ее уплотнения, возникают давления, вызывающие некоторое расширение скважины.

При твердении бетона происходит его усадка и тем самым уменьшение давления на стенки скважины, что вызывает некоторое уменьшение диаметра скважины. А при нагружении сваи вертикальной нагрузкой имеет место увеличение диаметра скважины за счет поперечного расширения ствола сваи.

Таким образом, при изготовлении буровых и буронабивных свай, на грунт, окружающий ствол сваи, оказывают влияние: давление от собственного веса бетона; усадка бетона при его твердении; давление от поперечного расширения ствола сваи при его нагружении.

Если же использовать в качестве материала сваи самоупрочненный бетон, то необходим и учет давления самоупрочнения.

Отсюда, при определении напряжений на контакте сваи с грунтом, обусловленных давлением бетонной массы на стенки скважины, самоупрочнением бетона и усадкой бетона при его твердении, необходимо рассматривать два случая:

- напряжения при условии, что давление бетонной смеси не вызывает появления вокруг скважины зон предельного равновесия грунта, (упругая задача);
- напряжения при условии, что вокруг скважины образуется зона предельного равновесия грунта (упруго-пластическая задача).

**Объект и методика исследований.** Теоретически вопрос о напряженно-деформированном состоянии грунта вокруг радиально расширяющейся скважины решен в задаче Ляме о расширении трубы при очень большой толщине ее стенок. Применительно к другим условиям этот вопрос решен в исследованиях [1, 3, 4, 5, 6, 7].

Радиус зоны предельного равновесия В.Г.Березанцев [ ] предложил определять по формуле

$$r_0 = \frac{d}{2} \left[ 1 + \frac{\sqrt{2} \cdot e^{\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)} \right], \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр скважины;  $\varphi$  - угол внутреннего трения грунта. Обозначив

$$M = 1 + \frac{\sqrt{2} \cdot e^{\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (2)$$

получим  $r_0 = M \frac{d}{2}$  (рис. 1).

Тогда вся зона уплотнения грунта с учетом упругих перемещений составит

$$R = M \frac{d}{2} + U_{\text{упр}}. \quad (3)$$

Гольдштейн М.Н. и др. предлагают область предельного равновесия, в которой происходит уплотнение грунта, определять по формуле:

**Пойта Петр Степанович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии, ректор Брестского государственного технического университета.

**Невейков Александр Николаевич**, аспирант кафедры оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии Брестского государственного технического университета.

**Шведовский Петр Владимирович**, к.т.н., профессор кафедры оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии Брестского государственного технического университета.

**Шалобьта Татьяна Петровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.