

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
АССОЦИАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ СНГ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 4 (592)

Апрель 2008 г.

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

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. А. Попов, Ю. П. Правдивец,
В. Г. Себешев, И. Б. Соколов, Ю. А. Феофанов,
В. М. Хрулев, Е. М. Чернышов, Г. Н. Шоршнев

Ответственный секретарь Н. В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, Ленинградская, 113,
Тел./факс 266-28-59.

<http://www.sibstrin.ru>

E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.03.08. Формат 70 108^{1/16}.
Усл. печ. л. 11,55+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3252.

ЗАО «Новосибирский полиграфкомбинат», 630007,
г. Новосибирск, Красный проспект, 22.

Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕР- НЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Тюкалов Ю. Я.** Использо-
вание кусочно-постоянных
напряжений для решения
объемных задач теории упру-
гости 4

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА- ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Комохов П. Г., Харито-
нов А. М.** Имитацион-
но-численная модель нано-
структуры и свойств це-
ментного камня 10
- Фокин Г. А., Лошкано-
ва Я. А.** Повышение физи-
ко-механических свойств це-
ментных систем акустиче-
ской активацией воды
затворения 16
- Корнеева Е. В., Павлен-
ко С. И.** Бесцементная за-
кладочная смесь на основе
отходов металлургической и
угольной промышленности 21
- Молькова Е. Е., Христо-
форова И. А., Христофо-
ров А. И.** Теплоизоляцион-
ные строительные материалы
на основе поливинилхлорида 25
- Абдрахимова Е. С.** Влия-
ние фазового состава на мо-
розостойкость керамическо-
го кирпича 28

ЭКОНОМИКА И ОРГА- НИЗАЦИЯ СТРОИТЕ- ЛЬСТВА АВТОМАТИЗА- ЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Болотин С. А., Мал-
кин М. М.** Анализ по-

тенциальных возможностей проектирования оптимального строительного генерального плана	30
Кузьминский А. Г., Изатов В. А., Надеин А. В. Методика формирования сметной цены на строительную продукцию в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы с учетом инвестиционных возможностей инвестора	34
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Курносое А. Д. Защита от размыва берегов рек арктического бассейна России	40
Кузнецова Ю. А. Напряженно-деформированное состояние и трещинообразование в бетоне анкерных опор турбинных водоводов	49
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Сотникова О. А., Чудинов Д. М., Щукина Т. В. Оценка ресурсов солнечной энергии для проектирования гелиоустановок	56
Шиляев М. И., Шиляев А. М., Хромова Е. М., Дорошенко Ю. Н. О конденсационных механизмах интенсификации пылеулавливания в противоточных форсуночных скрубберах и пенных аппаратах	61
Приймак Л. В. Оптимальные режимы дозирования при реагентном обезжелезивании воды	67
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Шевченко В. А., Иванова Л. А. Композиции для ремонта дорожных покрытий с использованием техногенных отходов промышленности	70
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д. Э., Абраменков Э. А., Грузин А. В. Совершенствование технологий уплотнения на базе аналитических исследований напряжений в грунтовых средах	73
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Никитин Ю. А. Промышленные выставки России — уроки истории	77
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Безбородов В. Г., Меденцов Л. Ф., Быкасова О. Б., Меденцова Н. Л. Межфазовое взаимодействие в системе суглинок — стекло при спекании керамики	88
Горюнов И. И., Алешковская А. А., Чеботаева Е. М. Построение упрощенной математической модели процесса обжига гипса во вращающейся печи	95
Кравченко Ю. А. Компактное представление плоской триангуляции ...	99
Герасимов В. В., Лабутич Е. С., Пятых Н. В., Михальченко О. Ю. Управление организационно-экономической надежностью строительных проектов	104
Лубягин А. В., Федоров В. К. К вопросу о контроле качества уплотнения грунтов оснований зданий и сооружений с использованием метода высоконапорной инъекции	109
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Васюта Б. Н., Чалков Г. В. Экспериментальное исследование моделей подкрановых балок на основе прокатных профилей при местном кручении верхнего пояса. Сообщение 1	115
Караулов А. М., Сыдыкова И. А., Кузнецов А. А. Экспериментальные исследования величины и эпюры предельного давления кольцевого штампа на глинистое основание	125
Замечательный ученый, педагог, изобретатель	130

CONTENTS

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Tyukalov Yu. A. The Use of Piecewise Constant Stresses to Solve Three-Dimensional Elastic Problems	4
---	---

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Komokhov P. G., Kharitonov A. M. A Simulation and Numerical Model of Nanostructure and Properties of the Cement Brick	10
Fokin G. A., Loshkanova Ya. A. The Increase in Physical and Mechanical Properties of Cement Systems by Acoustical Activation of Mixing Water	16
Korneeva E. V., Pavlenko S. I. A Cementless Filling Mixture Based on Wastes of Metallurgical and Coal Industries	21
Molkova E. E., Khristoforova I. A., Khristoforov A. I. Polyvinylchloride Based Heat-Insulating Building Materials	25
Abdrakhimova E. S. The Influence of Phase Composition on Frost Resistance of the Ceramic Brick	28

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Bolotin S. A., Malkin M. M. The Analysis of Potentialities for Making an Optimal General Construction Plan	30
Kuzminsky A. G., Izatov V. A., Nadein A. V. A Procedure of Formation of an Estimated Price for Building Products in the Predicted Level of Prices for Resources and Tariffs with Regard to Investment Opportunities of Investor	34

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Kurnosov A. D. Protection against Scouring of River Banks in the Arctic Basin of Russia	40
Kuznetsova Yu. A. Stress-Strain State and Crack Formation in the Concrete of Anchor Supports of Turbine Water Conduits	49

SANITARY ENGINEERING

Sotnikova O. A., Chudinov D. M., Shchukina T. V. Estimation of Solar Energy Resources for the Design of Solar Power Plants	56
Shilyaev M. I., Shilyaev A. M., Khromova E. M., Doroshenko Yu. N. On Condensation Mechanisms of Dust Collection Intensification in Countercurrent Jet Scrubbers and Foam Units	61
Priymak L. V. Optimal Conditions of Dosing at Reactant Defluoridation of Water	67

CONSTRUCTION OF MOTOR ROADS AND BRIDGES

Shevchenko V. A., Ivanova L. A. Compositions for Pavement Maintenance Using Technogenic Industrial Waste	70
---	----

BUILDING AND ROAD MACHINES

Abramenkov D. E., Abramenkov E. A., Gruzin A. V. Upgrading of the Technology of Compression Based on Analytical Investigations of Stress in Soil Mediums	73
---	----

