

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

Научно-теоретический журнал
Издается с марта 1958 г.
Выходит один раз в месяц

№ 5 (629)
Май 2011 г.

Главный редактор В.Г. Себешев
Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, В.И. Костин (зам. гл.
редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора),
Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов,
Ю.П. Панибратов, Ю.П. Правдивец, В.Г. Себе-
шев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов, Е.М. Чер-
нышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.
Тел./факс 266-28-59.
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 15.06.11. Формат 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 377.

ООО «Партнеры Сибири»,
630005, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ключков Ю.В., Николаев А.П., Марченко С.С., Шубович А.А. Анализ оболочки вращения с ветвящимся меридианом на основе четырехугольного конечного элемента при различных вариантах интерполяции полей перемещений 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Калашников В.И., Валиев Д.М., Гуляева Е.В., Володин В.М. Высокопрочные порошково-активированные пропариваемые песчаные бетоны нового поколения 14

Токарева С.А., Петров В.П. Кинетика горения углерода в гранулах при обжиге глинозольного керамзита во вращающихся печах 20

Веселов А.В., Косач А.Ф., Берёзкина Ю.В., Антонова А.В., Кузнецов О.А. Производство газогипса с использованием серной кислоты в качестве газообразователя 28

Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З. Исследование фазового состава керамического кирпича на основе полиминеральной легкоплавкой глины и обожженных алюминиевых солевых шлаков 34

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Дегтярев В.В., Плетнев А.С., Остапенко В.В., Бунтина М.В. Сравнение теории и эксперимента в задаче о разрушении плотины в прямоугольном русле с боковым сужением	43
Кузнецов Г.И., Балацкая Н.В., Канаш Н.С. Многоярусный гидроотвал в суровых климатических условиях	49
Шабанов В.А., Логинов В.А. Исследование влияния сработки уровня воды в водохранилище на положение кривой депрессии	54
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Береговой А.М., Береговой В.А., Мальцев А.В., Петрянина М.А. Энергосбережение в жилых зданиях с большим сроком эксплуатации	59
Машенков А.Н., Косолапов Е.А., Чебурканова Е.В. Математическое моделирование конвективного теплообмена около стены здания в приближении пограничного слоя	65
Хромова Е.М. Сравнение модели и инженерной методики расчета оросительных камер кондиционеров воздуха	72
Батоева А.А., Асеев Д.Г., Сизых М.Р., Хандархаева М.С., Рязанцев А.А., Иващенко А.Т. Применение реакторов гидродинамической кавитации в технологиях очистки сточных вод	80
Халтурин Т.И., Курилина Т.А., Чурбакова О.В. Исследование влияния вида гальванопары на эффективность процесса гальванокоагуляции сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов	87
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Зверева А.С., Малышева Ю.Э. Классификация признаков свайных молотов с пневмоприводом	94
Дукарт А.В., Вьет Нгок Фам, Тхань Бинь Фам. К определению свободных колебаний двухмассовой системы с демпфированием	98
Готман Н.З., Каюмов М.З. Численное моделирование роста карстовой полости в карстующихся грунтах	107
Королев К.В. Начальная несущая способность медленно уплотняющегося водонасыщенного основания ленточного фундамента	112
Хархардин А.Н. Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц	119
НАШИ ЮБИЛЯРЫ	
Каримов Альберт Миниханович (к 70-летию со дня рождения)	126

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Ю.В. КЛОЧКОВ, А.П. НИКОЛАЕВ, С.С. МАРЧЕНКО, А.А. ШУБОВИЧ

АНАЛИЗ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ С ВЕТВЯЩИМСЯ МЕРИДИАНОМ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Изложен алгоритм расчета оболочек вращения с ветвящимся меридианом при использовании в качестве элемента дискретизации криволинейного четырехугольника с восемнадцатью степенями свободы в узле, интерполяционные зависимости которого скомпонованы на основе векторного способа интерполяции перемещений. Для верификации разработанного алгоритма выполнен сравнительный анализ конечно-элементных решений, полученных с использованием программного комплекса ANSYS, и решений, найденных с помощью предлагаемого алгоритма.

Ключевые слова: оболочка вращения, метод конечных элементов, вектор перемещения, матрица жесткости, пологая оболочка, программный комплекс, скалярная аппроксимация, векторная аппроксимация.

В конечно-элементном анализе оболочек все более широкое применение находят современные вычислительные программные комплексы, такие как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN и др. При расчете пологих оболочек с плавным изменением геометрии эти комплексы позволяют получать адекватную картину напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочечных конструкций. Однако в случаях резкого изменения геометрии оболочки, наличия зон ветвления меридиана, значительных градиентов кривизны срединной поверхности использование вышеупомянутых комплексов не приводит к получению удовлетворительных результатов. Поэтому актуальной остается задача по созданию и совершенствованию алгоритмов расчета оболочек вращения при значительных градиентах кривизны меридиана и наличии зон сочленения оболочек различной геометрической формы.

1. Геометрия оболочки. Срединная поверхность оболочки вращения может быть задана радиусом-вектором

$$\vec{R}^0 = x\vec{i} + r\sin\theta\vec{j} + r\cos\theta\vec{k}, \quad (1)$$

где $r = r(x)$ — радиус вращения;

θ — угол, отсчитываемый от вертикального диаметра против часовой стрелки.

Дифференцированием (1) по глобальным криволинейным координатам s (длина дуги меридиана) и θ можно получить касательные векторы

базиса, а их векторным произведением — определить орты нормали срединной поверхности:

$$\vec{a}_1 = \vec{R}_{,s}^0 = x_{,s} \vec{i} + r_{,s} \sin\theta \cdot \vec{j} + r_{,s} \cos\theta \cdot \vec{k}, \quad \vec{a}_2 = \vec{R}_{,\theta}^0 = r \cos\theta \cdot \vec{j} - r \sin\theta \cdot \vec{k},$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{a}_1 \times \vec{a}_2}{\sqrt{a}}, \quad (2)$$

где $a = a_{11}a_{22} - (a_{12})^2$ — детерминант метрического тензора, отнесенного к точке срединной поверхности оболочки.

На основе (1) и (2) можно сформировать прямую и обратную матричные зависимости между векторами локального базиса и ортами декартовой системы координат:

$$\{\vec{a}\} = [d]\{\vec{i}\}, \quad \{\vec{i}\} = [d]^{-1}\{\vec{a}\}, \quad (3)$$

где $\{\vec{a}\}^T = \{\vec{a}_1 \vec{a}_2 \vec{a}\}$; $\{\vec{i}\}^T = \{\vec{i} \vec{j} \vec{k}\}$.

Дифференцированием (2) по глобальным криволинейным координатам s и θ можно получить производные векторов локального базиса, которые при учете (3) могут быть представлены компонентами, отнесенными к этому же базису:

$$\vec{a}_{1,s}^0 = r_{,xx} x_{,s}^3 \vec{a}^0, \quad \vec{a}_{1,\theta}^0 = \frac{r_{,s}}{r} \vec{a}_2^0, \quad \vec{a}_{2,s}^0 = \frac{r_{,s}}{r} \vec{a}_2^0,$$

$$\vec{a}_{2,\theta}^0 = -rr_{,s} \vec{a}_1^0 - rx_{,s} \vec{a}^0, \quad \vec{a}_{,s}^0 = -r_{,xx} x_{,s}^3 \vec{a}_1^0, \quad \vec{a}_{,\theta}^0 = \frac{x_{,s}}{r} \vec{a}_2^0. \quad (4)$$

Вектор перемещения точки срединной поверхности и его производные по s и θ могут быть представлены компонентами локального базиса в следующем виде:

$$\vec{v} = v^\alpha \vec{a}_\alpha + v \vec{a}, \quad \vec{v}_{,s} = t_s^\alpha \vec{a}_\alpha + t_s \vec{a}, \quad \vec{v}_{,\theta} = t_\theta^\alpha \vec{a}_\alpha + t_\theta \vec{a},$$

$$\vec{v}_{,ss} = t_{ss}^\alpha \vec{a}_\alpha + t_{ss} \vec{a}, \quad \vec{v}_{,\theta\theta} = t_{\theta\theta}^\alpha \vec{a}_\alpha + t_{\theta\theta} \vec{a}, \quad \vec{v}_{,s\theta} = t_{s\theta}^\alpha \vec{a}_\alpha + t_{s\theta} \vec{a}, \quad (5)$$

где v^α ($\alpha = 1, 2$) — тангенциальные, а v — нормальная компоненты вектора перемещения;

t_s^α , t_θ^α , t_{ss}^α , $t_{\theta\theta}^\alpha$, $t_{s\theta}^\alpha$ — многочлены, содержащие компоненты вектора перемещения, а также их первые (для t_s^α , t_θ^α) и вторые (для t_{ss}^α , $t_{\theta\theta}^\alpha$, $t_{s\theta}^\alpha$) производные в глобальной системе координат, например:

$$t_s^1 = v_{,s}^1 - r_{,xx} x_{,s}^3 v, \quad t_\theta^1 = v_{,\theta}^1 - rx_{,s} v^2,$$

$$t_{ss} = v_{ss} + 2r_{,xx} x_{,s}^3 v_{,s}^1 + v^1 (r_{,xx} x_{,s}^3)_{,s} - v (r_{,xx} x_{,s}^3)^2. \quad (6)$$

Используя гипотезы теории тонких оболочек [1], на основе уравнений механики сплошной среды [2] можно получить ковариантные компоненты тензоров деформаций и искривлений срединной поверхности оболочки вращения:

$$\epsilon_{ss} = t_s^1, \quad \epsilon_{\theta\theta} = r^2 t_\theta^2, \quad \epsilon_{s\theta} = \frac{t_\theta^1 + r^2 t_s^2}{2},$$

$$\chi_{ss} = -(t_s)_{,s} - t_s^1 r_{,xx} x_{,s}^3, \quad \chi_{\theta\theta} = -rr_{,s} t_{,s} - (t_\theta)_{,\theta} + rx_{,s} t_\theta^2, \quad (7)$$

$$\chi_{s\theta} = \frac{-r_{,xx} x_{,s}^3 t_\theta^1 - (t_s)_{,\theta} + rx_{,s} t_s^2 - (t_\theta)_{,s} + 2t_\theta r_s / r}{2}.$$

2. Конечный элемент и интерполяция перемещений. В качестве элемента дискретизации используется четырехугольный криволинейный фрагмент срединной поверхности оболочки вращения с узлами i , j , k и l , отображаемый для удобства численного интегрирования на квадрат с локальными координатами $-1 \leq \xi, \eta \leq 1$ (рис. 1).

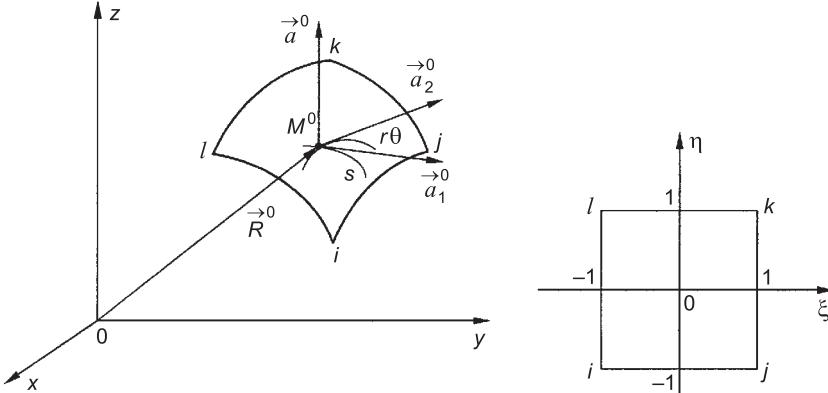


Рис. 1

Связь между глобальными s, θ и локальными ξ и η координатами осуществляется с помощью соотношения

$$Q = \frac{1-\xi}{2} \cdot \frac{1-\eta}{2} Q^i + \frac{1+\xi}{2} \cdot \frac{1-\eta}{2} Q^j + \frac{1+\xi}{2} \cdot \frac{1+\eta}{2} Q^k + \frac{1-\xi}{2} \cdot \frac{1+\eta}{2} Q^l \quad (8)$$

или в матричном виде

$$Q = \begin{matrix} \{f\}^T \\ 1 \times 4 \end{matrix} \begin{matrix} \{S_y\} \\ 4 \times 1 \end{matrix}, \quad (8')$$

где под Q понимается глобальная координата s или θ ;

$$\begin{matrix} \{f\}^T \\ 1 \times 4 \end{matrix} = \{f_1 f_2 f_3 f_4\}, \quad \{Q_y\}^T = \{Q^i Q^j Q^k Q^l\}.$$

2.1. Скалярная интерполяция перемещений. В качестве узловых неизвестных выбираются компоненты вектора перемещения и их производные в локальной и глобальной системах координат:

$$\begin{aligned} \{q_y^{\text{н}}\}^T &= \{q^i q^j q^k q^l q_{,\xi}^i q_{,\xi}^j q_{,\xi}^k q_{,\xi}^l q_{,\eta}^i \dots q_{,\eta}^l q_{,\xi\xi}^i \dots q_{,\xi\xi}^l q_{,\eta\eta}^i \dots q_{,\eta\eta}^l q_{,\xi\eta}^i \dots q_{,\xi\eta}^l\}; \\ \{q_y^{\text{r}}\}^T &= \{q^i q^j q^k q^l q_{,s}^i \dots q_{,s}^l q_{,\theta}^i \dots q_{,\theta}^l q_{,ss}^i \dots q_{,ss}^l q_{,\theta\theta}^i \dots q_{,\theta\theta}^l q_{,s\theta}^i \dots q_{,s\theta}^l\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где под q понимается компонента v^1 , v^2 или v .

Перемещение внутренней точки четырехугольного элемента дискретизации определяется интерполяционной зависимостью [3–5]

$$q = \begin{matrix} \{\varphi\}^T \\ 1 \times 24 \end{matrix} \begin{matrix} \{q_y^{\text{n}}\} \\ 24 \times 1 \end{matrix}, \quad (10)$$

где $\{\varphi\}^T = \{\varphi_1 \dots \varphi_{24}\}$ — матрица-строка, содержащая произведения полиномов Эрмита пятой степени.

Производные компонент вектора перемещения определяются дифференцированием (10) по s и θ :

$$q_{,s} = \underbrace{\{\varphi_{,s}\}}_{1 \times 24}^T \underbrace{\{q_y^n\}}_{24 \times 1}, \quad q_{,\theta} = \underbrace{\{\varphi_{,\theta}\}}_{1 \times 24}^T \underbrace{\{q_y^n\}}_{24 \times 1}, \\ q_{,ss} = \underbrace{\{\varphi_{,ss}\}}_{1 \times 24}^T \underbrace{\{q_y^n\}}_{24 \times 1}, \quad q_{,\theta\theta} = \underbrace{\{\varphi_{,\theta\theta}\}}_{1 \times 24}^T \underbrace{\{q_y^n\}}_{24 \times 1}, \quad q_{,s\theta} = \underbrace{\{\varphi_{,s\theta}\}}_{1 \times 24}^T \underbrace{\{q_y^n\}}_{24 \times 1}. \quad (11)$$

2.2. Векторная интерполяция перемещений. В качестве узловых неизвестных выбираются матрицы-строки, элементами которых являются векторы перемещений узловых точек четырехугольного конечно-го элемента и их производные в локальной и глобальной системах координат:

$$\begin{aligned} \{\vec{v}_y^{\text{r}}\}_{1 \times 24}^T &= \{\vec{v}^i \vec{v}^j \vec{v}^k \vec{v}^l \vec{v}_{,\xi}^i \dots \vec{v}_{,\xi}^l \vec{v}_{,\eta}^i \dots \vec{v}_{,\eta}^l \vec{v}_{,\xi\xi}^i \dots \vec{v}_{,\xi\xi}^l \vec{v}_{,\eta\eta}^i \dots \vec{v}_{,\eta\eta}^l \vec{v}_{,\xi\eta}^i \dots \vec{v}_{,\xi\eta}^l\}, \\ \{\vec{v}_y^{\text{r}}\}_{1 \times 24}^T &= \{\vec{v}^i \vec{v}^j \vec{v}^k \vec{v}^l \vec{v}_{,s}^i \dots \vec{v}_{,s}^l \vec{v}_{,\theta}^i \dots \vec{v}_{,\theta}^l \vec{v}_{,ss}^i \dots \vec{v}_{,ss}^l \vec{v}_{,\theta\theta}^i \dots \vec{v}_{,\theta\theta}^l \vec{v}_{,s\theta}^i \dots \vec{v}_{,s\theta}^l\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Связь между столбцами $\{\vec{v}_y^l\}$ и $\{\vec{v}_y^r\}$ может быть записана в матричном виде

$$\left\{ \vec{v}_y^{\text{L}} \right\}_{24 \times 1} = [L]_{24 \times 24} \left\{ \vec{v}_y^{\text{r}} \right\}_{24 \times 1}, \quad (13)$$

где элементы матрицы $[L]$ определяются из выражений

$$\begin{aligned}\vec{v}_{,\xi}^m &= \vec{v}_{,s}^m \cdot s_{,\xi}^m + \vec{v}_{,\theta}^m \cdot \theta_{,\xi}^m, \quad \vec{v}_{,\eta}^m = \vec{v}_{,s}^m \cdot s_{,\eta}^m + \vec{v}_{,\theta}^m \cdot \theta_{,\eta}^m, \\ \vec{v}_{,\xi\xi}^m &= \vec{v}_{,ss}^m \cdot (s_{,\xi}^m)^2 + 2\vec{v}_{,s\theta}^m \cdot s_{,\xi}^m \cdot \theta_{,\xi}^m + \vec{v}_{,\theta\theta}^m \cdot (\theta_{,\xi}^m)^2, \\ \vec{v}_{,\eta\eta}^m &= \vec{v}_{,ss}^m \cdot (s_{,\eta}^m)^2 + 2\vec{v}_{,s\theta}^m \cdot s_{,\eta}^m \cdot \theta_{,\eta}^m + \vec{v}_{,\theta\theta}^m \cdot (\theta_{,\eta}^m)^2,\end{aligned}$$

$$\vec{v}_{,\xi\eta}^m = \vec{v}_{,ss}^m \cdot S_{,\xi}^m \cdot S_{,\eta}^m + 2\vec{v}_{,s\theta}^m \cdot S_{,\xi}^m \cdot S_{,\theta}^m + \vec{v}_{,s}^m \cdot S_{,\xi\eta}^m + \vec{v}_{,\theta\theta}^m \cdot \Theta_{,\xi}^m \cdot \Theta_{,\eta}^m + \vec{v}_{,\theta}^m \cdot \Theta_{,\xi\eta}^m, \quad (14)$$

Входящие в (14) производные глобальных координат по локальным находятся дифференцированием (8') по ξ и η :

$$Q_{,\xi} = \{f_{,\xi}\}^T \{Q_y\}, \quad Q_{,\eta} = \{f_{,\eta}\}^T \{Q_y\}, \quad Q_{,\xi\eta} = \{f_{,\xi\eta}\}^T \{Q_y\}. \quad (15)$$

Записывая выражения (5) для узлов четырехугольного конечного элемента, можно сформировать матричное соотношение

$$\{\vec{v}_y^r\} = \begin{bmatrix} \vec{A} \\ 24 \times 1 \end{bmatrix} \{n_y\}, \quad 24 \times 72 \quad 72 \times 1 \quad (16)$$

где $[\vec{A}]$ — матрица, диагональными элементами которой являются базисные векторы узловых точек конечного элемента, имеет вид

\vec{a}_1^i	\vec{a}_2^i	\vec{a}^i											...		
			\vec{a}_1^j	\vec{a}_2^j	\vec{a}^j								...		
						\vec{a}_1^k	\vec{a}_2^k	\vec{a}^k					...		
									\vec{a}_1^l	\vec{a}_2^l	\vec{a}^l		...		
...
													\vec{a}_1^l	\vec{a}_2^l	\vec{a}^l

Столбец $\{n_y\}$ определяется выражением

$$\{n_y\}^T = \{v^{l_1} v^{2l_1} v^i v^{1j} v^{2j} v^i v^{lk} v^{2k} v^k v^{ll} v^{2l} v^l t_s^{l_1} t_s^{2l_1} t_i^i ... t_s^l t_{ss}^{l_1} ... t_{ss}^l t_{\theta\theta}^{l_1} ... t_{\theta\theta}^l t_{s\theta}^{l_1} ... t_{s\theta}^l\}$$

и содержит компоненты векторов \vec{v}^m , $\vec{v}_{,s}^m$, $\vec{v}_{,\theta}^m$, $\vec{v}_{,ss}^m$, $\vec{v}_{,\theta\theta}^m$ и $\vec{v}_{,s\theta}^m$ ($m = i, j, k, l$) узловых точек.

При использовании соотношений (5) и (6) для узловых точек i, j, k, l элемента столбец $\{n_y\}$ может быть выражен через столбец (17') традиционных скалярных узловых неизвестных четырехугольного элемента дискретизации:

$$\begin{matrix} \{n_y\} \\ 72 \times 1 \end{matrix} = \begin{bmatrix} P_R \\ 72 \times 72 \end{bmatrix} \begin{matrix} \{U_y^r\} \\ 72 \times 1 \end{matrix}, \quad (17)$$

где

$$\begin{matrix} \{U_y^r\}^T \\ 72 \times 1 \end{matrix} = \left\{ \begin{matrix} \{v_y^{1r}\}^T & \{v_y^{2r}\}^T & \{v_y^r\}^T \\ 1 \times 24 & 1 \times 24 & 1 \times 24 \end{matrix} \right\}. \quad (17')$$

Входящие в (17') матрицы-строки $\{v_y^{1r}\}^T$, $\{v_y^r\}^T$ имеют структуру, аналогичную (9).

Вектор перемещения внутренней точки конечного элемента интерполируется через узловые векторы (12), (13):

$$\vec{v} = \begin{matrix} \{\varphi\}^T & \{\vec{v}_y^r\} \\ 1 \times 24 & 72 \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} \{\varphi\}^T & [L] & \{\vec{v}_y^r\} \\ 1 \times 24 & 24 \times 24 & 24 \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} \{\gamma\}^T & \{\vec{v}_y^r\} \\ 1 \times 24 & 24 \times 1 \end{matrix}. \quad (18)$$

В результате подстановки (16) и (17) в (18) последнее может быть преобразовано к виду

$$\vec{v} = \begin{matrix} \{\gamma\}^T & [\vec{A}] & [P_R] & \{U_y^r\} \\ 1 \times 24 & 24 \times 72 & 72 \times 72 & 72 \times 1 \end{matrix}. \quad (19)$$

Базисные векторы узловых точек четырехугольного конечного элемента могут быть выражены через векторы базиса внутренней точки конечного элемента:

$$\{\vec{a}^m\} = \begin{bmatrix} d^m \\ 3 \times 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ 3 \times 3 \end{bmatrix}^{-1} \{\vec{a}\} = \begin{bmatrix} b^m \\ 3 \times 3 \end{bmatrix} \{\vec{a}\}, \quad (20)$$

где $\{\vec{a}^m\} = \{\vec{a}_1^m \vec{a}_2^m \vec{a}_3^m \vec{a}_4^m\}$, $m = i, j, k, l$.

С учетом (20) соотношение (19) может быть записано в следующем виде:

$$\vec{v} = \begin{matrix} \{\vec{a}\}^T & [H] & [P_R] & \{U_y^r\} \\ 1 \times 3 & 3 \times 72 & 72 \times 72 & 72 \times 1 \end{matrix}, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} [H] = & \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} \gamma_1 [b^i]_3^T & \gamma_2 [b^j]_3^T & \gamma_3 [b^k]_3^T & \gamma_4 [b^l]_3^T & \times \\ \hline \gamma_5 [b^i]_3^T & \gamma_6 [b^j]_3^T & \gamma_7 [b^k]_3^T & \gamma_8 [b^l]_3^T & \cdots \gamma_{24} [b^l]_3^T \end{array} \right] \times \\ & \times \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} \gamma_{1,\beta} [b^i]_3^T & \gamma_{2,\beta} [b^j]_3^T & \gamma_{3,\beta} [b^k]_3^T & \gamma_{4,\beta} [b^l]_3^T & \cdots \gamma_{24,\beta} [b^l]_3^T \end{array} \right]. \end{aligned}$$

Производные вектора перемещения (21) определяются выражениями

$$\vec{v}_{,\beta} = \{\vec{a}\}^T [H_{,\beta}] [P_R] \{U_y^r\}, \quad \vec{v}_{,\beta\rho} = \{\vec{a}\}^T [H_{,\beta\rho}] [P_R] \{U_y^r\}, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} [H_{,\beta}] = & \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} \gamma_{1,\beta} [b^i]_3^T & \gamma_{2,\beta} [b^j]_3^T & \gamma_{3,\beta} [b^k]_3^T & \gamma_{4,\beta} [b^l]_3^T & \cdots \gamma_{24,\beta} [b^l]_3^T \end{array} \right]; \\ [H_{,\beta\rho}] = & \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} \gamma_{1,\beta\rho} [b^i]_3^T & \gamma_{2,\beta\rho} [b^j]_3^T & \gamma_{3,\beta\rho} [b^k]_3^T & \gamma_{4,\beta\rho} [b^l]_3^T & \cdots \gamma_{24,\beta\rho} [b^l]_3^T \end{array} \right], \end{aligned}$$

β, ρ принимают значения s и θ .

Приравнивая правые части (5) и (21), (22), можно получить интерполяционные выражения вида

$$\begin{Bmatrix} v^1 \\ v^2 \\ v \end{Bmatrix}_{\substack{3 \times 72 \\ 72 \times 72 \\ 72 \times 1}} = [H][P_R] \{U_y^r\}, \quad \begin{Bmatrix} t_\beta^1 \\ t_\beta^2 \\ t_\beta \end{Bmatrix}_{\substack{3 \times 72 \\ 72 \times 72 \\ 72 \times 1}} = [H_{,\beta}] [P_R] \{U_y^r\}, \quad \begin{Bmatrix} t_{\beta\rho}^1 \\ t_{\beta\rho}^2 \\ t_{\beta\rho} \end{Bmatrix}_{\substack{3 \times 72 \\ 72 \times 72 \\ 72 \times 1}} = [H_{,\beta\rho}] [P_R] \{U_y^r\}. \quad (23)$$

Сопоставляя интерполяционные зависимости (11) и (23), можно отметить, что при векторном способе интерполяции каждая компонента вектора перемещения зависит от полного набора узловых варьируемых параметров $\{U_y^r\}$, в структуру которых входят узловые значения всех трех компонент вектора перемещения и их производные (17'). При скалярном варианте интерполяции отдельная компонента вектора перемещения зависит от узловых значений только этой же компоненты и ее производных. От узловых значений остальных двух компонент она не зависит.

3. Условия сопряжения n оболочек в зоне ветвления меридиана.

Столбец узловых варьируемых параметров одной из оболочек принимается за основной. Столбцы узловых неизвестных остальных ($n - 1$) оболочек вращения, примыкающих к узлу ветвления меридиана, выражаются через столбец узловых варьируемых параметров основной оболочки исходя из кинематических и статических условий сопряжения.¹

В качестве кинематических условий сопряжения n оболочек используются инвариантность векторов перемещений узла ветвления меридиана, равенства первой и второй производных векторов перемещений по окружной координате и предположение о том, что на окружности пересечения n сочлененных оболочек угол между нормалями к срединным поверхностям сочлененных оболочек в процессе деформирования остается неизменным.

В качестве статических условий сочленения используются условия равновесия по усилиям и моментам.

На основании кинематических условий сочленения узловые величины $v^1, v^2, v, v_{,\theta}^1, v_{,\theta}^2, v_{,\theta}, v_{,\theta\theta}^1, v_{,\theta\theta}^2, v_{,\theta\theta}, v_s, v_{,ss}$ ($n - 1$) примыкающих оболочек выражаются через основные узловые неизвестные.

На основании статических условий сочленения получаются зависимости между узловыми неизвестными $v_s^2, v_{,ss}$ всех сочленяемых оболочек. Остальные узловые величины подвергаются свободному варьированию.

На основании полученных матричных соотношений выполняются стандартные преобразования матриц жесткостей и столбцов узловых нагрузок конечных элементов, примыкающих к узлу ветвления меридиана.

4. Пример расчета. В качестве примера решена задача по определению напряженно-деформированного состояния оболочечной конструкции, состоящей из цилиндра и двух примыкающих к нему оболочек, радиус вращения которых задается формулами (рис. 2)

для верхней $r_1 = R_z + A \sin(x_1 / C)$;

для нижней $r_2 = B + D \cos(x_1 / C)$.

Цилиндрическая оболочка загружена внутренним давлением интенсивности q , примыкающие оболочки — $0,5q$. Приняты следующие исходные данные: $q = 5$ МПа; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\nu = 0,3$; $t = 0,02$ м; $R_z = 0,9$ м; $L_z = 1,0$ м; $A = 0,3$ м; $B = 0,3$ м; $D = 0,6$ м.

¹ Клочков Ю.В., Николаев А.П., Проскурнова О.А. Использование криволинейного четырехугольного конечного элемента к расчету сочлененных оболочек вращения // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 11. С. 16–24.

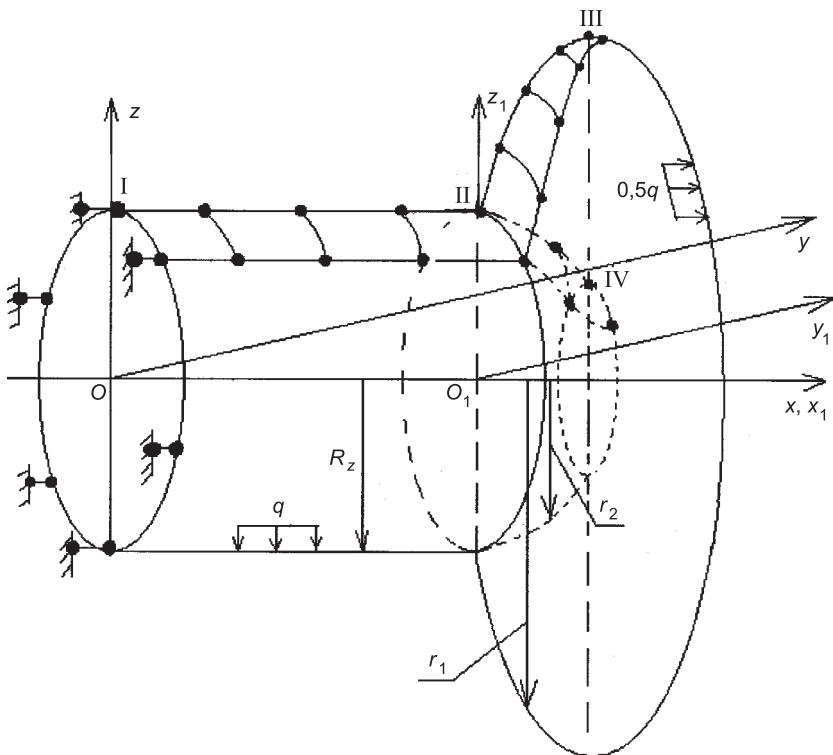


Рис. 2

Параметр C первоначально принят равным 0,48 м. Координата x_1 при этом изменялась в пределах $0 \leq x_1 \leq 0,24\pi$ м. Расчеты выполнены в двух вариантах. В первом варианте реализован описанный выше алгоритм векторной аппроксимации полей перемещений. В качестве второго контрольного варианта использован программный комплекс ANSYS, конечные элементы которого основаны на скалярной аппроксимации (см. п. 2.1). Результаты повариантного расчета представлены в табл. 1 и 2 соответственно, в которых

Таблица 1

Сечение	Параметры НДС, МПа	Сетка дискретизаци				Точное решение, МПа
		1×12	1×24	1×48	1×96	
I	σ_M^H	6,21	6,24	6,25	6,25	6,25
	σ_M^B	6,23	6,24	6,25	6,25	
	σ_K^H	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0
	σ_K^B	225,0	225,0	225,0	225,0	
II	σ_M^H	245,4	248,0	248,0	248,0	—
	σ_M^B	-232,0	-235,5	-235,5	-235,5	
	σ_M^{cp}	6,7	6,25	6,25	6,25	6,25
	σ_K^H	127,2	127,3	127,2	127,2	—
III	σ_K^B	-16,06	-17,73	-17,88	-17,91	
	σ_M^H	-0,020	-0,009	-0,0002	-0,0000	0,00
	σ_M^B	0,029	0,001	0,0001	+0,0000	
	σ_K^H	149,4	149,4	149,4	149,4	—
IV	σ_K^B	149,4	149,4	149,4	149,4	
	σ_M^H	0,049	-0,035	-0,005	-0,0005	0,00
	σ_M^B	-0,052	0,032	0,005	0,0005	
	σ_K^H	64,08	63,92	63,91	63,91	—
	σ_K^B	55,47	55,45	55,43	55,43	

Таблица 2

Сече- ние	Парамет- ры НДС, МПа	Сетка дискретизации								Точное решение, МПа	
		20×30		40×30		60×30		80×30			
		Shell 63	Shell 93	Shell 63	Shell 93	Shell 63	Shell 93	Shell 63	Shell 93		
I	σ_m^h	6,25	5,87	6,25	5,87	6,25	5,87	6,25	5,87	6,25	
	σ_m^b	6,28	5,75	6,27	5,75	6,27	5,75	6,27	5,75		
	σ_k^h	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	225,0	
	σ_k^b	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8		
II	σ_m^h	220	224,9	238,6	228,9	243,0	229,4	244,6	229,7	—	
	σ_m^b	-199	-195	-214	-197	-218	-197	-218,6	-196,5		
	σ_m^{cp}	10,5	14,95	12,3	15,95	12,5	16,2	13	16,6	6,25	
	σ_k^h	102,3	87,8	105,7	92,9	107,2	94,9	107,8	96,2	—	
III	σ_k^b	12,47	29,2	12,1	31,3	11,61	31,9	11,4	32,1		
	σ_m^h	0,031	0,092	0,026	0,042	0,024	-0,01	0,022	-0,014	0,00	
	σ_m^b	0,039	0,021	0,019	0,003	0,023	0,003	0,026	0,025		
	σ_k^h	148,8	146,1	148,8	145,9	148,8	145,5	148,7	145,4	—	
IV	σ_k^b	148,6	149,8	148,7	149,7	148,7	150,1	148,7	150,2		
	σ_m^h	1,43	0,00	0,74	0,027	0,51	0,002	0,39	0,014	0,00	
	σ_m^b	-0,34	-1,63	-1,03	-1,68	-1,26	-1,69	-1,38	-1,7		
	σ_k^h	69,3	68,6	68,9	68,8	68,7	68,9	68,7	68,9	—	
	σ_k^b	69,1	68,9	68,8	69,0	68,7	69,1	68,6	69,1	—	

приведены численные значения меридиональных напряжений σ_m^h , σ_m^b в наружных и внутренних волокнах оболочки, а также значения кольцевых напряжений σ_k^h и σ_k^b в тех же волокнах в характерных сечениях конструкции (I, II, III, IV) в зависимости от густоты сетки дискретизации. В крайней правой колонке приведены решения, полученные из условия равновесия. В контрольном варианте ANSYS использованы два типа элементов — «shell 63» и «shell 93».

Анализ табличных данных показывает, что результаты повариантных расчетов при заданных геометрических параметрах оболочки достаточно близки между собой. В то же время следует отметить, что при использовании элемента «shell 93» меридиональные напряжения в сечении I оказались несколько заниженными (примерно на 7,2 %) по сравнению с результатами, полученными на основе элемента «shell 63». Меридиональные напряжения в узле ветвления меридиана (сечение II) на внутренней поверхности оболочки во втором варианте также оказались заниженными по сравнению с первым вариантом. Анализируя меридиональные напряжения в сечении II, вычисленные со стороны цилиндра, можно отметить, что напряжение на срединной поверхности σ_m^{cp} (которое равно среднему арифметическому на наружной и внутренней поверхностях) также должно быть равным значению 6,25 МПа, вычисленному из условия равновесия. В первом варианте среднее арифметическое точно равно 6,25 МПа, во втором варианте — 13 МПа (для «shell 63») и 16,6 МПа (для «shell 93») при сетке узлов 60×30. Таким образом, можно сделать вывод, что первый вариант более предпочтителен.

Если геометрические параметры примыкающих оболочек изменить, приняв значение C равным 0,06 м, а $0 \leq x_1 \leq 0,03\pi$ м, то кривизна меридианов существенно увеличится. Результаты повариантных расчетов при

измененных геометрических параметрах примыкающих оболочек представлены в табл. 3 и 4 соответственно. Сопоставительный анализ табличного материала показывает, что во втором варианте меридиональные на-

Таблица 3

Сечение	Параметры НДС, МПа	Сетка дискретизации				Точное решение, МПа
		1×24	1×48	1×96	1×144	
I	σ_m^H	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
	σ_m^B	6,26	6,25	6,25	6,25	
II	σ_k^H	225,2	225,2	225,2	225,2	225,0
	σ_k^B	225,2	225,2	225,2	225,2	
III	σ_m^{cp}	1801,8 -1789,3	1833,0 -1820,5	1839,4 -1826,9	1840,8 -1828,3	—
	σ_k^H	164,9 -912,4	172,3 -923,7	173,9 -926,0	174,2 -926,5	
IV	σ_m^H	71,67 -27,76	23,4 -28,8	4,87 -6,69	1,67 -2,28	0,00
	σ_k^B	630,7 600,9	618,8 603,1	613,7 610,2	612,8 611,6	
	σ_m^B	0,92 -0,77	0,086 -0,075	0,0067 -0,0057	0,0015 -0,0012	0,00
	σ_k^H	643,0 986,3	644,3 986,9	644,7 987,1	644,7 987,1	

Таблица 4

Сече- ние	Парамет- ры НДС, МПа	Сетка дискретизации								Точное решение, МПа	
		40×30		60×30		80×30		160×30			
		Shell 63	Shell 93	Shell 63	Shell 93	Shell 63	Shell 93	Shell 63	Shell 93		
I	σ_m^H	7,53	7,09	7,53	7,08	7,53	—	7,52	—	6,25	
	σ_m^B	7,65	6,94	7,65	6,93	7,64	—	7,64	—		
II	σ_k^H	224,9	224,9	244,9	224,9	224,8	—	244,9	—	225,0	
	σ_k^B	224,8	225	224,8	225	224,8	—	244,8	—		
III	σ_m^{cp}	1446 -1276	1479 -1322	1470 -1286	1457 -1299	1489 -1297	—	1526,0 -1322	—	6,25	
	σ_k^H	-368	-344	-336	-359	-310	—	-272,8	—		
IV	σ_k^B	-391	-438	-419	-412	-443	—	-478,3	—	0,00	
	σ_m^H	-17,6 -14,3	-46,1 -199	-15,7 -14,2	-50,4 -355	-14,9 -13,2	—	-19,26 -11,21	—		
	σ_k^B	731,8 738,6	387,3 1201	735,3 737,5	351,8 1206	738,3 734,9	—	751,3 722,4	—	—	
	σ_m^B	0,18 -2,35	-0,06 -2,52	0,12 -2,39	-0,04 -2,51	0,087 -2,41	—	0,041 -2,44	—		
	σ_k^H	814,7 820,8	810,5 811,7	813,3 817,7	810,1 811,3	812,4 816,2	—	811,1 814,1	—		
	σ_k^B										

пряжения в сечении I не достигают точного значения даже при достаточно густой сетке дискретизации. Причем использование элемента «shell 93» при сетке узлов 80×30 и более приводит к срыву вычислительного процесса, т.е. данный тип элемента не может быть применен к решению данной задачи в принципе. Меридиональные напряжения в узле ветвления меридиана (сечение II) оказываются существенно заниженными (на 21 % и более в зависимости от геометрической формы поверхности), а напряжения на срединной поверхности на порядок отличаются от точного решения (96 МПа против 6,25 МПа) при сетке узлов 80×30 . Кольцевые напряжения во втором варианте на внутренней и внешней поверхностях имеют отрицательные значения (сжатие), что противоречит физическому смыслу решаемой задачи, так как в узле ветвления наблюдается изгибное напряженное состояние. Также следует отметить весьма существенную разницу в численных значениях кольцевых напряжений в сечениях III и IV, что не наблюдалось при расчете оболочечной конструкции с меньшими значениями кривизны меридиана примыкающих оболочек (см. табл. 1 и 2).

Основываясь на вышесказанном, можно сделать окончательный вывод о том, что при расчете сочлененных оболочечных конструкций с большими градиентами кривизны меридианов программный комплекс ANSYS становится неприемлемым из-за существенных погрешностей вычислений. При расчете данного типа оболочечных конструкций следует использовать алгоритм, изложенный в настоящей работе, который сочетает векторную интерполяцию перемещений и корректные кинематические и статические условия сопряжения n оболочек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов. — Л. : Судпромиздат, 1962. — 432 с.
2. Седов, Л.И. Механика сплошной среды [Текст] / Л.И. Седов. — М. : Наука, 1976. — Т. 1. — 535 с.
3. Постнов, В.А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций [Текст] / В.А. Постнов, И.Я. Хархурим. — Л. : Судостроение, 1974. — 344 с.
4. Голованов, А.И. Современные конечно-элементные модели и методы исследования тонкостенных конструкций [Текст] / А.И. Голованов, А.В. Песошин, О.Н. Тюленева. — Казань : Изд-во КГУ, 2005. — 442 с.
5. Зенкевич, О.М. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О.М. Зенкевич. — М. : Мир, 1975. — 542 с.

КЛОЧКОВ Ю.В., д-р техн. наук, проф.; E-mail: klotchkov@bk.ru

Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия

НИКОЛАЕВ А.П., д-р техн. наук, проф.; E-mail: ANPETR40@yandex.ru

Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия

МАРЧЕНКО С.С., канд. техн. наук, доц.; E-mail: marchenkosergey@mail.ru

Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия

ШУБОВИЧ А.А., ст. препод.; E-mail: ShubovichAL@yandex.ru

Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия

Получено после доработки 25.04.11

Klochkov Yu.V., doctor of technical sciences, professor; E-mail: klotchkov@bk.ru, Volgograd State Agricultural Academy, Russia

Nikolaev A.P., doctor of technical sciences, professor; E-mail: ANPETR40@yandex.ru, Volgograd State Agricultural Academy, Russia

Marchenko S.S., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: marchenko-sergey@mail.ru, Volgograd State Agricultural Academy, Russia
Shubovich A.A., senior lecturer; E-mail: ShubovichAL@yandex.ru, Volgograd State Agricultural Academy, Russia

**ANALYSIS OF SHELLS OF ROTATION
WITH BRANCHING MERIDIAN BASED ON QUADRANGULAR
FINITE ELEMENT DIFFERENT VERSIONS
OF INTERPOLATION DISPLACEMENT FIELDS**

In this paper we present an algorithm of calculation of shells of revolution with a branching meridian using as an element discretization of a curvilinear quadrangle with eighteen degrees of freedom at a node, interpolation depending on which are formed on the basis of the vector method of interpolation of displacements. To verify the algorithm developed a comparative analysis of finite element solutions obtained using the ANSYS software, and the solutions found by using the proposed algorithm.

Key words: shell of rotation, finite element method, vector of displacement, matrix stiffness, shallow shell, software complex, scalar approximation, vector approximation.

REFERENCES

1. Novozhilov, V.V. The theory of thin shells [Text] / V.V. Novozhilov. — L. : Sudpromizdat, 1962. — 432 p.
2. Sedov, L.I. Mechanics continuous of environment [Text] / L.I. Sedov. — M. : Science, 1976. — V. 1. — 535 p.
3. Postnov, V.A. Finite element method in calculations of ship structures [Text] / V.A. Postnov, I.Ya. Harhurim. — L. : Shipbuilding, 1974. — 344 p.
4. Golovanov, A.I. Current finite element models and methods of thin-walled structures [Text] / A.I. Golovanov, A.V. Pesoshin, O.N. Tuleneva. — Kasan: Kazan Univ. Publ., 2005. — 442 p.
5. Zenkevich, O.M. Finite element method in engineering [Text] / O.M. Zenkevich. — M. : Mir, 1975. — 542 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327:666.97–16

В.И. КАЛАШНИКОВ, Д.М. ВАЛИЕВ, Е.В. ГУЛЯЕВА, В.М. ВОЛОДИН

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫЕ ПРОПАРИВАЕМЫЕ ПЕСЧАНЫЕ БЕТОНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рассмотрены прочностные свойства и консистенция порошково-активированных бетонных смесей для высокопрочных песчаных бетонов нового поколения. Показано значительное снижение удельного расхода цемента в килограммах на единицу прочности ($\bar{C}_R^{\text{уд}}$, кг / МПа) в бетонах нового поколения по сравнению с другими бетонами, производимыми в России. Тепловая обработка ускоряет набор прочности бетонов как с реакционно-активным микрокремнеземом, так и без него, обеспечивая за тепловой цикл прочность бетонов, близкую к прочности бетонов нормального твердения.

Ключевые слова: бетон, активация порошками, тепловая обработка, микрокремнезем, удельный расход цемента, реологическая активность.

Под термином «бетоны нового поколения» следует понимать бетоны с новым составом компонентов и другим структурно-топологическим строением по сравнению с бетонами старого поколения. Такие бетоны обеспечивают низкий удельный расход цемента на единицу прочности ($\bar{C}_R^{\text{уд}}$, кг/МПа) или, соответственно, высокую удельную прочность на единицу расхода цемента ($R_{\text{ц}}^{\text{уд}}$, МПа/кг) за счет усиления действия суперпластификаторов (СП) и гиперпластификаторов (ГП), добавления в состав бетонов тонкодисперсных и тонкозернистых компонентов. И это относится к бетонам как низких классов прочности В30–В40, так и высоких — В140–В160. Для высокопластичных и самоуплотняющихся бетонов такие свойства достигаются в присутствии значительного количества порошково-минерального наполнителя, тонкозернистого песка фракции 0,16...0,63 мм и высокоэффективных СП, обеспечивающих особые реологические свойства бетонных смесей и максимальное водоредуцирующее действие.

Малые удельные расходы цемента, равные 2,0...5,0 кг / МПа, свойственны бетонам нового поколения различных видов: порошковым, реакционно-порошковым с микрокремнеземом (МК), мелкозернистым (песчаным) и щебеночным — с тем лишь отличием, что верхние значения $\bar{C}_R^{\text{уд}}$ относятся к песчаным, которые, как известно, являются более цементоемкими. Концепция снижения расхода цемента в полной мере соответствует глобальной стратегии уменьшения эмиссии углекислого газа при производстве портландцемента, которая оценивается в количестве более 5 % от всех выбросов CO₂ в мире. А производство цемента постоянно наращивается высокими темпами, ориентируясь на производство бетонов старого поколения.

Для порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонов нового поколения важно оптимальное сочетание в бетонной смеси реологической матрицы, состоящей из цемента, высокодисперсного наполнителя и тонкого песка, с мелким заполнителем или песчано-щебеночным заполнителем. Во всех составах песчаных бетонов нового поколения всегда должен быть высокодисперсный компонент, дополнительно добавляемый к цементу для усиления реологического действия супер- и гиперпластификаторов. Для повышения прочности добавляется микро- или нанометрический реакционно-активный стекловидный или аморфный кремнезем.

Бетоны нового поколения — это высокофункциональные бетоны по концепции High Performance Concrete (HPC) [1], которая сформулирована в 1986 г. канадским ученым П.Ц. Айчиным. Ее практическая реализация была осуществлена позже. Бетоны с прочностью 120...140 МПа из высокопластичных смесей начали использовать в практике после 1990 г. За последние 15 лет произошел кардинальный прорыв в технике бетона.

В перспективе самыми прочными будут порошковые бетоны, у которых поверхности раздела между цементирующим веществом и заполнителем минимальные. Экспериментально показано, что прочность порошковых бетонов достигает 180...200 МПа, а пропаренных — 200...270 МПа.

В бетонах нового поколения обязательно присутствие значительного количества дисперсных микроразмерных (нижний и средний микрометрический уровень от 1 до 100 мкм) наполнителей, увеличивающих совместно с цементом (той же или более высокой дисперсности) объем водо-дисперсной реологической матрицы. Таким образом, порошкообразные микрометрические наполнители являются реологически-активными добавками в смеси с цементно-водной пластифицированной дисперсией. Наноразмерными добавками, определяющими более эффективные технологии в бетоне, могут быть только наносиликатные кремнеземы — конденсированные, пирогенные и химически-осажденные. Механизм их действия связан не столько с нанометрическим зародышеобразованием на них предшественников кристаллов новообразований, а с химической реакцией с ними гидролизной извести. Только эта реакция позволит получить дополнительное количество цементирующего вещества в «пустом» пространстве капиллярных и гелевых пор в виде прочного тобермарита, а при прогреве и более прочных ксонотлита, трускотита с малым количеством гидратной воды.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства на протяжении 15 лет занимаются созданием и исследованием высокопрочных бетонов нового поколения [1, 2]. Здесь впервые в России получены и реализованы совместно с ООО «Новые технологии строительства» (г. Красноярск-45) особо высокопрочные порошковые бетоны с $R_{сж} = 150...200$ МПа.

На основе порошковой активации бетонных смесей с микрокремнеземом было изготовлено 8 составов порошково-активированных мелкозернистых (песчаных) бетонов (ПАМБ), показавших высокие физико-механические характеристики и ориентированных на заводское производство. Твердение бетонных образцов производилось при нормальных условиях в течение 28 сут и тепловлажностной обработке продолжительностью не более 13 ч [3].

При изготовлении бетонов использовали цемент М500ДО(Ц), песок кварцевый молотый (Π_m), песок тонкий фракции 0,16...0,63 мм (Π_t), песок-заполнитель (Π_3), гиперпластификатор Melflux 2651F с содержанием его 0,9 % от цемента, гранулированный микрокремнезем Новокузнецкого завода ферросилиция.

Бетоны изготавливали по специальной технологии, заключающейся в том, что порошковую смесь ($\text{Ц} + \text{П}_m + \text{П}_t$) дозировали в воду затворения с растворенным ГП при постоянном перемешивании в высокоскоростной мешалке в течение трех минут. Затем добавляли обычный песок-заполнитель с модулем крупности $M_k = 1,7\dots1,9$ и дополнительно перемешивали при меньшем числе оборотов мешалки.

Консистенцию бетонной смеси в зависимости от требуемой подвижности и жесткости определяли по осадке стандартного конуса и по методу Красного (ГОСТ 10181.1–81). Высокопластичные бетонные смеси уплотняли кратковременным вибраторием, малопластичные — более продолжительным вибраторием. Образцы с нормальными условиями твердения хранили в камере нормального твердения в течение 28 сут, а испытывали через 1, 7 и 28 сут. Образцы для определения прочности при пропаривании испытывали через 24 ч с момента изготовления и после последующего хранения в течение 27 сут.

Для каждого состава подбирался режим тепловой обработки. Все пропариваемые бетоны выдерживались в течение 12 ч до тепловой обработки. Порошково-активированный бетон (ПАМБ-44) не пропаривался и содержал МК в количестве 10 % от цемента. Тепловлажностная обработка состава ПАМБ-46 производилась по следующему режиму: подъем температуры до 80 °С в течение 4 ч, изотермическая выдержка при $t = 80$ °С 5 ч, остывание 2 ч. Режим тепловлажностной обработки для образцов бетона ПАМБ-48 и ПАМБ-49 1 + 10 + 2 ч. Малоцементный бетон ПАМБ-145 с повышенным расходом МК (24 % от Ц) пропаривался по режиму: 1 ч 15 мин + 6 ч 45 мин + 2 ч = 10 ч, изотермия — при температуре 90 °С.

Для оценки эффективности пропаривания бетонов удобно использовать коэффициент эффективности цементов при пропаривании, который равен отношению активности цемента при пропаривании по ГОСТ 310.4–81 к активности цемента нормального твердения в возрасте 28 сут по ГОСТ 310.4–81. Для высокоактивного цемента коэффициент эффективности при пропаривании должен быть не ниже 0,68. Прочность бетонных изделий при отгрузке потребителю должна быть не менее 70 % от проектной (28-суточной) прочности для изделий из бетона на портландцементе. Соответственно коэффициент эффективности при пропаривании будет равен 0,7.

Результаты испытания бетонов представлены в таблице. Так, пропариваемый порошково-активированный мелкозернистый бетон ПАМБ-46, изготовленный из бетонной смеси подвижностью П-1 (ГОСТ 10181.1–81), матрица которого включала кроме МК дополнительно молотый песок и тонкий (тонкозернистый) песок фракции 0,16…0,63 мм. Он имел нормированную прочность при нормальных условиях твердения 129,2 МПа и при тепловлажностной обработке 108,4 МПа. Удельные расходы цемента на единицу прочности составили соответственно 4,8 и 5,7 кг/МПа. В порошково-активированном мелкозернистом бетоне ПАМБ-48 был снижен расход цемента с 614 до 475 кг/м³, исключен МК с корректировкой порошковой матрицы, т.е. с увеличением содержания молотого и тонкого песка и повышением расхода песка-заполнителя. При этом удельный расход цемента на единицу прочности понизился и составил $\text{Ц}_{R\text{уд}} = 4,3$ кг/МПа. Сниженный расход воды в пропаренных образцах из бетона ПАМБ-49 позволил повысить прочность и снизить удельный расход цемента на единицу прочности до 4,2 кг/МПа по сравнению с ПАМБ-48.

В малоцементном бетоне ПАМБ-145 с повышенным расходом МК, как видно из таблицы, прочность при нормальных условиях твердения составила 61,2 МПа. В пропаренном составе ПАМБ-145 достигну-

Составы и прочностные свойства песчаных бетонов

Наименование компонентов и характеристики бетонной смеси и бетона	ПАМБ-44	ПАМБ-46	ПАМБ-48	ПАМБ-49	ПАМБ-145	МЗБ-Д2*		
Цемент, кг	602	614	475	475	268	550		
Микрокремнезем, кг (% от Ц)	60,2(10)	60,5(10)	—	—	75(24)	—		
Π_m , кг	301	310	360	360	142	—		
Π_t фр. 0,16...0,63 мм, кг	278	310	369	369	497	—		
Π_3 фр. 0,63...5 мм, кг	961	968	992	992	—	—		
Отсев от ПГС (Казань) фр. 0,63...5 мм, кг	—	—	—	—	997	—		
Отсев дробления альбитафиров, $M_k = 3,55$ кг	—	—	—	—	—	1507		
Гиперпластификатор Melflux 2651F, кг	5,4	5,6	4,3	4,3	2,4	—		
Маршалит, кг (% от Ц)	—	—	—	—	—	66(12)		
C-3, кг (% от Ц)	—	—	—	—	—	5,5(1)		
Вода, кг	175	189	158	134	164	220		
B/Ц	0,29	0,30	0,33	0,29	0,61	0,40		
B/T	0,079	0,080	0,072	0,063	0,083	0,104		
B/(Ц + МК)	0,260	0,278	0,330	0,290	0,475	—		
Прочность на сжатие при нормальных условиях твердения, МПа	Сроки испытания, сут	1	53	80,0	42,1	46,8	19,1	22,2
		7	104	109,6	99,2	99,6	41,6	57,2
		28	125,2	129,2	110,4	114,8	61,2	73,9
Прочность на растяжение при изгибе при нормальных условиях твердения, МПа		1	8,99	10,1	7,8	12,3	5,8	—
	Сроки испытания, сут	7	10,1	15,2	10,4	12,8	8,1	—
		28	12,4	16,7	10,7	12,9	10,4	—
Прочность на сжатие при пропаривании, МПа	Сроки испытания, сут	1	—	108,4	71,3	102,8	57,4	56,3
		28	—	124	106	111,2	59,1	70,4
Прочность на растяжение при изгибе при пропаривании, МПа	Сроки испытания, сут	1	—	12,4	10,4	11	9,3	—
		28	—	12,4	10,5	12	10,9	—
Удельный расход при нормальных условиях твердения, Ц _R ^{уд} , кг/МПа		4,8	4,8	4,3	4,2	4,4	7,5	
Удельная прочность при нормальных условиях твердения, R _ц ^{уд} , МПа/кг		0,208	0,211	0,233	0,242	0,227	0,135	
Коэффициент эффективности при пропаривании		—	0,84	0,65	0,9	0,93	0,95	
Консистенция смеси		П-2	П-1	П-5	Ж-1	П-4	П-2	

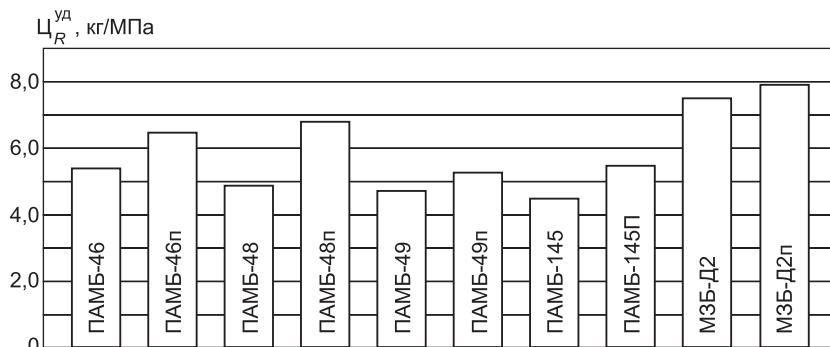
* Мелкозернистый бетон с комплексными модификаторами [4].

та прочность 59,1 МПа, коэффициент эффективности при пропаривании 0,93. Несмотря на то, что у образцов ПАМБ-145, испытанных в первые сутки после пропаривания и последующего твердения, прочность была значительно ниже по сравнению с бетонами ПАМБ-46 —

ПАМБ-49, удельный расход цемента на единицу прочности составил 4,4 кг / МПа.

Для сравнения представлен мелкозернистый бетон с комплексными модификаторами, предложенный в работе [4]. Порошково-активированные мелкозернистые бетоны нового поколения с более низкими удельными расходами цемента ($475 \text{ кг} / \text{м}^3$) без МК по удельному расходу цемента более экономичны. Расходы цемента в разработанных бетонах снижены на 14 % с повышением прочности при нормальных условиях твердения на 49–56 % по сравнению с бетоном МЗБ Д2, а при пропаривании на — 52–59 %.

Таким образом, порошковое активирование мелкозернистых песчаных бетонов позволяет существенно повысить их прочность и довести ее до прочности щебеночных бетонов старого поколения или значительно превысить ее. Существенно то, что после тепловлажностной обработки коэффициент эффективности пропаривания превышает 0,7 и достигает 0,9...0,93, что важно для заводской технологии. Удельный расход цемента на единицу прочности становится сопоставимым с щебеночными бетонами старого поколения, изготовленными с суперпластификаторами (см. рисунок). Исключение из состава бетонов щебня — очень важный экономический фактор для изготовителей бетонов, работающих на привозных



Удельный расход цемента на единицу прочности при нормальных условиях твердения

щебнях (Пензенская, Тамбовская, Саратовская, Мордовская и другие области). Переход на песчаные бетоны нового поколения обоснован и технически и экономически с достижением марок М1000–М1100 даже без использования реакционно-активных пущколонических добавок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айчин, П.Ц. Пешеходный мост Шербрук с велосипедной дорожкой [Текст] / П.Ц. Айчин, П. Ричард // 4-й Междунар. сим. по применению высокопрочного высококачественного бетона. — Париж, 1996. — С. 1399–1406.
2. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Стройт. материалы. — 2008. — № 10. — С. 4–6.
3. Калашников, В.И. Влияние режима тепловой обработки на кинетику набора прочности высокопрочного бетона [Текст] / В.И. Калашников, В.С. Демьянова // Изв. вузов. Строительство. — 2000. — № 2–3. — С. 21–25.
4. Ананенко, А.А. Мелкозернистые бетоны с комплексными модификаторами [Текст] / А.А. Ананенко, В.В. Нижевясов, А.С. Успенский // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 5. — С. 42–46.

КАЛАШНИКОВ В.И., д-р техн. наук, проф., E-mail: techbeton@pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ВАЛИЕВ Д.М., асп., E-mail: damir_vn@mail.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ГУЛЯЕВА Е.В., асп., E-mail: gulyaeva5@gmail.com

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ВОЛОДИН В.М., асп., E-mail: vladimir.versus@gmail.com

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 20.04.11

Kalashnikov V.I., doctor of technical sciences, professor; E-mail: techbeton@pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Valiev D.M., post-graduate student; E-mail: damir_vn@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Guljaeva E.V., post-graduate student; E-mail: gulyaeva5@gmail.com, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Volodin V.M., post-graduate student; E-mail: vladimir.versus@gmail.com, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

HIGHSTRENGTH POWDER-ACTIVATED SAND CONCRETES WITH CURING PROCEDURES OF A NEW GENERATION

My graduation work analyses the strength properties and the consistence of powder-activated concrete mixtures for high-strength sand (fine) concretes of a new generation. It demonstrates a significant reduction in the specific expense of cement in kg per unit of strength Cem_R^{SPEC} , kg/MPa the concretes of a new generation in comparison with existing concretes made in Russia. The thermal treatment hastens the development of concrete strength either with reaction-active silica fume or without it, so that within a thermal cycle the concrete obtains the strength close to the strength of concretes at normal curing.

Key words: concrete, activation by powders, thermal treatment, silica fume, specific expense of cement, reological activity.

REFERENCES

1. Aichin, P.C. The pedestrian bikeway bridge of sherbrooke [Text] / P.C. Aichin, P. Richard // 4th Intern. Sim. of Utilization of High Strength / High Performance Concrete. — Paris, 1996. — P. 1399–1406.
2. Kalashnikov, V.I. The calculation structure of components of selfcompacting of high strength concretes [Text] / V.I. Kalashnikov // Stroitelnye materialy. — 2008. — N 10. — P. 4–6.
3. Kalashnikov, V.I. Influence of modes curing procedures on a set of durability of high strength concretes [Text] / V.I. Kalashnikov, V.S. Demyanova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2000. — N 2–3. — P. 21–25.
4. Ananenko, A.A. Fine-grained concrete with the complex modifiers [Text] / A.A. Ananenko, V.V. Nizhevyasov, A.S. Uspensky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 5. — P. 42–46.

УДК 666.64–492.3:66.041.9

С.А. ТОКАРЕВА, В.П. ПЕТРОВ

КИНЕТИКА ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА В ГРАНУЛАХ ПРИ ОБЖИГЕ ГЛИНОЗОЛЬНОГО КЕРАМЗИТА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

Показаны механизм и кинетика горения углерода в гранулах пористых заполнителей при их обжиге во вращающихся печах.

Ключевые слова: горение, газ, графит, углерод, десорбция, графит, диффузия, обжиг.

Одна из причин сравнительно низкого качества глинозольного керамзита — присутствие в нем несгоревших угольных частиц, которые остаются в заполнителе после обжига из-за неудачно подобранного режима термической обработки [1].

Горение углерода вообще, а тем более его горение в керамической обойме является сложным физико-химическим процессом, который можно разбить на пять этапов: а) доставка окислителя из атмосферы к поверхностям раздела фаз путем молекулярной и конвективной диффузии; б) адсорбция молекул окислителя на поверхности графита; в) взаимодействие адсорбированного окислителя с атомами углерода и образование продуктов реакции, также адсорбированных на графите; г) десорбция продуктов реакции; д) удаление (редиффузия) продуктов в атмосферу. Иными словами, этот процесс включает в себя диффузионную, адсорбционную и химическую стадии.

Как известно, количество вещества dM , продиффундировавшего за время $d\tau$ при градиенте концентрации dc/dx в направлении, нормальном к изоконцентрационной поверхности с площадью S , составляет

$$dM = -DS(dc/dx)d\tau. \quad (1)$$

Скорость процесса:

$$v = dM/d\tau = -DS dc/dx, \quad (2)$$

где $D = kl(l/\tau)$ — коэффициент диффузии;

l — длина свободного пробега молекулы;

l/τ — средняя скорость движения молекул;

k — коэффициент, величина которого зависит от геометрических условий блуждания молекулы.

Если известен коэффициент диффузии при температуре T_1 , то коэффициент диффузии при температуре T_2 можно определить из выражения

$$D_{T_2}/D_{T_1} = (T_2/T_1)n, \quad (3)$$

где $n = 1,5$ — для идеальных или очень разреженных газов, $n = 1,7$ — для реальных газов, $n = 2,0$ — для паров воды.

Условия доставки окислителей и отвода продуктов реакций от поверхности графита во многом зависят от характера макропотоков дымовых газов. Различают два случая: 1) ламинарное течение макропотока (у этого потока отсутствует составляющая, перпендикулярная границе раздела фаз, и поэтому ламинарный поток не увеличивает диффузию); 2) турбулентное течение конвективного потока, которое характеризуется сложной траекторией движения струек газа. Как известно, различие между ламинарным и турбулентным потоками устанавливается по коэффициенту Рейнольдса. Согласно расчетам движение дымовых газов во вращающейся печи является ламинарным, а в печи «кипящего слоя» — турбулентным. Однако даже в турбулентном потоке у поверхности гранул и тем более в поровом пространстве существуют два тонких слоя: ламинарный и диффузионный. Через последний осуществляется только молекулярная диффузия. Конвективная диффузия (макродиффузия), протекающая в газовом потоке, имеет более высокую скорость, чем молекулярная диффузия (микродиффузия).

Таким образом, для ускорения процесса горения углерода необходимо уменьшать слои и молекулярной, и ламинарной диффузии, что достигается увеличением скорости потока, уменьшением размера гранул и размера зерен графита. При заданных условиях производства (обжиг ведется в печах «кипящего слоя» или во вращающихся печах, потребителем задан размер гранул и т.д.) единственным средством ускорения выжигания избыточного количества углерода остается уменьшение зерен графита.

Графит, как и любое твердое кристаллическое вещество, на поверхности имеет некомпенсированные заряды, которые способны притягивать (адсорбировать) молекулы газовой фазы. Силы притяжения имеют различную природу, обусловленную как характером поверхности графита (базисная плоскость или поверхность, перпендикулярная ей), так и характером строения адсорбирующихся молекул. Необходимо отметить, что несгоревшие угольные частицы содержат набор кристалликов графита самых разнообразных, но очень малых размеров. Это обстоятельство не только увеличивает общую поверхность соприкосновения с газовой фазой, но, что особенно важно, оказывает влияние на энергетическое состояние атомов в решетке. Атомы углерода в неоформившихся плоскостях и краевые атомы нормальных базисных плоскостей энергетически связаны с соседями иначе, чем остальные (центральные в базисных плоскостях). Они отличаются особой ненасыщенностью связей, сближающих их с газообразным углеродом [1].

Столь же разнообразно силовое поле молекул газа, принимающих участие в адсорбционном акте. Например, молекулы воды имеют достаточно большой дипольный момент, обеспечивающий их адсорбцию на поверхности твердого тела. И хотя у молекул CO и CO₂ он очень мал, а молекулы O₂ и H₂ его вообще не имеют, большое значение имеет дисперсионный эффект, который возникает в частицах независимо от ее симметричности или асимметричности.

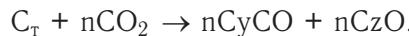
Согласно Есину и Гельду [2], в зависимости от остаточной валентности различают три возможных варианта образования оксидов углерода: А — атомы углерода находятся внутри базисной плоскости, связаны с ней тремя валентными связями и имеют одну свободную валентность; Б — атомы углерода находятся по краям базисной плоскости и имеют две остаточные валентности; В — наиболее активные атомы углерода, они имеют только одну валентную связь с решеткой и три свободные валентности. Комплекс «А», являющийся наиболее устойчивым, существует

при давлениях кислорода ниже 2 мм рт. ст. и высоких температурах. Комплекс «Б» возникает при более высоких давлениях и низких температурах. Наконец, комплекс «В» возникает при температурах 400...700 °C; при температурах выше 900 °C он разлагается с выделением смеси газов: CO + CO₂. Таким образом, при температурах выше 400...600 °C физическая и химическая адсорбция сливаются в один акт хемадсорбции.

Рассмотрим механизм взаимодействия углерода с окислителями более подробно.

Взаимодействие углерода с диоксидом углерода и парами воды. Обе реакции идут с поглощением тепла, и поэтому механизм взаимодействия компонентов у этих реакций достаточно схож.

При температурах 400...500 °C физическая адсорбция диоксида углерода на поверхности графита уступает место хемадсорбции без выделения CO. Такая хемадсорбция CO₂ приводит к возникновению на поверхности графита двух комплексов: кетенного C = C = O и кето < C = O, что схематически представляется следующим уравнением:



С повышением температуры кетенные комплексы становятся неустойчивыми и при температурах 600...700 °C покидают поверхность графита, а на их месте возникают новые кетенные комплексы. Первые разлагаются с выделением CO. При температурах выше 700 °C количество образующихся и исчезающих комплексов становится одинаковым. На каждый моль израсходованного CO₂ образуется один моль CO. При температурах 900 °C и выше разлагаются уже и кето-комpleксы. Таким образом, на каждый моль израсходованного CO₂ образуется уже два моля CO, т.е. образование CO соответствует обычной стехиометрической записи реакции:



Начиная с температуры 800 °C взаимодействие CO₂ с графитом происходит не только с поверхности. Молекулы CO₂ внедряются в межбазисное пространство и ослабляют связи поверхностных атомов углерода с массой кристалла графита, подготавливая их к взаимодействию с внешними молекулами CO₂ [2].

Согласно Д.А. Франк-Каменецкому [3] реакция CO₂ с C слагается из двух этапов. На первом молекулы CO₂, ударяясь о поверхность графита, приводят к образованию адсорбированного и газообразного оксида углерода. Эта часть реакции идет по схеме реакции первого порядка. Второй этап — десорбция адсорбированного оксида углерода: реакция идет по схеме реакции нулевого порядка.

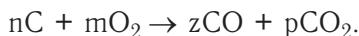
Многочисленными экспериментами, проведенными в условиях глубокого вакуума, доказано, что в результате реакции H₂O с C образуются только CO и H₂ и притом только в эквимолекулярных количествах [2]. Считается доказанным, что в температурном интервале 750...1050 °C молекулы воды, ударяясь о поверхность графита, распадаются на кето-комплексы (CO)_{адс} и адсорбированные атомы водорода (H)_{адс}:



Адсорбционный комплекс (H)_{адс} более прочен, чем «кето»-комплекс (CO)_{адс}. Пока существует второй комплекс, первый комплекс не разлагается. Поэтому реакция C + H₂O протекает, как и реакция C + CO₂, через

распад кето-комплексов. Обе реакции имеют одинаковую энергию активации $E = 30$ кДж/моль и одинаковые скорости реакции.

Взаимодействие углерода с кислородом. Данный процесс подробно исследован в работе [1]. Механизм взаимодействия углерода с кислородом можно представить следующим образом. Молекулы кислорода, ударяясь о поверхность графита, образуют в результате взаимодействия с ним адсорбционный комплекс, который затем разлагается с образованием CO и CO₂. Соотношение между объемами возникающих молей зависит от ряда условий: дисперсности графита, присутствия летучих, минеральных частиц и проч. Общее уравнение, отражающее некоторую неопределенность прохождения реакции, может быть записано в следующем виде:



Кроме этой реакции при анализе процесса горения необходимо учитывать следующее:



При низких температурах концентрация продуктов реакции изменяется незначительно вследствие медленного гомогенного горения оксида углерода. Поэтому молекулы кислорода имеют возможность достигать поверхности графита и взаимодействовать с ним. В окислительной зоне идет реакция 2CO + O₂ = 2CO₂, в восстановительной — реакция C + CO₂ = 2CO. Догорание CO происходит вне гранулы — в ядре газового потока над гранулой.

При повышении температуры возрастает скорость адсорбционно-химической стадии и процесс горения лимитируется диффузией. В этот период состав газа в ядре потока существенно отличается от состава на поверхности графита. Взаимная диффузия кислорода к графиту и смеси CO + CO₂ в ядро газового потока обусловливает догорание CO в ламинарном слое, окружающем гранулу. В ламинарной пленке, окружающей гранулу, концентрация CO₂ максимальна, поэтому CO₂ диффундирует в двух направлениях: к ядру газового потока и к частицам графита. Окисление углерода происходит преимущественно по реакции C + CO₂.

Эта реакция, как уже отмечалось, является эндотермической, идет с поглощением тепла. Благодаря этому поверхность графита, а следовательно, и гранул имеет более низкую температуру, чем ламинарная пленка, где идет догорание CO. Эта разница по разным источникам может достигать от 300 до 500 °C.

Для проверки данного положения были выполнены следующие опыты. В соответствии с известной методикой готовили гранулы размером 16 мм с разным содержанием несгоревших угольных частиц (НУЧ). Гранулы высушивали в сушильном шкафу при температуре 200 °C и затем помещали на поддон лабораторной печи. Печь представляет собой вертикальную шахту, снабженную десятью силовыми стержнями, подключенными к двум трансформаторам. Устройство печи позволяло в разных зонах поддерживать температуру заданной величины. Температуру среды возле гранул фиксировала термопара, установленная на поддоне. Эксперименты повторяли, меняя расстояние от термопары до гранулы.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1, они подтверждают факт того, что возле гранул наблюдается повышение температуры, несомненно, обусловленное сгоранием CO. Вокруг гранулы образуется пла-

Таблица 1
Температура среды, окружающей гранулу
на расстоянии, мм

Показания термопары 1, °C	Показания термопары 5	
	Расстояние между термопарой и гранулой, мм	Показания термопары, °C
900	2	950
	5	900
800	2	840
	5	800

термопарой с помощью каретки перемещали в зону с температурой 500 °C, где выдерживали ее в течение 5 мин, а затем — в зону печи с температурой 900 °C и фиксировали динамику изменения температуры внутри гранулы.

Опыты показали следующее: чем выше начальное содержание графита, тем больше разница между температурами среды (печи) и сердцевины гранулы, особенно в первый период обжига. По мере выгорания графита из гранулы происходит выравнивание температур. После полного выгорания графита температура внутри гранулы становится равной температуре печи. Нагрев гранулы, не содержащей графит, до температуры печи (900 °C) происходит за две минуты. Поэтому разницу между температурами печи и гранулами после 2...2,5 мин прогрева можно считать обусловленной присутствием в гранулах графита. Эта разница в первый период может составлять 200...250 °C.

При выпуске опытной партии глинозольного керамзита на основе шихты, состоящей из смышляевской глины — 50 % и золы Тольяттинской ТЭЦ — 50 %, были выполнены измерения температуры в печном пространстве, в слое и над слоем гранул. Начальное содержание графита в шихте составляло 4,47 %.

Среднюю температуру в печной среде измеряли термопарами, установленными в печи напротив друг друга и сообщающимися со вторичными приборами с помощью кольцевого питателя. Температуру над слоем гранул замеряли с помощью оптического пирометра, температуру в слое гранул — термопарами, вмонтированными в теплоизолированную емкость — «термокружку». Пробоотборники расположены по длине печи в местах, удобных для отбора проб материала. Всего на печи их было смонтировано 3 шт. Для анализа отбирали также пробы на выходе из печи. Поскольку в шихте содержание графита было достаточно большим, обжиг гранул производили в два этапа. Вначале сформованные и подсушенные в сушильном барабане гранулы пропускали по печи, нагретой в зоне максимальных температур до температуры 950 °C, затем после охлаждения гранулы вновь пропускали по печи, но с температурой в зоне максимальных температур, равной 1160 °C (температура вслучивания). Таким образом, температуру гранул измеряли в восьми точках по мере их прохождения по тепловым агрегатам. Измерения температур производили после стабилизации процесса, обычно после 2...2,5 ч работы тепловых агрегатов с начала загрузки исследуемым материалом. Результаты опытов представлены в табл. 2, где помещены также результаты определения содержания графита.

Полученные результаты достаточно убедительно доказывают, что окончательное сгорание оксида углерода происходит вне гранул, вне слоя

мя, которое видно невооруженным глазом при начальном содержании НУЧ более 2–3 %.

У части предварительно высушенных гранул просверливали отверстие размером 5 мм и вставляли в него термопару, точнее — насаживали гранулу на термопару. Гранулу с термопарой с помошью каретки перемещали в зону с температурой 500 °C, где выдерживали ее в течение 5 мин, а затем — в зону печи с температурой 900 °C и фиксировали динамику изменения температуры внутри гранулы.

Опыты показали следующее: чем выше начальное содержание графита, тем больше разница между температурами среды (печи) и сердцевины гранулы, особенно в первый период обжига. По мере выгорания графита из гранулы происходит выравнивание температур. После полного выгорания графита температура внутри гранулы становится равной температуре печи. Нагрев гранулы, не содержащей графит, до температуры печи (900 °C) происходит за две минуты. Поэтому разницу между температурами печи и гранулами после 2...2,5 мин прогрева можно считать обусловленной присутствием в гранулах графита. Эта разница в первый период может составлять 200...250 °C.

При выпуске опытной партии глинозольного керамзита на основе шихты, состоящей из смышляевской глины — 50 % и золы Тольяттинской ТЭЦ — 50 %, были выполнены измерения температуры в печном пространстве, в слое и над слоем гранул. Начальное содержание графита в шихте составляло 4,47 %.

Среднюю температуру в печной среде измеряли термопарами, установленными в печи напротив друг друга и сообщающимися со вторичными приборами с помощью кольцевого питателя. Температуру над слоем гранул замеряли с помощью оптического пирометра, температуру в слое гранул — термопарами, вмонтированными в теплоизолированную емкость — «термокружку». Пробоотборники расположены по длине печи в местах, удобных для отбора проб материала. Всего на печи их было смонтировано 3 шт. Для анализа отбирали также пробы на выходе из печи. Поскольку в шихте содержание графита было достаточно большим, обжиг гранул производили в два этапа. Вначале сформованные и подсушенные в сушильном барабане гранулы пропускали по печи, нагретой в зоне максимальных температур до температуры 950 °C, затем после охлаждения гранулы вновь пропускали по печи, но с температурой в зоне максимальных температур, равной 1160 °C (температура вслучивания). Таким образом, температуру гранул измеряли в восьми точках по мере их прохождения по тепловым агрегатам. Измерения температур производили после стабилизации процесса, обычно после 2...2,5 ч работы тепловых агрегатов с начала загрузки исследуемым материалом. Результаты опытов представлены в табл. 2, где помещены также результаты определения содержания графита.

Полученные результаты достаточно убедительно доказывают, что окончательное сгорание оксида углерода происходит вне гранул, вне слоя

Таблица 2

Изменения температуры газовой среды в слое и над слоем гранул и содержания графита в процессе тепловой обработки гранул во вращающейся печи

№ точки отбора проб	Температура, °C		Содержание графита, %	
	над слоем гранул	в слое гранул	в корочке гранулы	в сердцевине гранулы
1	500	200	4,5	4,5
2	800	400	4,4	4,5
3	1000	800	4,0	4,3
4	850	750	3,8	4,0
5	500	250	3,0	3,3
6	900	650	1,8	2,1
7	1200	1000	1,2	1,5
8	1000	1000	0,6	0,7

гранул. Пока в гранулах содержится значительное количество углерода, в слое гранул преобладает восстановительная среда, содержащая преимущественно CO и CO₂. В первый период прогрева гранул разница в температурах газовой среды в печи над слоем гранул и в слое гранул составляла 200...400 °C. Выравнивание температур происходит только после значительного выгорания графита из гранул, когда его количество становилось меньше 0,7 %.

Воспламенение угля происходило при температуре примерно 400 °C. Горение угля со светящимся пламенем над слоем гранул продолжалось в зоне с температурой 500...600 °C; пламя исчезало при $t = 700\ldots800$ °C. При повторном обжиге видимое пламя вновь возникало при $t = 500\ldots600$ °C. Отметим, что пока в гранулах присутствовали летучие, графит в гранулах не окислялся. Удаление графита из сердцевины гранул происходило с запаздыванием по сравнению с удалением его из корочки. Во вращающейся печи в слое гранул поддерживается восстановительная среда, поэтому горение CO со светящимся факелом происходило в пространстве печи, над слоем гранул.

Итак, горение графита в сырцовых гранулах представляет собой достаточно сложный физико-химический процесс. Согласно законам химической кинетики скорость окисления графита в гранулах может быть описана следующим уравнением:

$$v = k \cdot c_A^{n_1} \cdot c_B^{n_2}, \quad (4)$$

где n_1 — порядок реакции по графиту;

n_2 — порядок реакции, например, по диоксиду углерода;

сумма $n_1 + n_2 \rightarrow$ общий порядок реакции — сумма показателей степени при концентрациях в кинетическом уравнении реакции.

Порядок реакции определяли по результатам лабораторных и промышленных экспериментов, например, помещенным в табл. 2, путем подстановки их в уравнения реакций первого и второго порядков.

Известно, что реакция первого порядка описывается следующим уравнением:

в дифференциальной форме

$$-dc/d\tau = kc \quad (5)$$

и в интегральной форме

$$k = (1/\tau) \ln (c_0/c), \quad (6)$$

где c_0 — начальная концентрация исходного вещества (графита);
 c — концентрация графита в момент τ .

Реакция второго порядка:
в дифференциальной форме

$$-dc/d\tau = k c^2, \quad (7)$$

в интегральной форме

$$k = (1/\tau) (1/c - 1/c_0). \quad (8)$$

Расчеты показали, что окисление графита в гранулах при температуре их прогрева в лабораторной печи при 900 °C достаточно надежно описывается уравнениями второго порядка (7) и (8). Величина константы скорости реакции « k » оказалась равной $k = 0,02$ (1/мин)(1/мас. %). После преобразований получили

$$0,02 = (1/\tau)(1/c - 1/c_0) \quad (9)$$

или

$$\tau = 50 (1/c - 1/c_0). \quad (10)$$

Если начальная концентрация графита в грануле составляет 15 %, то его окисление до величины 1,0 % в лабораторной печи при температуре 900 °C произойдет за $\tau = 50 (1/1 - 1/15) = 47$ мин.

После аналогичной обработки результатов промышленных экспериментов получили среднее значение константы для уравнения, описывающего кинетику выгорания углерода из гранул во вращающейся печи: $k = 0,0167$ (1/мин)(1/мас. %). После преобразований получили

$$\tau = 60 (1/c - 1/c_0) \text{ мин.} \quad (11)$$

По этой формуле определяли предельное содержание графита в исходном сырье для технологического процесса, в котором была предусмотрена 40-метровая вращающаяся печь для выжигания углерода из гранул. Предполагалось, что в гранулах после тепловой обработки в печи выжигания содержание графита не должно было превышать 1 %. Именно такое количество графита необходимо для обжига заполнителя в короткой 20-метровой вращающейся печи. Расчеты и опыт работы показали, что при принятых параметрах печи $2,5 \times 40$ м время движения гранул от начала печи до ее конца составляет 40 мин, $\tau = 40$ мин. Тогда, подставляя в (11) $c = 1$ % и $\tau = 40$ мин, получим $c_0 = 3$ %. То есть начальная концентрация графита в гранулах не должна превышать 3 %, если выжигание избытка углерода осуществляется в 40-метровой вращающейся печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П е т р о в, В.П. Теоретические и практические основы получения пористых заполнителей из топливосодержащих отходов промышленности [Текст] / В.П. Петров : дис. ... д-ра техн. наук. — Самара : СГАСУ, 2007. — 420 с.
2. Е с и н, О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1 : Реакции между газообразными и твердыми фазами [Текст] / О.А. Есин, П.В. Гельд. — Свердловск : Металлургия, 1962. — 671 с.

*ТОКАРЕВА С.А., инж.; E-mail: keramzit@saminfo.ru
ЗАО «НИИКерамзит», г. Самара
ПЕТРОВ В.П., д-р техн. наук, проф.
Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 17.05.11

Tokareva S.A., engineer; E-mail: keramzit@saminfo.ru, Jont-Stock Company «NIIKeramzit», Samara, Russia

Petrov V.P., doctor of technical sciences, professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

KINETICS CARBON BURNING IN GRANULES AT ROASTING OF GLINOZOLNOGO EXPANDED CLAY IN ROTATING FURNACES

In this article are shown the mechanism and kinetics carbon burning in granules porous fillers at their roasting in rotating furnaces.

Key words: burning, gas, graphite, carbon, desorption, graphite, diffusion, roasting.

REFERENCES

1. Petrov, V.P. Theoretical and practical bases of reception of porous fillers from a fuel-bearing waste of the industry [Text] / V.P. Petrov : the dissertation ... doctor of technical sciences. — Samara, SSUACE, 2007. — 420 p.
 2. Esin, O.A. Physical chemistry pirometallurgical processes. Pt 1 : Reactions between gaseous and firm phases [Text] / O.A. Esin, P.V. Geld. — Sverdlovsk : Metallurgy, 1962. — 671 p.
-

УДК 691.33:666.913

А.В. ВЕСЕЛОВ, А.Ф. КОСАЧ, Ю.В. БЁРЕЗКИНА,
А.В. АНТОНОВА, О.А. КУЗНЕЦОВ

**ПРОИЗВОДСТВО ГАЗОГИПСА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ
В КАЧЕСТВЕ ГАЗООБРАЗОВАТЕЛЯ**

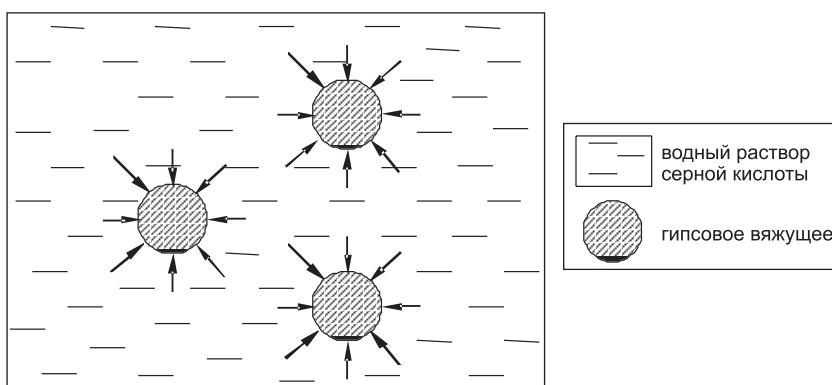
Исследован способ получения газогипса с использованием древесно-опилочного «носителя» серной кислоты в качестве газообразователя.

Ключевые слова: газогипс, гипсовое вяжущее, серная кислота, древесные опилки, газообразователь.

Повышение требований к тепловой защите зданий и энергосберегающие мероприятия в строительстве направлены на сокращение ежегодных затрат на отопление зданий. В современном жилищном строительстве с разными климатическими условиями применяют перспективный материал — газогипс. Использование газогипса позволяет обеспечить экономичность стеновой конструкции, а также понизить ее теплопроводность и сократить ежегодные затраты на отопление зданий.

Создание строительных материалов с заданными теплофизическими свойствами, а именно снижение теплопроводности изделий из газогипса и разработка надежных методов определения теплопроводности изделий на стадии проектирования, весьма актуально.

Один из известных способов получения газогипса — смешивание полуводного гипса, содощелочного плава и концентрированной серной кислоты с последующим затворением полученной гомогенной смеси водой [1]. При этом способе каждая частица известкового и доломитового балласта, содержащегося в гипсовом вяжущем, оказывается погруженной в водный раствор серной кислоты и реагирует с ней всей площадью своей наружной поверхности с выделением газа CO_2 . Реакция взаимодействия протекает до тех пор, пока полностью не прореагирует весь доломито-известковый балласт гипсового вяжущего (рис. 1).



Rис. 1. Схема взаимодействия частиц доломито-известкового балласта гипсового вяжущего с кислотой при традиционной технологии производства газогипса

Основным недостатком традиционной технологии получения газогипса при использовании в качестве газообразователя раствора серной кислоты является значительная разница в скорости и продолжительности реакции взаимодействия известково-доломитового балласта с серной кислотой и сроками схватывания гипсового теста. В результате этого фиксация пористой структуры гипсового теста происходит неравномерно, что приводит к образованию в объеме пористой структуры «рваных» незамкнутых ячеек. Полученный при этом материал практически непригоден к использованию в качестве утеплителя.

Недостатком традиционной технологии также является необходимость непосредственной работы с серной кислотой рабочего персонала, занятого при производстве газогипса. Работа связана с повышенными требованиями к промышленной санитарии и обеспечению условий безопасности производства, а также принятием дополнительных мер по защите от коррозии металлических частей технологического оборудования и оснастки, контактирующих с кислотой.

Все эти недостатки традиционной технологии газогипса сформировали представление о практической непригодности использования водного раствора серной кислоты в качестве газообразователя в промышленном производстве газогипса. В связи с этим исследовалась возможность использования для производства газогипса менее активных кислот средней силы (шавелевой, винной, малеиновой, янтарной и др.) и альтернативных источников газовыделения [2, 3].

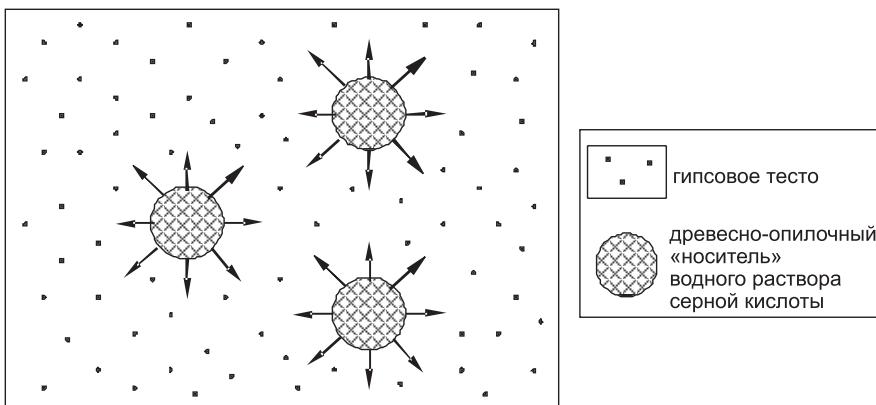
Вместе с тем несомненным преимуществом использования водного раствора серной кислоты в качестве газообразователя при производстве газогипса по сравнению с другими кислотами является то, что степень насыщения гипсового материала в результате его взаимодействия с водным раствором серной кислоты, посторонними новообразованиями крайне незначительна. Это очень важное обстоятельство. Кроме того, среди прочих строительных материалов гипсовый камень считается экологически чистым материалом, уступая по этому показателю только древесине.

В связи с этим цель данных исследований — это создание альтернативной технологии производства газогипса с использованием серной кислоты, не имеющей вышеперечисленных недостатков традиционной технологии.

Для достижения поставленной цели была разработана новая технология доставки и взаимодействия водного раствора серной кислоты с гипсовым вяжущим. Принципиальное отличие предлагаемой интенсивной раздельной технологии от традиционной заключается в способе подачи серной кислоты в гипсовое вяжущее. Суть данной технологии сводилась к тому, что водный раствор серной кислоты, пропитывающий частицы «носителя» из какого-либо пористого материала (в данной технологии из древесных опилок), вводился в гипсовое вяжущее (рис. 2).

Регулирование количества водного раствора серной кислоты возможно доставляемыми в гипсовое вяжущее размерами частиц «носителя» и их объемом. Это в свою очередь позволит регулировать объем и структуру пор, образующихся при взаимодействии раствора кислоты, доставляемого частичкой «носителя», с гипсовым вяжущим, что сказывается на физико-механических показателях производимого газогипсового материала.

На основании выдвинутой рабочей гипотезы о предлагаемой технологии производства газогипса было проведено экспериментальное исследование, в рамках которого проверялась возможность получения газогипса с заданными физико-механическими показателями.



Rис. 2. Схема взаимодействия минерализованной опилочной массы с известково-карбонатным балластом гипсового вяжущего при интенсивной раздельной технологии приготовления газогипсовой смеси

Для проведения исследования использовались следующие материалы:

1. Гипсовое вяжущее марки Г-3 Актюбинского гипсового завода, изготовленное из сырья Борлинского гипсового карьера, характеризующееся показателями:

- содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ — 91,11 %, CaO — 4,4 %, CaCO_3 — 3,16 %, MgCO_3 — 0,9 %, MgO — 0,43 %;

- нормальная густота гипсового теста при $\text{B}/\Gamma = 0,645$;

- начало схватывания гипсового теста нормальной густоты 4 мин;

- конец схватывания гипсового теста нормальной густоты 12 мин.

2. Серная кислота (H_2SO_4) 100%-ной концентрации.

3. Доломитовая пыль Агаповского известково-доломитового карьера.

4. Древесные опилки, полученные от распилки древесины хвойных пород (10%-ной влажности) с размером частиц от 1 до 5 мм.

5. Вода водопроводная.

С целью нейтрализации избыточного раствора серной кислоты при проведении исследования применялась карбонатная добавка, вводимая в гипсовое вяжущее перед его затворением водой, в качестве которой использовалась доломитовая пыль Агаповского известково-доломитового карьера в количестве 1 % от массы гипса.

Для производства газогипса была разработана интенсивная раздельная технология приготовления газогипсовой смеси, которая включала на первом этапе приготовление минерализованной опилочной массы в турбулентном смесителе и на втором этапе перемешивание полученной минерализованной опилочной массы с гипсовым тестом в основном смесителе с частотой вращения ротора 40 об/мин (рис. 3).

Для минерализации отмеренного количества опилок с водным 50%-ным раствором серной кислоты использовали турбулентный смеситель с металлопластиковым корпусом и с частотой вращения ротора 900 об/мин, в котором интенсивно перемешивали компоненты в течение 3 мин до получения однородной минерализованной опилочной массы светло-зеленого цвета.

Технология приготовления газогипса включает следующие технологические переделы:

- подготовка древесных опилок;

- подготовка 50%-ного раствора серной кислоты;

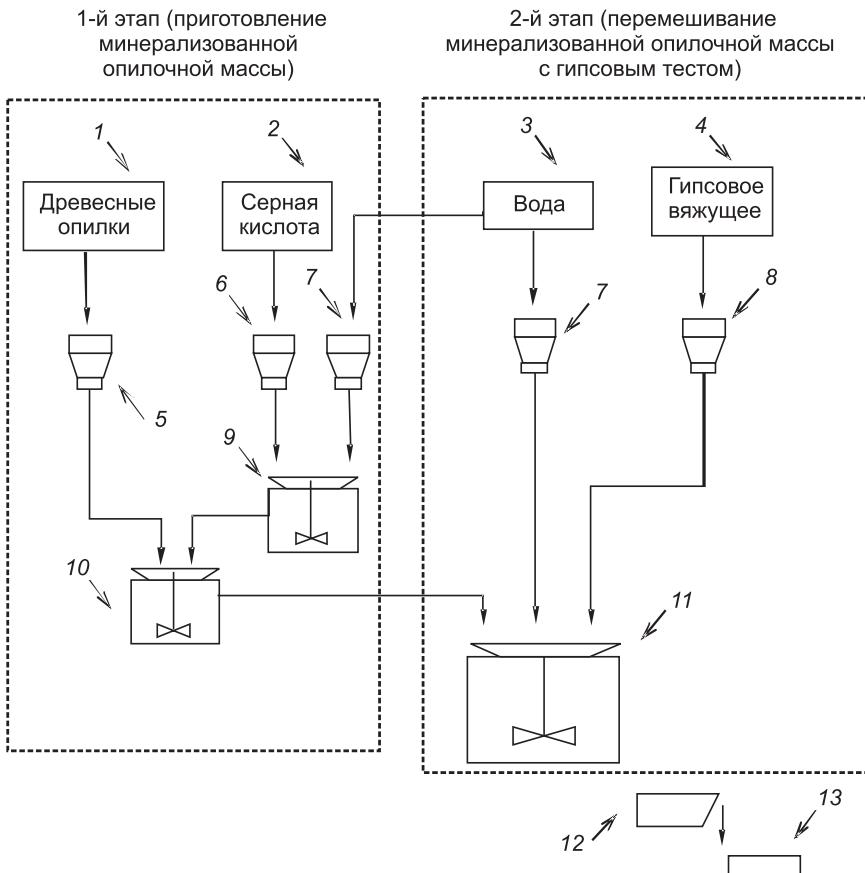


Рис. 3. Схема интенсивной раздельной технологии приготовления газогипсовой смеси

1 — емкость для древесных опилок; 2 — емкость для серной кислоты; 3 — емкость для воды; 4 — емкость для гипсового вяжущего; 5 — дозатор древесных опилок; 6 — дозатор серной кислоты; 7 — дозатор воды; 8 — дозатор гипсового вяжущего; 9 — смеситель для водного раствора серной кислоты; 10 — турбулентный смеситель для приготовления минерализованной опилочной массы; 11 — основной смеситель для газогипсовой смеси; 12 — воронка выдачи газогипсовой смеси; 13 — форма

- дозировка воды затворения;
 - минерализация древесных опилок с 50%-ным раствором серной кислоты;
 - введение в гипсовое вяжущее карбонатной добавки;
 - перемешивание гипсового вяжущего с водой затворения до однородной массы;
 - перемешивание не более 30 с гипсового теста и минерализованной опилочной массы;
 - разлив полученной однородной газогипсовой смеси по стандартным формам (размерами 4×4×16 см, 10×10×10 см);
 - сушка образцов при температуре $t = 25^{\circ}\text{C}$ до постоянного веса;
 - определение физико-механических показателей согласно ГОСТ.
- Состав и физико-механические показатели газогипса приведены в табл. 1 и 2.

На основании полученных экспериментальных результатов установлено, что процесс газообразования в гипсовом тесте происходит сразу после затворения минерализованной гипсоопилочной массы водой затворения и продолжается в течение времени, соразмерного с началом процесса

Таблица 1
Состав газогипса

Наименование компонента	Гипс марки Г-3	Карбонатная добавка	Вода водопроводная	Серная кислота	Древесные опилки
Количество компонента, г	400	4	290	10	25

Таблица 2
Физико-механические показатели газогипса

В/Г	$\rho_{cp}^{влаж}$, кг/м ³	$\rho_{cp}^{сух}$, кг/м ³	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	λ , Вт/м · С
0,75	644,1	447,3	0,35	0,18	0,1

схватывания гипсового теста. Заканчивается процесс газовыделения до начала схватывания гипсового теста, при этом усадки гипсового теста не наблюдается. Таким образом, полученные данные подтверждают целесообразность введения газообразователя на основе серной кислоты в гипсово-тесто по предложенной технологии.