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY

Nikitin Yu. A. Industrial Exhibitions of Russia – Lessons of History	77
---	----

SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

Bezborodov V. G., Medentsov L. F., Bykasova O. B., Medentsova N. L. Interphase Interaction in a Loam-Glass System during Ceramics Sintering	88
Goryunov I. I., Aleshkovskaya A. A., Chebotayeva E. M. The Construction of a Simplified Mathematical Model for the Process of Gypsum Calcination in a Rotary Kiln	95
Kravchenko Yu. A. Compact Representation of Planar Triangulation	99
Gerasimov V. V., Labutin E. S., Pyatykh N. V., Mihalchenko O. Yu. Management Organizational-economic Reliability of Building Projects	104
Lubyagin A. V., Fedorov V. K. On the Problem of Quality Control of Compacted Foundation Soils of Building and Structure Bases by the Method of High Pressure Injection	109

IN HIGHER SCHOOL LABS

Vasyuta B. N., Chalkov G. V. Experimental Investigation into Models of Crane Beams on the Basis of Rolling Structures at Local Torsion of the Top Belt. Information 1 ..	115
Karaulov A. M., Kuznetsov A. A. Experimental Investigations into Value and Profile of Limiting Pressure of a Circular Die on the Clay Base	125

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Ю. Я. ТЮКАЛОВ, канд. техн. наук, доц. (Вятский государственный университет, г. Киров)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КУСОЧНО-ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Рассматривается решение объемной задачи теории упругости методом конечных элементов на основе минимизации функционала дополнительной энергии. В качестве неизвестных используются непосредственно узловые напряжения. Для аппроксимации напряжений используются кусочно-постоянные аппроксимации, которые являются разрывными внутри конечного элемента. На область выбора неизвестных параметров конечно-элементной модели накладывается система ограничений в виде алгебраических уравнений равновесия, составленных для узловых точек при помощи принципа возможных перемещений. Приводится пример расчета и сравнение полученных результатов, которое показывает, что при измельчении сетки перемещения стремятся к точным значениям сверху.

В работах [1, 2] для решения задач изгиба плит и плоских задач теории упругости методом конечных элементов используются функционал дополнительной энергии деформаций и принцип возможных перемещений. В качестве неизвестных принимаются непосредственно узловые напряжения или внутренние усилия. Напряженно-деформированное состояние дискретной модели предметной области представляется полями напряжений (усилий), которые по области конечных элементов аппроксимируются постоянными или кусочно-постоянными базисными функциями. Очевидно, что в областях с постоянными напряжениями удовлетворяются однородные дифференциальные уравнения равновесия и дифференциальные уравнения совместности деформаций и, кроме того, при измельчении сетки напряжение в конечных элементах стремится к постоянной величине. Решение тестовых задач показало, что использование таких аппроксимаций для напряжений позволяет получить верхнюю границу для перемещений.

Решение задачи находится из условия минимума дополнительной энергии деформаций [3]:

$$\Pi_c = \frac{1}{2} \int_V \{\sigma\}^T [E]^{-1} \{\sigma\} dV - \int_{\Omega_u} \{T\}^T \{\bar{\Delta}\} d\Omega \rightarrow \min. \quad (1)$$

Для рассматриваемой задачи в (1) введены следующие обозначения:
 $\{\sigma\} = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz})^T$ — вектор поля напряжений;

$[E]^{-1}$ — матрица упругих констант;

$\{T\} = (T_x T_y T_z)^T$ — вектор поверхностных усилий;

$\{\bar{\Delta}\} = (\bar{u} \bar{v} \bar{w})^T$ — вектор заданных граничных перемещений;

V — область рассматриваемой задачи;

Ω_u — поверхность, на которой заданы перемещения. Выбираемые поля напряжений должны удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия и статическим граничным условиям.

После дискретизации предметной области и использования кусочно-постоянных аппроксимаций для полей напряжений необходимо обеспечить равновесие узлов сетки вдоль осей координат. Поэтому на область выбора неизвестных параметров конечно-элементной модели накладывается система ограничений в виде алгебраических уравнений равновесия, со-

ставленных для узловых точек при помощи принципа возможных перемещений. При измельчении сетки такие алгебраические уравнения равновесия, полученные для внутренних узлов, стремятся к соответствующим дифференциальным уравнениям равновесия, а для узлов, лежащих на границе предметной области, к соответствующим статическим граничным условиям. Для решения задачи условной минимизации используется метод штрафных функций или метод множителей Лагранжа.

В данной работе предлагается использовать кусочно-постоянные поля напряжений для решения объемных задач теории упругости. В этом случае поля напряжений являются разрывными внутри конечных элементов. В работе [1] такой подход назван вариационно-сеточным, так как использование разрывных внутри элемента аппроксимаций не характерно для метода конечных элементов.

Неизвестными параметрами являются шесть напряжений в каждом узле $\{\bar{\sigma}_i\}^T = (\bar{\sigma}_{x,i}, \bar{\sigma}_{y,i}, \bar{\sigma}_{z,i}, \bar{\tau}_{xy,i}, \bar{\tau}_{xz,i}, \bar{\tau}_{yz,i})$. Для вычисления дополнительной энергии деформаций всей конструкции применим квадратурную формулу численного интегрирования

$$\Pi_c = \frac{1}{2} \int_V \{\sigma\}^T [E]^{-1} \{\sigma\} dV \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n V_i \{\bar{\sigma}_i\}^T [E]^{-1} \{\bar{\sigma}_i\}. \quad (2)$$

V_i — весовой коэффициент (объем), определяемый по следующей формуле:

$$V_i = \sum_{k=1}^m a^k b^k c^k / 8 + \sum_{k=1}^s V^k / 6, \quad (3)$$

где m, s — соответственно количество шестигранных и пятигранных конечных элементов (ячеек), примыкающих к узлу i ;

a^k, b^k, c^k — размеры k -го шестигранного элемента;

V^k — объем пятигранного элемента.

На рис. 1 показаны области с постоянными напряжениями для прямоугольного элемента.