Выводы. 1. Применение интенсивной раздельной технологии производства газогипса с использованием древесно-опилочного «носителя» водного раствора кислоты позволяет в качестве газообразователя применять сильную серную кислоту.

2. Использование древесно-опилочного «носителя» водного раствора серной кислоты при производстве газогипса позволяет оптимизировать сроки газовыделения с учетом сроков схватывания гипсового теста и исключить взаимодействие серной кислоты с технологическим оборудованием и рабочим персоналом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авт. свид. СССР № 948939. Композиция для изготовления газогипса [Текст] / М.Т. Ларионов, Е.А. Филахтова, В.И. Корнев, Е.В. Ендржеевский : Опубл. 1982 ; Бюл. № 29.
2. Панов, В.П. Газогипс и его свойства [Текст] / В.П. Панов // Стройт. материалы. — 1985. — № 5. — С. 18–19.
3. Гаркави, М.С. Ячеистые бетоны на основе гипса [Текст] / М.С. Гаркави, М.А. Лапидус, Е.В. Сулимова // Стройт. материалы. — 1995. — № 1.
4. Завадский, В.Ф. Технология строительных изделий из ячеистых бетонов [Текст] / В.Ф. Завадский, В.А. Попов, П.П. Дерябин : учеб. пособие. — Новосибирск, 2004. — 108 с.

ВЕСЕЛОВ А.В., канд. техн. наук, доц.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
КОСАЧ А.Ф., д-р техн. наук, проф.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

БЕРЁЗКИНА Ю.В., канд. техн. наук

Бюджетное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа — Югры «Югорский институт развития строительного комплекса», г. Ханты-Мансийск

АНТОНОВА А.В., асп.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

КУЗНЕЦОВ О.А., асп.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Получено 30.12.10

Veselov A.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Russia

Cosach A.F., doctor of technical sciences, professor, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Berezkina Yu.V., candidate of technical sciences, «Yugra Institute of Development of the Building Complex», Khanty-Mansiysk, Russia

Antonova A.V., post-graduate student, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Kuznecov O.A., post-graduate student, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

MANUFACTURE GAZOGIPS USING SULFURIC ACID AS GASIFIER

The ways of obtaining gazogips using wood sawdust «carrier» sulfuric acid as gasifier have been investigated.

Key words: gazogips, gypsum binder, sulfuric acid, wood sawdust, gasifier.

REFERENCES

1. Cert. of auth. USSR № 948939. A composition for manufacturing gazogips [Text] / M.T. Larionov, E.A. Filahhtova, V.I. Kornev, E.V. Endrzheevsky : Publ. 1982 ; Bul. 29.
2. Panov, V.P. Gazogips and its properties [Text] / V.P. Panov // Building materials. — 1985. — N 5. — P. 18–19.
3. Garkavi, M.S. Cellular concrete on the basis of gyps [Text] / M.S. Garkavi, M.A. Lapidus, E.V. Sulimova // Building materials. — 1995. — N 1.
4. Zawadzky, V.F. The technology of building products from cellular concrete [Text] / V.F. Zawadzky, V.A. Popov, P.P. Deryabin // Textbook. — Novosibirsk, 2004. — 108 p.

УДК 691.42.002.611

Д.Ю. ДЕНИСОВ, В.З. АБДРАХИМОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА
КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА НА ОСНОВЕ
ПОЛИМИНЕРАЛЬНОЙ ЛЕГКОПЛАВКОЙ ГЛИНЫ
И ОБОЖЖЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СОЛЕВЫХ ШЛАКОВ**

Рентгенофазовые и электронно-микроскопические исследования показали, что при температуре обжига 1050 °С отмечается кристаллизация кристобалита, гематита, анортита и муллита. Содержание стеклофазы увеличивается до 30–35 %, и при этом образуются желтоватые и бурые стекла с показателями преломления n от 1,55 до 1,57. Муллит и стеклофаза способствуют повышению физико-механических свойств керамического материала.

Ключевые слова: отходы, утилизация, керамические материалы, солевые алюминиевые шлаки, дегидратированная глина, поэлементный химический состав, металлографический анализ, рентгеновский анализ, температура обжига, муллит, кристобалит, гематит, анортит, стеклофаза.

В производстве керамических материалов фазовому составу придается особое значение, так как именно он главным образом определяет эксплуатационные свойства изделий.

Для улучшения природных свойств глиняного сырья — уменьшения общей усадки, чувствительности к сушке и обжигу, улучшения формоочковых свойств — широко применяют отощающие добавки: песок, шамот, дегидратированную глину и другие минеральные невыгорающие добавки.

Применение в качестве отощителя кварцевого песка не всегда дает желаемый результат, потому что наиболее подходящий для отощения зерновой состав песка должен быть от 0,5 до 1,5 мм. Во многих регионах России, как правило, зерновой состав песка чаще всего встречается размером менее 0,5 мм. Мелкозернистые пески почти не уменьшают усадку и чувствительность изделий в сушке и в то же время снижают их прочность. Для повышения качества керамического материала из имеющихся природных материалов в Поволжье и других регионах России приходится применять только дегидратированную глину, т.е. обожженную до 600...800 °С, из которой удалена значительная часть химически связанный воды. Благодаря этому дегидратированная глина резко снижает усадку керамического композиционного материала, пластичность и чувствительность к сушке. Причем процесс сушки, например кирпича, сформованного с добавкой значительного количества дегидратированной глины, можно вести более форсированно, не опасаясь образования усадочных трещин. Дегидратированную глину можно вводить в пределах 30–50 % от общего объема шихты. При таком количестве резко уменьшается количество трещин в изделиях или же они полностью ликвидируются.

В настоящей работе целью является исследование фазового состава керамического кирпича при использовании вместо дегидратированной глины в качестве отощителя алюмосодержащих обожженных солевых отходов от вторичной переработки алюминиевых шлаков и лома.

Солевые алюминиевые шлаки — это отходы алюминиевого производства [1]. По показателям острой токсичности в эксперименте на теплокровных животных (мыши) и двух видах гидробионитов (ветвистоусых раках *Daphnia magna* Straus и зеленых протококковых водорослях *Scenedesmus quadricauda*) солевые отходы относятся к III классу опасности по степени воздействия на организм и к IV классу опасности для окружающей среды.

Солевые алюминиевые шлаки имеют следующий химический состав, мас. %: NaCl – 10,25; CaO+CaCO₃ – 14,28; MgO+MgCO₃ – 15,30; FeCl₃ – 0,001; SiO₂ – 3,10; Al₂O₃ – 41,282; KCl – 5,35; CuCl₂ – 0,001; алкилмеркаптиты Al – 0,545; предельные углеводороды – 0,001; Al (металлический) – 9,89. Поэлементный анализ солевого отхода представлен на рис. 1 и в табл. 1.

Поэлементный химический анализ исследуемых компонентов проводился с помощью электронного растрового сканирующего микроскопа Phillips 525M. Этот микроскоп с детектором EDAX 9S00 применяется для наблюдения и фотографирования микрорельефа поверхности в режиме вторичных электронов, с его помощью можно также проводить исследования элементного состава образцов методом рентгеноспектрального энергодисперсного анализа. Ускоряющее напряжение 15 кВ.

После обжига солевых алюминиевых шлаков при 950 °C химический состав их значительно обогатился оксидом алюминия (рис. 1, б, табл. 1 и 2). Как видно из табл. 2, обожженный солевой алюминиевый шлак при 950 °C обогащается оксидом алюминия до 75,1 %. С увеличением содержания в ке-

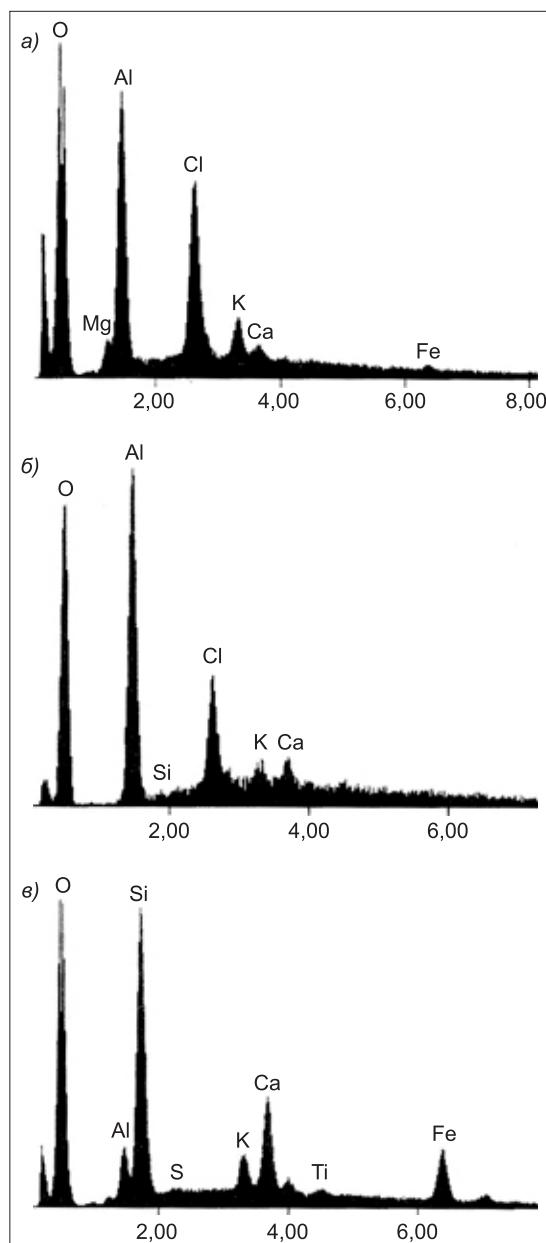


Рис. 1. Поэлементные химические анализы
а — необожженный солевой алюминиевый шлак; б — обожженный солевой алюминиевый шлак; в — кротовская глина

Таблица 1
Поэлементный химический состав компонентов

Компонент	Концентрация, мас. %									
	O	Al	Mg	K	Ca	Cl	Fe	Si	S	Ti
Необожженный солевой алюминиевый шлак	67,95	13,93	1,55	2,77	0,98	11,75	1,07	—	—	—
Обожженный солевой алюминиевый шлак	66,79	21,16	—	1,56	2,55	7,86	—	0,07	—	—
Кротовская глина	61,9	2,56	—	2,78	8,18	—	11,24	12,56	0,07	0,71

Таблица 2
Оксидный химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
Обожженный солевой алюминиевый шлак	4,55	75,1	1,6	2,56	7,61	5,13	3,45
Кротовская глина	57,2	13,2	9,92	9,17	1,25	2,3	7,4

рамических массах Al₂O₃, как правило, повышается прочность сформованных, сухих и обожженных изделий, увеличивается их огнеупорность [2].

На рис. 2 представлены рентгенограммы необожженных и обожженных солевых алюминиевых шлаков. Как видно из рис. 2, б, минерalogический состав обожженного алюминиевого шлака в основном представлен оксидом алюминия.

Несмотря на то, что в литературе описано большое количество полиморфных модификаций оксида алюминия, достоверно доказано существование только двух: α - и γ -модификаций [3]. В составе неметаллических включений присутствует обычно высокотемпературная α -модификация, которая является аналогом природного минерала — корунда. Как видно из табл. 1 и 2 и рис. 1, б, обжиг даже при относительно низкой температуре (менее 1000 °C) солевых алюминиевых шлаков значительно обогащает их оксидом алюминия.

В качестве глинистого компонента в производстве керамического кирпича использовалась глина Кротовского месторождения, поэлементный химический состав которой представлен в табл. 1 и на рис. 1, в, а оксидный химический состав — в табл. 2. Высота пиков при поэлементном анализе зависит от коэффициентов корреляции отдельного элемента, поэтому зачастую пики с меньшим значением процентного содержания выше пики с большим значением.

Как видно из табл. 2, глинистый материал относится к кислым глинам (Al₂O₃ < 15 %), а по содержанию оксида железа относится к группе с высоким содержанием красящих оксидов (Fe₂O₃ > 3 %).

Исследование минералогического состава кротовской глины показало, что основными глинистыми минералами в ней являются гидрослюды, каолинит и монтмориллонит (рис. 2, в и табл. 3). Технологические свойства кротовской глины представлены в табл. 4, а микроструктура ее приведена на рис. 3.

Для анализа размера частиц легкоплавкой глины проведен металлографический анализ на микроскопе МИН-8М при увеличении в 200 раз ($\times 200$). Частицы глины растворяли в спирте, наносили на стекло и фото-

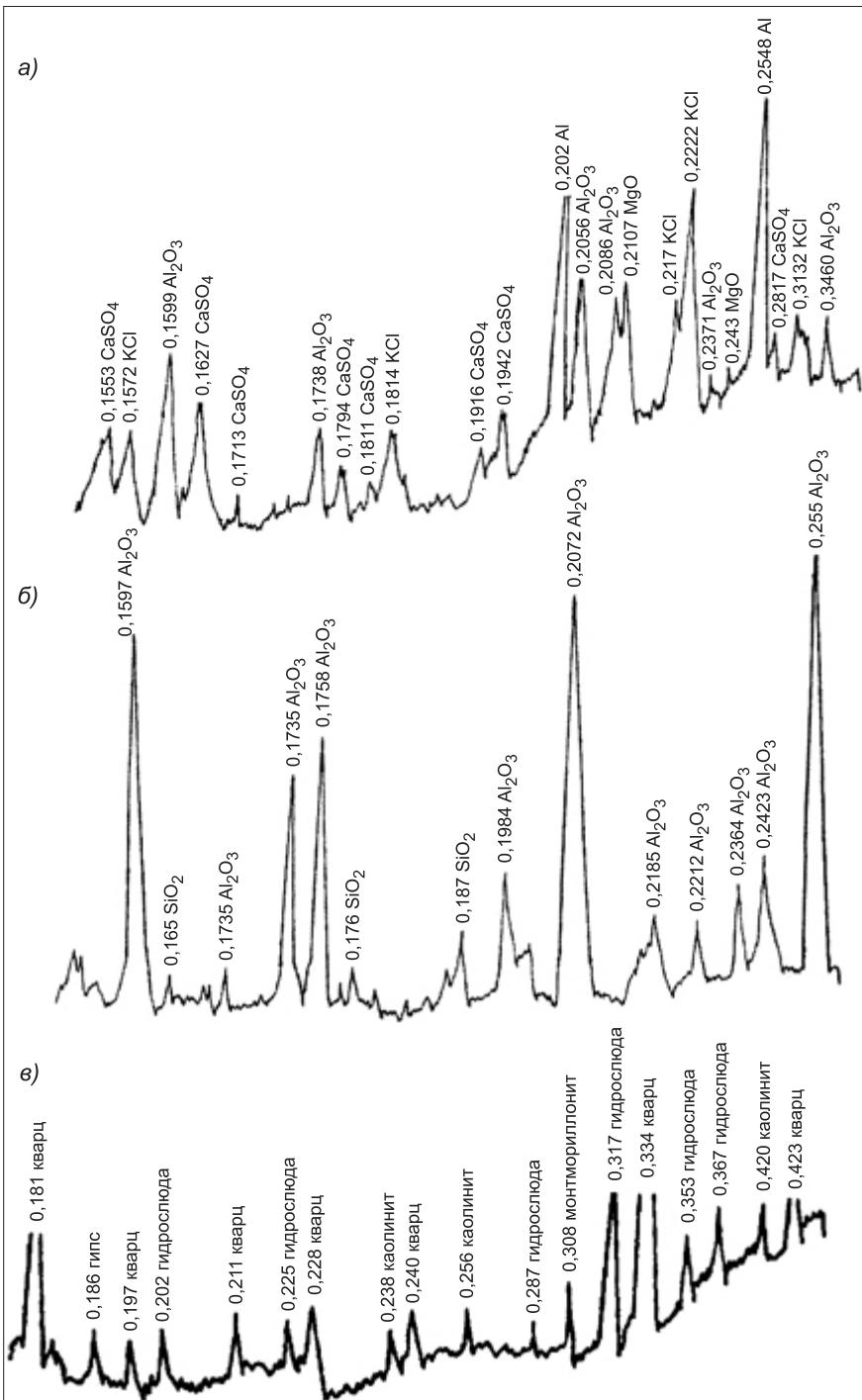


Рис. 2. Рентгенограммы компонентов

а — необожженных солевых алюминиевых шлаков; б — обожженных солевых алюминиевых шлаков; в — кротовской глины

графировали с помощью фотоаппарата. Для того чтобы точно определить размеры частиц, было заснято несколько участков объекта. Используя шкалу-объект микрометра (1 дел. = 0,01 мм), сфотографированную при этих же условиях, можно определить средний размер частиц глины. Средний размер частиц кротовской глины 0,001...0,01 мм (1...10 мКм,

Таблица 3

Минералогический состав кротовской глины

Содержание минералов, мас. %						
Гидрослюдя	Кварц	Гипс	Полевой шпат	Каолинит + иллит	Монтмориллонит	Оксиды железа
22...28	25...30	5...5	10...15	15...10	8...11	5...7

Таблица 4

Технологические свойства кротовской глины

Число пластичности	Содержание глинистых частиц (размером менее 0,005 мм)	Огнеупорность, °C	Спекаемость
15...20	30...50	1180...1200	Спекается

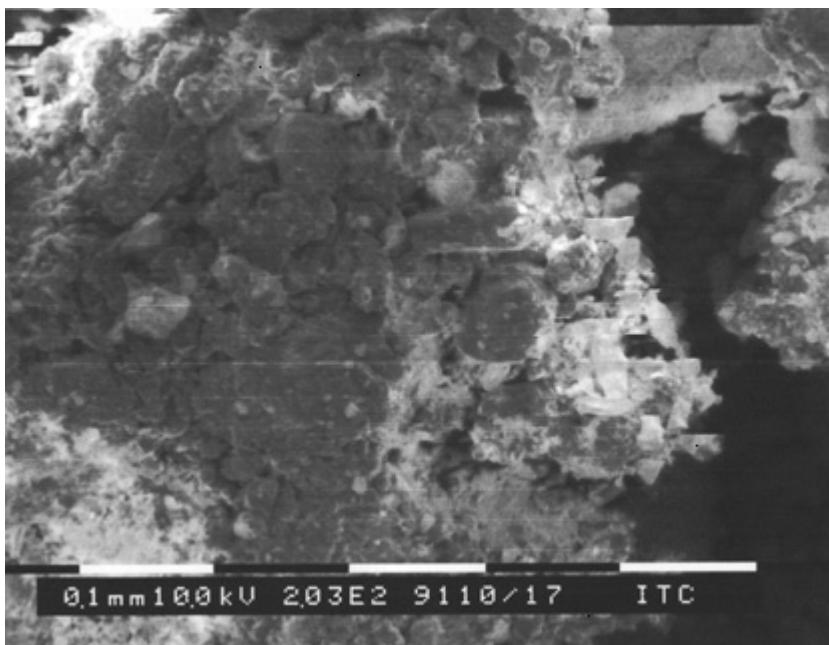


Рис. 3. Микроструктура кротовской глины.

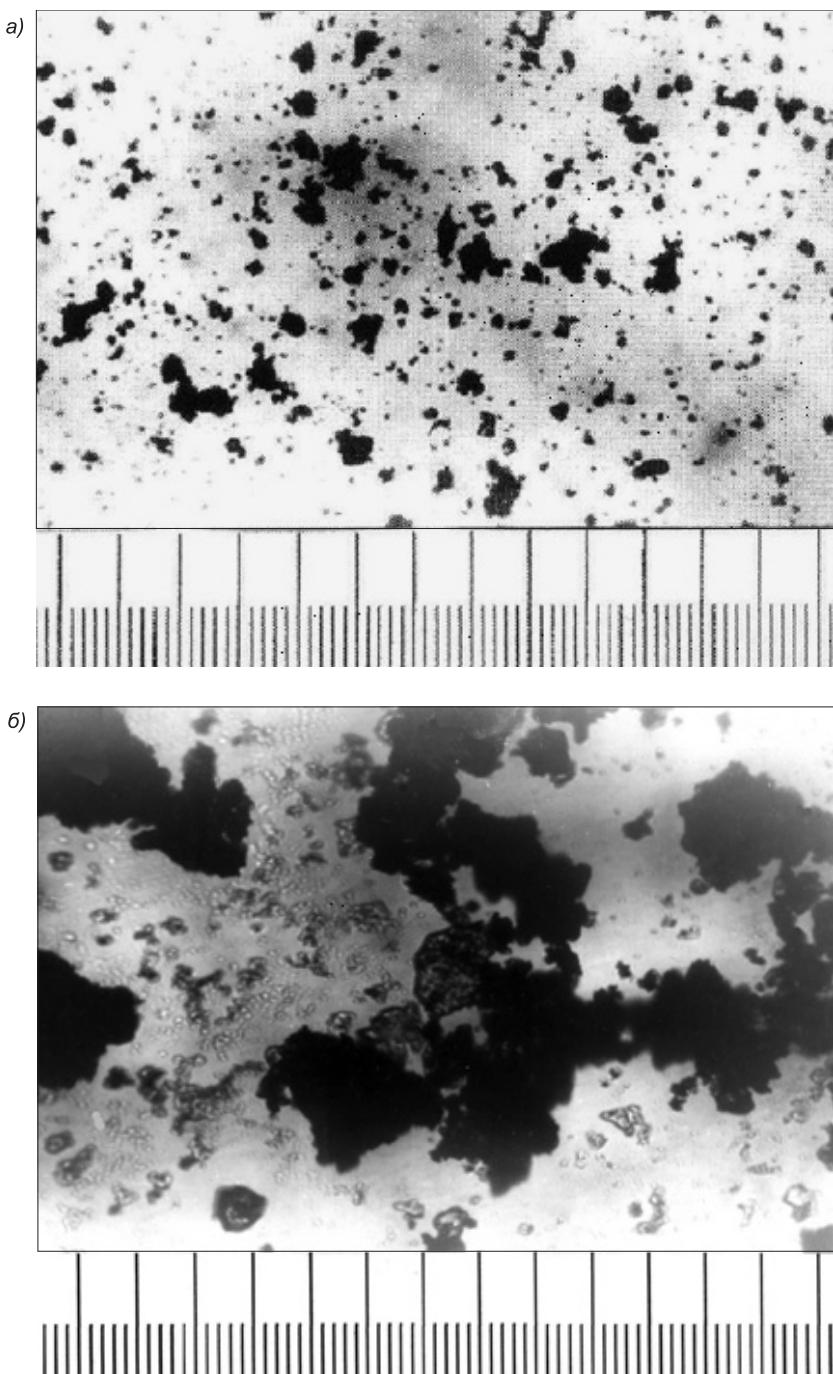
Увеличение ×1000

рис. 4, а). Средний размер частиц обожженных солевых алюминиевых шлаков 0,01...0,02 мм (10...20 мКм, рис. 4, б).

Как видно из рис. 3 и 4, а, кротовская глина имеет мелкие глинистые частицы, что, очевидно, будет способствовать спеканию и снижению пористости [1].

Исследования показали, что при производстве керамического кирпича на основе гидрослюдисто-каолиновой глины с примесью монтмориллонита и числом пластичности 15...20 оптимальное содержание обожженного солевого алюминиевого шлака 30–35 %.

Керамическую массу из оптимального состава [4] (мас. %: легко-плавкая глина 70, обожженный солевой алюминиевый шлак 30) готовили пластическим способом при влажности 20–24 %, из которой формировали кирпич, который высушивали до влажности не более 5–7 % и затем обжигали при температуре 1050 °C. Изотермическая выдержка при конечной температуре 30 мин. Керамический кирпич имел марку М175–200.



Rис. 4. Металлографические анализы

а — кротовской глины; б — обожженных солевых алюминиевых шлаков

Рентгенограмма полученного кирпича представлена на рис. 5. На дифрактограмме порошка отмечаются характерные интенсивные линии ($d/n = 0,211; 0,220; 0,228; 0,242; 0,339$ и $0,540$ нм) муллита, присутствие линии ($d/n = 0,251$ и $0,365$ нм) обусловлено гематитом, линии ($d/n = 0,192; 0,313$ и $0,403$ нм) — кристобалитом, ($d/n = 0,215; 0,321$ и $0,429$ нм) — анортитом и ($d/n = 0,205; 0,222; 0,334; 0,342; 0,443$ и $0,457$ нм) — кварцем. О повышенном содержании стеклофазы в исследо-

дуемом теплоизоляционном материале свидетельствует соотношение интегральных площадей аморфного гало и дифракционных отражений на рентгенограммах.

Как видно из рентгенограммы (рис. 5), при обжиге керамического материала (кирпича) образуются новые минералы: гематит, муллит, кристобалит и анортит.

Для получения наиболее полных сведений о структурообразовании в керамическом кирпиче проводилось изучение микроструктуры с помощью электронного микроскопа ЭМБ-100БР методом «на просвет», реплика платино-углеродная (рис. 6).

Электронно-микроскопические исследования подтвердили данные рентгенофазового анализа, что при температуре обжига 1050 °С отмечается появление муллита, кристобалита, гематита, анортита и стеклофазы.

На рис. 6, *a* показаны поля стеклофазы и оплавленные кристаллы кварца призматического и бипирамидального габитуса, а на рис. 6, *б* — одиночные крупные кристаллы α -кристобалита тетрагональной сингонии. Содержание стеклофазы увеличивается до 30–35 % (рис. 6, *а*), и при этом образуются желтоватые и бурые стекла с показателями преломления n от 1,55 до 1,57. На рис. 6, *в* видны одиночные кристаллы короткостолбчатого муллита, а на рис. 6, *г* — одиночные кристаллы гематита, таблитчатого и пластиначатого облика. Анортит таблитчатого и октаэдрического габитуса представлен на рис. 6, *в* и 6, *г*.

Содержание в обожженном отходе повышенного количества оксида алюминия способствует образованию муллита в керамическом кирпиче при обжиге 1050 °С. Механизм кристаллизации муллита в керамических материалах включает две стадии: образование центров кристаллизации (зародышей) и рост кристаллов в них. Центры кристаллизации могут зарождаться гетерогенно и гомогенно в результате локальных флуктуаций состава или структуры. В случае гомогенной кристаллизации состав вы-

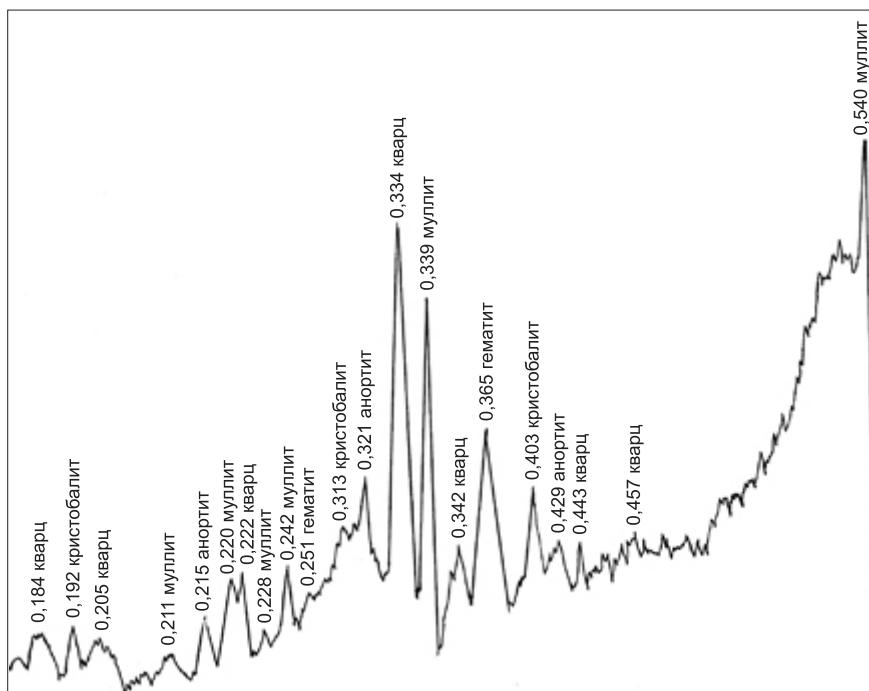


Рис. 5. Рентгенограмма кирпича из оптимального состава

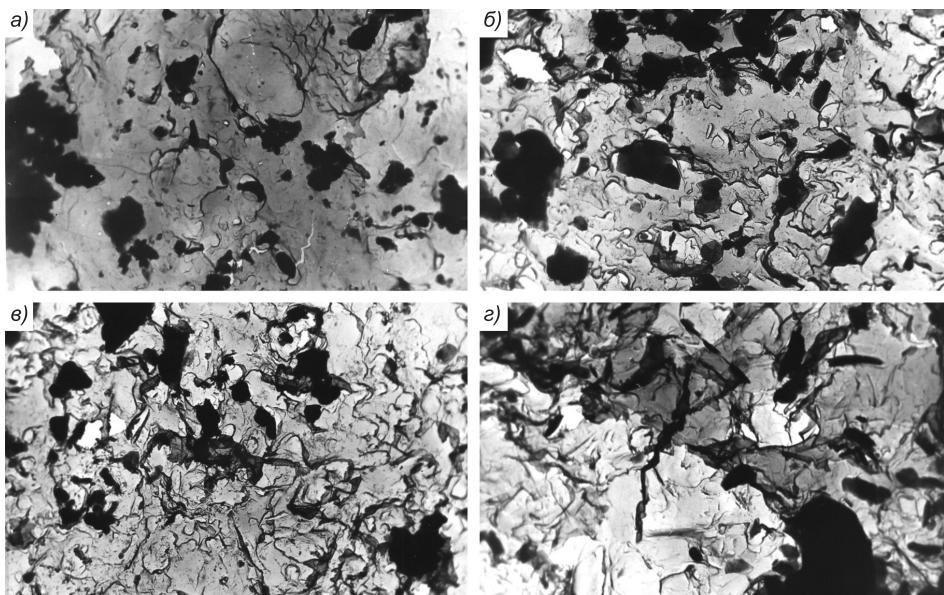


Рис. 6. Микроструктура кирпича из оптимального состава.

Увеличение $\times 5000$

деляющихся кристаллов соответствует составу центров кристаллизации. Гетерогенная кристаллизация происходит на примесных центрах инородной фазы. Состав кристаллов в этом случае не соответствует составу центров кристаллизации. По-видимому, при обжиге кирпича при использовании в составах керамических масс обожженного солевого алюминиевого шлака будет происходить гетерогенная кристаллизация муллита.

Муллит — один из часто встречающихся минералов в обожженных керамических материалах. Высокие показатели по огнеупорности, плотности, химической стойкости и механической прочности привлекли внимание исследователей как к получению синтетического муллита, так и исследованию его структуры [5].

Вывод. Проведенные исследования показали, что в качестве отоштата вместо дегидратированной глины целесообразно использовать алюмосодержащие обожженные солевые отходы от вторичной переработки алюминиевых шлаков и лома. Обожженный солевой алюминиевый шлак при 950°C обогащается оксидом алюминия до 75,1 %. С повышением содержания в керамических массах Al_2O_3 , как правило, повышается прочность сформованных, сухих и обожженных изделий, увеличивается их огнеупорность.

Введение алюмосодержащих обожженных солевых отходов в составы керамических масс для производства кирпича способствует появлению минерала муллита, который повышает физико-механические показатели кирпича.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисов, Д.Ю. Использование солей отходов от вторичной переработки алюминийсодержащих шлаков [Текст] / Д.Ю. Денисов, В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова, А.В. Абдрахимов // Экология и промышленность России. — 2008. — № 3. — С. 24–25.
2. Абдрахимов, В.З. Химическая технология керамического кирпича с использованием техногенного сырья [Текст] / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. — Самара : Самарский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2007. — 431 с.

3. Литвино娃, Т.И. Петрография неметаллических включений [Текст] / Т.И. Литвино娃, В.П. Пирожкова. — М. : Металлургия, 1972. — 183 с.
4. Денисов, Д.Ю. Использование золошлакового материала и солевых отходов от вторичной переработки алюминийсодержащих шлаков и лома в производстве керамического кирпича [Текст] / Д.Ю. Денисов, В.З. Абдрахимов // Промышленное и гражданское строительство. — 2010. — № 3. — С. 44–47.
5. Абдрахимова, Е.С. Синтез муллита из техногенного сырья и пирофиллита [Текст] / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Журн. неорганической химии. РАН. — 2007. — Т. 52, № 3. — С. 395–400.

ДЕНИСОВ Д.Ю., *асп.; E-mail: denisovdj@mail.ru*

Самарская академия государственного и муниципального управления

АБДРАХИМОВ В.З., *д-р техн. наук, проф.*

Самарская академия государственного и муниципального управления

Получено после доработки 26.04.11

Denisov D.Yu., post-graduate student; E-mail: denisovdj@mail.ru, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

Abdrahimov V.Z., doctor of technical sciences, professor, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

PROBE OF PHASE STRUCTURE OF THE CERAMIC BRICK ON THE BASIS OF POLYMINERAL FUSIBLE CLAY AND THE BURNT ALUMINIUM SALT SLAGS

Roentgenphase and electronic-microscopic examinations have shown, that at the temperature of furnacing 1050 °C crystallization of cristobalite, a haematite, an anorthite and mullite is marked. The content glassphase increases up to 30–35 % and thus will be derivated yellowish and brown glasses with refractive indexes n from 1,55 up to 1,57. Mullite and glassphase promote increase of physical-mechanical properties of a ceramic material.

Key words: waste products, salvaging, ceramic materials, the salt aluminium slags, dehydrated clay, item chemical composition, metallographic analysis, X-raying, a supermicroscope, a firing temperature, mullite, cristobalite, a haematite, an anorthite, glassphase.

REFERENCES

1. Denisov, D.Yu. Use of salts of waste products from a recycling aluminium keeping slags [Text] / D.Yu. Denisov, V.Z. Abdrahimov, E.S. Abdrahimova, A.V. Abdrahimov // Ecology and an industry of Russia. — 2008. — N 3. — P. 24–25.
2. Abdrahimov, V.Z. Chemical technolog of a ceramic brick with use of technogenic raw material [Text] / V.Z. Abdrahimov, E.S. Abdrahimova. — Samara : Publ. house the Samara state architectonic-building university. — 2007. — 431 p.
3. Litvinova, T.I. Petrograph of nonmetallics [Text] / T.I. Litvinova, V.P. Pirozhkova. — M. : Metallurgy, 1972. — 183 p.
4. Denisov, D.Yu. Use leachcinder a material and salt waste products from a recycling aluminium keeping slags and a breakage in manufacture of a ceramic brick [Text] / D.Yu. Denisov, V.Z. Abdrahimov // Industrial and a constructional engineering. — 2010. — N 3. — P. 44–47.
5. Abdrahimova, E.S. Synthesis mullite from technogenic raw material and perefillite [Text] / E.S. Abdrahimova, V.Z. Abdrahimov // Log-book of an inorganic chemistry. The Russian Academy of Science. — 2007. — T. 52, N 3. — P. 395–400.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.43:53.072.12

В. В. ДЕГТЬЯРЕВ, А. С. ПЛЕТНЕВ,
В. В. ОСТАПЕНКО, М. В. БУНТИНА

СРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАДАЧЕ О РАЗРУШЕНИИ ПЛОТИНЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ РУСЛЕ С БОКОВЫМ СУЖЕНИЕМ*

Приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования волн прорыва в русле прямоугольной формы поперечного сечения с боковым сужением.

Ключевые слова: задача о разрушении плотины, волна перемещения, эксперимент, численное моделирование.

Для анализа последствий аварийных ситуаций на гидротехнических водоподпорных сооружениях большое значение имеет информация, полученная при экспериментальном и теоретическом моделировании задачи о разрушении плотины. Эта задача, достаточно интенсивно изучавшаяся еще в середине прошлого столетия^{1, 2}, остается актуальной и в настоящее время [1, 2].

На основе первого приближения теории мелкой воды разработаны эффективные разностные схемы повышенной точности для математического моделирования волн перемещения, в том числе и в русле со сложной высотной и плановой морфометрией. Так, в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН разработана специальная TVD-схема, предназначенная для сквозного расчета течений с прерывными волнами в реальных руслах. Предложенная схема использует специальную аппроксимацию недивергентной формы записи уравнения полного импульса, в которой отсутствуют интегралы, связанные с определением силы давления в поперечном сечении русла и силы реакции стенок русла. В стандартных консервативных разностных схемах на вычисление этих интегралов расходуется основная часть машинного времени.

С целью верификации результатов численных расчетов, получаемых по этой новой TVD-схеме, на базе комплексной экспериментальной установки с рабочей длиной 16 м и размерами поперечного сечения 0,38×0,5 м выполнена серия экспериментов, моделирующих задачу о разрушении пло-

* Работа выполнена в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН и Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 09-01-98001), проектов фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.7 и гранта мэрии г. Новосибирска молодым ученым и специалистам (№ 23-10).

¹ Dressler R.F. Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave // Intern. Assoc. Sci. Hydrology. 1954. V. 3, N 38. P. 319–328.

² Стокер Д.Д. Волны на воде. Математическая теория и приложения — М. : Иностр. лит., 1959. — 617 с.

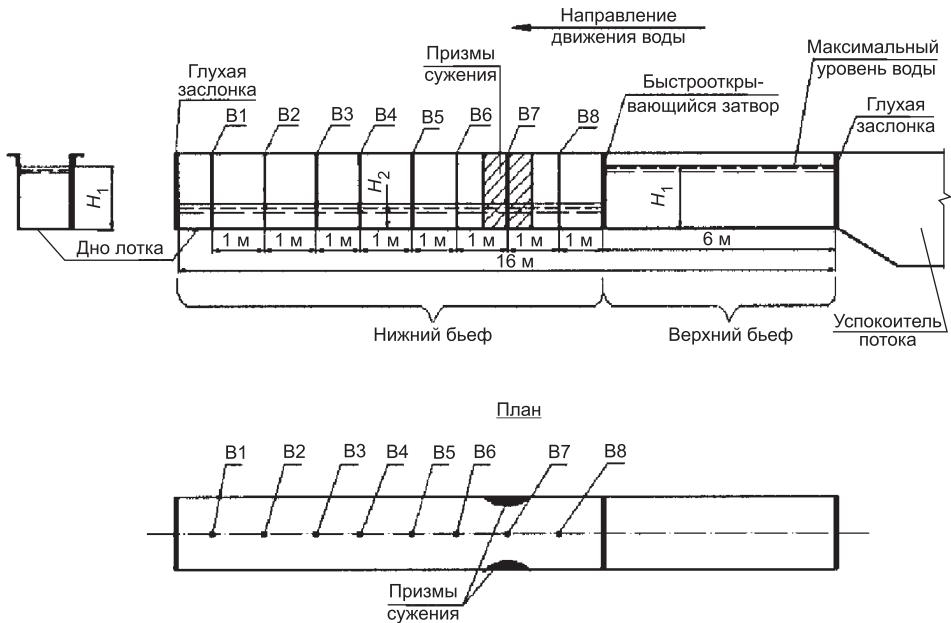


Рис. 1. Схема эксперимента

тины в прямоугольном призматическом канале, а также в прямоугольном канале, имеющем участок бокового сужения в нижнем бьефе (рис. 1). Первоначальный перепад уровней создавался с помощью быстрооткрывающегося плоского затвора и щита, расположенного в нижнем торце канала.

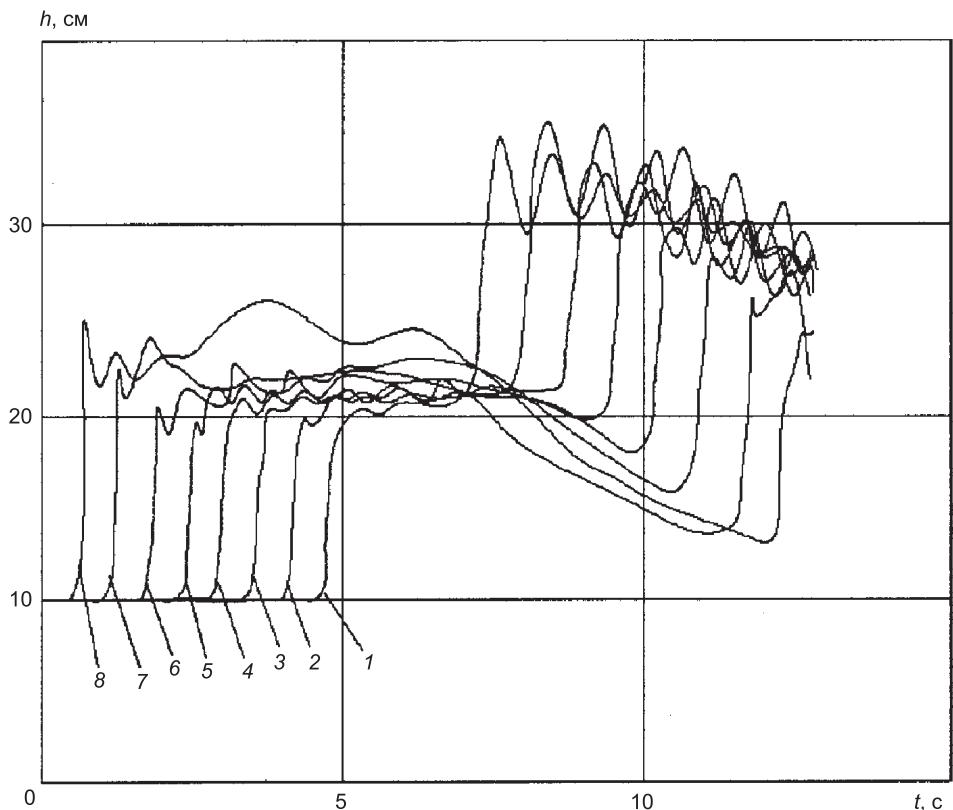


Рис. 2. Запись колебаний уровня воды в прямоугольном русле с боковым сужением при $H_1 = 0,363$ м и $H_2 = 0,1$ м

Для регистрации параметров волновых процессов использовался измерительный комплекс, который включает: два четырехканальных измерителя уровня (волномера) с восемью датчиками; компьютерную систему с аналого-цифровым преобразователем для одновременной регистрации выходных сигналов всех датчиков; лицензионное программное обеспечение, позволяющее обрабатывать результаты измерений.

Серия экспериментов была выполнена при постоянной глубине в верхнем бьефе $H_1 = 0,363$ м и различных глубинах в нижнем бьефе $H_2 = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,225$ м.

В момент времени $t_0 = 0$ быстрооткрывающийся затвор удалялся за время не более 0,08 с с помощью рычажной системы. Запись хода уровней велась до момента добрегания фронта прямой положительной волны до закрытого конца канала, ее продолжительность составляла 13 с. Колебания уровня как функция от времени t по продольной координате x измерялись волномерами, принцип работы которых основан на различии электрической проводимости воды и воздуха [3].

Градуировка приборов выполнялась перед каждой серией опытов путем погружения их в воду. В экспериментах использовалась водопроводная вода. Перед калибровкой вода отстаивалась в течение суток в целях дегазации.

Конструкция волномеров выполнена таким образом, что статическая (градуировочная) характеристика для каждого волномера представляла собой прямую линию и не изменялась в течение всех экспериментов.

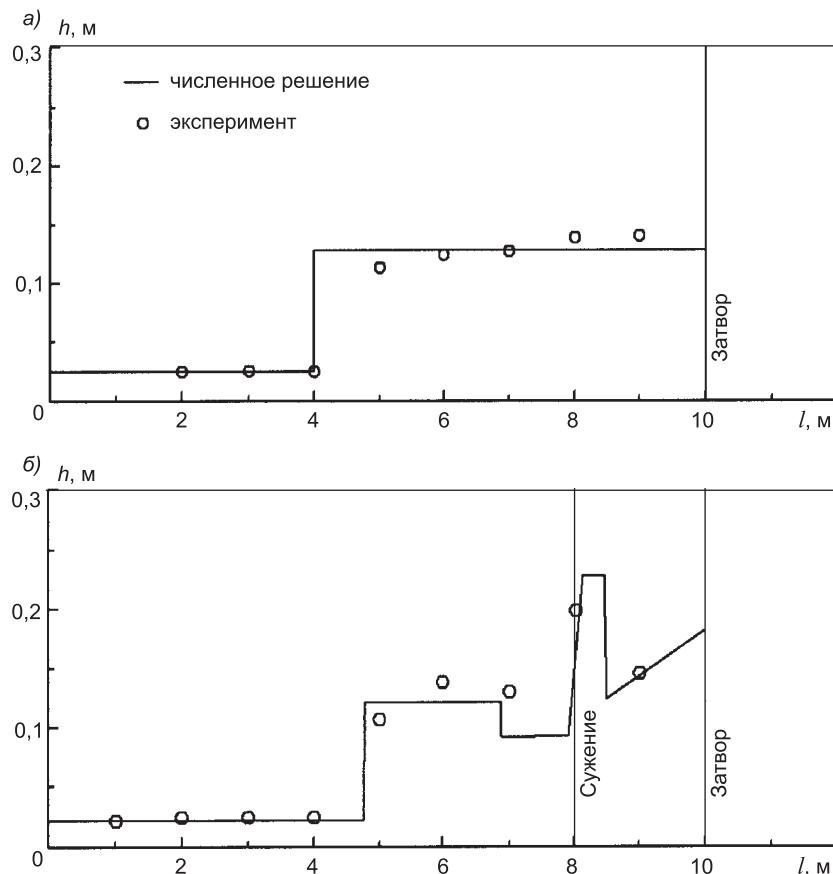


Рис. 3. Профиль свободной поверхности воды при $H_1 = 0,363$ м и $H_2 = 0,025$ м в момент времени $t = 3,00$ с в прямоугольном русле без бокового сужения (а) и с боковым сужением (б)

Размеры экспериментальной установки и схема расположения волномеров для опытов в призматическом прямоугольном русле представлены на рис. 1. Символами В1–В8 обозначены датчики, установленные в различных сечениях лотка. Начало координат совмещалось с местом установки затвора.

На рис. 2 приведен пример записи колебания уровней в прямоугольном русле с боковым сужением при $H_1 = 0,363$ м и $H_2 = 0,1$ м. По оси абсцисс указано время, отсчитываемое от начала эксперимента — момента удаления щита, по оси ординат — глубины потока в местах установки датчиков. Цифрами 1–8 обозначены показания соответственно волномеров В1–В8.

На рис. 3 и 4 показаны экспериментальные и численные результаты, полученные по TVD-схеме, предложенной в [4]. На рис. 3 на моменты времени $t = 3,00$ с приведены профили свободной поверхности воды, получаемые при моделировании задачи о разрушении плотины с начальной глубиной нижнего бьефа $H_2 = 0,025$ м. Начало координат совмещено с закрытым торцом канала в нижнем бьефе. Здесь результаты физического моделирования показаны кружками в местах, где установлены волномеры. На рис. 4 при двух различных начальных глубинах $H_1 = 0,363$ м и $H_2 = 0,1$ м показано изменение глубины жидкости как функции времени

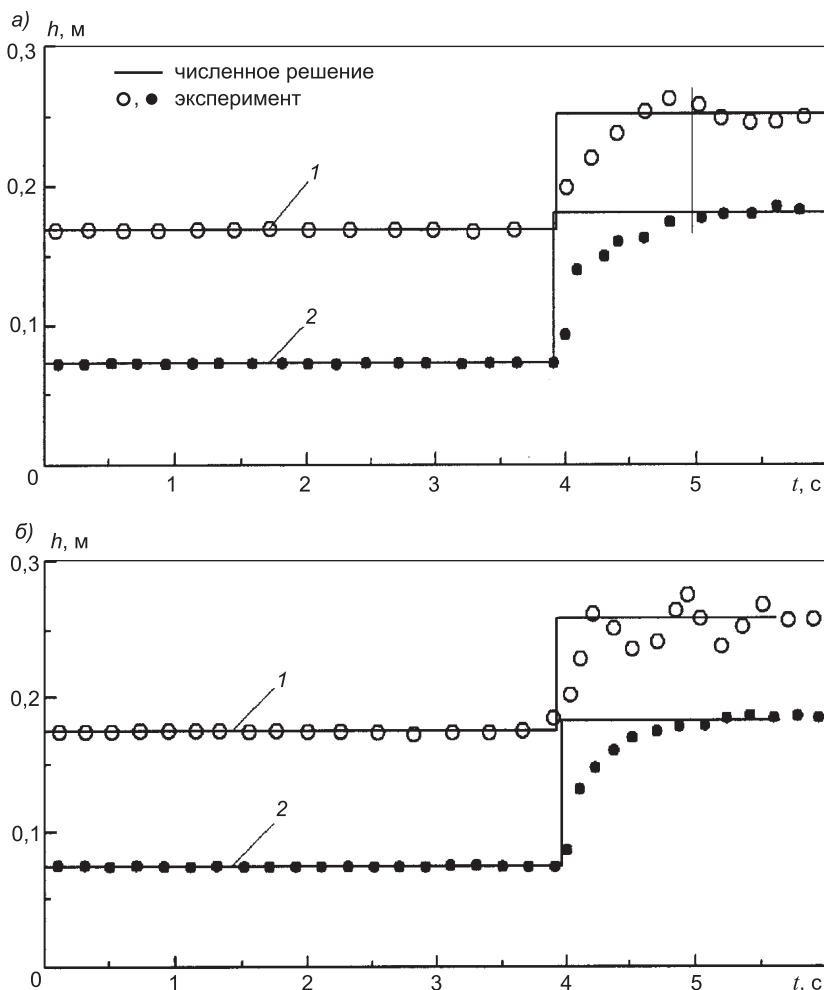


Рис. 4. Сравнение результатов при $H_1 = 0,363$ м, $H_2 = 0,175$ м (1) и $H_2 = 0,075$ м (2) в прямоугольном русле без бокового сужения (а) и с боковым сужением (б)

для волномера В2 ($x = 7$ м). Результаты численного моделирования на рис. 4 и 5 показаны сплошной линией, а экспериментального — кружками. На рис. 4, а приведен классический случай прямоугольного призматического русла, а на рис. 4, б — случай прямоугольного русла, имеющего область сужения в нижнем бьефе.