Используя соотношение (2), дополнительную энергию деформации можно выразить в следующей матричной форме:

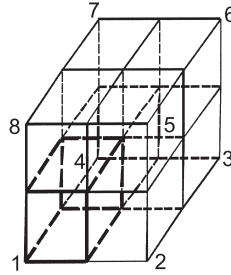


Рис. 1. Области с постоянными напряжениями

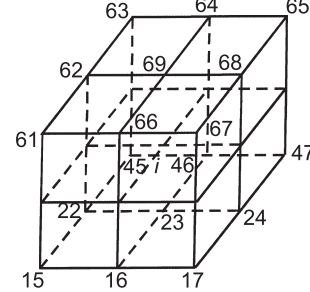


Рис. 2. Элементы, примыкающие к узлу i

$$\Pi_c = \frac{1}{2} \{\bar{\sigma}\}^T [B] \{\bar{\sigma}\} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Матрица податливости $[B]$ имеет простую блочно-диагональную структуру:

$$[B] = \begin{bmatrix} V_1 [E]^{-1} & & & \\ & V_2 [E]^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & V_n [E]^{-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Благодаря такой структуре легко получить выражение обратной матрицы $[B]^{-1}$. Вектор неизвестных $\{\bar{\sigma}\}$ имеет размер $6n$, где n — количество узлов конечно-элементной сетки.

Рассмотрим случай использования шестигранных прямоугольных конечных элементов (рис. 2). Получим уравнения равновесия узлов при помощи принципа возможных перемещений. Каждый узел имеет три возможных перемещения $\delta u_i, \delta v_i, \delta w_i$ вдоль осей глобальной системы координат. Аппроксимацию возможных перемещений по объему конечного элемента примем в виде линейных базисных функций.

$$\begin{aligned}\delta u_i &= (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i)(1 + \psi \psi_i) / 8, \\ \delta v_i &= (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i)(1 + \psi \psi_i) / 8, \\ \delta w_i &= (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i)(1 + \psi \psi_i) / 8.\end{aligned}\quad (6)$$

Безразмерные координаты связаны с локальными координатами x, y, z известными выражениями $\xi = 2x / a^e, \eta = 2y / b^e, \psi = 2z / c^e$. Выражения (6) соответствуют единичному перемещению узла i и нулевым перемещениям остальных узлов конечных элементов, примыкающих к рассматриваемому узлу. Для каждого из этих конечных элементов рассматриваемый узел будет иметь различные значения индекса i в промежутке от 1 до 8. Значение индекса соответствует порядковому номеру узла при описании конечного элемента (см. рис. 2).

Принцип возможных перемещений гласит: сумма работ всех внешних и внутренних сил на любых возможных перемещениях, допускаемых наложенными связями, равна нулю:

$$\delta \bar{U}_i + \delta \bar{V}_i = 0. \quad (7)$$

Возможное перемещение узла i вдоль оси X вызывает в конечных элементах, примыкающих к узлу, следующие деформации:

$$\begin{aligned}\delta \epsilon_x &= \partial(\delta u_i) / \partial x = \xi_i (1 + \eta \eta_i)(1 + \psi \psi_i) / 4a^e, \\ \delta \gamma_{xy} &= \partial(\delta u_i) / \partial y = \eta_i (1 + \xi \xi_i)(1 + \psi \psi_i) / 4b^e, \\ \delta \gamma_{xz} &= \partial(\delta u_i) / \partial z = \psi_i (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i) / 4c^e.\end{aligned}\quad (8)$$

Остальные деформации $\epsilon_y = \epsilon_z = \gamma_{yz} = 0$. Энергия деформации конечного элемента вычисляется в виде интеграла по его объему

$$\begin{aligned}\delta \bar{U}_{i,x}^e &= \iiint_{V^e} (\sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_y \delta \epsilon_y + \sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_z \delta \epsilon_z + \\ &+ \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dx dy dz.\end{aligned}\quad (9)$$

Вычисляя интеграл (9) аналитически, получим

$$\begin{aligned}\delta \bar{U}_{i,x}^e &= \frac{1}{32} \sum_{j=1}^8 (\xi_i b^e c^e (1 + \eta_i \eta_j / 2)(1 + \psi_i \psi_j / 2) \bar{\sigma}_{x,j} + \\ &+ \eta_i a^e c^e (1 + \xi_i \xi_j / 2)(1 + \psi_i \psi_j / 2) \bar{\tau}_{xy,j} + \\ &+ \psi_i a^e b^e (1 + \eta_i \eta_j / 2)(1 + \xi_i \xi_j / 2) \bar{\tau}_{xz,j}).\end{aligned}\quad (10)$$

Выражение (10) запишем в стандартном векторном виде

$$\delta \bar{U}_{i,x}^e = \{C_{i,x}^e\}^T \{\bar{\sigma}^e\}. \quad (11)$$

Вектор $\{C_{i,x}^e\}$ состоит из 48 коэффициентов, его можно представить в следующем виде:

$$\{C_{i,x}^e\}^T = (\{C_{i,x}^1\} \parallel \{C_{i,x}^2\} \parallel \{C_{i,x}^3\} \parallel \{C_{i,x}^4\} \parallel \{C_{i,x}^5\} \parallel \{C_{i,x}^6\} \parallel \{C_{i,x}^7\} \parallel \{C_{i,x}^8\}), \quad (12)$$

где

$$\{C_{i,x}^j\} = \frac{1}{32} \left\{ \begin{array}{c} \xi_i b^e c^e (1 + \eta_i \eta_j / 2) (1 + \psi_i \psi_j / 2) \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \eta_i a^e c^e (1 + \xi_i \xi_j / 2) (1 + \psi_i \psi_j / 2) \\ \hline \psi_i a^e b^e (1 + \eta_i \eta_j / 2) (1 + \xi_i \xi_j / 2) \\ \hline 0 \end{array} \right\}. \quad (13)$$

Энергию деформации всех конечных элементов, примыкающих к узлу i , представим в следующем виде:

$$\delta \bar{U}_{i,x} = \{C_{i,x}\}^T \{\bar{\sigma}^i\}, \quad (14)$$

где $\{\bar{\sigma}^i\}$ — вектор, включающий неизвестные напряжения в узлах конечных элементов, примыкающих к узлу i .

Работа сосредоточенных внешних сил $P_{i,x}$ и распределенных по объему нагрузок q_x^V , направленных вдоль оси X при возможном перемещении узла i вдоль оси X , определяется следующим выражением:

$$\delta \bar{V}_{i,x} = P_{i,x} \delta u_i + \sum_e \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 q_x^{gr} \delta u_i dx dy dz. \quad (15)$$

Учитывая выражение (6), получим, что для случая равномерно распределенной нагрузки q_x^V

$$\delta \bar{V}_{i,x} = P_{i,x} + \sum_e \frac{1}{8} q_x^V a^e b^e c^e = \bar{P}_{i,x}. \quad (16)$$

Окончательно уравнение равновесия узла вдоль оси X примет стандартный векторный вид

$$\{C_{i,x}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,x} = 0. \quad (17)$$

Составляя уравнения равновесия для всех узлов по направлению трех осей координат, получим задачу минимизации функционала при наличии ограничений в виде системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \{\bar{\sigma}\}^T [B] \{\bar{\sigma}\} &\rightarrow \min, \\ \{C_{i,x}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,x} &= 0, \quad i \in \Xi_x, \\ \{C_{i,y}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,y} &= 0, \quad i \in \Xi_y, \\ \{C_{i,z}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,z} &= 0, \quad i \in \Xi_z. \end{aligned} \quad (18)$$

Ξ_x, Ξ_y, Ξ_z — множества узлов, у которых не исключены перемещения вдоль осей X, Y и Z соответственно. Отметим, что при получении уравнений равновесия аппроксимировалось поле возможных, а не действительных перемещений.

Задачу (18) можно свести к задаче безусловной минимизации двумя способами: при помощи метода штрафных функций и при помощи метода множителей Лагранжа. В первом случае получаем следующий квадратичный функционал:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \{\bar{\sigma}\}^T [B] \{\bar{\sigma}\} + \sum_{i \in \Xi_x} \alpha (\{C_{i,x}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,x})^2 + \\ & + \sum_{i \in \Xi_y} \alpha (\{C_{i,y}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,y})^2 + \sum_{i \in \Xi_z} \alpha (\{C_{i,z}\}^T \{\bar{\sigma}^i\} + \bar{P}_{i,z})^2 \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (19)$$

где α — параметр функции штрафа.

Минимизация (19) приводит к системе линейных уравнений, которая является положительно определенной, симметричной и имеет ленточную структуру. Неизвестными в этом случае являются только узловые напряжения. Система линейных алгебраических уравнений будет иметь следующий матричный вид:

$$([B] + \alpha [S]) \{\bar{\sigma}\} = \alpha \{R\}. \quad (20)$$

Матрица $[S]$, которую можно назвать матрицей равновесия, является производной второго, третьего и четвертого слагаемых в функционале (19). Рекомендации по автоматическому выбору величины параметра штрафа и алгоритм определения перемещений по найденным напряжениям даны в [1, 2].

Для построения решения при помощи метода множителей Лагранжа введем вектор ненулевых узловых перемещений вдоль осей координат, но при этом аппроксимацию поля перемещений использовать не нужно:

$$\{u\}^T = (u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_n \ v_n \ w_n).$$

Элементы данного вектора являются множителями Лагранжа для соответствующих уравнений равновесия узлов (18). Уравнения равновесия (18) объединим в одно матричное уравнение

$$[C] \{\bar{\sigma}\} + \{P\} = 0. \quad (21)$$

Тогда решение задачи можно свести к минимизации следующего функционала:

$$\frac{1}{2} \{\bar{\sigma}\}^T [B] \{\bar{\sigma}\} + \{u\}^T ([C] \{\bar{\sigma}\} + \{P\}) \rightarrow \min. \quad (22)$$

В данном случае неизвестными являются вектор напряжений и вектор перемещений. Минимизация функционала (22) сводится к следующей системе линейных уравнений:

$$\begin{aligned} [B] \{\bar{\sigma}\} + [C]^T \{u\} &= 0, \\ [C] \{\bar{\sigma}\} + \{P\} &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Так как матрица $[B]$ имеет блочно-диагональную структуру и ее легко обратить, выразим из первого матричного уравнения вектор напряжений и подставим его во второе уравнение. Получим следующую последовательность уравнений:

$$\begin{aligned} [C][B]^{-1}[C]^T \{u\} - \{P\} &= 0, \\ \{\bar{\sigma}\} &= -[B]^{-1}[C]^T \{u\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Введем обозначение для произведения матриц:

$$[D] = [C][B]^{-1}[C]^T. \quad (25)$$

Матрица $[D]$ имеет ленточную структуру и является симметричной с положительными элементами на главной диагонали. При вычислении элементов данной матрицы для сокращения количества вычислительных операций следует учесть особенности структур матриц $[B]^{-1}$ и $[C]$. Матрица $[C]$ является несимметричной, но имеет ленточную структуру, ширина ленты которой определяется максимальной разностью номеров узлов элементов, примыкающих к каждому из узлов сетки. Матрица $[B]^{-1}$ — блочно-диагональная, симметричная с шириной ленты, равной трем. Как показало сравнение численных результатов, два рассмотренных варианта решения дают практически одинаковые результаты. Разность в значениях менее одного процента.

Для тестирования предлагаемой методики были выполнены расчеты консольной балки на действие постоянной равномерно распределенной вертикальной (касательной) нагрузки на свободном конце. В заделке исключались перемещения всех узлов по направлению осей координат. Варианты разбиения балки на шестигранные конечные элементы показаны на рис. 3. Длина балки равна 5 м, ширина и высота — 1 м, модуль

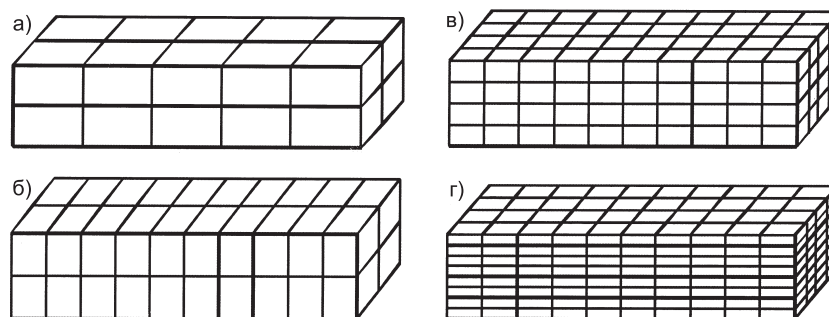


Рис. 3. Схемы разбиения балки на конечные элементы

упругости $E = 10^6$ кН/м², коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$, нагрузка $q = 10$ кН/м². Результаты расчетов приведены в таблице. По балочному решению максимальное перемещение равно 5 мм, максимальное напряжение — 300 кН/м².

Результаты расчетов показывают, что перемещения при измельчении сетки стремятся к точному решению сверху, а краевое напряжение приближается к значению, полученному по балочной теории.