На рис. 5 изображены асимптотические глубины, устанавливающиеся за фронтом головной волны при различных начальных глубинах в нижнем бьефе в русле с боковым сужением. Здесь h_{as} — асимптотическая глубина за фронтом волны перемещения, h_2 — глубина в нижнем бьефе.

Приведенное в данной работе сравнение теории с экспериментом показало, что (как в случае призматического русла, так и русла, имеющего сужение в нижнем бьефе) численное решение задачи о разрушении плотины, получаемое по предложенной в [4] TVD-схеме, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными по возможным типам волн, скорости их распространения и асимптотической глубине за фронтом прерывной волны, распространяющейся в нижнем бьефе. В то же время данная теория не описывает ондуляций, возникающих за фронтом прерывной волны (см. графики 1 на рис. 4); для их описания необходимо привлекать более высокие приближения теории мелкой воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Букреев, В.И. Экспериментальная проверка газогидравлической аналогии на примере задачи о разрушении плотины [Текст] / В.И. Букреев, А.В. Гусев, А.А. Малышева, И.А. Малышева // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2004. — № 5. — С. 143–152.
- Дегтярев, В.В. (мл.) Физическое моделирование нестационарных гидродинамических процессов, возникающих при чрезвычайных аварийных ситуациях на гидroteхнических сооружениях [Текст] / В.В. Дегтярев (мл.), В.Н. Шаталина // Тр. НГАСУ. — Новосибирск, 2002. — Т. 5, № 2 (17). — С. 45–52.
- Дегтярев, В.В. Лабораторная установка и измерительный комплекс для исследования нестационарных водных потоков [Текст] / В.В. Дегтярев, А.С. Плетнев, В.В. Зыков // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 4. — С. 93–98.
- Бунтина, М.В. TVD-схема для расчета волновых течений в открытых руслах [Текст] / М.В. Бунтина, В.В. Остапенко // Журн. вычисл. математики и мат. физики. — 2008. — Т. 48, № 12. — С. 2212–2224.

ДЕГТАРЕВ В.В., д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ПЛЕТНЕВ А.С., асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ОСТАПЕНКО В.В., д-р физ.-мат. наук, глав. науч. сотр.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

БУНТИНА М.В., асп.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

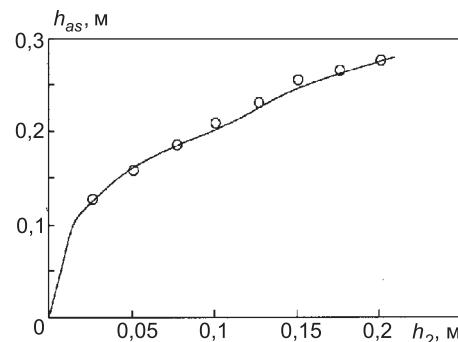


Рис. 5. Сравнение асимптотических глубин в русле с боковым сужением

Degtyaryov V.V., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Pletnew A.S., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Ostapenko V.V., doctor of physical and mathematical sciences, the main scientific employee, Hydrodynamics Institute Lavrenteva, Novosibirsk, Russia

Buntina M.V., post-graduate student, Hydrodynamics Institute Lavrenteva, Novosibirsk, Russia

THEORY AND EXPERIMENT COMPARISON IN THE PROBLEM ABOUT DAM DESTRUCTION IN THE RECTANGULAR CHANNEL WITH LATERAL NARROWING

Results of experimental and theoretical research of waves of break in the channel of the rectangular form of cross-section with lateral narrowing are resulted.

Key words: problem about dam destruction, a moving wave, experiment, numerical modeling.

REFERENCES

1. Bukreev, V.I. Experimental check of gazo-hydraulic analogy on a problem example about dam destruction [Text] / V.I. Bukreev, A.V. Gusev, A.A. Malisheva, I.A. Malisheva // News RAN. Mechanics of a liquid and gas. — 2004. — N 5. — P. 143–152.
2. Degtyaryov, V.V. (ml.) Physical modelling of the non-stationary hydrodynamic processes arising at extreme emergencies on hydraulic engineering constructions [Text] / V.V. Degtyaryov (ml.), V.N. Shatalina // Works NGASU. — Novosibirsk, 2002. — V. 5, N 2 (17).— P. 45–52.
3. Degtyaryov, V.V. Laboratory installation and measuring complex for research unsteady water flows [Text] / V.V. Degtyaryov, A.S. Pletnew, V.V. Zycov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 4. — P. 93–98.
4. Buntina, M.V. TVD-scheme for calculation of wave currents in open channels [Text] / M.V. Buntina, V.V. Ostapenko // Magazine of calculus mathematics and the mathematical physics. — 2008. — V. 48, N 12. — P. 2212–2224.

УДК 627.514:624.139

Г.И. КУЗНЕЦОВ, Н.В. БАЛАЦКАЯ, Н.С. КАНАШ

МНОГОЯРУСНЫЙ ГИДРООТВАЛ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрены условия нормальной и предаварийной эксплуатации гидроотвалов промышленных отходов. Предложено техническое решение многоярусного гидроотвала, перспективное для суровых климатических условий. Внесены уточнения в методику расчета устойчивости, учитывающие промерзание низового откоса гидроотвала. Приведены результаты расчета фильтрации в массиве гидроотвала.

Ключевые слова: гидроотвал, отходы, дамба, фильтрация, промерзание, дренаж, устойчивость.

Развитие природоохранных технологий складирования промышленных отходов — золошлаков ТЭС, хвостов рудообогащения и шламов в суровых климатических условиях требует решения следующих проблем [1, 2]:

- регулирование фильтрационного режима системы дамба — основание — намывной массив гидроотвала;
- теплоизоляция дренажных систем и обеспечение устойчивости дамб при промерзании низовых откосов.

При нормальном режиме эксплуатации в случае промерзания внешнего откоса массива гидроотвала фильтрационный поток свободно разгружается в незамерзающий дренаж. Неблагоприятный режим эксплуатации гидроотвала формируется при зимнем промерзании внешнего откоса и, как следствие, при недостаточной эффективности или отказе дренажной системы. В таких случаях на внешнем откосе образуются нерегулируемые выходы фильтрационного потока и наледи, отрицательно влияющие на устойчивость сооружения.

Наледи в сочетании с промерзанием откоса затрудняют выход фильтрационного потока; не имея возможности разгружаться в дренаж, поток оказывает взвешивающее давление на поверхностный мерзлый слой. Как показывают натурные наблюдения [1, 2], это может привести к выпору мерзлой корки и разрушению сооружения. Так, например, разрушение дамбы двухъярусного золоотвала Благовещенской ТЭЦ произошло при отказе внутреннего дренажа вследствие его кольматации золой и замерзания воды в дренажных колодцах.

Другой случай разрушения дамбы наблюдался на золоотвале Абаканской ТЭЦ. Здесь образование мерзлой корки на низовом откосе совпало с обильным водонасыщением тела сооружения вследствие значительных фильтрующих повреждений в пленочном экране. Дренирование этой дамбы не было предусмотрено проектом; фильтрационное давление привело к отрыву мерзлой корки от массива дамбы на участке длиной 80 м, разрушению дамбы и вытеканию золошлаковых отложений, воды и льда.

Практика эксплуатации гидроотвалов в суровых климатических условиях показывает, что отказы дренажных систем происходят вследствие замерзания воды в них при уменьшении расхода фильтрата или затруд-

ненном оттоке его из дрены из-за ее засорения и деформаций, длительных перерывов в работе откачивающих насосов, недостаточной эффективности теплоизоляции и по другим причинам. В ряде случаев даже непрерывная откачка и беспрепятственный отвод фильтрата не служили гарантией нормальной работы дренажа в процессе промерзания низового откоса.

Устойчивость гидроотвала рассматривается нами в наиболее сложный период его работы, когда к январю–февралю на откосе формируется водонепроницаемый мерзлый слой. Натурные наблюдения показывают, что при этом в нижней части откоса образуется взвешивающее давление P фильтрационного потока на мерзлый слой.

При расчете по способу А.А. Ничипоровича [2], в котором рассматривается сдвиг массива обрушения по круглоцилиндрической поверхности скольжения, равнодействующая эпюры взвешивающего давления P_n на рассматриваемом участке приложена в точке А к нижней поверхности не-

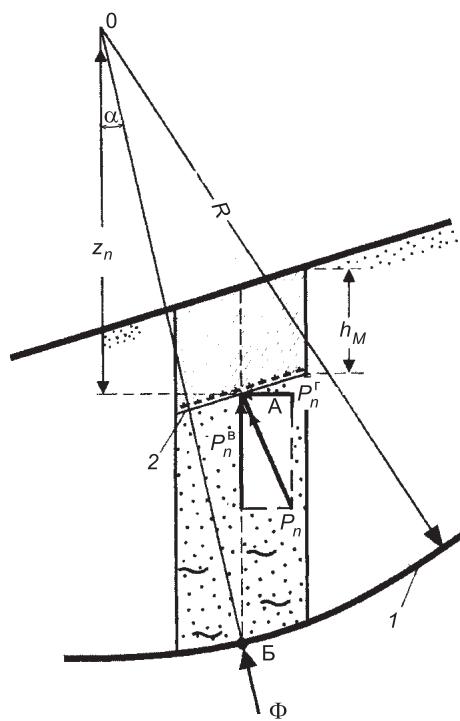


Рис. 1. Силы, действующие на отсек обрушения:

1 — кривая скольжения; 2 — подошва мерзлого слоя на откосе

ка, определяемая по круглоцилиндрической кривой скольжения; h_M — глубина промерзания откоса; величины R — радиус кривой скольжения и α обозначены на рис. 1. В отсеках, где кривая скольжения пересекает мерзлый слой, значения ϕ_n , C_n принимаются в зависимости от температуры грунта в момент расчета (например, в оценке «зимней» устойчивости при максимальной мощности слоя сезонного промерзания и в оценке «весенней» устойчивости, когда под оттаявшим с поверхности слоем сохраняется сравнительно тонкая мерзлая прослойка).

С учетом предлагаемых уточнений формула для определения коэффициента запаса устойчивости имеет вид

проницаемого мерзлого слоя и направлена по нормали к ней (рис. 1). Горизонтальная составляющая P_n^r учитывается как дополнительное сдвигающее усилие при определении момента сдвигающих сил относительно центра вращения расчетного тела обрушения; r_n — плечо этой силы относительно центра вращения. Вертикальная составляющая P_n^v учитывается в качестве подъемной (отрывающей) силы при определении веса отсека G_n , который соответственно уменьшается на величину P_n^v . Остальные обозначения: Φ_n — равнодействующая фильтрационного давления в традиционной трактовке, действующая в объеме талого грунта n -го отсека ниже кривой депрессии в зоне безнапорной фильтрации и ниже подошвы мерзлого слоя на участке напорной фильтрации; она приложена в центре подошвы отсека (в точке Б) и направлена по нормали к поверхности скольжения; $\operatorname{tg}\phi_n$, C_n — коэффициент внутреннего трения и сцепление на подошве расчетного отсека; l_n — длина подошвы n -го отсека;

$$K = \frac{\sum [(G_n - P_n^b) \cos \alpha_n - \Phi_n] \operatorname{tg} n + \sum C_n \cdot l_n}{\sum G_n \cdot \sin \alpha_n + \sum P_n^r \cdot r_n / R}. \quad (1)$$

В свете сказанного представляет интерес предлагаемая авторами незамерзающая дренажная система многоярусного гидроотвала.

Основными элементами гидроотвала (рис. 2) являются первичная дамба, расположенный вдоль нее основной дренаж и вторичные дамбы, размещенные на пляже намыва и образующие последующие ярусы наращивания гидроотвала. Пространственная дренажная система состоит из продольных дренажных лент, уложенных вдоль вторичных дамб, попечерных дренажных лент и вертикальных дрен, соединяющих дренажные ленты друг с другом и с основным дренажом.

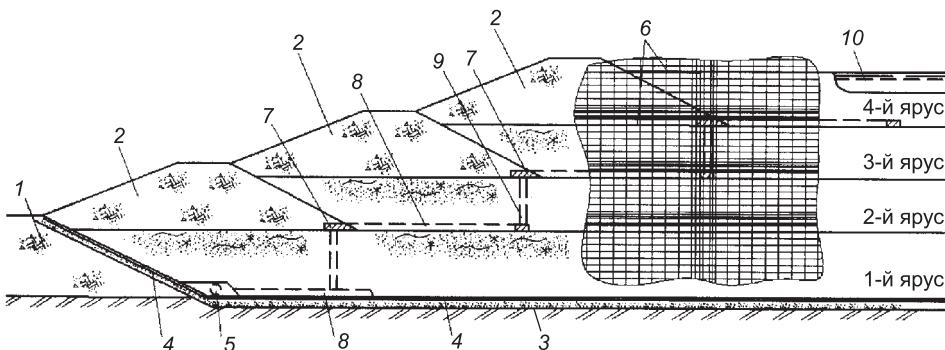


Рис. 2. Многоярусный гидроотвал с незамерзающей дренажной системой и фрагмент схемы конечно-разностной аппроксимации для расчета фильтрации:

1 — первичная ограждающая дамба; 2 — вторичные дамбы; 3 — основание гидроотвала (условный водоупор); 4 — экран ложа; 5 — основной дренаж; 6 — пляж намыва отходов; 7 — продольные дренажные ленты; 8 — поперечные дренажные ленты; 9 — вертикальные дрены; 10 — отстойный пруд с условным коэффициентом фильтрации

Вертикальные дрены выполнены в виде скважин, заполненных фильтрующим материалом (например, крупным песком, мелким гравием и т.п.), или в виде сборных элементов из водопроницаемого пористого бетона; высота этих дрен равна толщине соответствующего яруса.

Поперечные 8 и вертикальные 9 дрены, осуществляющие отвод фильтрата из каждого нового яруса в нижележащий ярус, можно считать прерывистыми дренажами, аналогичными рассмотренным ранее в работе И.И. Ляшко и др. [3]. В ней показано, что при заложении откоса в диапазоне от 1:1 до 1:5 и выполнении соотношения $S/L \leq 0,65...0,7$ практически не происходит высасывания фильтрационного потока на внешний откос плотины (дамбы), т.е. система прерывистых дрен работает как сплошной дренаж (здесь S — расстояние между локальными дренами вдоль дамбы, L — расстояние от этих дрен до поверхности откоса). Следовательно, предлагаемая система регулирования фильтрационного потока в гидроотвале, включающая как продольные дренажные ленты, так и локальные элементы, будет работать как единое дренажное устройство, полностью исключающее высасывание потока на откос между локальными элементами — поперечными и вертикальными дренами. Данное обстоятельство учтено при моделировании фильтрации в массиве гидроотвала.

Эффективность данной системы подтверждается результатами математического моделирования фильтрационного режима гидроотвала. Рассматривалась стационарная фильтрация в плоском вертикальном сечении

n -ярусного гидроотвала, сформированного фильтрационно-однородными на-мывными отложениями хвостов рудообогащения, с коэффициентом фильтрации $K_h = 0,5$ м / сут. Непроницаемым основанием гидроотвала могут быть многолетнемерзлые породы, плотная глина или искусственный экран. Таким образом, нижняя граница расчетной области является линией тока, и градиент напора по нормали к ней равен нулю. Элементы дренажной системы заполнены материалом с коэффициентом фильтрации $K_d = 45,0$ м / сут.

Численное интегрирование дифференциального уравнения (2) профильной безнапорной фильтрации в плоскости x, y (по В.М. Шестакову [1, 2] — уравнения распределения напоров) выполнено с использованием прямоугольной конечно-разностной сетки:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_x \frac{\delta H}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_y \frac{\delta H}{\delta y} \right) = 0. \quad (2)$$

Границочное условие на контуре питания определяется глубиной воды в отстойном пруде. Глубина воды в основной дрене задана из условия безнапорного режима ее работы.

Для равномерной гидродинамической сетки, построенной с интервалом напора $\Delta H = H_i - H_{i-1}$, удельный (на 1 пог. м длины напорного фронта) расход ленты тока определяется по формуле

$$q_i = \frac{K_i \cdot N_i \cdot \Delta H}{l_i}, \quad (3)$$

где K_i — коэффициент фильтрации грунта в данной ленте;

N_i — ширина ленты;

l_i — расстояние между эквидистантами H_i и H_{i-1} .

По данным наших натурных исследований [2], на хвостохранилище высотой до 50 м, расположенному в северо-западной части Якутии в районе со среднегодовой температурой воздуха $-13,4$ °С, глубина многолетнего (5–7 лет) промерзания откоса над депрессионной поверхностью со-

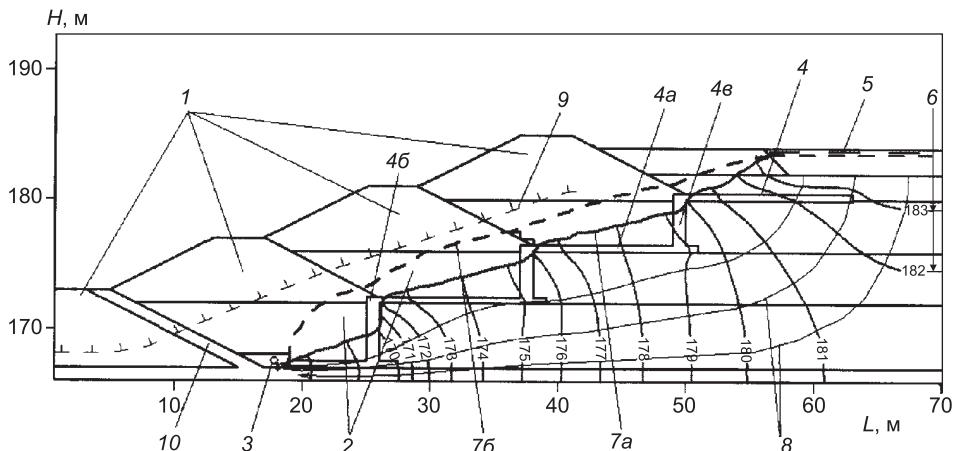


Рис. 3. Модель фильтрации для двух вариантов дренажной системы:

1 — первичная и вторичные дамбы ($K_\phi = 1,5$ м / сут); 2 — ярусы намывных отложений ($K_\phi = 0,5$ м / сут); 3 — основной дренаж ($K_\phi = 45,0$ м / сут); 4 — пространственная дренажная система ($4a$ — продольные дренажные ленты; $4b$ — поперечные дренажные ленты; $4c$ — вертикальные дрены, $K_\phi = 45,0$ м / сут); 5 — отстойный пруд; 6 — эквидистанты; $7a$ — кривая депрессии (предлагаемый вариант); $7b$ — кривая депрессии (при работе только основного дренажа); 8 — линии тока; 9 — глубина промерзания откоса; 10 — противофильтрационный экран ($K_\phi = 0,002$ м / сут)

ставляет 5...8 м при средней температуре фильтрационного потока 10...12 °C.

Анализ фильтрационной сетки (рис. 3) позволяет утверждать следующее.

1. Пространственная дренажная система делает возможным эффективное регулирование фильтрационного режима многоярусного гидроотвала. Практически весь массив поясно наращиваемого низового откоса (внешняя упорная призма) находится в осущенном состоянии. Депрессионная поверхность располагается значительно ниже сезонно-мерзлого слоя, чем и гарантируется незамерзаемость дренажа.

2. Принятые в нашем расчетном примере параметры гидроотвала и его дренажной системы вполне обеспечивают его безопасную эксплуатацию при глубоком промерзании внешнего откоса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, Г.И. Проблемы безопасности специальных гидросооружений (хвостохранилища, золоотвалы, шламонакопители) в условиях Сибири [Текст] / Г.И. Кузнецов // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 3. — С. 61–62.
2. Сысоев, Ю.М. Проектирование и строительство золоотвалов [Текст] / Ю.М. Сысоев, Г.И. Кузнецов. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 248 с.
3. Ляшко, И.И. Расчет фильтрации в зоне гидросооружений [Текст] / И.И. Ляшко, Г.Е. Мистецкий, А.Я. Олейник. — Киев. : Будівельник, 1977. — 120 с.

КУЗНЕЦОВ Г.И., д-р техн. наук, проф.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

БАЛАЦКАЯ Н.В., канд. техн. наук, доц.; E-mail: nball@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

КАНАШ Н.С., асп.; E-mail: NinaKanash@rambler.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено после доработки 26.04.11

Kuznetsov G.I., doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Balatskaya N.V., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: nball@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Kanash N.S., post-graduate student; E-mail: NinaKanash@rambler.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

MULTILEVEL SLUDGE POND IN HARSH CLIMATIC CONDITIONS

The conditions of normal and pre-crash exploitation of sludge pond of industrial waste are considered. The promising technical solution of multilevel sludge pond is proposed for harsh climatic condition. The refinements in the methodology of calculation of stability are done with taking into account the freezing of the bottom slope of sludge pond. The results of the calculation of filtration in a massif of sludge pond are given.

Key words: sludge pond, wastes, dam, filtration, freezing, drainage, stability.

REFERENCES

1. Kuznetsov, G.I. Security problems of special hydraulic (tailings, ash dumps, tailings pond) in Siberia [Text] / G.I. Kuznetsov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 3. — P. 61–62.
2. Sysoev, Yu.M. Design and construction of ash disposal [Text] / Yu.M. Sysoev, G.I. Kuznetsov. — M. : Energoatomizdat, 1990. — 248 p.
3. Lyashko, I.I. Calculation of filtration in the zone of hydro [Text] / I.I. Lyashko, G.E. Mistetsky, A.Ya. Oleinik. — Kiev : Budivelnik, 1977. — 120 p.

УДК 627.8.034

В.А. ШАБАНОВ, В.А. ЛОГИНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРАБОТКИ УРОВНЯ ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА ПОЛОЖЕНИЕ КРИВОЙ ДЕПРЕССИИ

Рассмотрено влияние быстрого снижения уровня воды в водохранилищах на положение кривой депрессии в напорных откосах грунтовых плотин. На основе данных, полученных моделированием процесса, найдены уравнения свободной поверхности, определены области тока и направление гидродинамических сил, получена зависимость высоты высыпчивания от уровня воды в водохранилище.

Ключевые слова: нестационарная фильтрация, водохранилище, фильтрационный поток, напорный откос, щелевая модель, кривая депрессии, уравнение свободной поверхности, гидродинамические силы.

Быстрое понижение уровня воды в водохранилище происходит на гидроузлах суточного регулирования, при аварийных сбросах в нижний бьеф, а также и при откачке обводненных котлованов.

Анализ работы верхового откоса плотины при быстром опорожнении водохранилища показывает, что его устойчивость значительно снижается за счет действия гидродинамических сил фильтрационного потока, направленных в сторону бьефа.

Современными нормативными документами предусматривается определение направления гидродинамических сил, возникающих при быстром снижении уровня водохранилища, но общей методики по построению линий тока и линий равных напоров в случае нестационарной фильтрации не существует.

Нами проведены исследования влияния быстрого снижения уровня воды в водохранилищах на положение кривой депрессии в напорных откосах грунтовых плотин с ядром на аналоговой модели. Для исследования была применена так называемая «щелевая модель», в которой ламинарное течение вязкой жидкости между параллельными пластинками (в «щели») описывается теми же уравнениями, что и плоская ламинарная фильтрация в пористой среде [1].

Моделирование проводилось с применением критерии подобия «по Рейнольдсу», причем в качестве характерного линейного размера для натуры взят эффективный диаметр грунта тела плотины, а для модели — ширина щели. Были подсчитаны масштабные коэффициенты и на основании масштаба коэффициентов динамической вязкости определена рабочая жидкость — водный раствор глицерина.

Масштабы моделирования определены исходя из условия одинаковости типа течения на модели и в натуре. В обоих случаях течения должны быть ламинарными. Для моделирования подобрана жидкость с коэффициентом кинематической вязкости, равным $\nu = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, которая удовлетворяет условиям подобия.

Методика проведения эксперимента. В собранную установку заливалась рабочая жидкость до зафиксированного уровня. Опыт начинался при открытии сливного отверстия. Одновременно начинался отсчет времени.

При понижении уровня водохранилища в верховом клине начинает формироваться кривая депрессии, образуется высота высачивания. Положение кривой депрессии и уровня жидкости в моделируемом напорном откосе через равные промежутки времени фиксировалось фотокамерой. Затем фотографии обрабатывались в программах Adobe Photoshop и AutoCad. На каждой депрессионной кривой выбиралось 10–20 точек в зависимости от ее длины, через которые затем проводилась аппроксимирующая кривая.

Траектории движения прослеживались на частицах, помещенных в различные области модели. Перемещение частицы во времени фиксировалось маркером на смотровом стекле модели. Затем координаты точек переносились на чертеж и строились траектории движения частиц фильтрационного потока внутри откоса.

На основе данных, полученных моделированием процесса, найдены уравнения свободной поверхности, определены области тока и направление гидродинамических сил, получена зависимость высоты высачивания от уровня воды в водохранилище. Положение кривых депрессии приведено на рис. 1. Для наглядности на рисунке изображено 5 кривых (всего по результатам опытов получено 15 кривых), время — модельное, указано в минутах.

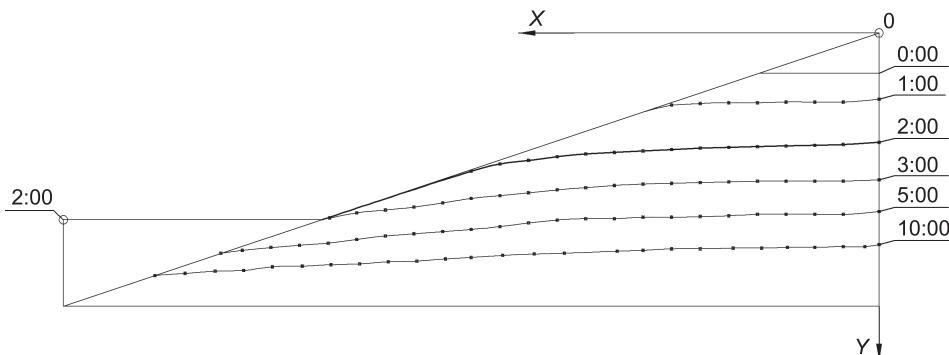


Рис. 1. Положение кривой депрессии

При обработке данных опытов движение частиц жидкости рассматривалось как сложное:

- относительное движение в подвижной системе координат, связанной с уровнем воды в водохранилище;
- переносное движение подвижной системы координат.

Начало отсчета находится в верхней правой точке — точке пересечения откоса с вертикалью, ограничивающей верховой клин плотины. В неподвижной системе координат положительные значения по оси X откладываются влево, а по оси Y — вниз. Подвижная система координат перемещается вниз по вертикали вместе с понижением уровня водохранилища. Это дает возможность выделить область фильтрационного потока, высчитывающуюся на откос плотины. В относительной системе координат скорости течения в области выше уровня воды водохранилища на одной из вертикалей фильтрационного потока согласно уравнению Буссинеска [2] равны.

Каждая из депрессионных кривых в подвижной системе координат аппроксимировалась полиномом второй степени вида

$$y = ax^2 + bx + c.$$

Значения коэффициентов полинома для различных депрессионных кривых, т.е. для различных моментов времени, уровня воды в водохранилище и высоты высасывания приведены в таблице. Численные значения коэффициентов зависят от геометрии области течения — заложения откоса, свойств пористой среды — гранулометрического состава грунта, его уровнепроводимости и времени [3].

Значения коэффициентов полинома для различных депрессионных кривых

$t, \text{ с}$	a	b	c	$h_{\text{вдхр}}, \text{ мм}$	$h_{\text{выс}}, \text{ мм}$
60	0,0011	0,1231	-23,794	45	18,71
75	0,0009	0,1196	-28,958	58	21,13
90	0,0008	0,1228	-36,27	73	27,61
105	0,0007	0,1049	-45,096	89	31,12
120	0,0005	0,0914	-51,493	104	33,59
135	0,0005	0,0894	-60,974	122	39,67
150	0,0004	0,0745	-73,905	140	51,74
165	0,0004	0,0729	-86,167	159	63,34

При построении графиков зависимости коэффициентов полинома от времени можно заметить их сходство, а также сходство функций, описывающих изменение коэффициентов. Этот факт служит основанием предположения об их подобности.

Рассмотрим изменение нормированных (т.е. приведенных к единице) коэффициентов a, b, c аппроксимационного полинома, уровня воды в водохранилище и высоты высасывания в зависимости от времени сработки (ось X — модельное время сработки водохранилища в секундах). Графики изменения значений коэффициентов a, b, c приведены на рис. 2. Из графиков видно, что точки практически совпадают, а следовательно, они описываются практически одной и той же функцией.

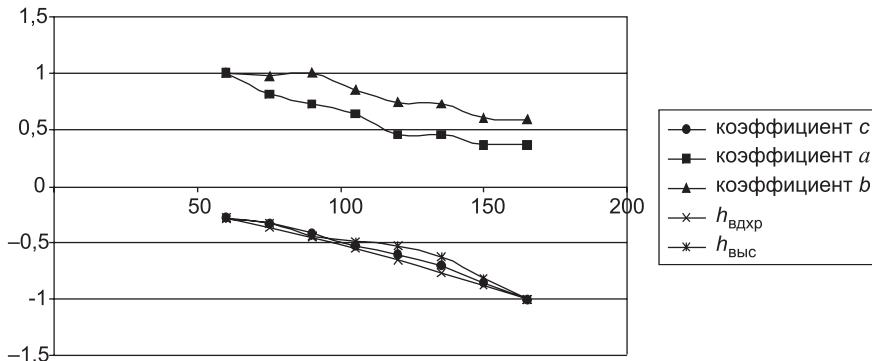


Рис. 2. Графики изменения значений коэффициентов a, b, c

Значения коэффициентов полиномов зависят от времени, влияние которого учитывается функцией сработки уровня водохранилища. И эта функция может быть представлена в виде сомножителя:

$$Q(x, t) = h(t)f(x).$$

Здесь Q — любой геометрический параметр фильтрационного потока, в том числе и коэффициенты аппроксимационного полинома.

Как было указано выше, депрессионные кривые строились в подвижной системе координат, связанной с переменным уровнем воды в водохранилище. Скорость движения жидкой частицы в относительной системе координат v_x направлена горизонтально, а переносная скорость v_y — вертикально.

Модуль вектора скорости будет равен геометрической сумме составляющих скоростей:

$$v = (v_x^2 + v_y^2)^{0.5}.$$

Причем $v_x = A \cdot df(x)/dx$, а $v_y = B \cdot dh(t)/dt$ в рассматриваемый момент времени, где A и B — коэффициенты, зависящие от уровнепроводимости.

Выводы. 1. В области течения, находящейся выше уровня водохранилища, для определения горизонтальных скоростей можно использовать уравнение $v_x = 2ax + b$.

2. Вертикальная составляющая скорости v_y зависит от режима сработки водохранилища.

3. Установлена связь между изменением коэффициентов полинома, изменением уровня воды в водохранилище и изменением высоты высачивания фильтрационного потока во времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аравин, В.И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде [Текст] / В.И. Аравин, С.Н. Нумеров. — М. : Гос. изд. технико-теорет. лит., 1953. — 616 с.
2. Шабанов, В.А. Экспериментальные исследования фильтрационных течений в верхнем клине грунтовой плотины с ядром при быстрой сработке уровня водохранилища [Текст] / В.А. Шабанов, В.А. Логинов // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика : Всерос. науч.-техн. конф. / Самар. гос. арх.-строит. ун-т. — Самара, 2007. — 561 с.
3. Методические указания по фильтрационному расчету вертикального дренажа и открытого водоотлива при вскрытии месторождений полезных ископаемых способом гидромеханизации (земснарядами) [Текст]. — Белгород : ЦНИИголосушение, 1966. — 83 с.

*ШАБАНОВ В.А., канд. техн. наук, проф.; E-mail: shabanov@sgasu.smr.ru
 Самарский государственный архитектурно-строительный университет
 ЛОГИНОВ В.А., инж.; E-mail: LoginovVA@srgov.gosnadzor.ru
 Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 13.05.11

Shabanov V.A., candidate of technical sciences, professor; E-mail: shabanov@sgasu.smr.ru, Samara State University of Architecture and Engineering, Russia

Loginov V.A., engineer; E-mail: LoginovVA@srgov.gosnadzor.ru, Samara State University of Architecture and Engineering, Russia

STUDY OF THE EFFECT OF RESERVOIR'S WATER LEVEL DRAWDOWN ON THE DEPRESSION CURVE

The article focuses attention to the study of the effect of reservoir's water level rapid drawdown on the position of depression curve in the pressure slopes of earth dams.

Based on the data of the process simulation, the equations of free surface have been found, the areas of current and direction of the hydrodynamic forces have been identified, the dependence of height of seep from the reservoir's water level has been determined.

Key words: non-stationary filtering, (water storage) reservoir, seepage flow, pressure slope, crevice model, depression curve, equation of the free surface, hydrodynamic forces.

REFERENCES

1. Aravin, V.I. Theory of Motion of Liquids and Gases in Non-Deformable Porous Medium [Text] / V.I. Aravin, S.N. Numerov. — M. : Gos. izd. tehniko-teoreticheskoi literatury, 1953. — 616 p.
 2. Shabanov, V.A. Experimental Studies of Seepage Flows in the Upper Wedge of an Earth Dam with the Kernel during Rapid Drawdown of Reservoir Level [Text] / V.A. Shabanov, V.A. Loginov // Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika: vseros. nauchno-tehn. konf. / Samara State University of Architecture and Engineering. — Samara, 2007. — 561 p.
 3. Methodical Instructions on Filtration Calculation of the Vertical Drainage and Open Dewatering at the Opening of Mineral Deposits by Using Dredging Methods (by Dredgers) [Text] — Belgorod : TSNIIgorosushenie, 1966. — 83 p.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.14

**А.М. БЕРЕГОВОЙ, В.А. БЕРЕГОВОЙ,
А.В. МАЛЬЦЕВ, М.А. ПЕТРЯНИНА**

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ С БОЛЬШИМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Показана эффективность выполнения обследований домов старой застройки с целью подготовки и реализации научно обоснованных проектов по энергосбережению. На конкретном примере определены и рассмотрены в рамках критериального анализа основные показатели энергоэффективности, влияющие на энергосбережение таких зданий после проведения в них комплекса малозатратных мероприятий по восстановлению.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, показатели энергоэффективности, старая застройка, наружные ограждения.

Одним из основных факторов, влияющих на физическое и моральное старение здания, является потеря теплозащитных свойств его ограждающих конструкций, что снижает эффект энергосбережения и приводит к прогрессирующему ухудшению микроклимата помещений. Так, например, выполненные нами натурные инструментальные обследования жилых зданий с более чем 20-летним сроком эксплуатации в г. Пензе и области показали, что по удельной величине тепловой энергии на отопление q_h^{des} обследованные здания существенно уступают нормативным требованиям.

При этом класс энергетической эффективности этих зданий варьировался в пределах: 1–2-этажные здания — «очень низкий»; 5-, 9- и 14-этажные здания — «низкий» и «очень низкий» (табл. 1).

Существенный эффект в решении проблемы энергосбережения на первом этапе восстановления зданий, не прошедших регулярных текущих и капитального ремонта, может принести хорошо продуманная и

Таблица 1
Теплоэнергетические показатели ряда обследованных типовых зданий

Типы обследованных зданий	Потребность в тепловой энергии Q_h^y , МДж	Величина q_h^{des} , кДж/(м ² · °C · сут)		Класс энергетической эффективности зданий
		факт.	норматив.	
1-этажный кирпичный дом	99 075,9	355	125	Очень низкий
2-этажный трехсекционный шлакоблочный дом	973 899	160	70	Очень низкий
5-этажный четырехсекционный панельный дом	1 753 225	122	85	Низкий
9-этажный девятисекционный панельный дом	2 588 102,5	120	76	Низкий
14-этажный односекционный кирпичный дом	5 161 457	145	70	Очень низкий

поставленная работа в виде комплекса малозатратных мероприятий, которые не требуют значительных материально-финансовых затрат. Они в основном заключаются в исправлении отдельных дефектов наружных ограждений, в том числе участков с «пустошкой» кладки, нарушенной гидро- или теплоизоляцией, а также в восстановлении требуемого воздухообмена помещений, влияющего как на энергосбережение в здании, так и на экологию его помещений (герметизация некоторых стыковых соединений наружных ограждений, восстановление целостности их светопрозрачных участков, регулирование открывания приточных отверстий и исправление дефектов вытяжных каналов в системе естественной вентиляции и др.). Например, значительный энергосберегающий эффект (по разным оценкам от 20 до 60 %) может дать проведение работ по предотвращению высокого уровня неконтролируемой воздухопроницаемости через наружные ограждения таких зданий (уплотнение притворов и замена части стекол окон, а также герметизирующих прокладок стыков панелей, нанесение наружной штукатурки на участки с «пустошкой» кладки стен, поддержание требуемого температурно-влажностного режима чердачных помещений, устройство самозакрывающихся дверей тамбуров).

Без проведения такого комплекса малозатратных мероприятий, характеризуемого множеством подчас случайных факторов воздействия на энергосбережение здания, трудно ожидать значительного технико-экономического эффекта при осуществлении более сложных технических решений, в том числе инновационного характера. Здесь важно учесть не только устоявшиеся требования, предъявляемые к зданию (долговечность, противопожарные, экономические и др.), но и не упустить выходящие сейчас на первый план требования к микроклимату и экологическим параметрам воздуха помещений. В процессе восстановления теплозащиты здания некоторые энергосберегающие мероприятия часто проводятся в ущерб экологическому состоянию внутренней среды проживания (например, работы по минимизации размеров приточных отверстий, приводящие к уменьшению воздухообмена помещений, широкое использование полимерных теплоизоляционных материалов в тепловой защите и отделочных слоях ограждений, вызывающие необходимость повышения интенсивности естественной вентиляции здания). Поэтому как для восстанавливаемых, так и для проектируемых зданий поиск основных факторов воздействия и оценку их влияния на энергосбережение здания желательно проводить путем рассмотрения всех их взаимосвязей в единой энергетической и экологической системе здания (ЕЭЭС).

Такой анализ воздействия климатических, теплофизических факторов и конструктивных показателей наружной оболочки в структуре ЕЭЭС проектируемого здания проводился рядом авторов, в том числе он был сделан в работе [1]. Для восстанавливаемых зданий анализ выполнен с использованием формулы [1]

$$K_{ui} = \sum_{j=1}^n q_{ij} k_{ij} + \sum_{j=1}^n q_{ij}^* k_{ij}^* r_i, \quad (1)$$

где K_{ui} — суммарный обобщенный критерий энергоэффективности здания при нормативных параметрах микроклимата помещений для i -го варианта задачи, j -го числа рассматриваемых показателей эффективности, u -го количества значений суммарного критерия;

$\sum_{j=1}^n q_{ij} k_{ij}$ и $\sum_{j=1}^n q_{ij}^* k_{ij}^*$ — соответственно суммы произведений $q_{ij} k_{ij}$, в которых сочетание безразмерных показателей эффективности не вызывает

понижающего эффекта в энергосбережении или, напротив, является его причиной;

q_{ij} и r_i — соответственно коэффициенты весомости и понижения суммарного эффекта ряда показателей, определяемые экспериментальным или расчетным путем;

k_{ij} — показатель эффективности энергосбережения.

По данным натурных обследований группы малоэтажных жилых зданий наиболее значительные дефекты были отмечены в тепловой защите стропильной конструкции крыши с «холодным» чердаком. Упомянутый анализ был сделан для этой наружной конструкции двухэтажного жилого здания. В качестве обобщенного суммарного критерия для исследуемого случая был принят приведенный коэффициент теплопередачи через наружные ограждающие конструкции здания [2]:

$$K_m^{tr} = \frac{A_w / R_w^r + A_F / R_F^r + A_{ed} / R_{ed}^r + A_{c1} / R_{c1}^r + A_f / R_f^r}{A_e^{sum}}, \quad (2)$$

где в числителе и знаменателе слагаемых даны площади, м², и приведенное сопротивление теплопередаче, (м² · °C) / Вт, соответственно наружных стен, заполнений светопроемов, наружных дверей, чердачного и цокольного перекрытий;

A_e^{sum} — общая площадь внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций, м². Показателями эффективности служили коэффициенты теплопередачи перечисленных выше конструкций $k_{1j} = 1 / R_{1j}$.

Коэффициент понижения суммарного эффекта r_1 , а также приведенное сопротивление теплопередаче R_{1j} ограждений определялись по результатам обмеров наружных ограждений и лабораторных измерений коэффициента теплопроводности λ материала проб, взятых из этих конструкций. Причиной повышения коэффициента r_1 , вызвавшего понижение суммарного эффекта энергосбережения, послужило существенное увеличение коэффициента теплопроводности λ теплоизоляции в виде засыпки из доменного шлака по чердачному перекрытию (с 0,19 до 0,23). На теплопроводность этого материала воздействовали несколько неблагоприятных факторов: эпизодическое увлажнение материала утеплителя диффундирующими потоком водяного пара со стороны помещений в зимнее время при отсутствии пароизоляционного слоя, а также очень слабое функционирование системы естественной вентиляции чердака через отверстия малой площади в слуховых окнах.

Значения теплотехнических показателей для определения коэффициента r_{14} приняты следующие:

в начальной стадии эксплуатации здания — по данным проектной документации, при этом $K_m^{tr} = 1,13$; для чердачного перекрытия $R_{c1}^r = 1,35$; $k_{14} = 0,74$;

в стадии обследования $R_w^r = 1,04$; $R_F^r = 0,44$; $R_{ed}^r = 0,6$; $R_{c1}^r = 0,95$; $R_f^r = 1,0$; при этом $\lambda = 0,23$; $R_{c1}^r = 0,95$; $k_{14} = 1,05$. Таким образом, коэффициент теплопередачи k_{14} этого перекрытия за время эксплуатации увеличился в 1,4 раза, с чем и связано соответствующее повышение коэффициента r_{14} .

Весовой коэффициент q_{14} находился расчетным путем по формуле (2) в виде доли величины K_m^{tr} , приходящейся на чердачное перекрытие. В начальной стадии эксплуатации здания весовой коэффициент q_{14} чердачного перекрытия составил

$$(601 / 1,35) / 1670 = 0,27, \quad q_{14} = 0,27 / 1,13 = 0,24.$$

На стадии обследования при расчете K_m^{tr} учтено, что старые конструкции окон в этом здании были заменены на новые из деревянных раздельно-спаренных переплетов:

$$K_m^{tr} = \frac{551 / 1,04 + 6 / 0,6 + 134 / 0,44 + 601 / 0,95 + 601 / 1}{1670} = 1,24.$$

Весовой коэффициент q_{14} чердачного перекрытия составил

$$(601 / 0,95) / 1670 = 0,38, \quad q_{14} = 0,38 / 1,24 = 0,31,$$

т.е. его величина по сравнению с начальной стадией эксплуатации здания возросла в 1,29 раза.

Таким образом, значительное увеличение коэффициента понижения суммарного эффекта r_{14} и весового коэффициента q_{14} чердачного перекрытия за время эксплуатации здания подтверждает результаты натурных обследований здания, выявивших ряд существенных дефектов тепловой защиты его «холодного» чердака. Результаты дальнейшего расчета энергоэффективности этого здания указали на его низкую тепловую эффективность (табл. 1, двухэтажное здание).

Натурные обследования группы жилых зданий, имеющих вполне удовлетворительные прочностные характеристики, показали, что решающее значение на энергосбережение после проведения первого этапа восстановления оказывает сравнительно небольшой круг факторов ЕЭЭС (табл. 2). Действительно, выполнение предшествующих малозатратных видов работ нацелено на устранение многочисленных дефектов конструкций наружных ограждений и тепловой защиты здания. Таким образом, при доброкачественном исполнении этой работы из широкого круга факторов влияния на энергосбережение здания исключается негативное влияние целого ряда вышеупомянутых конструктивных и теплофизических показателей.

Восстановление указанных в табл. 2 функциональных свойств некоторых подсистем и элементов ЕЭЭС здания дает определенный энергосберегающий эффект. Так, например, использование указанных в таблице способов восстановления теплотехнических свойств утеплителя чердачных перекрытий способствует снижению как тепловых потерь через крышу здания, так и массы нарастающего снежно-ледяного покрова на кровлях в результате циклически повторяющихся процессов оттаивания—замерзания сугробов снегового слоя на скатах. Такие здания с запущенными чердачными помещениями представляют собой угрозу пешеходам, и в них отмечается интенсивное разрушение системы водостока.

Отсутствие устройств регулирования тепла, в том числе в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) зданий, вызвало по причине относительно высокой температуры в первой декаде ноября 2010 г., наблюдавшейся во многих регионах нашей страны, многочисленные случаи перетопа помещений и негативно сказалось на эффективности реализации региональных программ энергосбережения в зданиях. Устранение возникшего температурного дискомфорта осуществлялось жильцами путем периодического открывания створок переплетов.

Как известно, использование энергии рассеянных природных источников для тепловой потребности зданий дает наибольший эффект в одно- и двухэтажных зданиях, имеющих небольшую тепловую нагрузку. Некоторые способы повышения энергоактивности наружных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий рассматриваются в работах [3, 4].

Таблица 2

Влияние факторов ЕЭС здания на энергосбережение

Показатель энергоэффективности k_{ij} подсистем	Причины снижения энергоэффективности	Возможные способы восстановления функции	Эффективность энергосбережения
Тепловая защита наружных ограждающих конструкций	Чрезмерная увлажненность материала наружных стен и слоя утеплителя. Изношенность и самоуплотнение структуры сыпучего или рыхлого утеплителя в чердачных перекрытиях и стенах	Вентилируемый сайдинг. Энергетическая сушка. Перелопачивание или замена утеплителя на перекрытии. Дополнительное утепление перекрытий жесткой плитой из минваты толщиной 50 или 100 мм	Уменьшение теплопотерь: через конструкцию стены на 5–10 %; через перекрытие в 1,5–3 раза
Возрастание инфильтрационной составляющей тепловых потерь, особенно при воздействии сильного доминирующего температурно-ветрового напора		Дополнительные конструктивные мероприятия по снижению воздушпроницаемости стыковых соединений наружных отражений	Уменьшение теплопотерь через наружную стену на 20–80 %
Теплоснабжение здания		Наладка номинальных теплогидравлических режимов отопительной системы здания, ИТП, ЦПИ и теплосети	Снижение суммарного расхода энергии на отопление на 20–30 %
Использование альтернативных источников энергии для дополнительного отопления здания	Плохая приспособленность объемно-планировочного, конструктивного решения здания и подвалных помещений к использованию этих видов энергии. Затененность фасадов и малая светопропускаемость окон, ориентированных на солнечные стороны горизонта	Дополнительное оборудование здания освещенными тепловыми буферными зонами (террасами, атриумами и др.). Использование на окнах теплозащитных штор, ставеньи и жалюзи. Применение энергактивных конструкций и устройств на наружной оболочке здания	Повышение эффективности энергосбережения на 5–10 %

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Береговой, А.М. Показатели эффективности в системном анализе теплопотерь через энергосберегающие наружные ограждения [Текст] / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 5. — С. 57–61.
2. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Текст] / Госстрой России. — М. : ФГУП ЦПП, 2004.
3. Селиванов, Н.П. Энергоактивные здания [Текст] / Н.П. Селиванов, А.И. Мелуа, С.В. Зоколей и др. / Под ред. Э.В. Сарнацкого и Н.П. Селиванова. — М.: Стройиздат, 1988. — 376 с.
4. Береговой, А.М. Энергосбережение в жилых зданиях с альтернативными источниками энергии [Текст] / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Жилищное строительство. — 2008. — № 5. — С. 36–37.

БЕРЕГОВОЙ А.М., д-р техн. наук, проф.; E-mail: vabereg @ Rambler.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
БЕРЕГОВОЙ В.А., канд. техн. наук, доц.; E-mail: vabereg @ Rambler.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
МАЛЬЦЕВ А.В., асп.; E-mail: gsia @ pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ПЕТРЯНИНА М.А., асп.; E-mail: gsia @ pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено после доработки 20.04.11

Beregovoy A.M., doctor of technical sciences, professor; E-mail: vabereg @ Rambler.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Beregovoy V.A., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vabereg @ Rambler.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Maltsev A.V., post-graduate student; E-mail: gsia @ pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Petryanina M.A., post-graduate student; E-mail: gsia @ pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

ENERGY SAVINGS IN THE RESIDENTIAL BUILDINGS WITH BIG SERVICE-LIFE

The efficiency of the investigation of old building is considered with a view to prepare and realize the scientific based designs on their energy savings. The calculations and description of important indices of efficiency within the system analyses are presented, influencing on energy savings of such buildings after carrying-out of complex of not expensive measures on their restoration.

Key words: thermal efficiency, energy saving effect, efficiency indices, old building, external enclosure structures.

REFERENCES

1. Beregovoy, A.M. The Indices of Efficiency in the System Analysis of the Heat loss through Energy Saving External Enclosure Structures [Text] / A.M. Beregovoy, O.L. Victorova, V.A. Beregovoy // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 5. — P. 57–61.
2. SNiP 23-02-2003. Thermal performance of the buildings [Text] // Gosstroy of Russia. — М., 2004.
3. Selivanov, N.P. Energy Active Buildings [Text] / N.P. Selivanov, S.V. Szokolay, A.I. Melua / Eds E.V. Sarnatsky, N.P. Selivanov. — М. : Stroyizdat, 1988. — 376 p.
4. Beregovoy, A.M. Energy Saving in the Domestic buildings with Alternative Energy Sources [Text] / A.M. Beregovoy, O.L. Victorova, V.A. Beregovoy // House Building. — 2008. — N 5. — P. 36–37.

УДК 697.11:536.25

А.Н. МАШЕНКОВ, Е.А. КОСОЛАПОВ, Е.В. ЧЕБУРКАНОВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА
ОКОЛО СТЕНЫ ЗДАНИЯ
В ПРИБЛИЖЕНИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Разработан метод численного решения системы уравнений свободной конвекции около стены здания в приближениях Буссинеска и пограничного слоя. Для конкретных исходных данных получены распределения скорости и температуры в пограничном слое. Даны рассчитанные значения ширины теплового и динамического пограничных слоев.

Ключевые слова: метод численного решения, пограничный слой, приближение Буссинеска, толщина тепловая, толщина динамическая.

Важнейшим процессом, определяющим требования к теплоизоляционным характеристикам наружных стен зданий, является свободная конвекция. При разной температуре стены здания и окружающего воздуха около стены образуется пограничный слой конвективного движения и теплообмена. Если температура окружающего воздуха меньше температуры стены, то поток будет восходящим, в противоположном случае — нисходящим.

При определении толщины утеплителя наружной стены одной из составляющих ее термического сопротивления является слагаемое $R_h = 1/\alpha_h$, где R_h и α_h — соответственно термическое сопротивление и коэффициент теплообмена наружной поверхности стены. В свою очередь в общем виде $\alpha_h = \alpha_k + \alpha_l$, где α_k и α_l — соответственно коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена.

Работа посвящена определению локальной составляющей конвективного теплообмена α_k (по тексту α) численными методами, а удельный поток теплоты q считается заданным и постоянным. Не рассматривается физика процессов подвода теплоты к наружной поверхности изнутри помещения, а также лучистый теплообмен на наружной поверхности — α_l .

Данная работа является важным этапом, она позволяет рассчитывать по разработанному алгоритму локальные (по высоте здания) характеристики внешнего конвективного теплообмена.

Ввиду слабой интенсивности конвекции для ее описания можно использовать приближение Буссинеска [1], которое учитывает изменение плотности воздуха только в подъемной силе, а во всем остальном течение считается несжимаемым. В приближении пограничного слоя не учитывается давление, а также вязкость и теплопроводность вдоль пограничного слоя [2]. С учетом приведенных допущений система уравнений, описывающая свободную конвекцию, направленную вверх, будет иметь вид [3]

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \text{Gr} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + T, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \text{Gr} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{\text{Pr}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время;

u, v — компоненты скорости поперек и вдоль пограничного слоя соответственно;

T — температура, равная разности температур в пограничном слое и окружающем воздухе, т.е. превышение температуры над температурой воздуха. Оси координат выбраны, как показано на рис. 1.

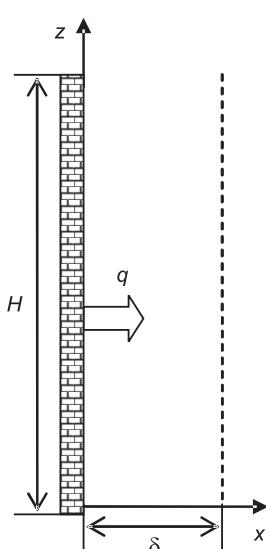


Рис. 1. К постановке задачи

Система уравнений (1) приведена для безразмерных величин. Выражения для размерных комплексов, на которые надо умножать безразмерные параметры, приведены в табл. 1.

Оценочная ширина пограничного слоя рассчитывалась по формуле, преобразованной из [2]:

$$\delta = \left(\frac{v^2 \lambda H}{g \beta q} \right)^{0.2}, \quad (2)$$

где v — коэффициент кинематической вязкости для воздуха;

λ — коэффициент теплопроводности;

H — высота здания;

g — ускорение силы тяжести;

β — температурный коэффициент расширения;

q — плотность теплового потока со стороны стены здания.

Критериальные числа Грасгофа и Прандтля определяются формулами

$$\text{Gr} = \frac{g \beta q H^2 \delta^2}{\lambda v^2}, \quad \text{Pr} = \frac{v}{\chi}, \quad (3)$$

где χ — коэффициент температуропроводности воздуха. Здесь мы ушли от параметра T и выразили число Gr через плотность теплового потока q , которая считается заданной и постоянной:

$$q = \frac{T \lambda \delta^2}{H^3}. \quad (4)$$

Числа Gr и Pr являются характерными, а не локальными, представляющими некие константы для данной задачи.

Систему дифференциальных уравнений в частных производных (1) можно свести к системе обыкновенных дифференциальных уравнений пут-

Таблица 1

Параметр	x	z	v	u	T	t
Размерный комплекс	δ	H	$\frac{g \beta q H^3}{\lambda v}$	$\frac{g \beta q H^2 \delta}{\lambda v}$	$\frac{q H^3}{\lambda \delta^2}$	$\frac{\delta^2}{v}$

тем введения автомодельных переменных [2]. Однако введение таких переменных требует дополнительных допущений, кроме того, решение полученных обыкновенных дифференциальных уравнений возможно численными методами.

В связи с этим для решения системы уравнений (1) был разработан прямой специальный разностный метод. Для получения стационарного решения используется нестационарная система уравнений (1). Стационарное решение получается в результате процесса установления, т.е. начальные распределения температуры и компонент скорости задаются произвольно. В процессе многократного повторения расчетов (шагов по времени) за счет стационарности граничных условий достигается стационарное решение.

Так как формула (2) дает только оценочную ширину пограничного слоя, расчетная область по оси x выбирается от 0 до $k\delta$, где $k > 1$. В данной работе использовалось $k = 10$. Таким образом, расчетная область в безразмерных переменных имеет вид

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq 10, \\ 0 \leq z \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Границные условия для системы уравнений (1) выглядят следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} v \Big|_{x=0; x=10} = u \Big|_{x=0} = T \Big|_{x=10} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{x=0} = -\left(\frac{\delta}{H}\right)^3, \\ v \Big|_{z=0} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \\ \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \Big|_{z=1} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_{z=1} = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

Эти граничные условия соответствуют условиям прилипания для скорости на стенке, безветренной погоде, постоянству температуры наружного воздуха по высоте здания, отсутствию теплового потока снизу и заданной плотности теплового потока со стороны стенки здания. Граничные условия на верхней границе ($z = 1$) можно трактовать как экстраполяцию нулевого порядка градиента скорости и температуры.

Главной особенностью разработанного метода является расчет одного шага по времени с расщеплением системы (1) по физическим процессам. Таким образом, расчет шага по времени делится на несколько этапов, примерно как в работах [3, 4]. Алгоритм расчета представлен на рис. 2.

Отметим еще некоторые особенности разработанного метода. Для его реализации используется разнесенная разностная сетка, что позволяет «усилить» устойчивость разностной схемы. Параметры v и T относятся к центрам ячеек разностной сетки, а u относится к левым и правым границам этих ячеек. Поэтому граничные условия для u ставятся только слева (6), а справа они получаются в результате расчетов.

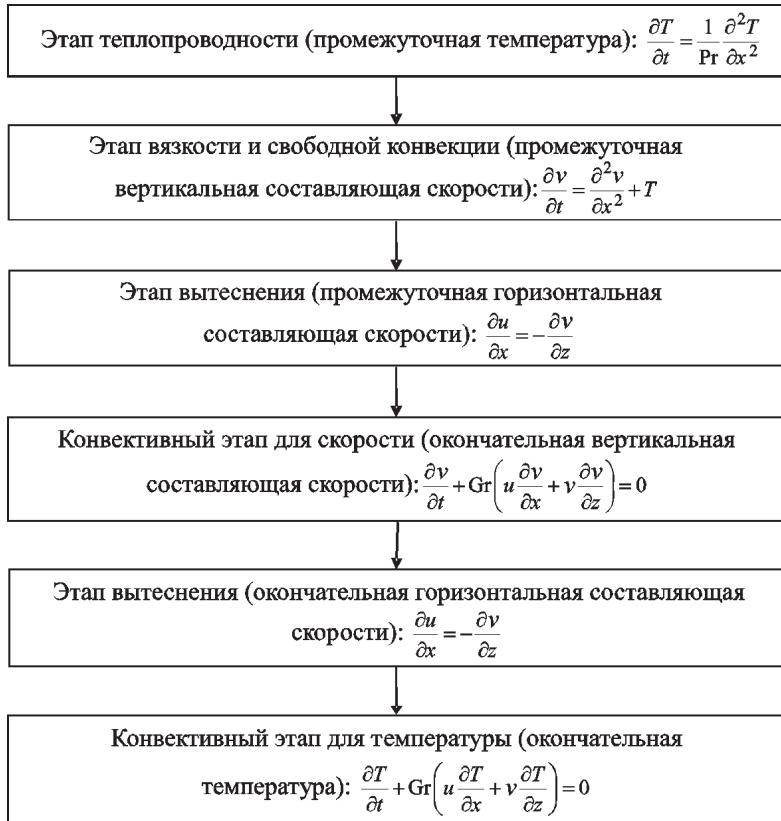


Рис. 2. Алгоритм расчета одного шага по времени

Разработанный алгоритм был реализован на языке Си++ в виде пакета программ со стандартным интерфейсом типа Документ-Вид. Имеются три основные диалоговые панели: «Исходные данные», «Расчет» и «Графическая обработка результатов».

Выполненные тестовые расчеты показали хорошую сходимость алгоритма. Так, при сетке 100×50 расчет 5000 шагов по времени занял менее минуты на персональном компьютере средней мощности. При этом достигалось хорошее установление: отклонение всех параметров на соседних шагах по времени не превышало $7 \cdot 10^{-4}$ % для всех искомых величин.

Ниже приведены результаты расчета для высоты здания $H = 15$ м и плотности теплового потока $q = 10$ Вт / м². Получено максимальное превышение температуры $T = 9,6$ К, максимальная вертикальная составляющая скорости $v = 1,1$ м / с, максимальные толщины пограничного слоя по температуре $\delta_T = 6,3$ см, по скорости $\delta_v = 8,3$ см. Ширина пограничного слоя определяется из условия относительного изменения параметров не более 0,1 %. Например, для температуры точка i выбирается из условия $|T_{i,j} - T_{i-1,j}| < 0,001 (T_{\max} - T_{\min})$, где $j = 1, \dots, 50$.

В рассматриваемом примере расчета задается постоянная плотность теплового потока. Таким образом, температура наружной стенки здания непостоянна. В этом случае проверить численный расчет методами теории подобия можно только для локальных величин. В верхней части здания локальный коэффициент теплоотдачи будет равен

$$\alpha = \frac{q}{T} = \frac{10}{9,6} = 1,04 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (7)$$

Для подсчета локального коэффициента теплоотдачи по теории подобия воспользуемся методикой, предложенной в работе [2]. При расчете различных величин будем использовать характеристики воздуха, соответствующие 0°C , приведенные в табл. 2.

Таблица 2

$\beta, \text{К}^{-1}$	$\lambda, \text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	$\chi, \text{м}^2/\text{с}$	$v, \text{м}^2/\text{с}$
$3,41 \cdot 10^{-3}$	$24,4 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$

Локальное число Грасгофа на высоте $z = H$ будет равно

$$Gr_z = \frac{g\beta q z^4}{\lambda v^2} = 3,92 \cdot 10^{15}. \quad (8)$$

По предложенному в [2] уравнению подобия найдем значение локального числа Нуссельта:

$$Nu_z = \left(\frac{Pr^2}{4 + 9Pr^{1/2} + 10Pr} \right)^{0.2} Gr_z^{0.2} = 0,485 Gr_z^{0.2} = 637. \quad (9)$$

Окончательно находим локальный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu_z \lambda}{H} = 1,04 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (10)$$

что соответствует значению, вычисленному по формуле (7).

На рис. 3 приведены эпюры вертикальной составляющей скорости и температуры на трех различных высотах, здесь же указаны границы динамического и теплового пограничных слоев. Отметим, что характер

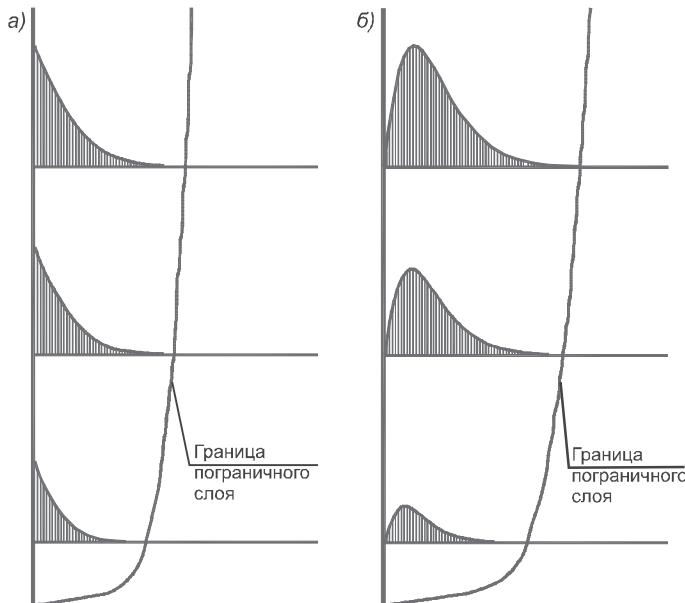


Рис. 3. Эпюры температуры (а) и скорости (б) по высоте здания

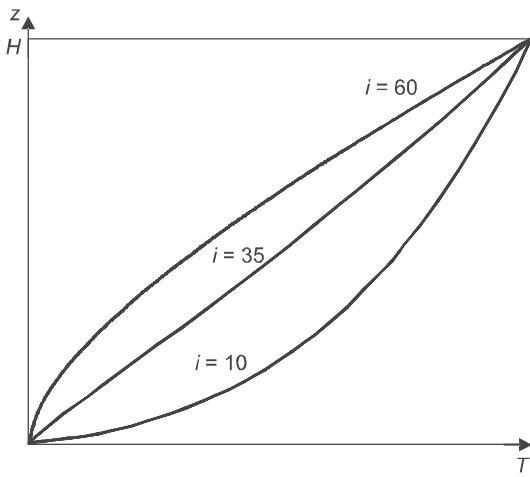


Рис. 4. Распределение температуры по высоте стены здания

$i = 55$. Таким образом, посередине слоя ($i = 35$) распределение температуры по высоте линейное, что соответствует работе [5]. Параболическое распределение ($i = 60$) уже находится за пределами пограничного слоя.

этих кривых совпадает с результатами работы [5], полученными для одномерной модели свободной конвекции в воздушном зазоре навесных фасадов зданий при равенстве нулю теплового потока в облицовочные плиты.

Для определения распределения температуры по высоте здания приведен рис. 4. Графики температуры перенормированы на один максимум и соответствуют различным номерам ячеек по оси x . Номер ячейки, соответствующей максимальной ширине пограничного слоя, равен

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т. IV : Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Либшиц. — М. : Наука, 1988. — 736 с.
- Себиси, Т. Конвективный теплообмен [Текст] / Т. Себиси, П. Брэдшоу. — М. : Мир, 1987. — 592 с.
- Косолапов, Е.А. Метод установления с расщеплением для решения уравнений пограничного слоя [Текст] / Е.А. Косолапов // Повышение эффективности судовых энергетических установок : межвуз. сб. — Н. Новгород : НГТУ, 1998. — С. 146–152.
- Косолапов, Е.А. Метод установления с расщеплением для численного расчета свободной конвекции в двумерном приближении [Текст] / Е.А. Косолапов, А.Н. Машенков, Е.В. Чебурканова // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Т. 69 : Энергетические установки и теплотехника. Вып. 2. — Н. Новгород : НГТУ, 2010. — С. 216–221.
- Машенков, А.Н. Свободная одномерная конвекция в воздушном зазоре навесных фасадов зданий с разными тепловыми потоками через облицовочный слой и стенку здания [Текст] / А.Н. Машенков, Е.А. Косолапов, Е.В. Чебурканова // Жилищное строительство. — 2009. — № 9. — С. 27–31.

МАШЕНКОВ А.Н., канд. техн. наук, доц.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

КОСОЛАПОВ Е.А., канд. физ.-мат. наук, доц.

Нижегородский государственный технический университет

ЧЕБУРКАНОВА Е.В., инж.

ООО «Юкон Инженинг»

Mashenkov A.N., candidate of technical sciences, assistant professor, State Architecture and Construction University of Nizhny Novgorod, Russia

Kosolapov E.A., candidate of physical and mathematical sciences, State Technical University of Nizhny Novgorod, Russia

Tscheburkanova E.V., engineer, E-mail: nto@u-kon.ru, U-kon Engineering Ltd., Russia

MATHEMATICAL MODELING OF CONVECTIVE HEAT EXCHANGE OF BOUNDARY-LAYER FLOW NEXT TO BUILDING WALL

This work contains method formulation of combined equation's numerical solution of free convection next to building wall concerning Bussinesk and. For definite basic data velocity and temperature profile in boundary-layer flow are received. In the work are also given calculated heat and dynamic values of boundary-layer flow.

Key words: numerical solution method, Bussinesk's approximation, thermal thickness, dynamic thickness.

REFERENCES

1. Landau, L.D. Theoretical physics. Vol. IV : Hydrodynamics [Text] / L.D. Landau, E.M. Lifshiz. — M. : Nauka, 1998. — 736 p.
2. Sebisi, T. Convective exchange of heat [Text] / T. Sebisi, P. Bradshow. — M. : Mir, 1987. — 592 p.
3. Kosolapov, E.A. Relaxation method with splitting for solution of boundary-layer equations [Text] / E.A. Kosolapov // Improvement of the effectiveness of energetic ship installation : interacademic digest. — N. Novgorod : Technical State University of N. Novgorod, 1998. — P. 146–152.
4. Kosolapov, E.A. Relaxation method with splitting for numerical calculation of free convection in two-dimensional approach [Text] / E.A. Kosolapov, A.N. Mashenkov, E.V. Tscheburkanova // Transactions of Technical State University of N. Novgorod. Vol. 69 : Energetic installations and thermotechnics. Pt 2. — N. Novgorod : Technical State University of N. Novgorod, 2010. — P. 216–221.
5. Mashenkov, A.N. Free one-dimensional convection in the air gap of rear ventilated façades with different heat flows through the cladding layer and wall of the building [Text] / A.N. Mashenkov, E.A. Kosolapov, E.V. Tscheburkanova // House construction. — 2009. — N 9. — P. 27–31.

УДК 697.932.3.001.24

Е.М. ХРОМОВА

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИ И ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР КОНДИЦИОНЕРОВ ВОЗДУХА

Проведено сравнение модели тепломассообмена в оросительной форсуночной камере кондиционеров воздуха, разработанной автором, с методикой расчета ВНИИкондиционер. Показано, что в отличие от методики ВНИИкондиционер, использование модели дает возможность оптимизировать работу оросительных камер по затратам энергии на распыливание жидкости.

Ключевые слова: оросительные камеры, кондиционирование воздуха, тепло- и мас-соперенос, оптимизация энергозатрат.

Физико-математическая модель тепломассообмена парогазового потока с каплями жидкости в оросительных форсуночных камерах в одномерной постановке представлена в [1]. В модели учтено влияние повышенной концентрации паров жидкости на тепломассообменные процессы, переменность массы капель жидкости. Параметры парогазового потока, входящие в уравнения сохранения по теплу и массе, отображают фазовые переходы испарение — конденсация на поверхности капель. Вязкость и теплопроводность парогазового потока определялись с помощью парциального давления пара и газа. Уравнения движения капель жидкости представлены в лагранжевой системе координат. Одномерная постановка задачи неудобна для анализа процессов, происходящих в горизонтальных камерах, когда значительная часть капель под действием силы тяжести может выпадать из потока в поддон, не доходя до выхода из камеры. Поэтому в работе [2] рассматривалась двумерная постановка этой задачи в эйлеровых координатах в континуальном представлении компонентов системы парогазовая смесь — капли жидкости, при котором некоторая плотность капель (локальная массовая концентрация жидкости) будет меняться по всему пространству форсуночных камер в зависимости от динамики их движения и выпадения из потока под действием силы тяжести. Размер капель принимался среднемассовым, определяемым по расчету форсунок, а температуру поверхности капель жидкости Θ_p принимали равной ее среднеобъемной температуре Θ .

В [2] учтено влияние повышенной концентрации капель жидкости на эффективную вязкость парогазового потока, проявляющуюся в их аэродинамическом сопротивлении, что важно для течений с противотоком, и введена поправка на влияние концентрации капель жидкости на их тепло- и массообмен с помощью известных в литературе зависимостей.

Уравнения модели имеют следующий вид.

Уравнение движения капли жидкости среднемассового размера диаметра δ_k с учетом переменности ее массы за счет процессов испарения — конденсации

$$d\vec{V}_k / d\tau = \vec{g} + \vec{R} - (\vec{V}_k / m_k)(dm_k / d\tau), \quad (1)$$

где τ — время;

\vec{V}_k — скорость капли;

\vec{g} — ускорение силы тяжести;

\vec{R} — сила сопротивления капли, приходящаяся на единицу ее массы;

m_k — масса капли.

Уравнение неразрывности для жидкости

$$\partial \rho_k / \partial \tau + \nabla (\rho_k \vec{V}_k) = (\rho_k / m_k)(dm_k / d\tau), \quad (2)$$

где ρ_k — некоторая по объему плотность капель (массовая концентрация жидкости).

Это уравнение выражает убывание массы жидкости в локальной точке пространства за счет испарения капель либо прибавление ее массы за счет конденсации водяных паров.

Уравнение массообмена капли жидкости с потоком парогазовой смеси за счет испарения — конденсации

$$dm_k / d\tau = -\beta \pi \delta_k^2 (\rho_{1k} - \rho_1), \quad (3)$$

где β — коэффициент массообмена капли с потоком по концентрационному напору пара;

ρ_{1k} и ρ_1 — парциальные плотности пара на поверхности капли и в потоке.

Уравнение для влагосодержания

$$dd / d\tau = -(\rho_k / m_k)(dm_k / d\tau)(1 / (1 - \varepsilon_k)\rho_2), \quad \varepsilon_k = \rho_k / \rho_\infty, \quad (4)$$

где d — влагосодержание;

ε_k — объемная концентрация капель жидкости;

ρ_2 — парциальная плотность сухого газа;

ρ_∞ — плотность жидкости;

$\rho_k / m_k = n_k$ — текущая счетная концентрация капель в потоке.

Уравнение теплообмена капли с потоком парогазовой смеси

$$c_\infty m_k (d\Theta / d\tau) = -\alpha_k \pi \delta_k^2 (\Theta - T) + r_\infty (dm_k / d\tau), \quad (5)$$

где c_∞ — удельная теплоемкость жидкости капель;

α_k — коэффициент теплоотдачи капли;

Θ и T — текущие абсолютные температуры капли и потока;

r_∞ — удельная теплота испарения — конденсации.

Это уравнение выражает изменение энталпии капли в единицу времени за счет конвективного теплообмена с парогазовым потоком и притока при конденсации или оттока при испарении тепла к капле жидкости вследствие фазовых переходов на ее поверхности.

Уравнение для температуры парогазовой смеси

$$\rho (dcT / d\tau) = \alpha_k \pi \delta_k^2 (\Theta - T) (\rho_k / m_k), \quad (6)$$

где c и ρ — удельная теплоемкость и плотность парогазовой смеси.

Данное уравнение определяет изменение энталпии парогазового потока в единицу времени за счет конвективного теплообмена с каплями жидкости количеством n_k в единице объема.

Уравнение для скорости парогазовой смеси вдоль оси форсуночной камеры для невысоких концентраций капель жидкости в потоке примем в форме [1]

$$U = U_0 \frac{T}{T_{00}} \frac{K+d}{K+d_0}, \quad (7)$$

где $K = M_1 / M_2$, M_1 и M_2 — молекулярные массы пара и сухого газа; U_0 , T_{00} — начальные скорость и температура парогазового потока.

Для высоких концентраций капель в потоке

$$U = U_0 \frac{T}{T_{00}} \frac{K+d}{K+d_0} \frac{1-q(U_0/V_{k0})}{1-q(U_0/V_{kx})}, \quad (7')$$

где V_{k0} — начальная температура капель;

V_{kx} — текущая составляющая скорости капель вдоль оси камеры;

q — реальный коэффициент орошения.

В уравнении (3) коэффициент массообмена β определяется из полуэмпирической зависимости для массообменного числа Нуссельта

$$\text{Nu}' = \frac{\beta \delta_k}{D} = 2 K_c \Phi. \quad (8)$$

Здесь $K_c = 1 + ((P_{1k} + P_1)/2B)$ — поправка на стефановский поток при высоких концентрациях пара в смеси;

P_{1k} и P_1 — парциальные давления насыщенных паров жидкости при температуре Θ и ненасыщенных паров жидкости вдали от капли при температуре T ;

B — барометрическое давление для парогазовой смеси;

$\Phi = 1 + 0,276 \text{Re}_k^{0.5} \text{Sc}^{0.33}$ — поправка Фресслинга на инерционность обтекания капли жидкости;

Re_k — число Рейнольдса обтекания капли;

D — коэффициент диффузии паров;

$\text{Sc} = \mu/\rho D$ — число Шмидта;

μ — динамическая вязкость парогазовой смеси.

Коэффициент теплоотдачи α_k определяется из формулы Дрейка для теплообменного числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = 2 + 0,459 \text{Re}_k^{0.55} \text{Pr}^{0.33}, \quad (9)$$

где $\text{Pr} = \mu c / \lambda$ — теплообменное число Прандтля;

λ — коэффициент теплопроводности парогазовой смеси.

Коэффициент сопротивления капель определялся по зависимости, обобщающей Геттингенскую опытную кривую для сферической твердой частицы в широком диапазоне чисел $\text{Re}_k < 3 \cdot 10^5$.

Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности для парогазового потока вычисляются на основе аппроксимаций Уилки, а динамические вязкости и коэффициенты теплопроводности компонентов смеси — по формулам Сатерленда [2].

В стационарной постановке дифференциальные уравнения модели должны решаться при следующих граничных условиях:

для прямотока при $x = 0$

$$\begin{aligned} V_{kx} &= V_{k0}, \quad V_{ky} = 0, \quad U = U_0, \quad \delta_k = \delta_{k0}, \quad m_k = m_{k0}, \\ d &= d_0, \quad \Theta = \Theta_0, \quad T = T_{00}, \quad \rho_k = \rho_{k0}; \end{aligned} \quad (10)$$

для противотока

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } x=0 \quad V_{kx}=V_{k0}, \quad V_{ky}=0, \quad \delta_k=\delta_{k0}, \quad \Theta=\Theta_0, \quad \rho_k=\rho_{k0}, \\ \text{при } x=l \quad U=U_0, \quad d=d_0, \quad T=T_{00} \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Предложенные в [1, 2] физико-математические модели тепломассообмена в оросительных камерах кондиционеров воздуха позволяют рассчитать все термодинамические параметры парогазового потока и жидкости, а также оптимизировать протекающие в камере термодинамические процессы с точки зрения сокращения энергозатрат на работу этих устройств. На основе анализа вышеприведенной двухмерной модели показано, что для расчета оросительных камер кондиционеров воздуха можно пользоваться одномерной моделью [3].

В [4] представлена инженерная методика расчета оросительных камер кондиционеров воздуха по данным ВНИИкондиционер¹. Цель данной методики — выбор типа камеры и определение режимных параметров (расхода и давления воды перед форсунками, температуры воды на выходе из камеры).

Расчет режимных параметров оросительной камеры производят с учетом характеристик луча процесса камеры при политропической обработке.

Находится коэффициент адиабатной эффективности процесса

$$E_a = \frac{I_0 - I}{I_0 - I_{np}}, \quad (12)$$

где I, I_0 — энталпия воздуха на входе и выходе из камеры орошения соответственно, кДж/кг;

I_{np} — энталпия предельного состояния воздуха на $I-d$ -диаграмме, кДж/кг, определяется графически как точка пересечения луча процесса обработки воздуха в камере орошения с линией $\varphi = 100\%$.

Коэффициент орошения μ вычисляют по формуле

$$\mu = \left[\frac{\left(\ln \frac{1}{1-E_a} - 0,15 \right)}{A_1} \right]^{1/\alpha_1}, \quad (13)$$

где A_1, α_1 — коэффициенты, определяемые в зависимости от производительности камеры орошения.

Получим приведенный коэффициент энталпийной эффективности процесса

$$E_n = \frac{1 - \exp(\Phi \cdot \ln(1 - E_a))}{\Phi} \quad (14)$$

и вспомогательный коэффициент

$$\Phi = \left(1 + \frac{0,725}{\mu} \right) \left(1 + \beta_1 (-\ln(1 - E_a))^{-0,858} \right), \quad (15)$$

¹ Справочник проектировщика: Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3: Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / под. ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1992. 416 с.

где β_1 — коэффициент, зависящий от производительности камеры орошения.

Определяем относительный перепад температур воздуха

$$\Omega = 0,33 \cdot c_{\infty} \cdot \mu \left(\frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_a} \right). \quad (16)$$

Вычисляем начальную температуру воды в камере, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Theta_0 = t_{\text{внр}} - \frac{\Omega (I_0 - I)}{c_{\infty} \cdot \mu}, \quad (17)$$

где $t_{\text{внр}}$ — предельная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$, определяется графически на $I-d$ -диаграмме как температура точки пересечения луча процесса камеры орошения с линией $\phi = 100 \%$.

Рассчитаем конечную температуру воды (на выходе из камеры)

$$\Theta = \Theta_0 + \frac{(I_0 - I)}{c_{\infty} \cdot \mu} \quad (18)$$

и расход разбрызгиваемой воды, кг/ч:

$$G_{\infty} = \mu \cdot \Pi_{\text{нр}}, \quad (19)$$

где $G_{\text{нр}}$ — массовый расход воздуха, проходящего через камеру орошения, кг/ч.

Вычисляем расход воды через форсунку, кг/ч:

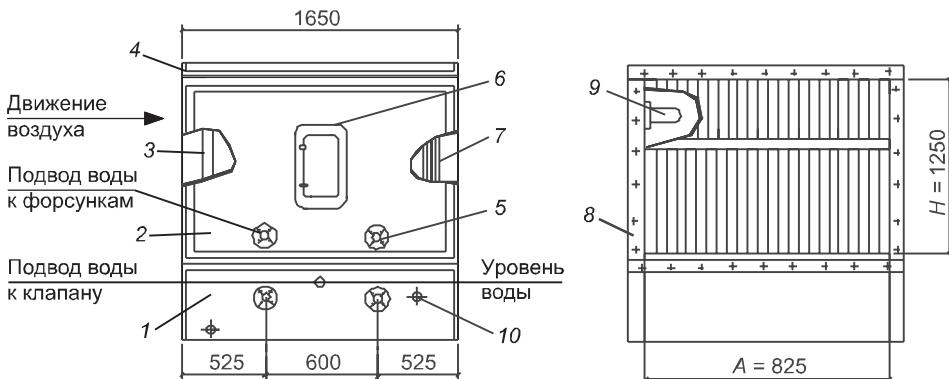
$$g_{\phi} = \frac{G_{\infty}}{n_{\phi}}, \quad (20)$$

где n_{ϕ} — общее число форсунок в ОКФ.

Необходимое давление воды перед форсункой типа ЭШФ 7/10, кПа:

$$\Delta P_{\phi} = \left(\frac{g_{\phi}}{93,4} \right)^{1/0,49}. \quad (21)$$

Произведем сравнение модели и инженерной методики расчета¹ [4] оросительной камеры на следующем примере: оросительная камера ОКФ-3 для центрального кондиционера марки КТЦЗ-10 с общим числом форсунок 24 шт. (рис. 1); массовый расход воздуха $G_{\text{нр}} = 11900$ кг/ч; ко-



Rис. 1. Камера орошения ОКФ-3:

1 — бак, 2 — стенка передняя, 3 — воздухораспределитель, 4 — потолок, 5 — коллекторный ряд, 6 — дверка, 7 — каплеуловитель, 8 — стенка, 9 — светильник, 10 — муфта

эффициенты $A_1 = 0,503$, $\alpha_1 = 1,91$, $\beta_1 = 0,387$; температура воздуха, входящего в камеру орошения, $T_{00} = 298,9$ К, прошедшего обработку в камере, $T = 284,3$ К, предельная температура воздуха $t_{\text{впр}} = 9$ °C; энталпия

воздуха, входящего в камеру орошения, $I_0 = 52,8$ кДж/кг, прошедшего обработку в камере, $I = 31$ кДж/кг, энталпия предельного состояния воздуха $I_{\text{пр}} = 27,3$ кДж/кг; влагосодержание воздуха, входящего в камеру орошения, $d_0 = 10,4$ г/кг с.в., прошедшего обработку в камере, $d = 7,8$ г/кг с.в. Результаты расчета по инженерной методике сведены в табл. 1.

Таблица 1
Данные расчета оросительной камеры по методике ВНИИкондиционер

E_a	μ	E_{π}	Ω	$\Theta_0, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Theta, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$G_{\text{ж}}, \text{ кг/ч}$	$g_{\phi}, \text{ кг/ч}$	$\Delta P_{\phi}, \text{ кПа}$
0,855	1,94	0,573	1,544	4,86	7,54	23086	961,9	116,4

Расчет режимных параметров обработки воздуха в камере орошения при помощи модели произведем по вышеприведенным исходным данным. Дополнительные параметры, не учитываемые в расчетах по инженерной методике, принимаются с учетом габаритов камеры орошения и уже рассчитанных данных, представленных в табл. 1.

Реальный коэффициент орошения может быть определен исходя из объемных расходов газа и жидкости, проходящих через камеру орошения:

$$q = \frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{г}}} = \frac{23\ 086 \cdot 1,2}{1000 \cdot 11\ 900} = 0,00233 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 2,33 \text{ л/м}^3. \quad (22)$$

Начальная скорость воздуха в оросительной камере определяется исходя из площади поперечного сечения камеры (рис. 1):

$$U_0 = \frac{Q_{\text{г}}}{3600 \cdot H \cdot A} = \frac{11\ 900}{1,2 \cdot 3600 \cdot 0,825 \cdot 1,25} = 2,67 \text{ м/с}. \quad (23)$$

Начальные скорость и размер капель, распыливаемых форсунками, могут быть определены по зависимостям², приведенным в [3]:

$$V_{k0} = \sqrt{\frac{2P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 116\ 400}{1000}} = 15,26 \text{ м/с (здесь } P_{\text{ж}} \text{ в Па);} \quad (24)$$

$$\delta_{k0} = 1,81 \frac{v_{\text{ж}}^{0,59} \cdot g_{\phi}^{0,205} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,192}}{P_{\text{ж}}^{0,397}} = 1,81 \frac{0,01^{0,59} \cdot 961,9^{0,205} \cdot 1^{0,192}}{1,187^{0,397}} = 457 \text{ мкм,} \quad (25)$$

где $v_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость жидкости, $\text{см}^2/\text{с}$;

g_{ϕ} — расход жидкости через форсунку, кг/ч ;

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, г/см^3 ;

$P_{\text{ж}}$ — давление подаваемой воды в форсунки, кгс/см^2 .

В табл. 2 приведены режимные параметры в оросительной камере, рассчитанные по методике ВНИИкондиционер и модели тепломассообмена. Как видно из табл. 2, требуемые параметры обрабатываемого воздуха можно получить при различных начальных значениях температуры жидкости и коэффициента орошения, что невозможно осуществить при использовании инженерной методики расчета.

² Хавкин Ю.И. Центробежные форсунки. Л.: Машиностроение, 1976. 168 с.

Таблица 2

Сравнение режимных параметров оросительной камеры*

Параметры	Методика ВНИИКондиционер	Модель тепломассообмена				
		2,33	2,1	1,95	1,8	1,7
$q, \text{ л}/\text{м}^3$	2,33	2,33	2,1	1,95	1,8	1,7
$\Theta_0, \text{ К}$	277,86	277,86	277,0	276,0	275,5	275,0
$T, \text{ К}$	284,3	285,05	285,18	285,08	285,36	285,49
$d, \text{ г}/\text{кг}$	7,8	7,3	7,3	7,2	7,2	7,2
$\Theta, \text{ К}$	280,54	280,12	279,5	278,74	278,42	278,07

* Исходные данные: $T_{00} = 298,9 \text{ К}$, $d_0 = 10,4 \text{ г}/\text{кг} \text{ с.в.}$, $U_0 = 2,67 \text{ м}/\text{с}$, $V_{k0} = 15,26 \text{ м}/\text{с}$, $\delta_{k0} = 457 \text{ мкм}$.

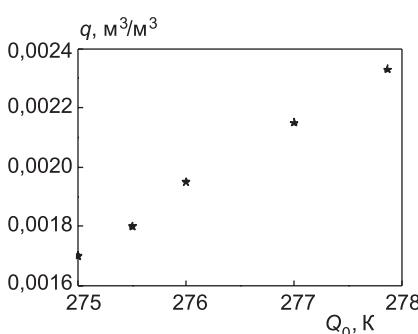


Рис. 2. Расчет режимных параметров для камеры орошения

На рис. 2 представлены результаты расчета режимных параметров для оросительной камеры в диапазоне температуры жидкости, подаваемой на форсунки, до 2 °C [4].

При понижении начальной температуры жидкости уменьшается реальный коэффициент орошения q , а значит, и объемный расход жидкости, подаваемый в камеру орошения, при заданных (требуемых) параметрах воздуха T и d на выходе из камеры. В приведенном примере экономия жидкости, подаваемой на распыливание форсунками, составляет порядка 25 %, если

ее температуру на входе задать равной минимально допустимой 2 °C. Инженерная методика не позволяет варьировать режимные параметры, что может вызывать перерасход жидкости, а следовательно, и энергозатрат на обработку воздуха, в отличие от разработанной модели расчета оросительных камер кондиционеров воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шиляев, М.И. Моделирование процесса тепломассообмена в оросительных камерах [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова // ТОХТ. — 2008. — Т. 42, № 3.
- Шиляев, М.И. Гидродинамика и тепломассообмен в форсуночных камерах орошения [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, А.В. Григорьев, А.В. Тумашова // Теплофизика и аэромеханика. — 2011. — Т. 18, № 1.
- Шиляев, М.И. Интенсификация тепломассообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, А.Р. Богомолов. — Томск : ТГАСУ, 2010. — 272 с.
- Аверкин, А.Г. Примеры и задачи по курсу «Кондиционирование воздуха и холода-снабжение» [Текст] : учеб. пособие / А.Г. Аверкин. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Изд-во АСВ, 2003. — 126 с.

ХРОМОВА Е.М., канд. физ.-мат. наук, доц.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 28.03.11

Khromova E.M., candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

COMPARISON OF THEORETICAL AND ENGINEERING METHODS OF CALCULATION OF IRRIGATING CHAMBERS OF CONDITIONERS OF AIR

Comparison of a theoretical method of calculation of chambers of an irrigation of the central conditioners of air offered in [1] and method of calculation ASRIConditioner, presented in the literature for engineering application is spent. It is shown that unlike an engineering method, use of a theoretical method of calculation gives the chance to optimize work of irrigating chambers on expenses of energy and a spent liquid.

Key words: irrigating chambers, air conditioning, heat - and mass transfer, optimization of power inputs.

REFERENCES

1. Shilyaev, M.I. Modeling of process heat- and mass transfer in irrigating chambers [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova // TOKT. — 2008. — Vol. 42, N 3.
 2. Shilyaev, M.I. Hydrodynamics and heat- and mass transfer in jet irrigation chambers [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.V. Grigorev, A.V. Tumashova // Thermophysics and aeromechanics. — 2011. — Vol. 18, N 1.
 3. Shilyaev, M.I. Intensification heat- and mass transfer in disperse environments at condensation and evaporation [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.R. Bogomolov. — Tomsk : TSUAB, 2010. — 272 p.
 4. Averkin, A.G. Example and problems at the rate «Air conditioning and coldsupply» : the manual [Text] / A.G. Averkin. — 2 ed., corr. and ad. — M. : Publ. House ASV, 2003. — 126 p.
-

УДК 628.339

А.А. БАТОЕВА, Д.Г. АСЕЕВ, М.Р. СИЗЫХ, М.С. ХАНДАРХАЕВА,
А.А. РЯЗАНЦЕВ, А.Т. ИВАЩЕНКО

ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКТОРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД*

Представлены результаты влияния гидродинамической кавитации, инициированной в низконапорных устройствах струйного типа, на скорость окисления фенола. Рассчитаны базовые параметры кавитационных камер, разработана технологическая схема очистки фенолсодержащих сточных вод. Скорость окисления фенола реагентом Фентона ($H_2O_2 + Fe^0/Fe^{2+}$) при одновременном воздействии гидродинамической кавитации возрастает в 1,6 раза по сравнению с его окислением в реакторе без кавитации при снижении расхода окислителя в 2 раза.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, очистка сточных вод, окисление фенола.

Анализ опубликованных результатов по окислению хлорированных углеводородов, ароматических красителей, фенолов показывает, что гидродинамическая кавитация в комбинации с окислением высокореакционными частицами активированного кислорода типа $\cdot OH$, $\cdot HO_2$, $\cdot O_2^-$ является эффективным решением для разработки промышленных методов очистки сточных вод, содержащих в своем составе подобные биорезистентные химические соединения [1, 2]. При этом следует выделить методы, где используется металлическое железо (Fe^0) (пластинки, колотая дробь, стружка и др.), выполняющее роль катализатора разложения перекиси водорода H_2O_2 , которая образуется в воде под воздействием кавитации или добавляется в реакционную смесь [2–5]. Принято считать, что сначала металлическое железо Fe^0 окисляется в кислой среде ($pH \leq 3$) до ионов Fe^{2+} , которые реагируют с H_2O_2 с образованием радикалов $\cdot OH$ и Fe^{3+} . Затем Fe^0 восстанавливается Fe^{3+} до Fe^{2+} и цикл продолжается. При одновременном воздействии кавитации наблюдается синергетический эффект окисления примесей, величина которого во многом зависит от типа устройств, инициирующих кавитацию, температуры, а также pH среды, поскольку в сильнокислой среде ($pH < 2$) и при $pH \geq 4$ реакция окисления железа сильно замедляется.

Цель настоящей работы — изучение влияния гидродинамической кавитации, инициированной в низконапорных устройствах струйного типа, на кинетику окисления пероксидом водорода трудноокисляемых органических примесей на примере фенола.

Исследования проводили на установке (рис. 1), работа которой организована следующим образом: поток рабочей жидкости из усреднителя нагнетается насосом в камеру, где формируется область пониженного давления и развивается кавитация. Теплообменник (трубчатый контур из

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 08-08-00867-а.

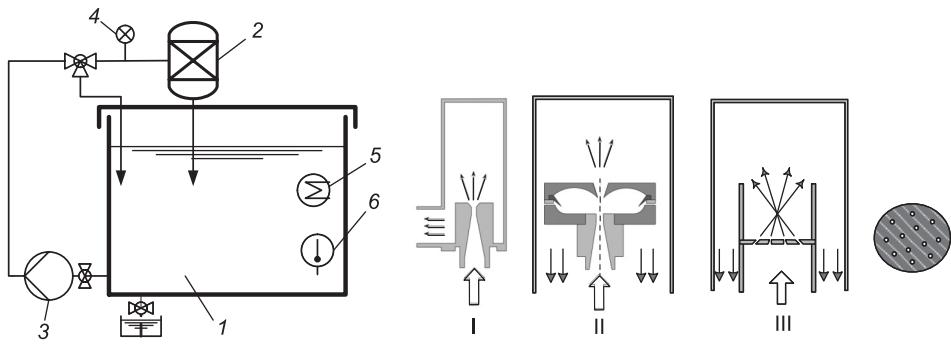


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и используемые кавитационные камеры
1 — усреднитель; 2 — кавитационная камера; 3 — насос; 4 — манометр; 5 — теплообменник;
6 — термометр

нержавеющей стали) с внешним охлаждением поддерживает заданную температуру $20 \pm 0,2$ °С. Давление в потоке жидкости на входе в кавитационную камеру изменяли в диапазоне от 0,4 до 7 атм. Объем циркулирующего раствора 5..30 л. Для инициирования кавитации использовали форсунки, установленные в реакционной камере и выполненные в виде одного или нескольких цилиндрических насадков.

Высокая степень турбулентности потока воды и падение давления ниже давления насыщенного пара при увеличении скорости потока, проходящего через насадок, приводят к появлению кавитации. Интенсивность кавитации в воде с плотностью $\rho = 998,2$ кг / м³ при внешнем давлении $P_{amb} = 1$ атм обычно характеризуется безразмерным параметром — числом кавитации σ :

$$\sigma = (P_{amb} - P_v) / 0,5\rho v^2 \approx (P_{amb} - P_v) / \Delta P, \quad (1)$$

где P_v — давление насыщенного пара (0,0231 атм);
 $v = Q / \omega$ — скорость движения турбулентного потока жидкости,
 Q — расход жидкости, ω — площадь поперечного сечения входного отверстия насадка;

ΔP — перепад давления на выходе потока жидкости из отверстия.

Эмпирические зависимости значений числа кавитации σ от давления на входе в насадок $P_{вх}$ для разных диаметров отверстий хорошо описываются степенной функцией $\sigma = aP_{вх}^{-b}$. Минимальные значения σ_{kp} , при которых начинается кавитация, для форсунок с различным диаметром входного отверстия были рассчитаны с учетом коэффициентов местного сопротивления, угла конусности

конфузора и давления на входе в насадок¹. Значения коэффициентов a и b в уравнении $\sigma = aP_{вх}^{-b}$ и σ_{kp} представлены в таблице. Зная σ и σ_{kp} для форсунок с различными диаметрами входного отверстия, можно рассчитать

Расчетные значения гидродинамических параметров форсунок

d , мм	a	b	R^2	σ_{kp}	P_{kp} , атм
1	2,647	1,340	0,995	0,8935	2,25
2	2,357	1,000	0,999	0,8901	2,65
3	2,176	0,920	0,999	0,8843	2,66
4	1,228	1,010	0,998	0,8756	1,34
4 (топ)	1,027	0,820	0,994	0,8511	1,19

¹ Примеры расчетов по гидравлике / под ред. А.Д. Альтшуля. М.: Стройиздат, 1977. 255 с.

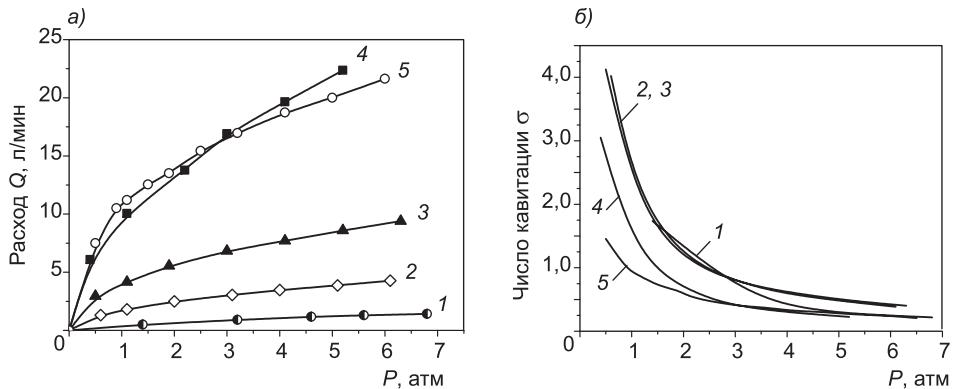


Рис. 2. Зависимость производительности (а) и числа кавитации (б) от давления для форсунок с различными диаметрами входного отверстия
1 — $\varnothing = 1$ мм, 2 — $\varnothing = 2$ мм, 3 — $\varnothing = 3$ мм, 4 — $\varnothing = 4$ мм, 5 — $\varnothing = 4$ мм, торOIDальная камера

расстояние от выхода струи из форсунки до точки, где скорость струи достигает значения, при котором жидкость превращается в водовоздушную смесь, и определить тем самым базовые параметры кавитационной камеры². Анализ полученных эмпирических зависимостей (рис. 2) и результаты расчетов σ_{kp} свидетельствуют о преимуществах использования форсунок с диаметром входного отверстия 4 мм, так как критическое давление, т.е. давление жидкости, протекающей через форсунку, при котором возникает кавитация, минимально, а производительность устройства максимальна.