Результаты расчета

Схема разбиения на рис. 3	Количество узлов сетки	Максимальное напряжение σ_x , кН/м ²	Перемещение консоли, мм
a	54	257,5	6,05
b	99	266,5	6,02
c	165	282,8	5,40
d	495	294,5	5,19

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюкалов Ю. Я. Решение плоской задачи теории упругости методом конечных элементов в напряжениях/Ю. Я. Тюкалов//Строительная механика и расчет сооружений.— 2006.— № 2.— С. 34–38.
2. Тюкалов Ю. Я. Вариационно-сеточный метод решения задач изгиба плит в напряжениях/Ю. Я. Тюкалов//Изв. вузов. Строительство.— 2006.— № 8.— С. 13–20.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы/Р. Галлагер.— М.: Мир, 1984.— 428 с.

© Тюкалов Ю. Я., 2008

Получено после доработки 17.12.07

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.54 : 620.18

П. Г. КОМОХОВ, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., **А. М. ХАРИТОНОВ**, канд. техн. наук (Петербургский государственный университет путей сообщения)

ИМИТАЦИОННО-ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ НАНОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Разработана двухуровневая имитационно-численная модель цементного геля, представляющая собой совокупность частиц размером 4,4 и 40 нм с распределением пор по размеру, соответствующим экспериментальным данным. На основе предложенной модели посредством метода конечных элементов симитированы механизмы влажностной усадки, обусловленные капиллярным давлением и изменением свободной поверхностной энергии. Получены численные оценки деформаций усадки и произведено их сопоставление с экспериментальными данными.

Сложность оценки свойств цементных композиций в первую очередь связана с неоднородностью и многоуровневостью структуры таких материалов. Только укрупненные характеристики, такие как, например, величина интегральной и капиллярной пористости, распределение условно замкнутых пор, связываются с макросвойствами бетона. Подобные показатели являются интегральными и в ряде случаев не позволяют отразить сущность происходящих процессов, и только недавно подчеркнута необходимость и возможность установления четкой связи между структурой и свойствами цементных систем [1]. Такая возможность реализуется путем разработки компьютерных имитационных моделей структуры композиционных материалов и приложения к ним вычислительных алгоритмов, реализующих представление о механизмах процессов деструкции при воздействии различных внешних и/или внутренних факторов.

На наш взгляд, наиболее целесообразным является создание имитационных моделей структуры на основе данных экспериментальных исследований уже сформировавшегося цементного камня. При этом теряется кинетический аспект формирования структуры, но исключаются весьма неоднозначные результаты моделирования процесса гидратации.

Следует отметить, что и по настоящее время микроструктура цементного камня во многом остается дискуссионной. Существующие численные модели не учитывают фазу цементного геля, которая обуславливает важнейшие практические свойства и требует своего учета при оценке свойств композиционного материала.

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы явилась разработка имитационно-численной модели структуры цементного камня на уровне нанометра. Данная модель базируется на результатах физико-химических исследований цементного камня 28-суточного возраста с учетом различных технологических факторов (условия твердения, в/ц, присутствие химических добавок).

Основными параметрами, лежащими в основе разработки модели цементного геля, явились его пористость и распределение пор по размеру. Исследование пористости осуществлялось по методикам, основанным на протонном магнитном резонансе (ПМР) [2], десорбции бензола и ртутной порометрии. В таблице приведены исследованные составы цементного камня.

Исследованные составы цементного камня

Состав	В/Ц	Условия твердения	Вид цемента	Вид и количество добавки, %
1	0,28	НВУ	Белгородский ПЦ500Д0	–
2	0,28	ТВО		–
3	0,24	НВУ		С-3 (0,5)
4	0,24	НВУ		С-3 (0,5) + ТФ* (0,5)
5	0,28	НВУ	Оскольский ПЦ500Д0	–
6	0,30	НВУ		–
7	0,28	ТВО		–

* Тиосульфат натрия.

Распределение пор геля по размеру, определенное при помощи протонного магнитного резонанса (рис. 1), показывает, что во всех составах значительный объем порового пространства цементного камня в 28-суточном возрасте приходится на поры радиусом около 0,85 нм. Технологические факторы (в/ц, сроки и условия твердения, присутствие химических добавок) влияют на объем данных пор, что обусловлено степенью гидратации цемента (объемом новообразований). Однако с качественной стороны строение С–S–Н (по данному параметру) остается неизменным. Общий объем пор указанного размера в среднем составляет порядка 18% объема цементного камня.

Наличие пор радиусом 0,85 нм указывает на то, что размер единичных элементов структуры геля, обеспечивающих наличие данных пор, составляет порядка 4–5 нм. Аналогичная оценка размеров твердой фазы геля получена при помощи малоуглового нейтронного рассеяния [3, 4].

Исследование пористости цементного камня методами адсорбции бензола и ртутной порометрии позволило выявить наличие большого объема пор радиусом 3–5 нм (рис. 2). В свою очередь это подтверждает предположение об агрегации единичных элементов геля: кластеры размером 40–50 нм обеспечивают формирование пор указанного радиуса, что согласуется с экспериментальными данными [5].

Относительно пор большего размера однозначной картины нет (см. рис. 2). Тем не менее можно выделить общие для всех составов диапазоны размеров пор: 7–10, 12–16, 21–26, 41–44, 70–73 нм. Причем объем данных пор определяется технологическими факторами. Данные факторы могут быть учтены при разработке модели структуры для различных частных случаев. Ниже рассматривается построение модели бездобавочного цементного камня нормально-влажностного твердения.

На основании вышеизложенного разработана двухуровневая численная модель структуры С–S–Н (28-суточного возраста). Модель первого уровня реализует представление о структуре геля как коллоидной системе, состоящей из отдельных частиц диаметром 4,4 нм, обеспечивающих преобладающее количество пор радиусом около 0,85 нм (рис. 3). При этом не исключается слоистый характер внутреннего строения отдель-

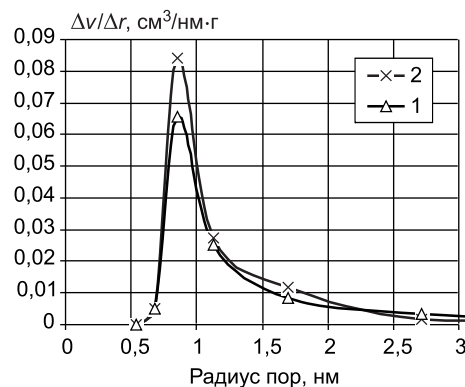


Рис. 1. Дифференциальное распределение пор в цементном камне (возраст 28 сут), определенное методом ПМР

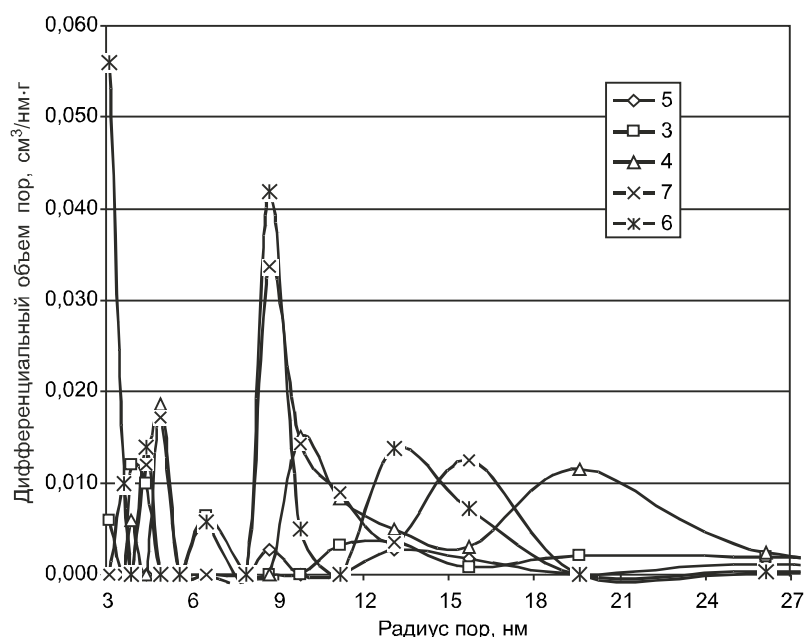


Рис. 2. Дифференциальное распределение пор в цементном камне, определенное при помощи ртутной порометрии (номера составов согласно таблице)

ных частиц, но данное обстоятельство в расчетах не учитывается из-за чрезвычайно малого межслоевого пространства.

Количество пор радиусом 0,85 нм определяется их удельной поверхностью, исходя из чего пористость модели составила 24%.

Модель структуры геля второго уровня построена с учетом положений о фрактальном строении цементного геля, т.е. также представляет собой совокупность отдельных частиц твердой фазы, но диаметром 40 нм (рис. 4). Данная модель охватывает диапазон пор от 4 до 70 нм. Пористость системы, включая объем пор модели первого уровня, составляет 35%.

Для описания механического поведения материалов представляется обоснованным использование метода конечных элементов (МКЭ), который позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние цементного камня как многокомпонентной структуры и определить его интегральные свойства. Поэтому дальнейшими этапами процедуры созда-

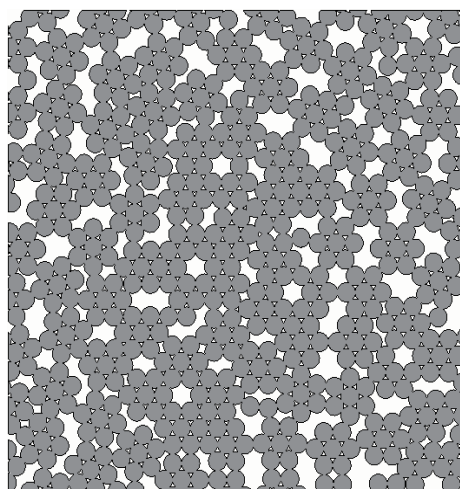


Рис. 3. Модель структуры геля первого уровня (размер модели 200 200 нм)

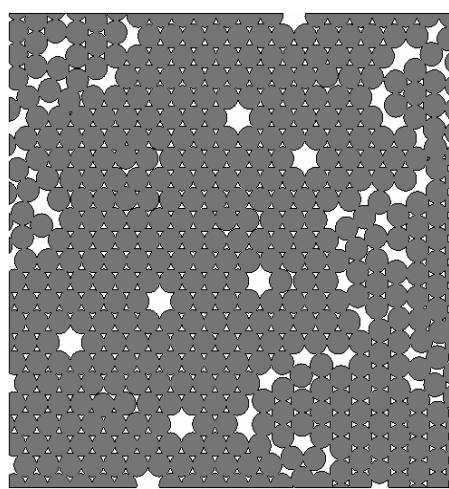


Рис. 4. Модель структуры геля второго уровня (размер модели 800 800 нм)

ния расчетной модели являются представление структуры в виде совокупности конечных элементов, присвоение физических свойств каждому структурному элементу, задание условий закрепления краев пластинки, приложение нагрузки, т. е. реализация алгоритма МКЭ. Эта часть создания расчетной модели связана с использованием программного комплекса ANSYS.

В результате получена конечно-элементная модель, содержащая более чем 50000 двумерных элементов PLANE 183. Непрерывное (перколяционное) сопряжение частиц твердой фазы обеспечивает последующее использование метода конечных элементов при расчете физико-механических свойств материала.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона при задании физических свойств материала конечных элементов первой модели приняты согласно экспериментальным оценкам ($E = 64,5$ ГПа, $\nu = 0,3$ [5]) и приведены к двумерному представлению.

Так как внутреннее строение элементов твердой фазы модели второго уровня является отражением модели первого уровня, то и физические свойства материала отдельных частиц второго уровня составляют свойства всей системы первого уровня. Исходя из этого модуль упругости материала твердой фазы принят равным 22,6 ГПа, а коэффициент Пуассона 0,34, которыми характеризуется система первого уровня.

Следует отметить, что изложенное выше является первым этапом в создании более сложной конечно-элементной модели, предназначенной, например, для моделирования процессов влажностной усадки цементного камня.

Применительно к данной модели нами сформулированы и реализованы вычислительные методы, моделирующие механизмы влажностной усадки. Данные механизмы основаны на принципах термодинамического равновесия системы с окружающей средой и подразумевают в качестве основных факторов, определяющих величину усадочных деформаций, капиллярное давление и изменение свободной поверхностной энергии [6].

Расчет начинается с модели первого уровня. Определяются максимальный радиус пор, заполненных водой, и капиллярное давление в них при соответствующем значении относительной влажности среды. Полученные значения капиллярного давления реализуются в компьютерной модели структуры геля в виде внешней нагрузки, прикладываемой к граням конечных элементов, лежащих по поверхностям пор.

Далее вычисляются значения изменения поверхностной энергии и деформации, обусловленные ее действием. Расчеты производятся по известной величине удельной поверхности осушенных пор. Полученные деформации от поверхностной энергии задаются твердой фазе модели структуры.

Аналогичный расчет усадочных деформаций проводится для модели второго уровня. Отличием является то, что к деформациям при каждом расчетном уровне влажности, определенным для данной модели, добавляются деформации модели первого уровня.

Общие результаты расчета собственных деформаций системы под действием влажностной усадки в графическом виде представлены на рис. 5.