Кавитационную камеру с форсункой I (см. рис. 1) можно использовать в качестве реактора в лабораторных установках для интенсификации массообменных процессов в системах газ — жидкость, например, при окислении сульфидов или ионов двухвалентного железа кислородом воздуха, при флотационной очистке сточных вод в качестве устройства для диспергирования воздуха, а также для активации осадков очистных сооружений биологической очистки сточных вод перед обработкой в мешалках.

Форсунка III выполнена в виде пластины с цилиндрическими насадками, количество которых, диаметр и конфигурация входных отверстий, угол по отношению к вертикальной оси и др. позволяют в широком диапазоне изменять производительность устройства, интенсивность кавитации. Кавитационная камера с этой форсункой предназначена для использования как в погруженном положении, так и для диспергирования жидкости в газовой среде.

Форсунка II³ разработана для изучения процессов окисления трудноокисляемых примесей, таких как фенолы, нефтепродукты, СПАВ, красители, пероксидом водорода с одновременным растворением железа в реакторе и воздействием кавитации. Устройство содержит корпус с входным и выходным коническими соплами и торOIDальной кавитационной камерой, в которой расположен элемент вторичной кавитации, имеющий форму кольца, размещенного радиально к ее оси в проточке. Входное сопло смешено относительно оси кавитационной камеры. Выполнение форсунки в указанном виде приводит к продлению контакта транзитной струи с водо-

² Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. Изд. 2-е. М.: Наука, 1979. 536 с.

³ Патент РФ № 2269386 МПК B06 B 1/20. Генератор гидродинамических колебаний / А.Т. Иващенко, А.А. Рязанцев, Н.Б. Усольцева. Опубл. 10.02.2006 г. Бюл. № 4.

воротными областями, увеличивает силу трения, закручивающую жидкость в полости кавитационной камеры, и, как следствие, приводит к снижению числа кавитации за счет увеличения доли потока рабочей жидкости, участвующей во вращательном движении. Конструкция кавитационной камеры позволяет установить над выходным соплом кассету, выполненную в виде конуса, с помещенной в нее загрузкой (стальная стружка, колотая дробь и др.)⁴. Под действием скоростного напора загрузка разрыхляется и переходит во взвешенное состояние, выполняя при этом роль препятствия, на котором происходит дополнительное схлопывание пузырьков, находящихся в потоке жидкости и не подвергшихся коллапсу во внутренней полости кавитационной камеры. Число кавитации σ при этом снижается. Кавитация приводит к интенсивному окислению стальной загрузки с образованием ионов Fe^{2+} и далее в зависимости от pH гидроксоединений $Fe(II)$ и $Fe(III)$ различного состава. Кавитация способствует непрерывному обновлению диффузационного пограничного слоя на поверхности элементов загрузки и увеличению эффективности массообменных процессов между твердой и жидкой фазами, что предотвращает пассивацию загрузки. При дозированной подаче в кавитационную камеру окислителя, например H_2O_2 , происходит активация пероксида водорода и молекул растворенного кислорода, сопровождающаяся радикально-цепными реакциями окисления органических примесей, находящихся в воде. Соединения железа при этом играют роль катализатора.

Для иллюстрации влияния гидродинамической кавитации на кинетику окисления трудноокисляемых примесей в водных растворах представлены данные по деструкции фенола пероксидом водорода ($C_\phi = 0,213 \text{ mM}$, $C_{H_2O_2} = 1,5 \text{ mM}$, $pH = 4$, $t = 20^\circ\text{C}$) в реакторе с форсун-

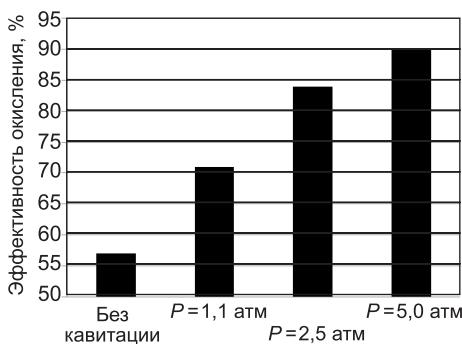


Рис. 3. Влияние условий кавитационного воздействия на эффективность окисления фенола ($\tau = 5 \text{ мин}$)

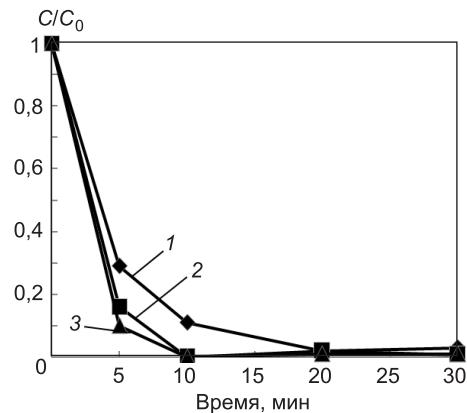


Рис. 4. Кинетические кривые изменения концентрации фенола при окислении в условиях кавитации

1 — $P_{bx} = 1,1 \text{ атм}$, 2 — $P_{bx} = 2,5 \text{ атм}$, 3 — $P_{bx} = 5 \text{ атм}$

кой II (рис. 3, 4). Обработка раствора фенола в начальный момент развития кавитации ($P_{bx} = 1,1 \text{ атм}$, $\sigma = 0,89$) и в режимах развитой кавитации ($P_{bx} = 2,5 \text{ атм}$, $\sigma = 0,47$ и $P_{bx} = 5 \text{ атм}$, $\sigma = 0,37$) по сравнению с обработкой в непроточном реакторе без кавитации с перемешиванием

⁴ Патент РФ № 94564. МПК C02 A 1/463. Устройство для очистки промышленных сточных вод / А.А. Рязанцев, А.А. Батоева, М.С. Хандархаева. Опубл. 27.05.2010 г. Бюл. № 15.

загрузки путем барботирования воздуха ($\tau = 5$ мин, $C_{H_2O_2} = 3$ мМ) приводит к увеличению степени деструкции фенола на 12, 27 и 33% соответственно. Практически полное окисление фенола в условиях развитой кавитации происходит за 10 мин (рис. 4), но производительность установки при $P_{вх} = 5$ атм возрастает на треть по сравнению с экспериментом при $P_{вх} = 2,5$ атм. В реакторе без кавитации при двухкратном по сравнению с экспериментами в кавитационной камере количестве окислителя реакция практически прекращается через 5 мин, а степень деструкции фенола не превышает 57 %.

Наблюдаемый синергетический эффект окисления фенола объясняется тем, что под воздействием кавитации ускоряется окисление загрузки (стальная колотая дробь фракции 1...2 мм) и, следовательно, в водном растворе увеличивается количество соединений Fe(II) и Fe(III), являющихся катализаторами разложения H_2O_2 . Образующиеся в результате разложения H_2O_2 и под воздействием кавитации кислородсодержащие радикалы окисляют фенол в газовой фазе внутри кавитационного пузырька и на границе раздела фаз жидкость — газ, т. е. непосредственно в микрополостях с высокой температурой и давлением.

Представленные выше устройства для инициирования кавитации и результаты окисления фенола, взятого в качестве модельного соединения, позволяют предложить технологическую схему очистки сточных вод, содержащих такие трудноокисляемые примеси, как хлорированные ароматические углеводороды, красители, пестициды и др.

Технологическая схема (рис. 5) включает:

- коагуляционное осаждение примесей на первой ступени очистки сточных вод с последующим разделением фаз;

- обработку осветленного стока пероксидом водорода с одновременным растворением стальной загрузки и воздействием кавитации на второй ступени очистки (при этом окисление фенолов или других трудноокисляемых примесей на второй ступени очистки осуществляется в реакторе с взвешенным слоем загрузки);

- осаждение гидроксидов железа и адсорбированных на них продуктов неполного окисления примесей на третьей ступени очистки.

Часть осадка, содержащего свежеобразованные гидроксиды железа, может быть использована в качестве коагулянта на первой ступени очистки сточных вод.

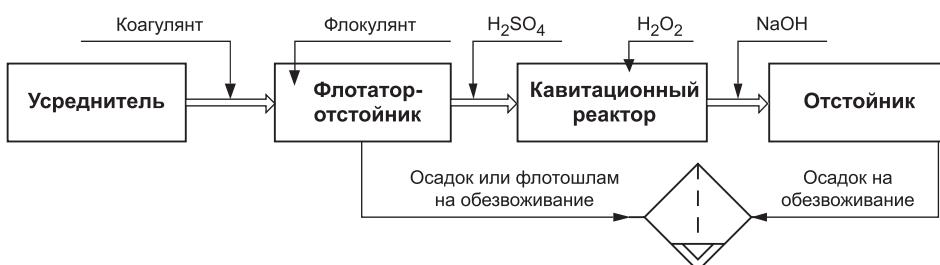


Рис. 5. Блок-схема очистки фенолсодержащих сточных вод

Выходы. 1. Разработанные устройства для генерирования гидродинамической кавитации имеют ряд преимуществ:

- низкий напор на входе (2...6 атм при расходе более 0,5 м³/ч);
- возможность подачи реагентов непосредственно в зону зарождения кавитации;

- скоростной напор на выходе из устройства, способный поддерживать во взвешенном состоянии загрузку из стальной колотой дроби;
- отсутствие подвижных частей.

2. Гидродинамическая кавитация, инициированная в низконапорных устройствах струйного типа, может быть с успехом использована для интенсификации процессов очистки сточных вод. Скорость взаимодействия фенола с реагентом Фентона ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^0 / \text{Fe}^{2+}$) при воздействии гидродинамической кавитации возрастает в 1,6 раза по сравнению с его окислением в реакторе без кавитации при одновременном снижении расхода окислителя в 2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gogate, P.R. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: Hybrid methods [Text] / P.R. Gogate, A.B. Pandit // Advances in Environmental Research. — 2004. — Vol. 8, N 3–4. — P. 553–597.
2. Chakinala, A.G. Multivariate analysis of phenol mineralisation by combined hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing [Text] / A.G. Chakinala, D.H. Bremner, P.R. Gogate, K.-C. Namkung, A.E. Burgess // Applied Catalysis. B : Environmental. — 2008. — Vol. 78. — P. 11–18.
3. Bremner, D.H. Phenol degradation using hydroxyl radicals generated from zero-valent iron and hydrogen peroxide [Text] / D.H. Bremner, D. Houllemare, K.-C. Namkung // Applied Catalysis. B : Environmental. — 2006. — Vol. 63. — P. 15–19.
4. Namkung, K.-C. A fenton-like oxidation process using corrosion of iron metal sheet surfaces in the presence of hydrogen peroxide: A batch process study using model pollutants [Text] / K.-C. Namkung, A.E. Burgess, D.H. Bremner // Environ. Technol. — 2005. — Vol. 26. — P. 341–352.
5. Батоева, А.А. Гальваническое окисление фенолов [Текст] / А.А. Батоева, М.Р. Сизых, А.А. Рязанцев, М.С. Хандархаева, Д.Г. Асеев // Журн. прикл. химии. — 2007. — Т. 80, N 8. — С. 1326–1329.

БАТОЕВА А.А., канд. техн. наук, доц.; E-mail: abat@binm.bscnet.ru

Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

АСЕЕВ Д.Г., канд. хим. наук

Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

СИЗЫХ М.Р., канд. техн. наук, доц.

Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

ХАНДАРХАЕВА М.С., канд. техн. наук

Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

РЯЗАНЦЕВ А.А., д-р техн. наук, проф.; E-mail: raastu@academ.org

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск

ИВАЩЕНКО А.Т., канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск

Получено после доработки 29.04.11

Batoeva A.A., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: abat@binm.bscnet.ru, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Aseev D.G., candidate of chemical sciences, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Sizykh M.R., candidate of technical sciences, assistant professor; Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Khandarhaeva M.S., candidate of technical sciences, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Ryazantsev A.A., doctor of technical sciences, professor; E-mail: raastu@academ.org, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Ivaschenko A.T., candidate of technical sciences, assistant professor; Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

APPLICATION OF HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTORS FOR WASTEWATER TREATMENT

The results of influence of hydrodynamic cavitation, initiated in low-pressure jet type devices, on the rate of phenol oxidation are presented. Basic parameters of the cavitation chamber were calculated, the principal technological scheme of phenolic wastewater treatment was presented.

Combination of Fenton's reagent ($H_2O_2 + Fe^0/Fe^{2+}$) with hydrodynamic cavitation nearly doubled the phenol oxidation rate as compared with treatment by Fenton's reagent alone.

Key words: hydrodynamic cavitation, wastewater treatment, phenol oxidation.

УДК 628.337

Т.И. ХАЛТУРИНА, Т.А. КУРИЛИНА, О.В. ЧУРБАКОВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ГАЛЬВАНОПАРЫ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА
ГАЛЬВАНОКОАГУЛЯЦИИ СТОЧНЫХ ВОД,
СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ**

Представлены результаты исследований влияния вида гальванопары на эффективность процесса гальванокоагуляции сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, при использовании метода ионной хроматографии и атомно-абсорбционной спектрометрии.

Ключевые слова: гальванокоагуляция, загрузка гальванопары, ионная хроматография, сточные воды, углеродминеральный сорбент.

Известно, что с учетом региональных условий наиболее рациональным методом очистки сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, является гальванокоагуляция [1–3].

Цель исследований была в изучении влияния вида гальванопары на изменение ионного состава сточной воды в процессе гальванокоагуляции. Исследования проводились в гальванокоагуляционном модуле, аналогичном по конструкции указанному в [4], который содержит вертикальный цилиндрический корпус объемом 0,6 дм³ с размещенной в нем загрузкой из смеси железной стружки (насыпной вес $\rho = 950$ г/дм³) и материала, играющего роль «кислородного» электрода — гранулированного активированного угля ($\rho = 200$ г/дм³) или углеродминерального сорбента ($\rho = 800$ г/дм³) крупностью 1,5...2 мм. Химический состав активированного угля в процентном выражении: углерод 80,0 %; водород 1,4 %; кислород 5,1 %; азот 0,3 %; сера 0,15 %. Состав углеродминерального сорбента: углерод 80,0—98 %; SiO₂ 8,41—10,4 %; CaO 2,26—2,79 %; MgO 1,34—1,66 %; Fe₂O₃ 1,89—2,33 %; Al₂O₃ 3,82—4,72 %; SO₃ 0,58—0,72 %; K₂O 0,30—0,37%; Na₂O 0,35—0,43%; кислород общий 4,53—5,60.

Было изучено влияние соотношения загрузки Fe — СГН на эффективность процесса очистки при условиях обработки: $C_{\text{исх}}^{\text{Cu}^{2+}} = 60$ мг/дм³, $C_{\text{исх}}^{\text{SO}_4^{2-}} = 180$ мг/дм³, $C_{\text{исх}}^{\text{Cl}^-} = 20$ мг/дм³, $C_{\text{исх}}^{\text{Na}^+} = 56$ мг/дм³; $C_{\text{исх}}^{\text{NH}_4^+} = 1,0$ мг/дм³; $C_{\text{исх}}^{\text{K}^+} = 2,0$ мг/дм³; общее солесодержание 319 мг/дм³, $t_{\text{к}} = 7$ мин, pH_{исх} = 2,3. По полученным данным, представленным в табл. 1 и показанным на рис. 1, установлено, что для гальванопары Fe—СГН оптимально соотношение 4:1.

В данной работе исследовано изменение ионного состава сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, до и после гальванокоагуляционной обработки с различными гальванопарами (Fe—АУ, Fe—СГН), где АУ — активированный уголь; СГН — углеродминеральный сорбент, получаемый из руд скрытокристаллического графита с использованием ионной хроматографии и атомно-абсорбционной спектрометрии. Ис-

Таблица 1

№ опыта	Соотношение загрузки	$C_{\text{ост}}^{\text{Cu}^{2+}}$, мг/дм ³	Эффект очистки Cu^{2+} , %	$C_{\text{ост}}^{\text{SO}_4^{2-}}$, мг/дм ³	$C_{\text{ост}}^{\text{Cl}^-}$, мг/дм ³
1	4 : 0,5	0,047	99,93	138	18,9
2	4 : 1,0	0,014	99,98	102	17,5
3	4 : 1,5	0,030	99,96	115	17,9
4	4 : 2,0	0,038	99,95	130	18,2

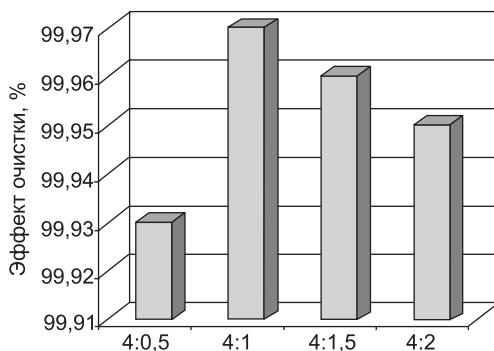


Рис. 1. Зависимость эффекта очистки от соотношения загрузки

следования были выполнены на ионном хроматографе «LC-20 Prominance» Shimadzu (Япония). Было использовано программное обеспечение «Lesolution» (Shimadzu). Условия проведения анализа: разделяющая колонка Shodex IC SI-90 4E 250×4 мм. Мембранный подавительная система SeQuant. Подвижная фаза: водный раствор 1,8 мМ Na_2CO_3 и 1,7 мМ NaHCO_3 , скорость 1,0 мл/мин.

Для проведения анализа готовили подвижную фазу и про-

пускали ее через колонку с целью кондиционирования. Для сравнения использовали раствор смеси анионов. Определяли время удерживания и площадь пиков каждого из анионов. Сопоставление площадей или высот хроматографических пиков позволило выполнить количественные определения. Результаты исследования представлены на хроматограммах (рис. 2, а) и в табл. 2. На рис. 2, а показан стандарт на четыре аниона.

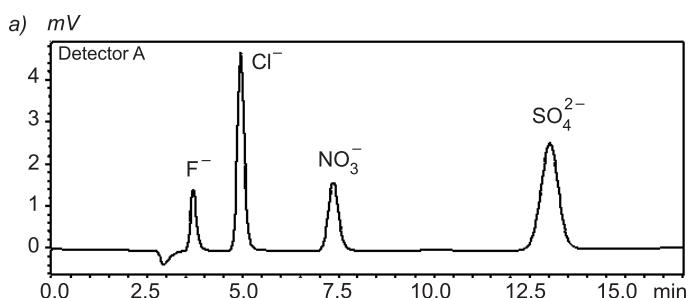


Рис. 2. Результаты исследования анионного состава сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов с помощью гальванокоагуляционной обработки

Таблица 2

Анион	Время удерживания, мин
Фторид (F^-)	3,8
Хлорид (Cl^-)	4,95
Нитрат (NO_3^-)	7,34
Сульфат (SO_4^{2-})	13,17

На рис. 2, б представлена хроматограмма исходной сточной воды, содержащей ионы тяжелых металлов с концентрацией $C_{\text{исх}}^{\text{Cu}^{2+}} = 60$ мг/дм³, $C_{\text{исх}}^{\text{Ni}^{2+}} = 15$ мг/дм³, $C_{\text{исх}}^{\text{Zn}^{2+}} = 20$ мг/дм³ для определения концентрации ани-

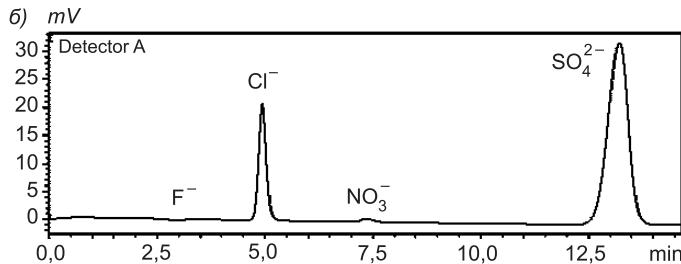


Таблица 3

Анион	Время удерживания, мин	Площадь пика S	Концентрация C , мг/дм ³
Фторид (F^-)	3,80	—	—
Хлорид (Cl^-)	4,91	265 263	$19,3 \pm 0,1$
Нитрат (NO_3^-)	7,34	11 068	$1,95 \pm 0,01$
Сульфат (SO_4^{2-})	13,17	1 087 379	$103,7 \pm 0,4$

нов сульфатов (SO_4^{2-}), фторидов (F^-), хлоридов (Cl^-), нитратов (NO_3^-) (табл. 3).

Был проведен анализ сточной воды после ее обработки методом гальванокоагуляции с использованием гальванопары Fe—СГН в соотношении 4:1 при времени контакта $t_{\text{конт}} = 15$ мин, результаты по анионному составу представлены на рис. 2, в и в табл. 4.

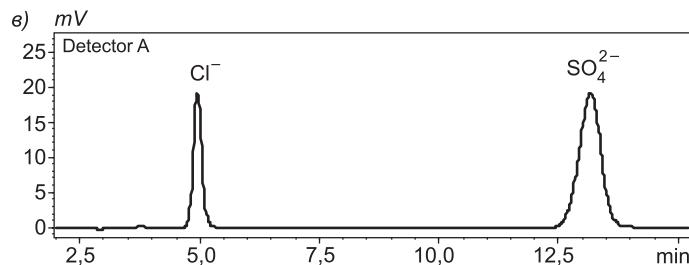


Таблица 4

Анион	Время удерживания, мин	Площадь пика S	Концентрация C , мг/дм ³
Хлорид (Cl^-)	4,95	240 361	$17,52 \pm 0,08$
Сульфат (SO_4^{2-})	13,17	622 677	$60,31 \pm 0,04$

Как видно из полученных экспериментальных данных, в процессе гальванокоагуляции концентрация ионов Cl^- снижается на 9 %, а сульфат-ионов — на 42 %. Остаточные концентрации ионов тяжелых металлов составили: ионов меди $C_{\text{ост}}^{Cu^{2+}} = 0,201$ мг/дм³, ионов никеля $C_{\text{ост}}^{Ni^{2+}} = 0,223$ мг/дм³, ионов цинка $C_{\text{ост}}^{Zn^{2+}} = 0,198$ мг/дм³. Они были определены на атомно-абсорбционном спектрометре 3300 с пламенным атомизатором производства фирмы Perkin—Elmer.

Для выбора вида активной загрузки при гальванокоагуляционном обезвреживании медьсодержащих сточных вод также были проведены исследования с использованием гальванопар Fe—СГН и Fe—АУ в соотношении 4:1.

На рис. 2, *г* представлена хроматограмма медиодержащей сточной воды с исходной концентрацией $C_{\text{исх}}^{\text{Cu}^{2+}} = 100 \text{ мг/дм}^3$ при $\text{pH}_{\text{исх}} = 2,3$. Перед гальванокоагуляционной обработкой были определены концентрации сульфатов (SO_4^{2-}), фторидов (F^-), хлоридов (Cl^-), нитратов (NO_3^-), которые показаны в табл. 5.

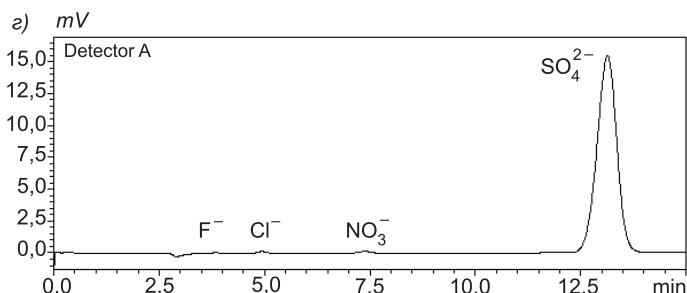


Таблица 5

Анион	Время удерживания, мин	Площадь пика S	Концентрация C , мг/дм ³
Фторид (F^-)	3,80	1308	$0,09 \pm 0,01$
Хлорид (Cl^-)	4,91	12 970	$1,03 \pm 0,01$
Нитрат (NO_3^-)	7,34	31 163	$5,32 \pm 0,01$
Сульфат (SO_4^{2-})	13,17	5 053 850	$489,5 \pm 0,4$

После обработки медиодержащих сточных вод методом гальванокоагуляции на гальванопаре Fe—АУ при времени обработки $t_{\text{конт}} = 15$ мин были определены концентрации анионов (рис. 2, *д* и табл. 6).

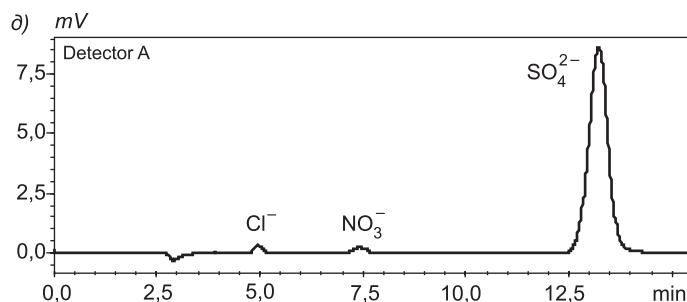
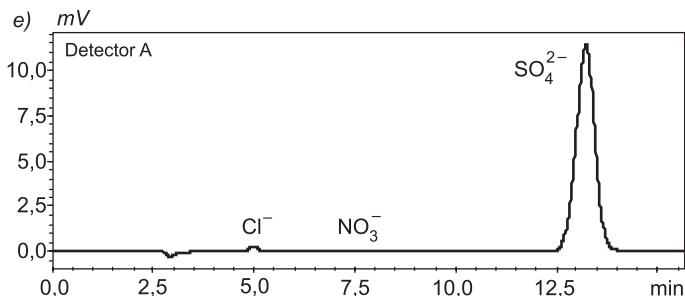


Таблица 6

Анион	Время удерживания, мин	Площадь пика S	Концентрация C , мг/л
Хлорид (Cl^-)	4,95	25 322	$2,23 \pm 0,01$
Нитрат (NO_3^-)	7,34	34 002	$6,01 \pm 0,02$
Сульфат (SO_4^{2-})	13,17	2 811 190	$272,3 \pm 0,3$

Данные анионного состава медиодержащих сточных вод после гальванокоагуляции на гальванопаре Fe—СГН при $\text{pH}_{\text{исх}} = 2,3$ и $t_{\text{конт}} = 15$ мин представлены на рис. 2, *е* и в табл. 7.

Некоторое увеличение концентрации нитратов в очищенной сточной воде при использовании гальванопары Fe—АУ по сравнению с концентра-



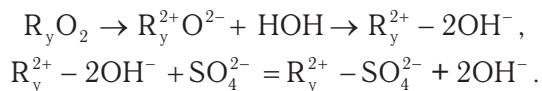
Т а б л и ц а 7

Анион	Время удерживания, мин	Площадь пика <i>S</i>	Концентрация <i>C</i> , мг / дм ³
Хлорид (Cl^-)	4,95	31 003	$2,74 \pm 0,02$
Нитрат (NO_3^-)	7,34	6262	$1,07 \pm 0,01$
Сульфат (SO_4^{2-})	13,17	3 760 170	$364,2 \pm 0,2$

цией NO_3^- в исходной воде с 5,32 до 6,01 мг / дм³, возможно, объясняется процессом окисления иона аммония. Повышение концентрации ионов Cl^- с 1,03 до 2,23 мг / дм³ вызвано тем, что в сточной воде содержатся различные соединения хлора. При гальванокоагуляционной обработке используют углеродсодержащие материалы (активированный уголь и углеродминеральный сорбент), которые могут сорбировать соединения хлора, окисляющие углерод до CO_2 и восстанавливающиеся до хлоридов ($2\text{HOCl} + \text{C} \rightarrow \text{HCl} + \text{CO}_2$). Ионы хлора Cl^- , обладая активирующим действием, способствуют депассивации железной стружки и ее растворению.

В результате исследований с помощью ионной хроматографии установлено, что в процессе гальванокоагуляционного обезвреживания снижение солесодержания обрабатываемой сточной воды зависит от вида применяемой активной загрузки. При использовании гальванопары Fe—АУ происходит снижение концентрации SO_4^{2-} на 44,4 %, в то время как при использовании Fe—(СГН) — на 25,5 %.

Уменьшение концентрации SO_4^{2-} при гальванокоагуляции в случае использования как гальванопары Fe—АУ, так и Fe—СГН возможно за счет образования труднорастворимых гидроксосульфатов железа. Большой эффект снижения SO_4^{2-} на гальванопаре Fe—АУ объясняется тем, что активированный уголь может являться также основным сорбентом, способным обменивать свои гидроксильные группы на SO_4^{2-} :



Изучение влияния вида гальванопары на эффективность процесса обезвреживания натурных медьсодержащих сточных вод было также проведено при использовании активных загрузок Fe—АУ и Fe—СГН при $\text{pH}_{\text{исх}} = 2,3$, $C_{\text{исх}}^{\text{Cu}^{2+}} = 100 \text{ мг / дм}^3$, $C_{\text{исх}}^{\text{SO}_4^{2-}} = 300 \text{ мг / дм}^3$.

Концентрацию ионов меди определяли атомно-абсорбционным методом, основанным на измерении резонансного поглощения света свободными атомами определяемого элемента при прохождении света через атомный пар исследуемого образца, образующийся в пламени. Приведенная погрешность прибора Analyst-600 составляет 0,01 %.

Таблица 8

№ опыта	рН _{исх}	Время обработки, мин	$C_{\text{ост}}^{\text{Cu}^{2+}}$, мг/дм ³		$C_{\text{ост}}^{\text{SO}_4^{2-}}$, мг/дм ³	
			Fe–СГН	Fe–АУ	Fe–СГН	Fe–АУ
1	2,3	13,44	0,0001	0,03	190	150
2	2,3	12,00	0,0006	0,12	210	150
3	2,3	10,00	0,004	0,221	220	170
4	2,3	8,00	0,006	0,28	230	180
5	2,3	4,56	0,008	0,3	290	240

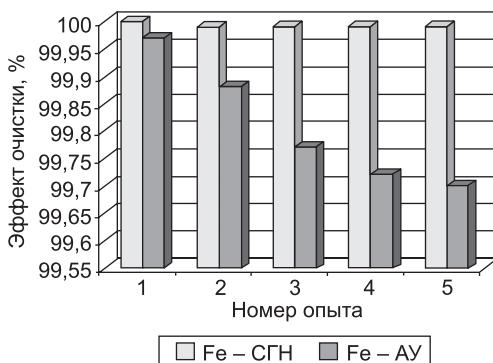


Рис. 3. Гистограмма для определения эффекта очистки по вариантам гальванокоагуляции с использованием Fe–АУ и Fe–СГН

Результаты эксперимента для сравнения вариантов процесса гальванокоагуляции представлены в табл. 8 и на рис. 3. Как видно, более глубокая очистка от ионов меди достигается на гальванопаре Fe–СГН, чем при использовании гальванопары Fe–АУ. Это объясняется тем, что углеродминеральный сорбент, используемый в качестве катодной составляющей загрузки, обладает большим содержанием мезопор. Кроме того, высокая эффективность процесса связана с более интенсивным протеканием

окисления железа за счет углеродминерального сорбента (графитовые плоскости разделены металлооксидами).

Учитывая, что соединения меди, выносимые сточными водами гальванического производства, относятся к группе высокотоксичных компонентов, обладающих широким спектром токсического действия с многообразными проявлениями, для глубокого обезвреживания предпочтительно использовать гальванопару Fe–СГН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Зайцев, Е.Д. Совершенствование метода гальванокоагуляции вредных примесей в сточных водах промышленных предприятий [Текст] / Е.Д. Зайцев // Изв. вузов. Цветная металлургия. — 2002. — № 2.
- Халтурина, Т.И. Исследование технологического процесса гальванокоагуляции медьсодержащих сточных вод [Текст] / Т.И. Халтурина, Т.А. Курилина // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 8. — С. 70–75.
- Курилина, Т.А. Гальванокоагуляционное обезвреживание сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов [Текст] / Т.А. Курилина, Т.И. Халтурина // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 9. — С. 77–83.
- Пат. 32057080. МСИ СО2 А 1/46. Способ очистки сточной воды и устройство для его осуществления [Текст] / А.А. Рязанцев, А.А. Батоева : опубл. 27.03.96, бюл. № 9.

ХАЛТУРИНА Т.И., канд. хим. наук, проф.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

КУРИЛИНА Т.А., канд. техн. наук, ст. препод.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ЧУРБАКОВА О.В., канд. техн. наук, доц.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 21.03.11

Khalturina T.I., candidate of chemical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Kurilina T.A., candidate of technical sciences, senior lecturer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Churbakova O.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**STUDY THE EFFECT OF SPECIES
ON GALVANOPARY EFFICIENCY
OF THE PROCESS GALVANOAKOAGULYATSI WASTEWATER
CONTAINING HEAVY METAL IONS**

The article presents the results of studies of the effect of the form galvanopary galvanokoagulyatsi on efficiency of waste water containing heavy metal ions using the method of ion chromatography and atomic-absorption spectrometry.

Key words: galvanokoagulyation, download galvanopary, ion chromatography, sewage, uglerodmineralny sorbent.

REFERENCES

1. Zaitsev, E.D. Improvement in the method galvanokoagulyatsi contaminants in the wastewater of industrial enterprises [Text] / E.D. Zaitsev // Proc. of the universities. Non-ferrous Metallurgy. — 2002. — N 2.
2. Khalturina, T.I. Investigation process galvanokoagulyatsi copper wastewater [Text] / T.I. Khalturina, T.A. Kurilina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 8. — P. 70–75.
3. Kurilina, T.A. Galvanokoagulyatsionnoe neutralization of wastewater containing heavy metal ions [Text] / T.A. Kurilina, T.I. Khalturina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 9. — P. 77–83.
4. Patent 32057080. MSI CO2 A 1/46. The purification of waste water and apparatus for its implementation [Text] / A.A. Ryazantsev, A.A. Batoeva : publ. 27.03.96, Bull. N 9.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.51.001.33

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.С. ЗВЕРЕВА,
Ю.Э. МАЛЫШЕВА

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЗНАКОВ СВАЙНЫХ МОЛОТОВ С ПНЕВМОПРИВОДОМ

Рассматриваются исторически применяемые и новые признаки для классификации свайных молотов.

Ключевые слова: цилиндр-корпус, поршень, боек-ударник, воздухораспределитель, пневматический молот.

Исторически сложилось так, что молоты с подвижным корпусом-цилиндром, выполняющим функции бойка-ударника, и молоты с неподвижным корпусом-цилиндром представляли все многообразие пневматических молотов для погружения свай и шпунта. При этом функции воздухораспределителя возлагались на расположенные в неподвижном корпусе-цилиндре многоступенчатые золотники, поворотные краны, клапаны и на ступенчатые бойки-ударники.

Были распространены молоты со штоковым бойком-ударником, перемещающимся по направляющим штангам и с управлением воздухораспределением подвижной поршневой частью, имеющей шток в неподвижном корпусе.

Отмеченное многообразие конструкций молотов Губерта, Маккерна-на-Терри, Униона Айрона Уоркса, Ингерсолл – Ранд, заводов Вильгельма и др. нашло отражение в классификации, выполненной Л.В. Арнольдом [1], в которой молоты представлены двумя видами:

- 1) молоты с подвижным корпусом-цилиндром;
- 2) молоты с неподвижным корпусом-цилиндром.

К первому виду отнесены молоты трех групп конструкций, содержащих следующие элементы. Первая группа молотов содержала неподвижный поршень-воздухораспределитель и подвижный корпус-цилиндр, выполняющий функции бойка-ударника. Вторая группа молотов содержала подвижный поршень-воздухораспределитель и подвижный корпус-цилиндр, выполняющий функции бойка-ударника. Третья группа молотов содержала подвижный корпус-цилиндр, выполняющий функции воздухораспределителя и бойка-ударника, а также неподвижный поршень, выполняющий функции воздухоподвода.

С целью формализации и получения более наглядного представления о конструкции молота обозначим его элементы: Π_n , P_n , Π_h , B_y , B_p , B_n — соответственно корпус-цилиндр подвижный, поршень подвижный, поршень неподвижный, боек-ударник, воздухораспределитель и устройство воздухоподвода. Принципиальные схемы молотов известных конструкций [1] можно представить в виде комбинаций (стрелками показаны основные взаимосвязи):

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Зверева А.С., Малышева Ю.Э., 2011

$$\begin{array}{c} \Pi_{\text{п}} \leftrightarrow \Pi_{\text{н}} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{Б}_y \leftrightarrow \text{В}_p; \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \Pi_{\text{п}} \leftrightarrow \Pi_{\text{п}} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{Б}_y \leftrightarrow \text{В}_p; \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \Pi_{\text{п}} \leftrightarrow \Pi_{\text{н}} \\ \uparrow \downarrow \quad \downarrow \\ \text{В}_p \text{Б}_y \leftrightarrow \text{В}_{\text{п}}. \end{array}$$

Ко второму виду были отнесены молоты трех групп конструкций, содержащих те же элементы, как и первый вид, но с некоторой особенностью их исполнения. Так, первая группа молотов содержала неподвижный корпус-цилиндр, подвижный поршень-воздухораспределитель, устройство воздухоподвода, выполняющее одновременно функции бойка-ударника. Вторая группа молотов содержала неподвижный корпус-цилиндр с воздухораспределителем, подвижный поршень, выполняющий функции устройства воздухоподвода и боек-ударник. Третья группа молотов содержала неподвижный корпус-цилиндр, неподвижный поршень, выполняющий функции устройства воздухоподвода и боек-ударник, выполняющий одновременно функции воздухораспределителя.

Обозначим элементы молотов второго вида теми же буквами, изменив для неподвижного корпуса-цилиндра индекс: $\Pi_{\text{н}}$.

Существенными отличиями наделен неподвижный корпус-цилиндр, поскольку в нем расположены воздухораспределитель и воздухоподвод. Используя обозначения, представим варианты молотов в виде комбинаций (стрелками показаны основные взаимосвязи):

$$\begin{array}{c} \Pi_{\text{н}} \leftrightarrow \Pi_{\text{п}} \leftrightarrow \text{Б}_y \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{В}_p \leftrightarrow \text{В}_{\text{п}}; \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \Pi_{\text{н}} \leftrightarrow \Pi_{\text{п}} \leftrightarrow \text{Б}_y \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{В}_p \leftrightarrow \text{В}_{\text{п}}; \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \Pi_{\text{н}} \leftrightarrow \Pi_{\text{п}} \leftrightarrow \text{Б}_y \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{В}_{\text{п}} \leftrightarrow \text{В}_p. \end{array}$$

Принимая во внимание развитие видов и тип воздухораспределительных устройств за последние 40 лет [2, 3], можно предложить варианты их конструктивного исполнения применительно к свайным пневматическим машинам ударного действия (молотам).

Свайные молоты с неподвижным корпусом-цилиндром и подвижным бойком-ударником имеют следующие варианты систем воздухораспределения: с отдельным золотником; отдельным клапаном; золотником, совмещенным с ударником; клапаном, совмещенным с ударником; дроссельной с постоянно открытым сечением; дроссельной с переменным сечением; со струйной; мембранный; сильфонной.

Варианты 3 и 4 известны [2] как бесклапанные и беззолотниковые пневмоударные системы, однако могут быть представлены как комбинации с отдельным ударником и золотником или клапаном. Как отмечено в [2], конструктивные варианты воздухораспределительных систем от 1 до 9 могут быть выполнены: в (на) корпусе-цилиндре, ударнике, стержне, трубке, отдельном кинематическом звене (например, поршне), а также вынесеными за пределы корпуса-цилиндра, бойка-ударника, корпуса поршня.

Кроме рассмотренных элементов свайных молотов следует учитывать и состав их комплектации: базовую машину (БМ), компрессор (К), средства подвода воздуха к молоту (СПВ), промежуточный ударник (ПУ), буферный наголовник (БН), сваю (С), средства подвеса (навески) молота (СПМ). При этом компоновочная схема свайного молота с подвижным или неподвижным корпусом-ударником будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Отдельно свайный молот (СМ) может включать: ударную часть — боек-ударник или ударную часть — корпус-цилиндр; поршень подвижный; воздухораспределитель; систему подвески (СПМ); буферный наголовник (БН).

Учитывая разнообразие подходов к совершенствованию пневматического ударного механизма молота как основной его части, по мнению авторов, целесообразно рассматривать композицию, приведенную на рис. 2.

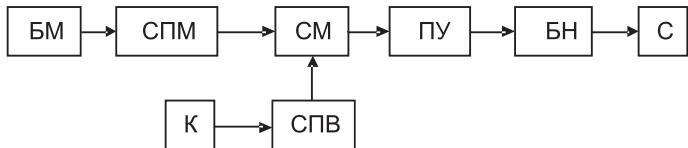


Рис. 1

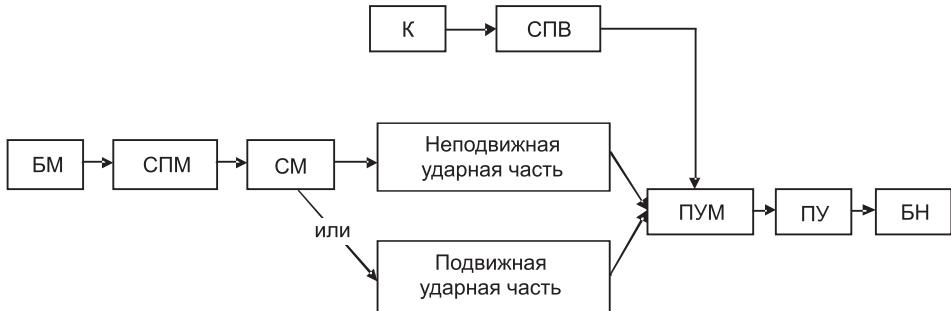


Рис. 2

Из нее следует выделять ПУМ как базовую машину — энергообразующую часть и изначально совершенствовать ПУМ вне зависимости от композиции.

Пневматический ударный механизм наиболее широко представлен признаками в классификации [3]. Признаки ПУМ даны в сокращенном варианте на блок-схеме, представленной на рис. 3.

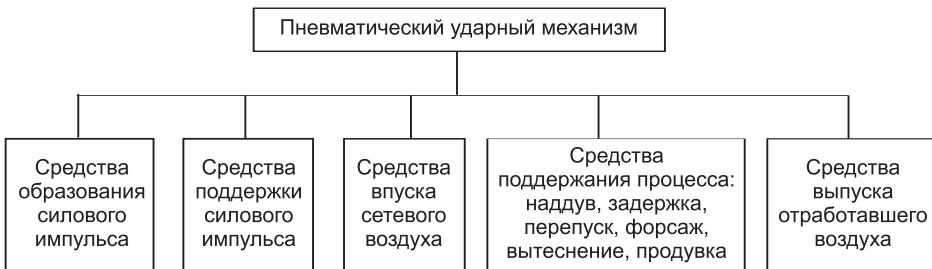


Рис. 3

Отметим, что признаки управления процессами впуска, наддува, запуска, перепуска, задержки, форсажа, вытеснения, продувки и выпуска воздуха осуществляются конструктивными решениями [3].

Для формализованной записи свайных молотов можно воспользоваться записью, приведенной в [1, 3].

Отметим, что промежуточные ударники используются не только в тяжелых молотах, но и в ручных машинах ударного действия, навесных молотах, что подтверждается патентами 1930–1990 годов: GB 1030136A (1966 г.), GB 329921A (1930 г.), DE 546489A (1932 г.), SE 358332 В (Швеция, 1973 г.), SU 804418 A1 (1981 г.) и патентом RU 2410234 C2 (2008 г.) [4]. Применение в свайных молотах промежуточных ударников привлекает возможность изменения скорости соударения с буферным устройством свай, что в некоторых грунтовых условиях может оказаться целесообразным, поскольку соотношения масс бойка-ударника и промежуточного ударника могут быть подобраны наилучшим образом.

Вывод. Предложенная классификация позволяет выделять отдельные базовые признаки как элементы декомпозиции свайных молотов и решать вопросы совершенствования всей композиции поэлементно с учё-

том того, что пневматический механизм ударного действия является основным, влияющим на свойства других элементов композиции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арнольд, Л.В. Строительные пневматические инструменты и компрессоры [Текст] / Л.В. Арнольд. — Л. ; М. : НКТП-ОНТИ, 1936. — 343 с.
2. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дросельные, струйные, беззоловниковые, бесклапанные [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.
3. Кутумов, А.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов [Текст] / А.А. Кутумов, Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2008. — 376 с.
4. Патент 2410234 РФ. Пневматический молот [Текст] / Д.Д. Абраменков, Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков и др. — Опубл. 2010, Бюл. № 13.

АБРАМЕНКОВ Д.Э., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Э.А., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЗВЕРЕВА А.С., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

МАЛЫШЕВА Ю.Э., инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 10.05.11

Abramenkov D.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov E.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Zvereva A.S., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Malysheva Yu.E., engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CLASSIFICATION OF SIGNS OF PILE HAMMERS WITH THE PNEUMODRIVE

Signs historically applied and new to classification of pile hammers are considered.

Key words: cylinder-case, piston, ram-drummer, air distributor, compressed air hammer.

REFERENCES

1. Arnold, L.V. Building pneumatic tools and compressors [Text] / L.V. Arnold. — Л. ; М. : NKTP-ONTI, 1936. — 343 p.
2. Абраменков, Е.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дросельные, струйные, беззоловниковые, бесклапанные [Текст] / Е.А. Абраменков, Д.Е. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 p.
3. Кутумов, А.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов [Текст] / А.А. Кутумов, Д.Э. Абраменков, Е.А. Абраменков. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2008. — 376 p.
4. Patent 2410234 Russian Federations. A pneumatic hammer / D.D. Абраменков, D.E. Абраменков, E.A. Абраменков, etc. — Opubl. 2010, Bul. N 13.

УДК 534.014

А.В. ДУКАРТ, ВЬЕТ НГОК ФАМ, ТХАНЬ БИНЬ ФАМ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С ДЕМПФИРОВАНИЕМ

Рассматриваются свободные колебания линейной системы с двумя степенями свободы в предположении, что она обладает непропорциональным трением. Решения, описывающие переходные режимы колебаний, вызываемые заданными начальными отклонениями и скоростями масс, найдены в замкнутой форме. Анализируется влияние параметров системы на ее демпфирующие свойства и характер движения масс.

Ключевые слова: свободные колебания, двухмассовая система, непропорциональное трение, начальные условия, переходные режимы колебаний.

Колебания линейных систем с двумя степенями свободы являются предметом многочисленных исследований. Им отведены отдельные разделы известных курсов теории колебаний^{1–4} [1], что связано с широким распространением таких систем в инженерной практике. Так, классическими примерами двухмассовых систем являются фундаменты машин и виброизолированные установки с присоединенными одномассовыми динамическими или ударными гасителями колебаний; два связанных пружиной или демпфером маятника; двойной маятник; два связанных резистором электрических контура; двухзвенная каскадная виброизоляция; амортизаторы и поглотители толчков автомобилей; два диска, размещенных на одном валу и др.

К настоящему времени детально проанализированы свободные и вынужденные колебания линейных систем с двумя степенями свободы при отсутствии сил сопротивления. В то же время многие вопросы, связанные с учетом демпфирования в звеньях таких систем, исследованы недостаточно полно, хотя работы в данном направлении постоянно ведутся^{5–7}. В данной статье рассматриваются свободные колебания линейной двухмассовой системы с последовательным соединением масс (рис. 1), вызываемые заданными начальными отклонениями и скоростями масс. Неуп-

¹ Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960. 580 с.

² Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 272 с.

³ Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. СПб.: Лань, 2005. 440 с.

⁴ Тонг Кин Н. Теория механических колебаний. М.: Машгиз, 1963. 352 с.

⁵ Майдановский А.С. Особенности колебаний линейных динамических систем с двумя степенями свободы при диссипативной связи / / Изв. вузов. Физика. 2008. № 1. С. 52–59.

⁶ Нагаев Р.Ф., Степанов А.В. Об оптимизации коэффициента затухания свободных колебаний двухмассовой системы / / Механика твердого тела. 1979. № 4. С. 24–28.

⁷ Sun C.T., Bai J.M. Vibration of multi-degree-of-freedom system with nonproportional viscous damping / / Intern. J. of Mechanical Sciences. 1995. V. 37, N 4. P. 441–455.

ругое сопротивление в звеньях системы учтем сначала в соответствии с гипотезой частотно-независимого трения Е.С. Сорокина⁸.