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что влияние капиллярной усадки ограничено в области относительной влажности $\varphi = 0,35 - 1,0$, а наибольшее влияние данная составляющая оказывает в диапазоне $\varphi = 0,85 - 1,0$. Анализируя степень влияния усадки от поверхностной энергии, можно отметить резкий прирост деформаций при влаж-

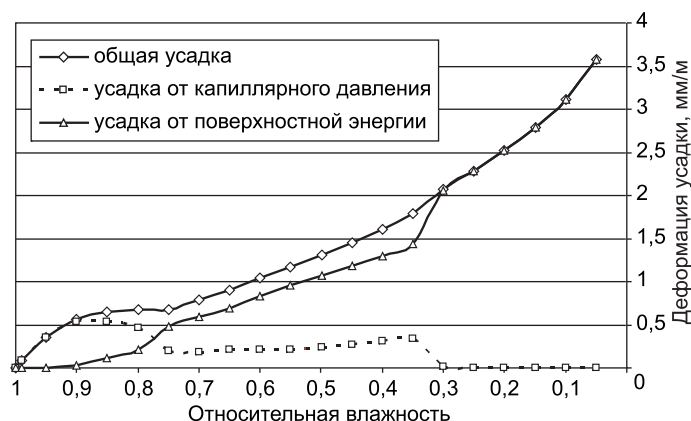


Рис. 5. Расчетные усадочные деформации

ности $\phi = 0,3 \dots 0,35$, что соответствует осушению пор радиусом 0,8–1 нм, преобладающих в модели первого уровня.

Степень влияния поверхностной энергии на деформации влажностной усадки весьма значительна и не ограничивается диапазоном относительной влажности 20–40%, как предполагалось ранее. Так как капиллярная усадка не превышает 0,5 мм/м и наблюдается только при достаточно высоких значениях относительной влажности, то она не может являться фактором, определяющим деструкцию структуры. Следует отметить, что предложенные модели еще не учитывают наличие фаз, ограничивающих усадку, поэтому абсолютные величины деформаций значительно превышают экспериментально определенные значения.

К сожалению, полученные расчетные данные нельзя напрямую сопоставить с экспериментальными, которые невозможно получить для исследуемого структурного уровня. С качественной точки зрения адекватность расчетных моделей можно оценить на основе экспериментальных данных усадки цементного камня (в возрасте 28 сут). В связи с этим проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 6.

В целом для всех составов характер зависимости усадочных деформаций от относительной влажности примерно одинаковый. Различия в абсолютных величинах обусловлены не нано-, а микроуровнем структуры материала (не охватываемым предложенной моделью).

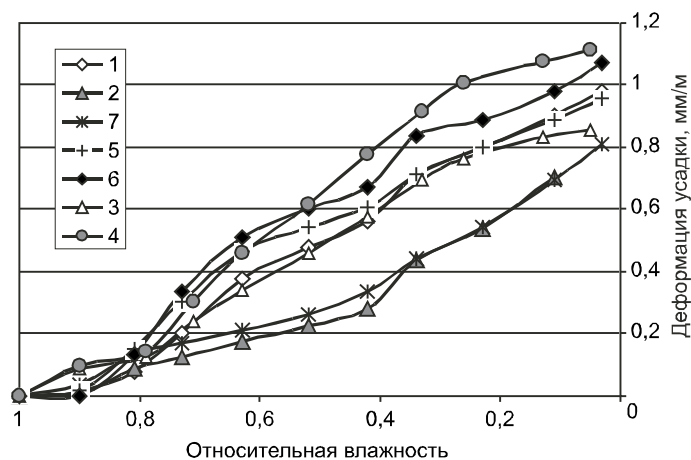


Рис. 6. Деформации влажностной усадки (номера составов согласно таблице)

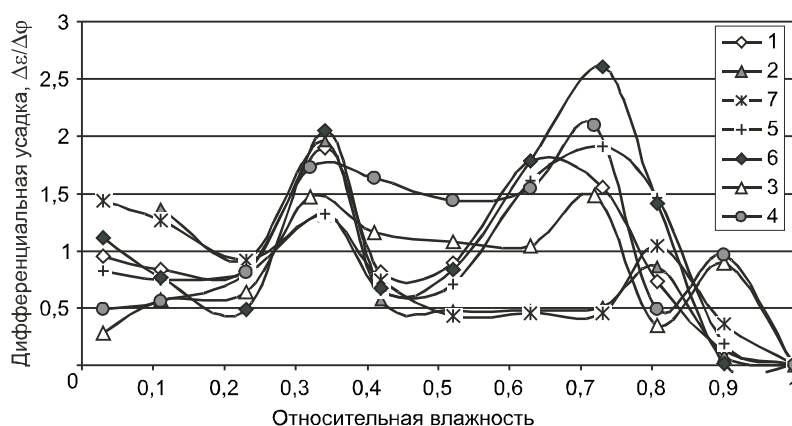


Рис. 7. Дифференциальная усадка по экспериментальным данным

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных удобнее всего воспользоваться представлением зависимости усадки от относительной влажности в дифференцированном виде (рис. 7).

Для всех составов характерно наличие двух основных пиков. Первый пик соответствует влажности 0,7–0,8, а второй — 0,3–0,4. Причем у пропаренных составов первый пик смещается ближе к 0,8, а у беспропарочных — к 0,7. Для составов с пониженным в/ц наблюдается дополнительный пик при влажности 0,9.

Сравнение с графиком дифференцированной усадки, полученным по расчетным данным (рис. 8), позволяет сделать вывод о наличии сходимости экспериментальных и расчетных данных с качественной точки зрения: наблюдаются два характерных пика, упомянутых выше.

Таким образом, сопоставление расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности разработанной имитационной модели цементного камня на уровне фазы С–С–Н. Экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии технологических факторов (в/ц, условия твердения, модифицирующие добавки), а также вида цемента на величину усадочных деформаций. Эти факторы определяют формирование порового пространства цементного камня и могут быть учтены при разработке модели структуры для частных случаев.



Рис. 8. Дифференциальная усадка согласно расчетным данным

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xi Y. Relationships Between Microstructure and Creep and Shrinkage of Cement Paste/Y. Xi, H. M. Jennings//Materials Science of Concrete III, American Ceramic Society, Westerville, OH, 1992.— P. 37–69.
2. Бетехтин В. И. Концентрация микропор в цементном камне и их распределение по размерам/В. И. Бетехтин и др.//Цемент.— 1989.— № 10.— С. 8–10.
3. Allen A. J. Analysis of C-S-H gel and cement paste by small-angle neutron scattering/A. J. Allen, J. J. Thomas//Cement and Concrete Research.— 2007.— V. 37.— P. 319–324.
4. Jennings H. M. A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste/H. M. Jennings, J. J. Thomas, J. S. Gevrenov, G. Constantinides, F.-J. Ulm//Cement and Concrete Research.— 2007.— V. 37.— P. 329–336.