Запишем [2] дифференциальные уравнения свободных колебаний системы

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(u_1 + iv_1)x_1 + \\ + c_2(u_2 + iv_2)(x_1 - x_2) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(u_2 + iv_2) \times \\ \times (x_2 - x_1) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и характеристическое уравнение

$$\begin{aligned} m_1 m_2 \lambda^4 + [c_1 m_2 (u_1 + iv_1) + \\ + c_2 (m_1 + m_2) (u_2 + iv_2)] \lambda^2 + \\ + c_1 c_2 [(u_1 u_2 - v_1 v_2) + i(u_1 v_2 + u_2 v_1)] = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$u_j = (4 - \gamma_j^2) / (4 + \gamma_j^2); \quad v_j = 4\gamma_j / (4 + \gamma_j^2); \quad j = 1, 2; \quad i = \sqrt{-1}.$$

На рис. 1 и в (1), (2) m_j , c_j , γ_j , x_j — соответственно масса, квазиупругий коэффициент, коэффициент неупругого сопротивления и абсолютная координата j -го звена системы;

λ — характеристический показатель.

Предполагается, что при рассматриваемых значениях параметров системы вещественные части всех четырех корней $\lambda_{2v-1,2v} = -0,5h_v \pm i\omega_v$ уравнения (2) отрицательны; $\omega_v > 0, h_v > 0$ — частоты свободных колебаний и соответствующие им коэффициенты демпфирования системы, $v = 1, 2$. Для определения корней уравнения (2) могут быть использованы как аналитические, так и численные методы⁹.

Будем далее считать, что матрица коэффициентов демпфирования рассматриваемой системы (рис. 1) не может быть одновременно с матрицей квазиупругих коэффициентов приведена к диагональному виду, т.е. уравнениями (1) описываются свободные затухающие колебания системы с непропорциональным трением. Решениями дифференциальных уравнений (1) являются вещественные функции [2, 3]

$$x_j(t) = 2 \sum_{v=1}^2 e^{-0.5h_v t} [\alpha_{2v-1}^{(j)} \cos \omega_v t - \alpha_{2v}^{(j)} \sin \omega_v t]. \quad (3)$$

Здесь

$$\alpha_{2v-1}^{(2)} = \alpha_{2v-1}^{(1)} \beta_{2v-1} - \alpha_{2v}^{(1)} \beta_{2v}, \quad \alpha_{2v}^{(2)} = \alpha_{2v-1}^{(1)} \beta_{2v} + \alpha_{2v}^{(1)} \beta_{2v-1};$$

β_{2v-1} , β_{2v} — действительные и мнимые части коэффициентов распределения амплитуд, вычисляемые по формулам

⁸ Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Стройиздат, 1960. 131 с.

⁹ Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 832 с.

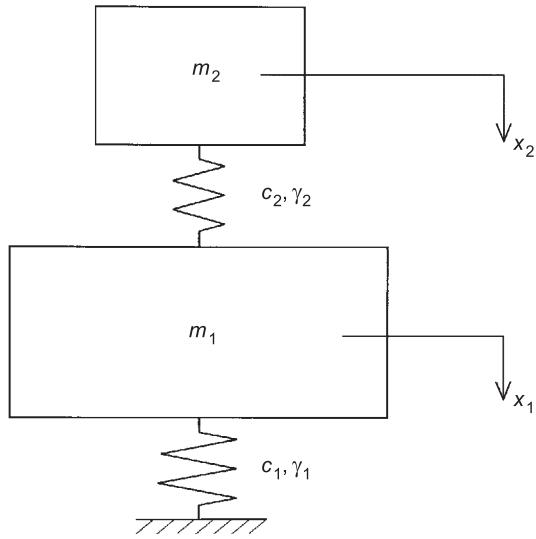


Рис. 1. Двухмассовая колебательная система с частотно-независимым трением

$$\begin{aligned}\beta_{2v-1} &= \omega_{02}^2 [(0,25h_v^2 - \omega_v^2 + u_2\omega_{02}^2)u_2 + (v_2\omega_{02}^2 - h_v\omega_v)v_2] / \sigma_v; \\ \beta_{2v} &= \omega_{02}^2 [(0,25h_v^2 - \omega_v^2 + u_2\omega_{02}^2)v_2 - (v_2\omega_{02}^2 - h_v\omega_v)u_2] / \sigma_v; \\ \sigma_v &= (0,25h_v^2 - \omega_v^2 + u_2\omega_{02}^2)^2 + (v_2\omega_{02}^2 - h_v\omega_v)^2;\end{aligned}$$

$\omega_{02} = \sqrt{c_2 / m_2}$ — парциальная частота колебаний второго звена ($j = 2$) системы;

$\alpha_{2v-1}^{(j)}, \alpha_{2v}^{(j)}$ — произвольные постоянные.

В общем случае свободные колебания системы определяются как параметрами самой системы (m_j, c_j, γ_j), так и заданными значениями начальных отклонений и скоростей масс m_1 и m_2 :

$$x_{10} = x_1(0), \quad x_{20} = x_2(0), \quad \dot{x}_{10} = \dot{x}_1(0), \quad \dot{x}_{20} = \dot{x}_2(0). \quad (4)$$

Использование условий (4) приводит к системе алгебраических уравнений относительно постоянных $\alpha_k^{(1)} (k=1,4)$

$$\bar{B} \vec{\alpha}^{(1)} = \vec{W}_0, \quad (5)$$

где \bar{B} — квадратная 4×4 -матрица, элементы которой вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}b_{1,2v-1} &= 1; \quad b_{1,2v} = 0; \\ b_{2,2v-1} &= 0,5h_v; \quad b_{2,2v} = \omega_v; \\ b_{3,2v-1} &= \beta_{2v-1}; \quad b_{3,2v} = -\beta_{2v}; \\ b_{4,2v-1} &= 0,5h_v\beta_{2v-1} + \omega_v\beta_{2v}; \quad b_{4,2v} = \omega_v\beta_{2v-1} - 0,5h_v\beta_{2v};\end{aligned}$$

$\vec{\alpha}^{(1)}$ и \vec{W}_0 — матрицы-столбцы, элементами которых являются соответственно постоянные $\alpha_k^{(1)}$ и начальные отклонения и скорости масс системы

$$\vec{\alpha}^{(1)} = [\alpha_1^{(1)}, \alpha_2^{(1)}, \alpha_3^{(1)}, \alpha_4^{(1)}]^T;$$

$$\vec{W}_0 = 0,5[x_{10}, -\dot{x}_{10}, x_{20}, -\dot{x}_{20}]^T;$$

индекс « T » означает операцию транспонирования матриц. Основной определитель уравнений (5) вычисляется по формуле

$$\Delta_s = \omega_1\omega_2 \left(\sum_{k=1}^4 \beta_k^2 - 2\beta_1\beta_3 \right) - \beta_2\beta_4 \left[\sum_{v=1}^2 \omega_v^2 + 0,25(h_1 - h_2)^2 \right].$$

Рассмотрим колебания системы, вызываемые каждым из начальных условий (4) отдельно. Для определения движения системы, задаваемого несколькими начальными условиями, следует воспользоваться принципом суперпозиции.

Найдем сначала колебания системы, вызываемые заданным отклонением x_{10} массы m_1 при нулевых значениях остальных начальных условий ($\dot{x}_{10} = x_{20} = \dot{x}_{20} = 0$). В этом случае матрица $\vec{W}_0 = 0,5[x_{10}, 0, 0, 0]^T$ и решение системы уравнений (5) достаточно просто определяется в замкнутом виде:

$$\alpha_1^{(1)} = \frac{u_{11}}{\Delta_s} x_{10}, \quad \alpha_2^{(1)} = \frac{v_{11}}{\Delta_s} x_{10}, \quad \alpha_3^{(1)} = \frac{u_{12}}{\Delta_s} x_{10}, \quad \alpha_4^{(1)} = \frac{v_{12}}{\Delta_s} x_{10}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= \omega_1 \omega_2 (\beta_3^2 + \beta_4^2 - \beta_1 \beta_3) - \beta_2 \beta_4 [0,25 h_2 (h_2 - h_1) + \omega_2^2] + \\
 &\quad + 0,5 (h_1 \omega_2 \beta_2 \beta_3 - h_2 \omega_1 \beta_1 \beta_4), \\
 v_{11} &= \beta_1 \beta_4 [0,25 h_2 (h_1 - h_2) - \omega_2^2] + \omega_1 \beta_2 (0,5 h_2 \beta_4 + \omega_2 \beta_3) + \\
 &\quad + 0,5 h_1 [\omega_2 \beta_1 \beta_3 - \omega_2 (\beta_3^2 + \beta_4^2)], \\
 u_{12} &= \omega_1 \omega_2 (\beta_1^2 + \beta_2^2 - \beta_1 \beta_3) + \beta_2 \beta_4 [0,25 h_1 (h_2 - h_1) - \omega_1^2] + \\
 &\quad + 0,5 (h_2 \omega_1 \beta_1 \beta_4 - h_1 \omega_2 \beta_2 \beta_3), \\
 v_{12} &= \omega_2 \beta_4 (0,5 h_1 \beta_2 + \omega_1 \beta_1) - 0,5 h_2 \omega_1 \beta_1 (\beta_1 - \beta_3) - \\
 &\quad - 0,25 h_1 \beta_2 \beta_3 (h_1 - h_2) - \omega_1 \beta_2 (\omega_1 \beta_3 + 0,5 h_2 \beta_2).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Подставляя (6) в (2), получим искомую реакцию системы на отклонение x_{10} массы m_1 в начальный момент времени ($t = 0$) в виде

$$x_j(t) = \frac{x_{10}}{\Delta_s} \sum_{v=1}^2 e^{-0,5h_v t} (u_{jv} \cos \omega_v t - v_{jv} \sin \omega_v t), \tag{8}$$

причем

$$u_{2v} = u_{1v} \beta_{2v-1} - v_{1v} \beta_{2v}; \quad v_{2v} = u_{1v} \beta_{2v} + v_{1v} \beta_{2v-1}. \tag{9}$$

Пусть теперь колебания системы вызваны только заданным отклонением x_{20} массы m_2 . Повторим процедуру определения входящих в (3) постоянных $\alpha_k^{(1)}$, учитывая, что в данном случае матрица $\vec{W}_0 = 0,5[0, 0, x_{20}, 0]^T$. В результате найдем реакцию системы на заданное в начальный момент времени ($t = 0$) отклонение x_{20} массы m_2 в виде функций (8), в которых следует заменить x_{10} на x_{20} , а для вычисления величин u_{1v}, v_{1v} воспользоваться формулами

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= -u_{12} = \omega_1 \omega_2 (\beta_1 - \beta_3) + 0,5 (h_2 \omega_1 \beta_4 - h_1 \omega_2 \beta_2), \\
 v_{11} &= 0,5 h_1 \omega_2 (\beta_3 - \beta_1) + 0,25 h_2 \beta_4 (h_2 - h_1) + \omega_2 (\omega_2 \beta_4 - \omega_1 \beta_2), \\
 v_{12} &= 0,5 h_2 \omega_1 (\beta_1 - \beta_3) + 0,25 h_1 \beta_2 (h_1 - h_2) + \omega_1 (\omega_1 \beta_2 - \omega_2 \beta_4).
 \end{aligned} \tag{10}$$

Величины u_{2v}, v_{2v} по-прежнему определяются по формулам (9).

Для отыскания законов движения, вызываемого отдельно начальными скоростями \dot{x}_{10} и \dot{x}_{20} масс m_1 и m_2 , можно воспользоваться импульсными реакциями системы, полученными в [3]. Отметим, что колебания масс системы в этих случаях также описываются функциями (8), причем следует заменить x_{10} соответственно на \dot{x}_{10} и \dot{x}_{20} : если они определяются заданной скоростью \dot{x}_{10} массы m_1 , то $\vec{W}_0 = -0,5[0, \dot{x}_{10}, 0, 0]^T$ и

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= -u_{12} = \omega_2 \beta_2 \beta_3 - \omega_1 \beta_1 \beta_4 - 0,5 \beta_2 \beta_4 (h_2 - h_1), \\
 v_{11} &= \omega_2 (\beta_1 \beta_3 - \beta_3^2 - \beta_4^2) + \omega_1 \beta_2 \beta_4 + 0,5 \beta_1 \beta_4 (h_1 - h_2), \\
 v_{12} &= \omega_1 (\beta_1 \beta_3 - \beta_1^2 - \beta_2^2) + \omega_2 \beta_2 \beta_4 + 0,5 \beta_2 \beta_3 (h_2 - h_1),
 \end{aligned} \tag{11}$$

если движение системы вызвано заданной скоростью \dot{x}_{20} массы m_2 , то $\vec{W}_0 = -0,5[0, 0, 0, \dot{x}_{20}]^T$ и

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= -u_{12} = \omega_1 \beta_4 - \omega_2 \beta_2, \\
 v_{11} &= 0,5 (h_2 - h_1) \beta_4 - \omega_2 (\beta_1 - \beta_3), \\
 v_{12} &= \omega_1 (\beta_1 - \beta_3) + 0,5 (h_1 - h_2) \beta_2.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Найденные решения определяют законы движения двухмассовой системы с частотно-независимым трением при любом сочетании начальных отклонений и скоростей ее масс, позволяя тем самым рассмотреть широкий класс инженерных задач. Отметим, что полученные решения применимы и в том случае, когда демпфирование в звеньях системы учитывается по гипотезе вязкого трения [1]. Здесь следует [2] заменить характеристическое уравнение (2) на уравнение

$$m_1\lambda^4 + 2[m_1h_{01} + (m_1+m_2)h_{02}]\lambda^3 + [m_1(\omega_{01}^2 + 4h_{01}h_{02}) + (m_1+m_2)\omega_{02}^2]\lambda^2 + (13)$$

$$+ 2m_1(h_{02}\omega_{01}^2 + h_{01}\omega_{02}^2)\lambda + m_1\omega_{01}^2\omega_{02}^2 = 0,$$

а действительные и мнимые части коэффициентов распределения амплитуд вычислять по формулам

$$\beta_{2v-1} = [(0,25h_v^2 - h_{02}h_v + \omega_{02}^2 - \omega_v^2)(\omega_{02}^2 - h_{02}h_v) + 2h_{02}\omega_v^2(2h_{02} - h_v)]/\sigma_v,$$

$$\beta_{2v} = [2h_{02}\omega_v(0,25h_v^2 - h_{02}h_v + \omega_{02}^2 - \omega_v^2) - \omega_v(\omega_{02}^2 - h_{02}h_v)(2h_{02} - h_v)]/\sigma_v, (14)$$

$$\sigma_v = (0,25h_v^2 - h_{02}h_v + \omega_{02}^2 - \omega_v^2)^2 + (2h_{02} - h_v)^2\omega_v^2.$$

В (13) и (14) обозначено:

$\omega_{01} = \sqrt{c_1/m_1}$ — парциальная частота колебаний первого (или главного) звена ($j = 1$) системы;

$$h_{01} = k_1/(2m_1);$$

$$h_{02} = k_2/(2m_2);$$

k_j — коэффициент вязкого трения j -го звена системы, $j = 1, 2$.

В качестве примера численной реализации рассмотрим переходные режимы колебаний двухмассовой системы с частотно-независимым трением, вызываемые заданным отклонением x_{10} массы m_1 . Предполагается, что на массу m_2 не наложены дополнительные удерживающие связи; тогда начальное отклонение x_{20} массы m_2 совпадает с отклонением x_{10} массы m_1 , т.е. $x_{20} = x_{10}$. Задача такого типа возникает, например, в теории динамического гашения колебаний конструкций и машин в связи с необходимостью уменьшения длительности переходных процессов^{6, 10, 11} [4]. В данном случае полное движение масс системы также описывается выражением (8), в котором на основании принципа суперпозиции величины u_{jv}, v_{jv} должны приниматься равными сумме соответствующих величин, найденных по формулам (7), (9) и (10). Для анализа полученных таким образом функций отклонений масс $x_j(t)$ введем следующие безразмерные величины:

$$\mu = m_2 / m_1, s = \omega_{02} / \omega_{01}, y_j(\tau) = x_j(t) / x_{10}, \tau = \omega_{01}t, p_v = \omega_v / \omega_{01},$$

$$\delta_v = h_v / \omega_{01}, v = 1, 2, j = 1, 2.$$

Не останавливаясь здесь на деталях выбора оптимальных параметров гасителя при соответствующих критериях качества виброзащиты, рассмотрим некоторые вопросы, связанные с влиянием параметров гасителя на демпфирующие свойства системы и характер переходных режимов движения масс m_1 и m_2 . Некоторые результаты вычислений,

¹⁰ Бартел (Bartel D.L), Краутер (Krauter A.I.) Оптимизация временных характеристик динамического поглотителя колебаний // Тр. амер. общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. 1971. Т. 93. Сер. В, № 3. С. 34–38.

¹¹ Вульфсон М.Н. К вопросу о выборе параметров динамического гасителя колебаний // Нелинейные колебания и переходные процессы в машинах. М.: Наука, 1972. С. 347–354.

связанных с анализом уравнения (2) при фиксированной величине относительной массы гасителя μ , приведены в табл. 1 и 2. Они свидетельствуют о том, что при заданной величине одного из оптимизируемых параметров гасителя (настройки s или коэффициента неупругого сопротивления

Таблица 1

**Значения коэффициентов демпфирования системы с гасителем
в зависимости от величин коэффициентов неупругого сопротивления
ее звеньев ($\mu = 0,025$; $s = 0,97561$)**

γ_2	$\gamma_1 = 0,025$		$\gamma_1 = 0,05$		$\gamma_1 = 0,075$	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
0,0	0,0105	0,0144	0,0210	0,0288	0,0315	0,0432
0,025	0,0228	0,0267	0,0333	0,0411	0,0438	0,0555
0,05	0,0351	0,0390	0,0456	0,0534	0,0561	0,0678
0,075	0,0475	0,0512	0,0579	0,0657	0,0684	0,0801
0,1	0,0599	0,0634	0,0703	0,0779	0,0807	0,0924
0,125	0,0724	0,0753	0,0827	0,0900	0,0931	0,1045
0,15	0,0851	0,0871	0,0871	0,1019	0,1055	0,1165
0,175	0,0980	0,0985	0,1080	0,1135	0,1180	0,1283
0,2	0,1113	0,1096	0,1209	0,1249	0,1308	0,1399
0,225	0,1250	0,1201	0,1342	0,1358	0,1437	0,1511
0,25	0,1393	0,1298	0,1479	0,1462	0,1570	0,1619
0,275	0,1549	0,1383	0,1624	0,1557	0,1708	0,1722
0,3	0,1726	0,1445	0,1779	0,1640	0,1853	0,1816

Таблица 2

**Значения коэффициентов демпфирования системы с гасителем
в зависимости от величин коэффициента внутреннего трения
и настройки гасителя ($\mu = 0,025$; $\gamma_1 = 0,025$)**

s	$\gamma_2 = 0,15$		$\gamma_2 = 0,2$		$\gamma_2 = 0,25$	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
0,970	0,0871	0,0843	0,1144	0,1054	0,1440	0,1238
0,971	0,0868	0,0848	0,1138	0,1061	0,1432	0,1248
0,972	0,0864	0,0853	0,1133	0,1069	0,1424	0,1259
0,973	0,0861	0,0858	0,1127	0,1076	0,1415	0,1270
0,974	0,0857	0,0863	0,1122	0,1084	0,1407	0,1281
0,975	0,0853	0,0868	0,1116	0,1091	0,1399	0,1292
0,976	0,0850	0,0872	0,1111	0,1099	0,1390	0,1303
0,977	0,0846	0,0878	0,1105	0,1107	0,1381	0,1314
0,978	0,0843	0,0883	0,1099	0,1114	0,1373	0,1325
0,979	0,0839	0,0888	0,1094	0,1122	0,1364	0,1336
0,980	0,0836	0,0893	0,1088	0,1130	0,1355	0,1348
0,981	0,0832	0,0898	0,1082	0,1137	0,1346	0,1359
0,982	0,0828	0,0903	0,1076	0,1145	0,1338	0,1370

тивления γ_2) путем варьирования другого из них можно добиться равенства коэффициентов демпфирования по обеим формам колебаний рассматриваемой системы ($\delta_2 = \delta_1$). Исходя из указанного условия может быть найдено оптимальное значение настройки гасителя при заданной величине коэффициента γ_2 [4]. Отметим, что для заданного значения настройки s величина коэффициента неупругого сопротивления гасителя, при которой достигается выполнение условия $\delta_2 = \delta_1$, с увеличением сил сопротивления в главном звене системы возрастает (табл. 1). Аналогичной является зависимость значения настройки гасителя, при которой удовлетворяется условие равенства коэффициентов демпфирования обеих форм колебаний системы, от величины неупругого сопротивления гасителя (табл. 2).

На рис. 2 и 3 приведены графики переходных режимов движения главной массы и массы гасителя соответственно; для сравнения на рис. 2 пунктирной линией изображен график свободных колебаний массы m_1 при отсутствии гасителя. Значения настройки гасителя приняты из условия равенства коэффициентов демпфирования по обеим формам колебаний системы. Представленные кривые $y_j(\tau)$ переходных процессов показывают их существенное отличие в зависимости от величи-

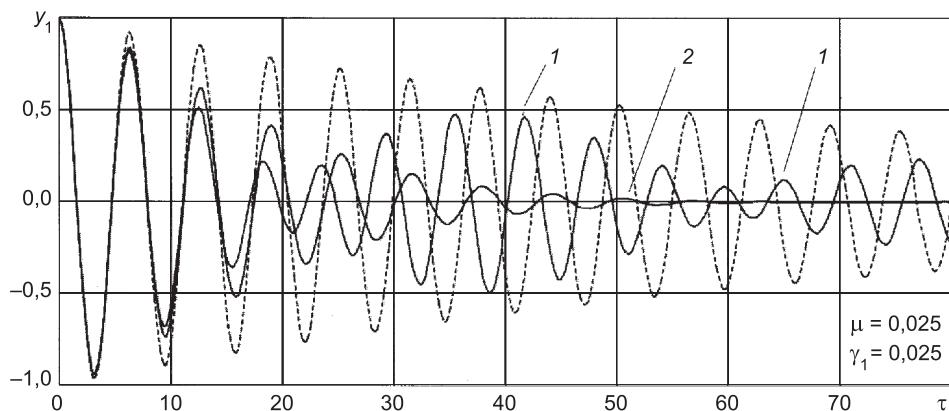


Рис. 2. Переходные процессы колебаний массы m_1 :
1 — $\gamma_2 = 0,05$; $s = 0,95009$; 2 — $\gamma_2 = 0,3$; $s = 0,98419$

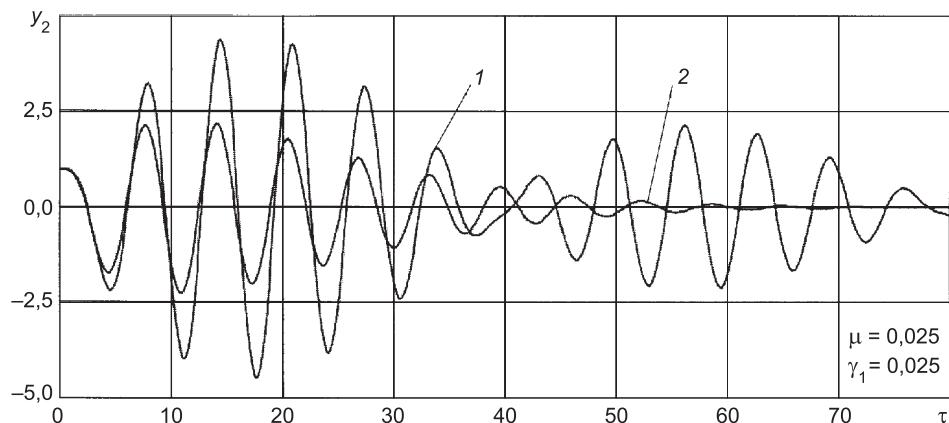


Рис. 3. Переходные процессы колебаний массы m_2 :
1 — $\gamma_2 = 0,05$; $s = 0,95009$; 2 — $\gamma_2 = 0,3$; $s = 0,98419$

ны коэффициента неупругого сопротивления в звене гасителя. При значениях γ_2 , близких к оптимальному $\gamma_{2,\text{опт}}$, свободные колебания главной массы (кривая 2 на рис. 2) затухают практически равномерно, без биений, т.е. происходят примерно так же, как свободные колебания системы с одной степенью свободы при больших значениях коэффициента неупругого сопротивления γ_1 [1]. При небольшом демпфировании в звене гасителя ($\gamma_2 \ll \gamma_{2,\text{опт}}$) колебания массы m_1 характеризуются биениями (кривая 1 на рис. 2) и на достаточно большом промежутке времени они затухают значительно медленнее. Переходные режимы движения массы m_2 свидетельствуют о том, что масса гасителя достаточно быстро и сильно раскачивается (см. рис. 3), включаясь тем самым в работу в течение одного-двух условных периодов колебаний и обеспечивая существенное повышение рассеяния энергии в звене главной массы системы, что благоприятно влияет на ее переходные процессы. Указанные особенности колебаний масс системы используются при назначении параметров гасителя в зависимости от принятого критерия качества виброзащиты [4].

В заключение отметим, что найденные в данной работе решения могут быть использованы для определения свободных колебаний системы с двумя степенями свободы как при действии мгновенных импульсов, так и при импульсах конечной длительности, а также при исследовании колебаний двухмассовых виброударных систем, в частности систем с ударным гасителем [2]. При этом в случае импульсов конечной продолжительности необходимо рассматривать два интервала движения: 1) $0 \leq t \leq t_0$, где t_0 — длительность действия импульса; 2) $t \geq 0$. Колебания масс системы в первом интервале для различных форм импульса могут быть найдены с помощью решений, приведенных в [3], а во втором интервале они определяются при начальных условиях движения масс, соответствующих моменту окончания действия импульса. Изучение колебаний виброударных систем связано с пересчетом начальных условий системы на интервалах движения, разделенных моментами соударения масс [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С.П. Тимошенко. — М. : КомКнига, 2007. — 440 с.
2. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний [Текст] / А.В. Дукарт. — М. : АСВ, 2006. — 208 с.
3. Дукарт, А.В. Об установившихся колебаниях двухмассовой системы с демпфированием при произвольной периодической возмущающей нагрузке [Текст] / А.В. Дукарт // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 3–4. — С. 3–13.
4. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. — М. : Наука, 1988. — 304 с.

ДУКАРТ А.В., д-р техн. наук, проф.

Московский государственный строительный университет
ФАМ Вьет Нгок, асп.

Московский государственный строительный университет
ФАМ Тхань Бинь, асп.

Московский государственный строительный университет

Dukart A.V., doctor of technical sciences, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Pham Viet Ngoc (Vietnam), post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Pham Thanh Binh (Vietnam), post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

TO DETERMINATION OF FREE OSCILLATIONS OF TWO-MASS SYSTEM WITH DAMPING

A linear system with two degrees of freedom and disproportionate friction is examined. Transient oscillations, caused by the initial displacements and velocities of the masses, are found in the closed form. An impact of the system parameters on damping properties and character of the motion is analyzed.

Key words: two-mass system, disproportionate friction, initial conditions, free oscillations.

REFERENCES

1. Timoshenko, S.P. Vibrations in engineering [Text] / S.P. Timoshenko. — M. : KomKniga, 2007. — 440 p.
 2. Dukart, A.V. Problems of theory impact vibration damper [Text] / A.V. Dukart. — M. : ASV, 2006. — 208 p.
 3. Dukart, A.V. On periodic oscillations of a two-mass damped system with an arbitrary exciting force [Text] / A.V. Dukart // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 3-4. — P. 3-13.
 4. Korenev, B.G. Dinamic vibration dampers: Theory and engineering applications [Text] / B.G. Korenev, L.M. Reznikov. — M. : Nauka, 1988. — 304 p.
-

УДК 556.332.46:624.131.54

Н.З. ГОТМАН, М.З. КАЮМОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ В КАРСТУЮЩИХСЯ ГРУНТАХ

Рассмотрен способ моделирования роста полости в карстующихся грунтах с учетом процессов сводообразования, происходящих в покровной толще. Даны результаты натурных исследований, выполнено сравнение с результатами численных исследований.

Ключевые слова: карстовая полость, моделирование.

При расчете конструкций зданий на возможные карстовые деформации основными исходными данными являются размеры карстовых деформаций. Эти размеры обычно задаются геологами, или геотехниками, в виде возможного карстового провала (или просадки) под подошвой фундамента. Если рассматривать здание с развитой подземной частью, подошва которой может быть в непосредственной близости от кровли карстующихся слоев грунта, то вместо традиционно используемого в расчетах фундамента диаметра карстового провала (который прогнозируется геологами, как правило, в виде воронок у поверхности) может быть успешно использован расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах, при котором свод полости еще сохраняет устойчивость [1].

При оценке карстовой опасности основания и определения расчетных параметров карстовых деформаций (расчетного диаметра карстового провала, размеров критической полости в карстующихся грунтах) наиболее достоверный метод исследований — физическое моделирование роста карстовой полости на эквивалентных материалах на плоском стенде [2]. Однако в связи с высокой трудоемкостью физического моделирования, а также при необходимости учета различных факторов, влияющих на карстовый процесс (деформационно-прочностные характеристики основания, нагрузки от здания, его заглубление и т.д.), наиболее целесообразным, а часто и единственным методом исследования является численное моделирование на основе построения математической модели карстового процесса. В связи с тем, что карстовый процесс сопровождается явлениями разупрочнения, разрывов и вывалообразования, т. е. нарушением сплошности грунта покровной толщи, его математическое описание возможно с применением специальных процедур и ограничений.

На основе анализа научной литературы по механизму карстообразования, а также результатов физических экспериментов данного процесса [2, 3] были сделаны следующие выводы, положенные в основу процедуры численного моделирования:

— образование свода в кровле полости начинается с локальной потери устойчивости на краях и в центре кровли;

— локальная потеря устойчивости не всегда ведет к общей потере устойчивости всей покровной толщи, такие области необходимо исключать из расчета;

— покровная толща не сразу теряет устойчивость — сначала образуется несколько сводов равновесия над полостью, и только потом вся толща теряет устойчивость;

— в процессе роста полости и образования свода равновесия неизбежно возникают области с необратимыми сдвигами и разрывами грунта.

На основе сделанных выводов была создана процедура моделирования роста карстовой полости численным способом. Для математического моделирования необходимо:

1. В качестве разбиения на конечные элементы использовать изменяемую (деформируемую) конечно-элементную сетку. Применение такой сетки значительно усложняет процесс расчета, но позволяет на каждой итерационной процедуре учсть изменение геометрических размеров конечно-элементной модели, особенно над карстовой полостью, и избежать больших погрешностей при расчете, возникающих при недеформируемой конечно-элементной сетке. Это особенно важно при поэтапном расчете роста карстовой полости.

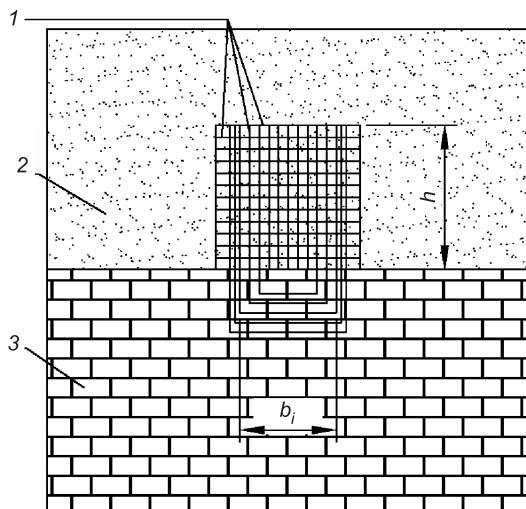


Рис. 1. Общий вид модели для численных исследований

1 — контактные элементы; 2 — покровная толща; 3 — гипсы

2. Использовать в кровле полости контактные элементы (контактные поверхности), которые допускают как сдвиг нагруженных областей грунта относительно друг друга, так и отрыв. Так как заранее не известно, по каким поверхностям будет происходить сдвиг грунта, то кровлю полости необходимо разбить контактными поверхностями на мелкие элементы с регулярным шагом (рис. 1).

3. Размер области покровной толщи, где следует вводить контактные поверхности, определяется по формуле Протодьяконова:

$$h = b / 2f, \quad f = \operatorname{tg}\varphi + c / (\gamma H),$$

где h — высота полости;

b — ширина полости;

f — коэффициент крепости покрывающих глинистых пород по М.М. Протодьяконову;

c — удельное сцепление покрывающих глинистых пород, кПа;

γ — их удельный вес, кН/м³;

φ — угол внутреннего трения покрывающих глинистых пород, град.;

H — их мощность (глубина залегания кровли карстующихся пород), м.

В процессе роста полости область с контактными поверхностями может корректироваться (в зависимости от размеров полости).

4. Всегда должно выполняться условие равновесия системы.

5. Процесс роста полости следует производить до первого вывала с образованием устойчивого свода равновесия. Свод равновесия образуется исключением зон грунта с локальной потерей несущей способности. Дальнейший рост размеров карстовой полости не имеет смысла, так как данный процесс сопровождается вывалообразованием и разрушением

(потерей несущей способности, нарушением сплошности) грунта кровли полости, для которого точного математического решения в настоящее время не существует.

Обоснование возможности математического моделирования карстового процесса с учетом принятых ограничений выполнено путем сравнения результатов физического и численного моделирования.

В качестве физического эксперимента был взят эксперимент с моделированием роста карстовой полости на плоском стенде на эквивалентных материалах, проведенный Ш.Р. Незамутдиновым в институте БашНИИстрой. Сущность способа моделирования на эквивалентных материалах заключается в том, что модель толщи пород изготавливается из некоторых природных или искусственных материалов с соблюдением подобия сил тяжести и геометрического подобия модели и натуры. При этом материалы модели подбираются с такими физико-механическими свойствами, которые находятся в необходимых масштабированных соотношениях со свойствами горных пород натуры. Лоток представляет собой жесткий металлический каркас коробчатого типа размерами $1,7 \times 2,4$ м (рис. 2). Лицевая стенка стенда прозрачная. Днище лотка выполнено наборным из деревянных брусков. Имитация карстовой полости определенной ширины производилась путем извлечения соответствующего числа брусков днища.

В эксперименте моделировался рост карстовой полости в карстующихся грунтах с покровной толщиной из глинистых грунтов. Рост полости разделен на четыре этапа: I этап — диаметр полости равен 12 см; II — диаметр равен 16,5 см; III — 20 см; IV — 22 см. Для моделирования глины использовалась смесь песка, увлажненная мыльным раствором. Смесь обладала следующими физико-механическими характеристиками: удельное сцепление $c = 3$ кН/м²; угол внутреннего трения $\phi = 16^\circ$.

В эксперименте исследовалось распределение осадок по глубине над центром полости в зависимости от диаметра полости в карстующихся грунтах. Для измерения перемещений использовались индикаторы часового типа. Индикаторы размещались по вертикали над центром полости. На рис. 3 представлены результаты эксперимента.

Данный эксперимент был повторен численным методом в программном комплексе Plaxis 2D. Размер модели, физико-механические характеристики грунта, диаметры карстовых полостей на различных этапах расчета брались такими же, как и в лотковом эксперименте. В качестве модели основания использовалась модель упрочняющегося грунта. Использование этой модели по сравнению с широко распространенной моделью Кулона-Мора позволяет более точно учесть поведение грунта при изменении НДС массива грунта после образования карстовой полости. Достоинствами модели упрочняющегося грунта перед моделью Кулона-Мора являются:

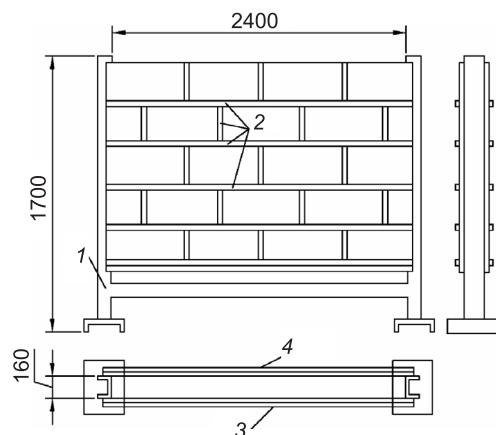


Рис. 2. Схема плоского стенда

1 — швеллер; 2 — уголки жесткости; 3 — оргстекло; 4 — доски

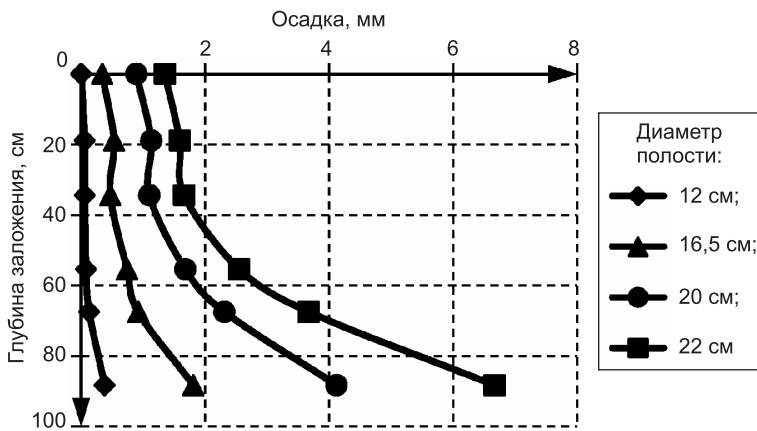


Рис. 3. Результаты физических экспериментов

- зависимость модуля деформации грунта от напряженного состояния (упрочнение при увеличении напряжений);
- близкие к реальным значения перемещений от выпора грунта при больших откопках, что актуально при больших заглублениях (более 5 м);
- учет траектории нагружения.

Моделирование роста полости выполнялось в соответствии с вышеописанной процедурой.

В численном эксперименте по аналогии с физическим исследовалось распределение осадок по глубине над центром полости в зависимости от диаметра полости в карстующихся грунтах. Результаты, полученные на математической модели, сравнивались с результатами физического моделирования (рис. 3). На рис. 4 показано сравнение результатов физиче-

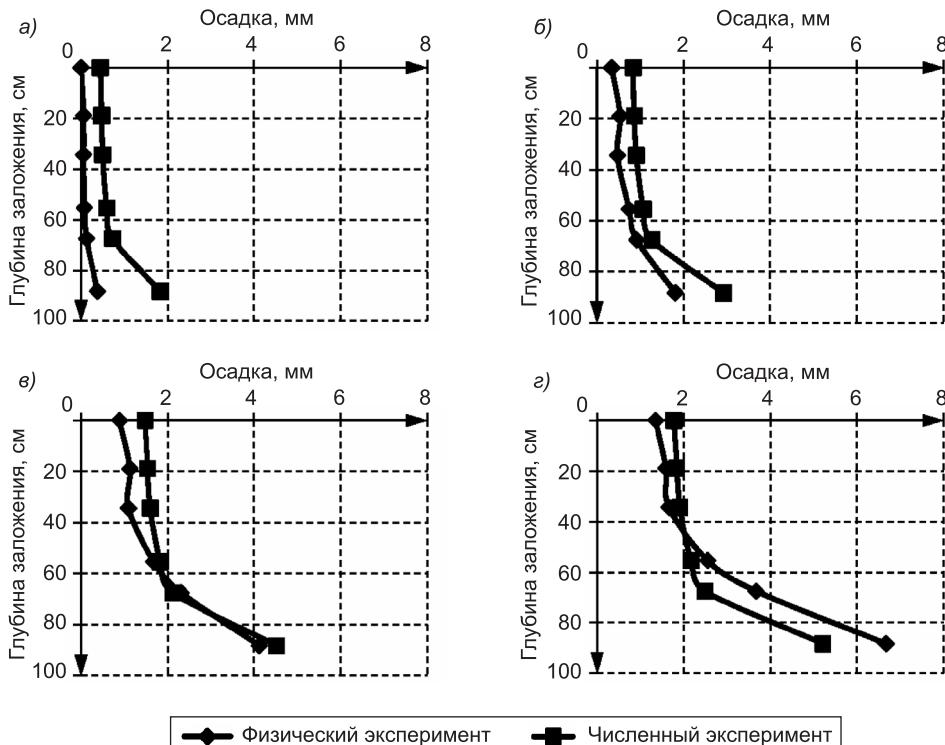


Рис. 4. Сравнение результатов физического и численного моделирования

Диаметр полости: а — 12 см; б — 16,5 см; в — 20 см; г — 22 см

ского моделирования с результатами численного моделирования в Plaxis 2D для диаметра полости от 12 до 22 см.

Как показало сравнение, при использовании разработанной процедуры для численного моделирования роста полости характер распределения осадок и их величина получаются практически такими же, как и при физическом моделировании на эквивалентных материалах. Некоторое расхождение результатов можно объяснить тем, что в физическом эксперименте не уделялось внимание деформационным характеристикам грунта (модуль деформации), так как целью эксперимента являлось не определение абсолютных значений перемещений, а выявление характера взаимного перемещения различных точек грунта. В целом полученные результаты позволяют рекомендовать данную методику для моделирования процессов, происходящих в грунтах при росте карстовой полости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Готман, Н.З. Расчет фундаментов зданий с заглубленной подземной частью на закарстованных территориях [Текст] / Н.З. Готман, М.З. Каюмов // Вест. гражданских инженеров. — 2010. — № 4.
2. Толмачев, В.В. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий [Текст] / В.В. Толмачев, Г.М. Троицкий, В.П. Хоменко. — М. : Стройиздат, 1986.
3. Толмачев, В.В. Механизм деформации горных пород над подземными карстовыми формами [Текст] / В.В. Толмачев, Е.Г. Карпов, В.П. Хоменко, В.И. Мартин, Р.Б. Давыдько // Инженерная геология. — 1982. — № 4.

ГОТМАН Н.З., д-р техн. наук, проф.; E-mail: LSF_PS@mail.ru
Уфимский государственный нефтяной технический университет
КАЮМОВ М.З., асп.; E-mail: LSF_PS@mail.ru
Уфимский государственный нефтяной технический университет

Получено 02.03.11

Gotman N.Z., doctor of technical sciences, professor; E-mail: LSF_PS@mail.ru, Ufa State Petroleum Technological University, Russia

Kayumov M.Z., post-graduate student; E-mail: LSF_PS@mail.ru, Ufa State Petroleum Technological University, Russia

NUMERICAL MODELING OF THE KARST CAVITY GROWTH IN KARSTING SOILS

The paper presents the way of modeling of cavity growth in karsting soils considering the processes of arching in the covering strata. Results of site investigations are given; the comparison with the results of the numerical investigations is carried out.

Key words: karst cavity, modeling.

REFERENCES

1. Gotman, N.Z. Calculation of building foundations with a deep underground part in karsted territories [Text] / N.Z. Gotman, M.Z. Kayumov // Bulletin of civil engineers. — 2010. — N 4.
2. Tolmachev, V.V. Engineering-design development of the karsted territories [Text] / V.V. Tolmachev, G.M. Troitsky, V.P. Khomenko. — M. : Stroyizdat, 1986.
3. Tolmachev, V.V. Mechanism of rocks deformation above the underground karst forms [Text] / V.V. Tolmachev, E.G. Karpov, V.P. Khomenko, V.I. Martin, R.B. Davydko // Engineering Geology. — 1982. — N 4.

УДК 624.131

К.В. КОРОЛЕВ

НАЧАЛЬНАЯ НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МЕДЛЕННО УПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА

Приводится методика расчета несущей способности медленно уплотняющегося водонасыщенного основания фундамента в условиях плоской деформации. В основе методики лежат решения теории мгновенной прочности грунтов Соловьева–Строганова.

Ключевые слова: основание, водонасыщение, расчет, консолидирующие грунты.

Согласно СНиП 2.02.01-83* [1] несущая способность основания, сложенного медленно уплотняющимися водонасыщенными глинистыми грунтами, должна определяться с учетом избыточного порового давления u . При этом предельное сопротивление консолидирующегося грунта сдвигу принимается по формуле К. Терцаги:

$$\tau_n = (\sigma_n - u) \operatorname{tg}\varphi + c, \quad (1)$$

где τ_n и σ_n — предельное касательное и полное нормальное напряжения по площадке сдвига;

$(\sigma_n - u)$ — эффективное нормальное напряжение;

φ и c — консолидированно-дренированные параметры прочности грунта: угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Далее в нормах [1] дается выражение для вертикальной составляющей предельного давления ленточного фундамента на основание. В случае, когда действует только вертикальная внешняя нагрузка, это выражение представляет собой известную формулу Прандтля для определения предельного давления на идеально связное основание ($\varphi = 0, c \neq 0, \gamma \neq 0$):

$$p_u = q + (2 + \pi)c,$$

где q — величина боковой пригрузки, равная γd (γ — удельный вес грунта, d — глубина заложения фундамента);

c — то же, что и в формуле (1).

Методика СНиП, таким образом, предполагает, что при нагружении до предельного состояния водонасыщенный грунт не обладает внутренним трением и его прочность характеризуется одним параметром — удельным сцеплением. Это является следствием гипотезы о том, что в момент нагружения внешнее давление полностью передается на воду, т.е. $\sigma_n = u$, а само нагружение происходит теоретически мгновенно и перераспределение напряжений между скелетом и поровой водой не успевает произойти.

С точки зрения фактической работы консолидирующихся оснований и при соблюдении указанных условий отсутствие внутреннего трения является в принципе приемлемым допущением. Несколько более спорной выглядит ситуация, когда прочность основания всюду характеризуется одним неизменным параметром — удельным сцеплением, определенным при консолидированно-дренированном сдвиге.

© Королев К.В., 2011

Последнее положение ($\tau_n = c$) формально не противоречит формуле (1) К. Терцаги. Однако при этом не учитывается, что к моменту нагружения в различных точках массива водонасыщенный грунт имеет различную степень уплотнения (например, в результате консолидации от приложенных ранее нагрузок или даже без внешних нагрузок, а только от собственного веса грунта) и, как следствие, неодинаковую прочность.

Изложенный выше подход, по существу, является простейшим решением теории предельного равновесия консолидирующихся грунтов, или теории мгновенной прочности (ТМП). Основы расчета несущей способности консолидирующихся оснований были заложены А.С. Строгановым, рассмотревшим несколько отдельных важных задач [2], и Ю.И. Соловьевым, давшим законченную математическую формулировку ТМП [3].

Итак, совершенствование нормативного метода расчета несущей способности водонасыщенных оснований будем осуществлять в рамках ТМП. Поскольку на настоящий момент существует не так много публикаций по ТМП, кратко опишем ее основные положения.

Рассматривается явление мгновенного догружения грунта до предельного состояния. Так же, как и в теории фильтрационной консолидации, принимается, что при мгновенном нагружении консолидирующегося грунта полное среднее напряжение $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ распределяется между скелетом грунта и поровой водой:

$$\beta = \frac{u}{\sigma}, \quad \sigma = \sigma_{ef} + u. \quad (2)$$

Здесь β — коэффициент порового давления;

$\sigma_{ef} = (\sigma_{1ef} + \sigma_{3ef})/2$ — среднее эффективное напряжение.

Согласно принципу эффективных напряжений (1) условие предельного равновесия Кулона–Мора определяется выражением

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_{1ef} + \sigma_{3ef} + 2c \cdot \operatorname{ctg}\phi) \sin\phi,$$

где σ_{1ef} и σ_{3ef} — эффективные главные напряжения в момент разрушения грунта.

Подчеркнем, что к моменту догружения эффективные напряжения в основании уже существуют (например, бытовые напряжения), и в процессе догружения грунтовой массы они получат приращения до значений σ_{1ef} и σ_{3ef} .

Обозначим индексом «*» напряженное, предположим, стабилизированное состояние консолидирующегося грунта, достигнутое к моменту приложения предельной нагрузки: поровое давление $u^* = 0$ и среднее эффективное напряжение σ_{ef}^* . Тогда при мгновенном догружении условие прочности консолидирующегося грунта определится формулой

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = (\sigma_{ef}^* + \Delta\sigma_{ef}) \sin\phi + c \cos\phi,$$

где $\Delta\sigma_{ef}$ — приращение среднего эффективного напряжения при догружении.

В полных напряжениях с учетом (2) это условие примет вид

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = [(1-\beta)\sigma + \beta\sigma_{ef}^*] \sin\phi + c \cos\phi$$

или

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\rho + 2k \cos\rho, \quad (3)$$

где ρ и k — параметры мгновенной прочности консолидирующегося грунта:

$$\sin \rho = (1 - \beta) \sin \varphi, \quad k = \frac{1}{\cos \rho} (\beta \sigma_{ef}^* \sin \varphi + c \cos \varphi).$$

Условие прочности (3) позволяет сформулировать плоскую задачу ТМП в полных напряжениях в декартовой системе координат xOz :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= X, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = Z, \\ \sigma_1 - \sigma_3 &= (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \rho + 2k \cos \rho. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь X и Z — проекции массовой силы на координатные оси.

Компоненты тензора полных предельных напряжений даются формулами

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x \\ \sigma_z \end{aligned} \right\} = (\sigma + k \cdot \operatorname{ctg} \rho) (1 \mp \sin \rho \cos 2\alpha) - k \cdot \operatorname{ctg} \rho,$$

$$\tau_{xz} = (\sigma + k \cdot \operatorname{ctg} \rho) \sin \rho \sin 2\alpha,$$

где α — угол между первым главным напряжением σ_1 и осью Oz .

Система канонических уравнений ТМП имеет вид [1, 4]

$$\begin{aligned} dx &= dz \cdot \operatorname{tg}(\alpha \pm \mu), \quad \mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}, \\ d(\sigma + k \cdot \operatorname{ctg} \rho) \pm 2(\sigma + k \cdot \operatorname{ctg} \rho) \cdot \operatorname{tg} \rho \cdot d\alpha &= \\ = \left(X + \frac{\partial k}{\partial x} \operatorname{ctg} \rho \right) (dx \pm dz \cdot \operatorname{tg} \rho) + \left(Z + \frac{\partial k}{\partial z} \operatorname{ctg} \rho \right) (dz \mp dx \cdot \operatorname{tg} \rho). \end{aligned} \quad (5)$$

Производные $\frac{\partial k}{\partial x}$ и $\frac{\partial k}{\partial z}$ определяются выражениями

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{\partial \sigma_{ef}^*}{\partial x}, \quad \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{\partial \sigma_{ef}^*}{\partial z}. \quad (6)$$

Система (5) принадлежит к гиперболическому типу и имеет два семейства действительных характеристик, совпадающих с линиями скольжения. Верхние знаки в уравнениях (5) отвечают характеристикам 1-го семейства, нижние — 2-го семейства.

Перейдем к основной в данной статье задаче о предельном давлении ленточного фундамента на медленно уплотняющееся водонасыщенное основание, догружаемое из достигнутого ранее стабилизированного состояния. Решение получается численным интегрированием канонической системы уравнений (5) по характеристикам в рамках известной последовательности краевых задач, описанной, например, в [4].

В отношении прочности консолидирующегося основания примем наиболее неблагоприятный случай, когда коэффициент порового давления равен единице $\beta = 1$, а достигнутый уровень эффективного напряженного состояния определен гидростатическими бытовыми напряжениями в грунте $\sigma_{ef}^* = \gamma z$. При таких условиях получим наименьшее значение несущей способности консолидирующегося основания.

Отдельные строгие и приближенные решения этой задачи для ряда граничных условий были даны А.С. Строгановым [2] и Ю.И. Соловьевым

[3]. В настоящей работе эти исследования дополнены расчетами для всего диапазона исходных данных, представляющего практический интерес.

Задача решалась в относительных переменных: γ — единица массовой силы, b — единица длины. Исходными параметрами задачи являлись относительные величины $q' = q/(\gamma b)$ и $c' = c/(\gamma b)$.

Пример сетки линий скольжения в консолидирующемся основании представлен на рис. 1. Порядок решения данной задачи впервые был изложен в работе Ю.И. Соловьева [3]. От известного решения В.В. Соколовского данную схему отличает наличие касательных напряжений по

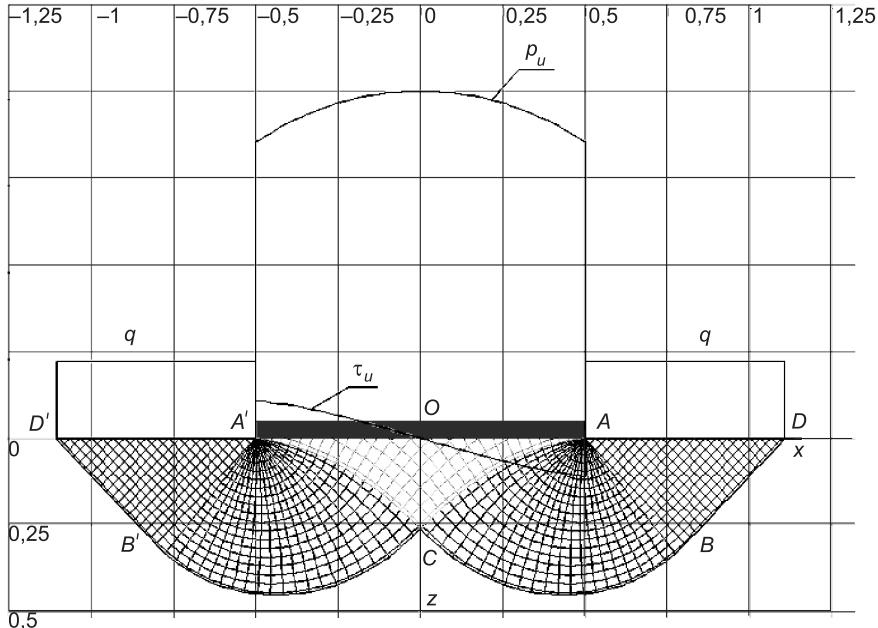


Рис. 1. Пример сетки линий скольжения в консолидирующемся основании
($\phi = 30^\circ$, $c = 0$, $q = 1$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$, $b = 1$)

подошве штампа, получаемых в ходе решения [4]. Результаты численного решения показали, что относительная величина средней предельной нагрузки ленточного фундамента на консолидирующееся основание $p'_u = p_u/(\gamma b)$ может быть представлена функцией от параметров q' и c' :

$$p'_u = N_{\gamma c} + q' N_{qc} + c' N_{cc}, \quad (7)$$

где $N_{\gamma c}$, N_{qc} , N_{cc} — коэффициенты несущей способности консолидирующегося основания.

Выполненные расчеты показали, что уравнение (7) для фиксированного значения угла внутреннего трения ϕ является уравнением поверхности небольшой кривизны $p'_u = f(q', c')$. Следовательно, коэффициенты несущей способности — функции не только угла внутреннего трения ϕ , но также и параметров q' и c' . Для примера на рис. 2 представлены зависимости $N_{\gamma c}(q', c')$ при $c' = 0$ и $N_{\gamma c}(q', c')$ при $q' = 0$. На рис. 3 даны графики $N_{qc}(q')$ при $c' = 0$ и графики $N_{cc}(c')$ при $q' = 0$.

Вместе с тем анализ выполненных расчетов показал, что для практического использования уравнение (7) можно аппроксимировать плоскостью. Тогда коэффициенты несущей способности $N_{\gamma c}$, N_{qc} , N_{cc} следует

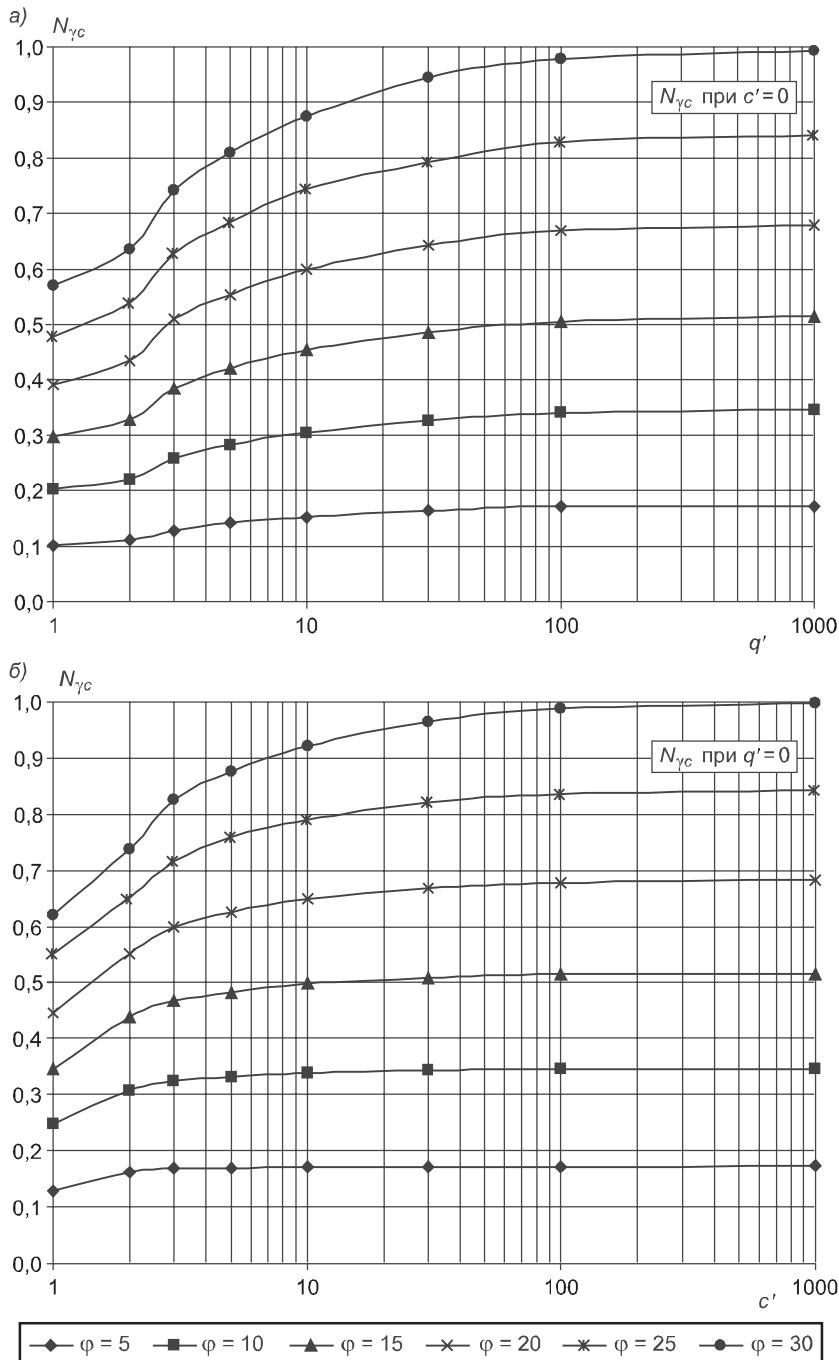


Рис. 2. Зависимости коэффициента несущей способности $N_{\gamma c}$ от относительной пригрузки q' при $c' = 0$ (а) и относительного сцепления c' при $q' = 0$ (б)

рассматривать только как функции угла внутреннего трения ϕ . Значения коэффициентов даны в таблице.

Обращает на себя внимание тот факт, что коэффициент N_{cc} уменьшается с ростом угла внутреннего трения. Это вытекает непосредственно из анализа выражения (7) для невесомой среды ($\gamma = 0$) и отсутствия пригрузки ($q = 0$):

$$p'_u = c' N_{cc} .$$

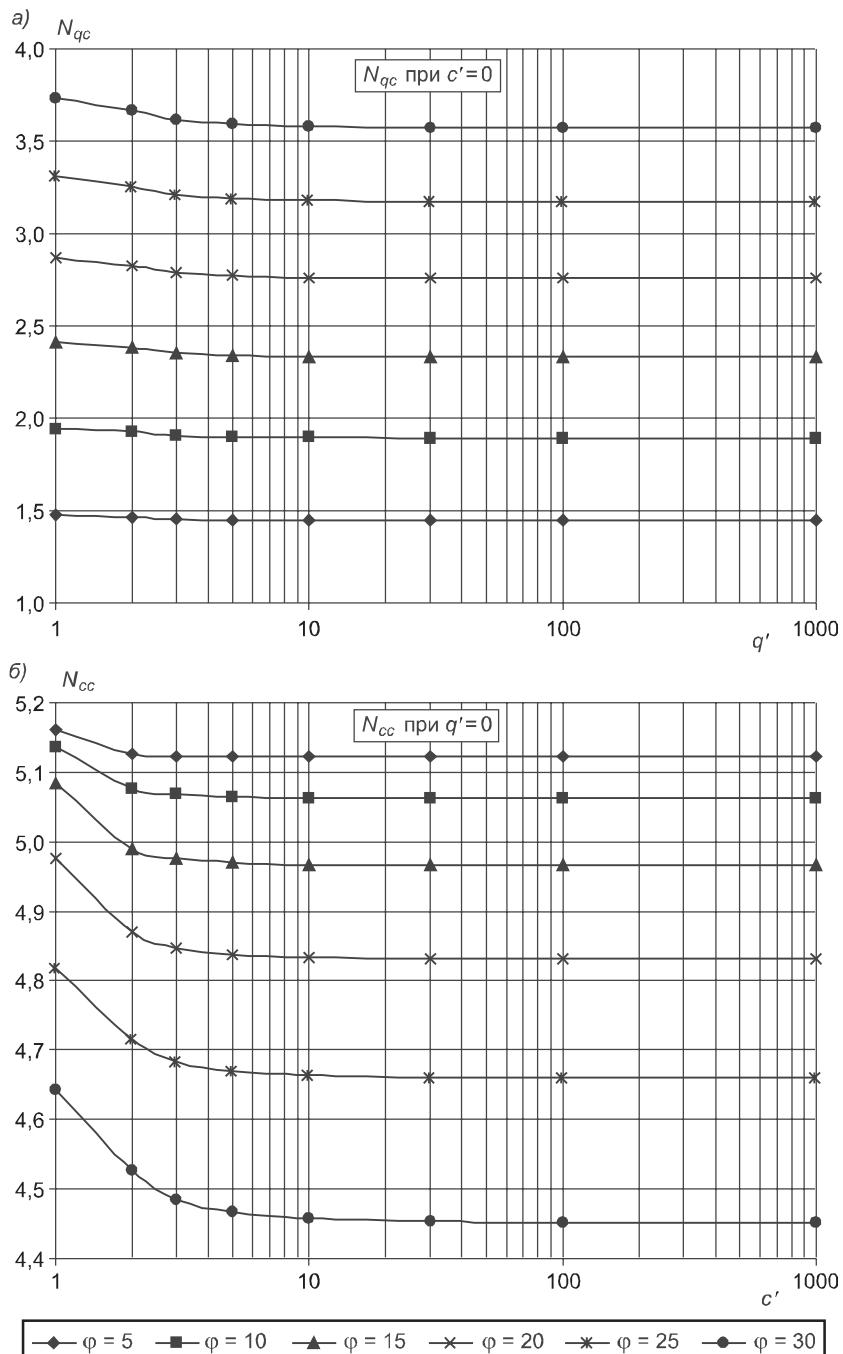


Рис. 3. Зависимости коэффициентов несущей способности $N_{qc}(q')$ (а) и $N_{cc}(c')$ (б)

Тогда параметры мгновенной прочности уравнения (3) примут вид ($\beta = 1$, $\sigma_{ef}^* = \gamma z = 0$):

$$\sin \rho = (1 - 1) \sin \varphi = 0,$$

$$k = \frac{1}{\cos 0} (1 \cdot 0 \cdot \sin \varphi + c \cos \varphi) = c \cos \varphi.$$

Коэффициенты несущей способности консолидирующегося основания

φ , град	$N_{\gamma c}$	N_{qc}	N_{cc}
5	0,1150	1,4485	5,1220
10	0,2290	1,8932	5,0635
15	0,3425	2,3309	4,9664
20	0,4530	2,7590	4,8315
25	0,5605	3,1733	4,6599
30	0,6625	3,5713	4,4528

а также табличными значениями коэффициентов (см. таблицу) или графиками на рис. 2 и 3, можно устанавливать начальную несущую способность консолидирующегося основания ленточного фундамента.

Начальная несущая способность, подчеркнем, будет иметь место при быстрым (теоретически мгновенном) нагружении полностью водонасыщенного основания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.02.01–83*. Основания зданий и сооружений [Текст] / М. : Госстрой, 1995.
2. Стrogанов, А.С. Несущая способность глинистого водонасыщенного основания в нестабилизированном состоянии под круглым фундаментом [Текст] / А.С. Стrogанов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1977. — № 5. — С. 40–41.
3. Соловьев, Ю.И. Жестко- и упругопластический анализ устойчивости и напряженно-деформированного состояния грунтов : Автoref. дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / Ю.И. Соловьев. — М., 1989. — 42 с.
4. Королев, К.В. Плоская задача теории предельного равновесия грунтов [Текст] / К.В. Королев. — Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. — 251 с.

КОРОЛЕВ К.В., канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 21.04.11

Korolev K.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

BEGINNING BEARING CAPACITY OF SLOWLY COMPRESSED SATURATED BASES OF TAPING FOUNDATION

The design procedure of bearing capacity of slowly condensing water-saturated subfoun-dation in conditions of plane deformation is resulted. In a basis of a technique decisions of the theory of instant durability soils Soloviev–Stroganov.

Key words: basis, saturated, design, consolidated soils.

REFERENCES

1. SNiP 2.02.01–83*. Bases of buildings and constructions [Text]. — M. : Gosstroy, 1995.
2. Stroganov, A.S. Bearing capacity of the water-saturated soils in not stabilized condition under the round foundation [Text] / A.S. Stroganov // Bases, foundation and soils mechanics. — 1977. — N 5. — P. 40–41.
3. Soloviev, Yu.I. Plastic and elastic-plastic the analisis of stability and it is stress-deformed conditions of soils : Autoref. dis. ... doctor techn. Sciences [Text] / Yu.I. Soloviev. — M., 1989. — 42 p.
4. Korolev, K.V. Plane strain theory of limit equi lib ruium of soils [Text] / K.V. Korolev. — Novosibirsk : SGUPS, 2010. — 251 p.

Единственный в этом случае параметр прочности k уменьшается с увеличением угла внутреннего трения φ .

Итак, абсолютная величина средней предельной нагрузки на консолидирующееся основание может быть вычислена по формуле стандартного вида:

$$p_{uc} = \gamma_{sb} b N_{\gamma c} + q N_{qc} + c N_{cc}. \quad (8)$$

Пользуясь формулой (8),

а также табличными значениями коэффициентов (см. таблицу) или графиками на рис. 2 и 3, можно устанавливать начальную несущую способность консолидирующегося основания ленточного фундамента.

Начальная несущая способность, подчеркнем, будет иметь место при быстрым (теоретически мгновенном) нагружении полностью водонасыщенного основания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.02.01–83*. Основания зданий и сооружений [Текст] / М. : Госстрой, 1995.
2. Стrogанов, А.С. Несущая способность глинистого водонасыщенного основания в нестабилизированном состоянии под круглым фундаментом [Текст] / А.С. Стrogанов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1977. — № 5. — С. 40–41.
3. Соловьев, Ю.И. Жестко- и упругопластический анализ устойчивости и напряженно-деформированного состояния грунтов : Автoref. дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / Ю.И. Соловьев. — М., 1989. — 42 с.
4. Королев, К.В. Плоская задача теории предельного равновесия грунтов [Текст] / К.В. Королев. — Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. — 251 с.

КОРОЛЕВ К.В., канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 21.04.11

Korolev K.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

BEGINNING BEARING CAPACITY OF SLOWLY COMPRESSED SATURATED BASES OF TAPING FOUNDATION

The design procedure of bearing capacity of slowly condensing water-saturated subfoun-dation in conditions of plane deformation is resulted. In a basis of a technique decisions of the theory of instant durability soils Soloviev–Stroganov.

Key words: basis, saturated, design, consolidated soils.

REFERENCES

1. SNiP 2.02.01–83*. Bases of buildings and constructions [Text]. — M. : Gosstroy, 1995.
2. Stroganov, A.S. Bearing capacity of the water-saturated soils in not stabilized condition under the round foundation [Text] / A.S. Stroganov // Bases, foundation and soils mechanics. — 1977. — N 5. — P. 40–41.
3. Soloviev, Yu.I. Plastic and elastic-plastic the analisis of stability and it is stress-deformed conditions of soils : Autoref. dis. ... doctor techn. Sciences [Text] / Yu.I. Soloviev. — M., 1989. — 42 p.
4. Korolev, K.V. Plane strain theory of limit equi lib ruium of soils [Text] / K.V. Korolev. — Novosibirsk : SGUPS, 2010. — 251 p.

УДК 691:53.022.612

А.Н. ХАРХАРДИН

СТРУКТУРНАЯ ТОПОЛОГИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ

Приводится методика анализа уравнений для потенциалов и сил электростатического взаимодействия микро- и наночастиц в дисперсных минеральных системах, макромолекул в полимерах и метод получения параметров их топологического состояния.

Ключевые слова: дисперсные материалы, микро- и наночастицы, потенциалы межмолекулярного взаимодействия.

Механические, ультразвуковые и другие способы сухого измельчения минерального сырья для производства безобжиговых вяжущих (克莱ящих) веществ и геоматериалов на их основе приводят к следующим результатам и топологическим состояниям дисперсных систем.

С уменьшением размера частиц возрастает электростатический заряд на их поверхности. В связи с этим увеличиваются силы взаимодействия частиц, в большей степени дальнодействующие силы отталкивания между ними. Распределение электростатического заряда на поверхности частиц приобретает сферическую форму. Твердая дисперсная фаза становится все более рыхлой. Насыпная плотность и плотность упаковки частиц при этом уменьшаются. Далее наступает состояние предельного сухого механического измельчения частиц, когда близкодействующие силы притяжения частиц становятся равными или превосходят силу их гравитационного оседания. При этом происходит объединение частиц до сферических агрегаций различного размера, средняя плотность упаковки частиц в дисперсной системе становится равной первой критической ($\eta_{1c} \approx 0,2549$). Механическая энергия измельчения в большей степени идет на разрушение агрегаций и измельчение частиц крупных размеров.

Взаимодействие частиц наступает, если $\eta_{1c} \leq \eta_1^3$, где $\eta_1 \leq 0,64029$ — плотность упаковки зерен монодисперсной фракции измельчаемого сырья, а пределом сухого механического измельчения является $\eta_{1c} = \eta_1^{10/3}$, следовательно,

$$\eta_{1c} \leq (0,64029...0,63096)^{3...10/3} \leq 0,2625...0,22625...0,2154,$$

где $0,630957^5 = 0,1$.

Структурная топология допускает близкие к этим величинам значения [1]:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 0,62634...0,61875, \text{ тогда } \eta_{1c} = (0,62634...0,61875)^{10/3...5} = \\ &= 0,2102...0,2018 - 0,09. \end{aligned}$$

Для сухого тонкого измельчения зернистых материалов обычно используют кольцевые шаровые и ролико-маятниковые мельницы, а для сверхтонкого измельчения — вибрационные и струйные мельницы. Сте-

пень измельчения в них $i = d_1/d_2 \approx 100 - 10$, соответственно для зерен исходного сырья $d_1 = 2$ мм и $d_2 = 0,1$ мм, где d_1 и d_2 — средний размер частиц до и после измельчения.

Мокрый способ помола материалов в шаровых и коллоидных мельницах позволяет увеличить степень измельчения в несколько раз ($i \leq 10$) вплоть до коллоидного состояния дисперсной системы ($d_2 \approx 10\ldots100$ нм), в которой происходит:

- частичное экранирование заряда на поверхности частиц дипольными молекулами дисперсионной среды с образованием двойного электрического слоя;

- разъединение частиц в результате определенной протяженности его диффузионной части с одноименным зарядом, что приводит к их взаимному отталкиванию, ослабление тенденции частиц дисперсной фазы к коагуляции и сохранение ее высокой дисперсности;

- частичное проникновение в слабощелочных средах при высокой концентрации твердой фазы противоиона (катиона) в диффузионный слой и снижение его толщины вследствие компенсации заряда ядра, что приводит к снижению агрегативной устойчивости системы. Для снижения коагуляции частиц в такие системы вводят поверхностно-активные вещества, изменяющие природу поверхности частиц и поверхностное напряжение на границе раздела фаз, стабилизаторы, пластифицирующие и другие добавки;

- растворение в слабощелочных средах микро- и наночастиц измельчаемого силикатного и алюмосиликатного сырья до мономерных и олигомерных кремниевых кислот, их солей и алюминатов с образованием силикогелей, алюмогелей и золей, а при удалении дисперсионной среды — к образованию коагуляционных и коагуляционно-конденсационных структур.

Мокрый способ сверхтонкого измельчения позволяет получить высокодисперсную твердую фазу с плотностью упаковки монодисперсных частиц в переводе на сухой порошок (пыль) ($\eta_{2c} \leq 0,1$).

Прочность твердых золь-гель силикатных и алюмосиликатных продуктов остается меньше прочности силикатного и обычного стекла ($R_{ck} \approx 2000$ МПа). Помимо хрупкости основными недостатками твердых силикогелей и алюмогелей являются низкая щелочестойкость, водостойкость и повышенная сорбция. При соответствующем улучшении этих свойств такие безобжиговые минеральные kleевые связующие и композиты на их основе могут быть использованы для получения материалов и изделий специального строительного назначения.

Покажем, что приведенные выше топологические показатели свойств твердой дисперсной фазы сухого и мокрого способов измельчения материалов вытекают из общей закономерности структурной топологии зернистых и дисперсных систем [1]:

$$d_n/d_1 = \left[\frac{1}{10\eta_1(\sqrt{3}-1)^p} \right]^{\frac{m(n-1)}{3}}, \quad (1)$$

где $m/3 = (3\ldots15)/3$.

Из этого выражения при $d_n = d_1$, где d_n — средний размер частиц мелких фракций, $m = 3$ и $n = 2$, для одиночных монодисперсных фракций получим ряд критических плотностей упаковки частиц, в том числе и теоретическую плотность ($p = 6$) случайной (произвольной) упаковки одинаковых по размеру твердых сфер (шаров):

$$\eta_{pc} = \frac{1}{10(\sqrt{3}-1)^p}, \quad (2)$$

где p — показатель изменения расстояния между геометрическими центрами двух смежных монодисперсных частиц (сфер), $p < 6$ — разъединение частиц;

$p > 6$ — сближение центров частиц (сфер) с их перекрыванием.

Результаты расчета η_{pc} в зависимости от величины p приведены ниже.

p	0	1	2	3	4	5	6
η_{pc}	0,1	0,1366	0,1866	0,2549	0,3482	0,4757	0,64976

Структурная топология дисперсных систем дает следующие результаты η_{pc} :

$$\eta_c = \eta_l^m, \quad m = (3\dots16)/3, \quad (3)$$

где $m = 1\dots3$ — для невзаимодействующих частиц при $0,60377 \leq \eta_l \leq 0,6403$, тогда $\eta = (0,60377\dots0,6403)^{2\dots3} = 0,3645\dots0,2201\dots0,40997\dots0,2625$;

$m = (10\dots15)/3$ — согласно (1) для взаимодействующих частиц в твердой дисперсной фазе при $\eta_l \leq 0,6403$, тогда $\eta = 0,6403^{(10\dots15)/3} = 0,22625\dots0,1076$;

$m = (10\dots16)/3$ — для теоретического значения $\eta_l \geq 0,64976$ и выполнения условия $\eta_{2c} \cong 0,1$, тогда $\eta_c = 0,64976^{10/3\dots16/3} = 0,2376\dots0,2058\dots0,100$.

Экспериментальные исследования Дж. Скотта [2] плотности упаковки стальных и свинцовых шариков (т.е. при наличии трения) в больших сферических бутылях при утряске и свободной засыпке показали, что

$$\eta_l = 0,64 - 0,33\sqrt[3]{N}, \quad \eta_l = 0,60 - 0,37\sqrt[3]{N},$$

где N — полное число шариков в бутыле, при $N \rightarrow \infty$ $\eta_l = 0,64$ и $\eta_l = 0,60$.

Ряд канонических значений η_l получают из минимальной величины $\eta_{2c} = 0,1$ — индекса амплитуды критической плотности упаковки частиц $C_3 = 0,1$ (см. таблицу):

$$C_3 = (0,1/k_i^n)^{1/5}, \quad (4)$$

где $k_1 = 0,634053/0,64976 = 0,9758269$, $k_2 = 0,634053/0,64029 = 0,9902597$.

Ряд промежуточных значений η_l для построения схем уровней фазотопологических состояний (ФТС) дисперсных систем со случайной упаковкой:

Значения C_3 и η_l , получаемые из выражения (4) при $k_1 = 0,9758$

n	$C_3 = \eta^5 l$	η_l	$C_3 = 0,2539 \eta^5 l$
-1	0,31623	0,626342	0,1
0	0,1	0,630957	0,101479
1	0,102477	0,634053	0,102477
2	0,105026	0,6371635	0,103485
3	0,107618	0,640289	0,104503
...
6	0,115815	0,64976	0,107618

ковкой в них частиц (рис. 1) вычисляют по рекуррентному уравнению [1] (в том числе и экспериментальную величину 0,60) либо из уравнений

$$\eta_1 = 0,6497595 \cdot 0,975827^n = 0,634053; 0,618726; \mathbf{0,6037693};$$

$$\eta_1 = 0,640289 \cdot 0,99026^{n/2} = 0,63716; 0,634053; 0,630957; 0,627877; 0,624812; \\ 0,62176; 0,618726; 0,615705; 0,61270; 0,609710; 0,60673; \mathbf{0,6037693}.$$

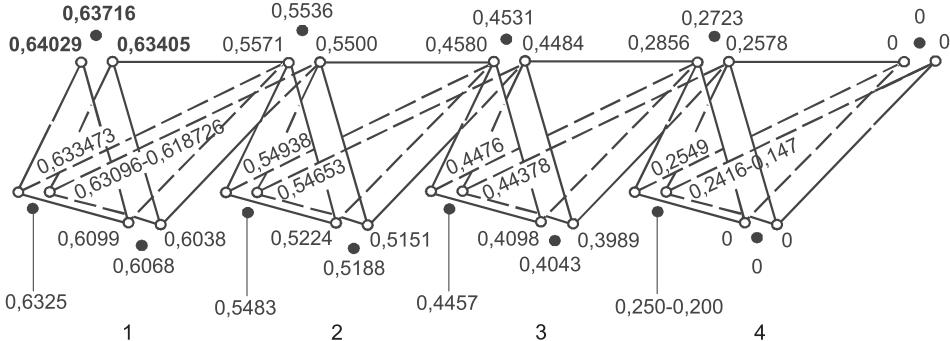


Рис. 1. Стандартная схема основных уровней ФТС неупорядоченных конденсированных (зернистых и дисперсных) систем

Схема уровней ФТС определяет следующие топологические состояния дисперсных систем: 1-й — псевдотвердое — зернистое, 2-й — псевдотвердое — дисперсное, 3-й — псеводожидкое, 4-й — критическое.

Покажем, что взаимодействие частиц в дисперсной фазе хорошо описывается потенциалом 2–4, который записывается в виде

$$\varphi = \frac{n}{m-n} \varepsilon \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^m - \frac{m}{n} \left(\frac{d_0}{r} \right)^n \right] = \varepsilon \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^4 - 2 \left(\frac{d_0}{r} \right)^2 \right], \quad (5)$$

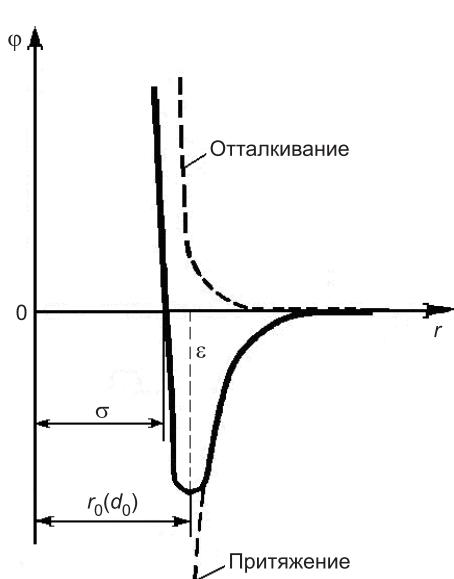


Рис. 2. Зависимости потенциальной энергии взаимодействия, притяжения и отталкивания частиц от расстояния между ними и ее параметры

где $m > n$, для потенциала 2–4 $m = 4$, $n = 2$;

d_0 — расстояние между частицами, определяющее положение минимума φ на оси абсцисс потенциальной кривой (рис. 2);

r — текущее расстояние между частицами на оси абсцисс;

ε — минимальное значение потенциальной энергии взаимодействия φ частиц на потенциальной кривой, так называемая глубина потенциальной ямы.

Наиболее часто потенциалы взаимодействия записывают через параметры ε и σ :

$$\begin{aligned} \varphi &= 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^4 - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^2 \right] = \\ &= 4\varepsilon\eta^{2/3} (\eta^{2/3} - 1), \end{aligned} \quad (6)$$

где σ — расстояние между контактируемыми частицами, соответствующее их диаметру, определяется условием $r = \sigma$ и $\varphi(\sigma) = 0$:

$$\left(\frac{d_0}{\sigma}\right)^4 - \left(\frac{d_0}{\sigma}\right)^2 = 0.$$

Из этого равенства находим $d_0 = 2^{\frac{1}{2}}\sigma$. Подстановка этого значения d_0 в выражение (5) определяет потенциал (6) через параметры ϵ и σ .

Силы электростатического взаимодействия (притяжения и отталкивания частиц) определяются производной $f = -d\varphi/dr$ (знак минус опущен):

$$f = 8\epsilon \left[\frac{\sigma^2}{r^3} - 2 \frac{\sigma^4}{r^5} \right] = 8\epsilon \frac{\eta}{\sigma} (1 - 2\eta^{2/3}). \quad (7)$$

При $r > r_0$ силы взаимодействия отрицательные (притяжение частиц), при $r < r_0$ силы взаимодействия положительные (отталкивание частиц). В точке $r = r_0$ и $f(r) = 0$ силы притяжения уравновешиваются силами отталкивания. Силы притяжения максимальны при $r = r_{00}$ ($d^2\varphi/dr^2 = 0$). Пользуясь при этом (6) и (7), легко получить

$$r_0 = \left(\frac{m}{n} \right)^{\frac{1}{m-n}} = 2^{1/2}\sigma, \quad r_{00} = \left[\frac{m(m+1)}{n(n+1)} \right]^{\frac{1}{m-n}} = (10/3)^{\frac{1}{2}}\sigma.$$

Преобразуем эти выражения к виду

$$2^{1/2}\sigma/r = 1, \quad (10/3)^{1/2}\sigma/r = 1.$$

Так как $\eta = (\sigma/r)^3$, то при возведении этих выражений в куб и подстановке фактической величины η_1 для монодисперсной фазы вместо равенства их единице получим

$$\eta_{1c} = \eta_1 / \alpha_1^3 = 0,64029 / 2^{3/2} = 0,22638; \quad (8)$$

$$\eta_{2c} = \eta_1 / \alpha_2^3 = 0,64029 / (10/3)^{3/2} = 0,1052. \quad (9)$$

Структурная топология дает хорошо совпадающие результаты:

$$\eta_{1c} = 0,64029^{10/3} = 0,22625,$$

$$\eta_{2c} = (0,640289...0,63096)^5 = 0,1076...0,1.$$

Потенциал 2–4 вполне пригоден для описания взаимодействия частиц металлических порошков с плотностью упаковки атомов в частицах 0,7405. Критическая плотность упаковки частиц в порошке при этом будет равна

$$\eta_{1c} = 0,7405^{(15...16)/3} = 0,2226...0,2014.$$

Тогда наибольшая плотность упаковки частиц порошка, зависящая от его крупности, должна быть равной

$$\eta_1 = (0,2226...0,2014) 2^{3/2} = 0,6297...0,5697.$$

При этом критическая плотность упаковки тонкодисперсных металлических частиц будет равна

$$\eta_{2c} = (0,6297...0,5697)/(10/3)^{3/2} = 0,1035...0,0936.$$

Полученные критические плотности упаковки $\eta_{2c} = 0,1366$ и $\eta_{2c} = 0,1866$ относятся к полимерным материалам, которые хорошо описываются потенциалами 2–5 и 3–5. Для данных потенциалов легко получить [3] соответственно:

$$r_0 = (5/2)^{1/3}\sigma, \alpha^3 = 5/2, r_{00} = 5^{1/3}, \alpha^3 = 5; \quad (10)$$

$$r_0 = (5/3)^{1/2}\sigma, \alpha^3 = (5/3)^{3/2}, r_{00} = (5/2)^{1/2}\sigma, \alpha^3 = (5/2)^{3/2}. \quad (11)$$

Используя (8)–(10), получим среднюю величину плотности упаковки макромолекул в аморфных полимерах $\eta_1 = 0,1366 \cdot \alpha^3 = 0,1366 \cdot 5 = 0,683$. Экспериментально — расчетный результат $\eta_1 = 0,681$ [4]. Согласно уравнению ФТП [1] для этих полимеров $\eta_{1\min} = 0,6042$.

Используя (8)–(9), (11) и $\eta_{1c} = 0,1866$, получим плотность упаковки макромолекул в линейных аморфных полимерах вблизи абсолютного нуля:

$$\eta_1 = 0,1866 / (5/2)^{3/2} = 0,7376.$$

Несколько улучшенный результат получают, если $\eta_{1cp} = 0,74048$:

$$\eta_1 = 0,7404805 \cdot 2 - 0,749224 = 0,73174.$$

Температурно-экстраполяционный расчет дает результат $\eta_1 = 0,731$ [4]. Такую же величину η_1 имеют металлы с гексагональной кристаллической упаковкой атомов в точке их перегрева:

$$\eta_1 = (0,749224 \cdot 0,726235)^{1/2} = 0,7376$$

$$\text{либо } \eta_1 = (0,633473^{10/3})^{1/5} = 0,7376,$$

где $\eta_1 = 0,726235$ — плотность упаковки атомов металлов с гранецентрированной кристаллической решеткой в точке их перегрева.

Таким образом, математический аппарат структурной топологии позволяет установить топологическое состояние дисперсных материалов, получаемых в процессе измельчения зернистого минерального сырья вплоть до нанометрового размера его частиц, в том числе и изменение информационной энтропии при топологических переходах [1]. Так, $\eta_1 = 0,64029\dots 0,64976$,

$$\begin{aligned} \Delta S &= k_B \ln \left[\frac{\eta_1}{3 \ln (120,754 \eta_1^5)} \right] = \\ &= k_B \ln \left\{ \frac{0,6403\dots 0,64976}{3 \ln [120,754 (0,6403\dots 0,64976)^5]} \right\} \approx -2,5k_B, \end{aligned}$$

где k_B — постоянная Больцмана.

Полученные здесь результаты внесут вклад в развитие современного строительного материаловедения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Хархардин, А.Н. Структурная топология : учеб. пособие [Текст] / А.Н. Хархардин. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2009. — Ч. 1. — 196 с.
- Scott, G.D. About density of packing of balls in the spherical large bottles [Текст] / G.D. Scott // Nature. — London. — 1960. — N 188. — P. 908–914.
- Хархардин, А.Н. Модели потенциалов и сил парного взаимодействия микро- и наночастиц в дисперсных системах [Текст] / А.Н. Хархардин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 2. — С. 117–126.
- Слонимский, Г.Л. Об упаковке макромолекул в полимерах [Текст] / Г.Л. Слонимский, А.А. Аскадский, А.И. Китайгородский // Высокомолекулярные соединения. — 1970. — Т. (A) X11, № 3. — С. 494–511.

Получено 19.05.11

Kharkhardin A.N., doktor of technical sciences, professor; E-mail: s-nsm@intbel.ru,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia

STRUCTURAL TOPOLOGY OF DISPERSE SYSTEMS COOPERATING OF MICRO-AND NANOPARTICLES

The technique of the analysis of the equations for potentials and forces of electrostatic interaction of micro- and nanoparticles in disperse mineral systems, macromolecules in polymers and a method of reception of parametres of their topological condition is resulted.

Key words: disperse materials, micro- and nanoparticles, potentials of intermolecular interaction.

REFERENCES

1. Kharkhardin, A.N. Structural topology: the manual [Text] / A.N. Kharkhardin. — Belgorod : BSTU, 2009. — Ч. 1. — 196 p.
2. Scott, G.D. About density of packing of balls in the spherical large bottles [Text] / G.D. Scott // Nature. — London. — 1960. — N 188. — P. 908–914.
3. Kharkhardin, A.N. Modeli of potentials and forces of pair interaction micro- and nanoparticles in disperse systems [Text] / A.N. Kharkhardin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 2. — P. 117–126.
4. Slonimsky, G.L. About packing of macromolecules in polymers [Text] / G.L. Slonimsky, A.A. Askadsky, A.I. Kitaigorodsky // High-molecular connections. — 1970. — V. (A) X11, N 3. — P. 494–511.



НАШИ ЮБИЛЯРЫ

КАРИМОВ

Альберт Миниханович

(к 70-летию со дня рождения)

19 апреля 2011 года исполнилось 70 лет действительному члену Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), академику Международной академии архитектуры, заслуженному архитектору России, профессору Альберту Минихановичу Каримову.

А.М. Каримов родился в г. Омске в семье учителей. После окончания школы работал чертежником, плотником. В 1958 г. поступил, а в 1965 г. с отличием окончил архитектурный факультет Новосибирского инженерно-строительного института. За отличную учебу был удостоен Ленинской стипендии и поощрялся поездками за границу – в ГДР, Польшу, Финляндию, Данию, Англию.

По окончании аспирантуры Московского архитектурного института защитил диссертацию и получил ученую степень кандидата архитектуры. До 1975 года работал в институте «Омскгражданпроект», где он стал главным архитектором института.

В 1975 году А.М. Каримов приглашен на должность начальника отдела по делам строительства и архитектуры горисполкома, главного архитектора города Омска, в которой проработал более тридцати лет, до 2005 года. За этот период он неоднократно был избран депутатом Городского Совета, членом Центрального правления Союза архитекторов, делегатом съездов архитекторов СССР и России.

В должности главного архитектора г. Омска он лично курировал строительство крупных общественных зданий, таких как Дворец пионеров, Торговый центр, Музыкальный театр, восстановление Никольского казачьего собора и др., а также участвовал в разработке большого количества архитектурных и градостроительных проектов, среди которых кинотеатр «Сатурн» и киноконцертный зал (дипломы Госстроя России), конкурсный проект концепции генплана г. Омска (I премия на Всесоюзном конкурсе), здание Лютеранской кирхи (диплом Международной вы-

ставки «Зодчество»), зал органной и камерной музыки (приз «Золотая капитель») и др.

После завершения административной работы А.М. Каримов возглавил авторскую школу архитектуры и создал персональную творческую мастерскую, в которой проводятся научно-исследовательские и проектные работы, получившие признание научной и архитектурной общественности. В настоящее время профессор А.М. Каримов является академиком РААСН, руководителем Омского представительства РААСН, академиком Международной академии архитектуры, ведет научно-педагогическую работу в Инженерно-строительном институте СибАДИ. Им под эгидой Омского представительства РААСН совместно с ИСИ СибАДИ и Международным центром развития творчества «Сибирская пирамида» организован «Институт города», ориентированный на междисциплинарный подход к разработке методологических основ формирования биосферно-составимых с человеком экометрополисов и поселений.

За последние годы активной научной деятельности А.М. Каримовым выполнено более пятидесяти исследований, среди которых «Организация процесса проектирования и создания объекта с учетом основных направлений развития архитектуры и строительства в XXI веке», «Развитие архитектуры и градостроительства в XXI веке с учетом воплощения принципа непрерывной устойчивости», «Градостроительный подход к развитию территории как необходимое условие пространственных и инфраструктурных предпосылок для повышения качества жизни», «Роль ученых в реализации Стратегии социально-экономического развития Сибири до 2020 года» и др.

Работы А.М. Каримова отмечены медалями РААСН, дипломами и премиями Союза архитекторов, он был участником различных международных форумов в Канаде, США, Испании, Франции, Германии, Китае, Турции, где выступал с лекциями, научными сообщениями, персональными выставками.

А.М. Каримов награжден Орденом почета, орденом Русской Православной церкви святого Благоверного князя Даниила Московского, медалями. Он удостоен приза «Золотой Меркурий» программы «Партнерство ради прогресса» (Париж), золотой медали Международного выставочного центра «Интерсиб» (г. Новосибирск), высшей награды Совета главных архитекторов России «Кентавр».

Имя А.М. Каримова включено в энциклопедию «Лучшие люди России» и в биографическую энциклопедию успешных людей России «Who is who в России».

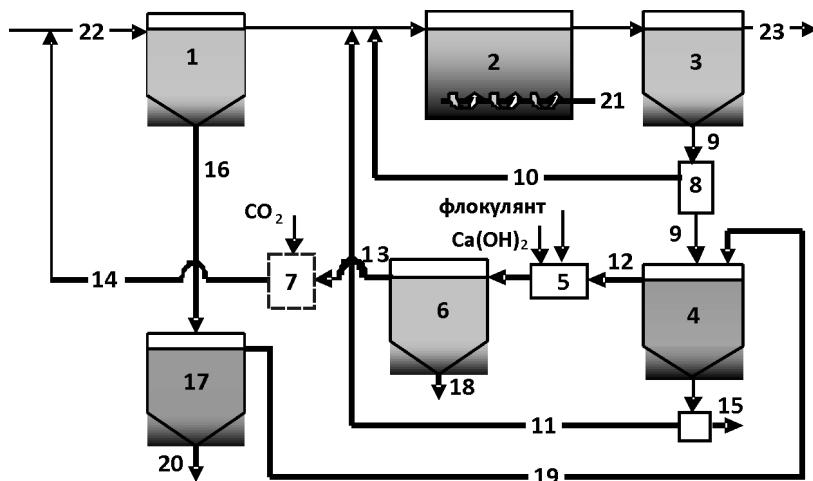
А.М. Каримов избран председателем Омского областного отделения Всероссийского общества охраны памятников истории и культуры, является членом экспертного совета по градостроительству Государственной думы РФ и заместителем председателя Совета главных архитекторов субъектов РФ и муниципальных образований, членом центрального правления Союза архитекторов России, членом областного архитектурно-градостроительного Совета при губернаторе Омской области.

Коллеги, ученики, научно-педагогическая общественность поздравляют Альберта Минихановича со славным юбилеем и желают ему новых творческих планов и свершений

Редакция журнала присоединяется к поздравлениям юбиляру

УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА ИЗ СТОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

В НГАСУ (Сибстрин) на кафедре «Водоснабжение и водоотведение» разработан способ удаления фосфора из сточной жидкости. Согласно данной технологии, эффект удаления фосфора достигает 96,8 % (как в летний, так и в зимний период года), т.е. концентрация фосфора (по PO_4^{3-}) в очищенной сточной воде составляет 0,38 мг/л.



Комбинированный метод удаления фосфора

1 — первичный отстойник, 2 — аэротенк, 3 — вторичный отстойник, 4 — сооружение для дефосфатирования циркулирующего ила, 5 — камера смешения и реакции, 6 — отстойник физико-химической очистки, 7 — карбонизатор, 8 — насосная станция, 9 — циркулирующий и избыточный активный ил, 10 — циркулирующий активный ил, 11 — дефосфатированный циркулирующий активный ил, 12 — иловая вода, обогащенная фосфатами, 13 — иловая вода, освобожденная от фосфатов, 14 — иловая вода на повторную очистку, 15 — уплотненный избыточный активный ил, 16 — осадок из первичного отстойника, 17 — ацидофикатор, 18 — осадок, содержащий $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 19 — иловая вода, обогащенная летучими жирными кислотами, 20 — осадок из ацидофикатора, 21 — воздух, 22 — сточная жидкость, поступающая на очистку, 23 — очищенная сточная жидкость

Данная технология очистки сточной жидкости от фосфора предполагает замену дорогостоящей уксусной кислоты на продукт метаболизма отходов очистных сооружений канализации, содержащий большое количество летучих жирных кислот, и позволяет увеличить чистый дисконтированный доход на 1,3 млн руб.

Данный способ подтвержден патентами на изобретение № 2276108 (заявл. 05.08.2004, опубл. 27.01.2006), № 2230042 (заявл. 23.11.2002, опубл. 10.06.2004), № 43258 (заявл. 05.08.2004, опубл. 10.01.2005).

Разработчики: Г.Т. АМБРОСОВА, канд. техн. наук, доц.,
Т.А. БОЙКО, канд. техн. наук, доц.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: ntio-ngasu@yandex.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел/факс: (383) 266-28-89

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

- 1.** К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подпись автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

- *рекомендацию* соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);
- *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;
- *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5") или диске 3,5". Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

- 3.** Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

- индекс УДК;
- инициалы, фамилии авторов;
- название статьи;
- аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);
- ключевые слова;
- текст статьи;
- библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- сведения об авторах: *фамилии, инициалы, ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;
- почтовые адреса, телефоны и *e-mail* авторов;
- *название статьи на английском языке*;
- *аннотацию на английском языке*;
- *ключевые слова на английском языке*;
- *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. *Русские и греческие буквы* и индексы, а также *цифры*, *аббревиатуры* и *стандартные функции* (Re, cos и др.) набираются *прямым* шрифтом. *Латинские буквы* набирать *курсивом*. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п./ж курсивом).

² На 2011 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публикавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 1-е полугодие 2011 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции

Теория инженерных сооружений

Строительные материалы и изде-

лия

Экономика и организация строи-

тельства

Автоматизация и технология строи-

тельного производства

Гидротехническое строительство

Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог

и мостов

Строительные и дорожные машины

Научные проблемы архитектуры и

экологии

Научно-методический

В лабораториях вузов

Внедрение научных достижений в про-

изводство

Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1200 р.

Цена отдельного номера — 200 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 5 (629) 2011

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Т.П. Петроченко*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*