5. Tennis P. D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes/P. D. Tennis, H. M. Jennings//Cement and Concrete Research.— 2000.— V. 30.— P. 855–863.
6. Комохов П. Г. Моделирование структуры и усадки цементных композиций/П. Г. Комохов, А. М. Харитонов//Матеріали до 46-го міжнародного семінару з моделювання і оптимізації композитів — МОК' 46. Одеса 26–27 квітня 2007.— Одеса: Астропринт, 2007.— С. 3–6.

© Комохов П. Г., Харитонов А. М., 2008

Получено 26.11.07

УДК 691.54 : 541.18

Г. А. ФОКИН, д-р техн. наук, проф., Я. А. ЛОШКАНОВА, асп. (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ

Статья посвящена изучению влияния на свойства цементного камня жидкости затворения, активизированной акустическим полем. Рассмотрены две физические модели, объясняющие механизм протекания высокоэнергетичных процессов. Сопоставление свойств цементных композиций, затворенных акустически активированной водой, убеждает в более высокой эффективности способа водоподготовки.

Вода является активным компонентом большинства технологических процессов, в том числе при использовании вяжущих веществ для изготовления различных искусственных камневидных материалов. Знание физико-химических основ энергетических процессов, протекающих в водных структурах при воздействии внешних физических факторов, позволяет определить пути и технологии управления энергетическим состоянием водных систем — их активацией.

Исходя из новых физических представлений о воде как гетерогенной ион-кристаллической системе, под термином «активация» следует понимать процесс изменения структурно-физических, энергетических и магнитно-электрических свойств гетерофаз связанного состояния вещества в составе жидкофазных систем, включая воду, водные растворы, жидкие кристаллы, аморфные материалы, полимеры и металлы под действием физических полей. Это открывает широкие возможности для изменения свойств производимых материалов путем активации жидкофазных систем используемого сырья [1–5].

Существует много различных способов изменения реакционной способности воды и водных систем путем физико-химического воздействия. Среди них можно выделить несколько: механохимическая активация, баротермическая, магнитная, электрохимическая. В данной статье рассмотрена акустическая активация водной системы.

Как показал анализ патентной и научно-технической литературы, исследования по применению такой воды в качестве жидкости затворения строительных композиций практически никем не проводились.

Сущность физико-химических процессов, происходящих в воде при воздействии на нее акустического поля, в настоящее время изучена недостаточно и является предметом дальнейших исследований.

Настоящая статья посвящена изучению влияния на свойства цементного камня жидкости затворения, активированной переменным акустическим полем [6].

Инициирование большинства звукохимических реакций в водном растворе под действием акустических колебаний обусловлено возникновением кавитации. Кавитация — это нарушение сплошности жидкости, связанное с образованием, ростом, осциллированием и схлопыванием парогазовых пузырьков в жидкости. Необходимо отметить, что сплошность среды нарушается только при достижении некой пороговой частоты звуковых колебаний. Очевидно, что лишь часть энергии акустических волн, распространяющихся в жидкости, расходуется на образование кавитационных пузырьков. Остальная часть идет на возникновение микропотоков, нагревание жидкости, образование фонтана и распыление жидкости (рис. 1).

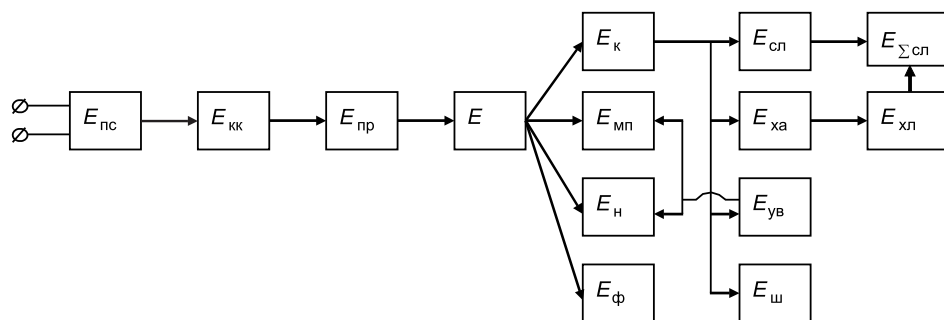


Рис. 1. Схема превращения энергии при создании кавитации в акустическом поле водной среды

$E_{пс}$ — энергия, потребляемая из сети; $E_{кк}$ — энергия в колебательном контуре генератора; $E_{пр}$ — энергия, преобразуемая в акустической системе; E — общая акустическая энергия, вводимая в жидкость объемом V и затраченная на создание кавитации (E_k); образование микропотоков ($E_{мп}$); нагревание жидкости (E_n); образование фонтана и распыление жидкости (E_f); образование свободных радикалов ($E_{ха}$) (химико-акустическая энергия); создание ударных волн ($E_{ув}$); возникновение шума ($E_{ш}$); возбуждение сонолюминесценции ($E_{сл}$); возбуждение хемилюминесценции ($E_{хл}$); $E_{\Sigma сл}$ — суммарная энергия сонолюминесцентного и вторичного, хемилюминесцентного, свечения, которое наблюдается визуально и может регистрироваться фотоэлектронными приборами [6]

В момент схлопывания давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и 1000°C). После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве. Модель физико-химических процессов, происходящих в кавитационном пузырьке и прилегающем к нему объеме жидкости, представляют в следующем виде [6]. В кавитационную полость могут проникать пары воды, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы или молекулы нелетучих растворенных веществ. Выделяющейся в процессе схлопывания пузырька энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной полости.

Существует множество моделей движения одиночного сферического пузырька, в той или иной мере учитывающие термодинамические свойства жидкостей и газов. Природа экспериментально наблюдающихся высокоэнергетических процессов при кавитации до настоящего времени не ясна.

В работе [7] предлагается в физической модели учитывать параметр нелинейных пульсаций кавитационного пузырька: конечную скорость релаксации дипольных молекул жидкости.

Физический механизм образования неравновесного состояния дипольного «облака» в окрестности сжимающегося пузырька представлен на рис. 2.

При неподвижном пузырьке полярные молекулы в узком слое жидкости вблизи раздела фаз ориентированы определенным образом, зависящим от сил взаимодействия между молекулами жидкости и газа (рис. 2, а).

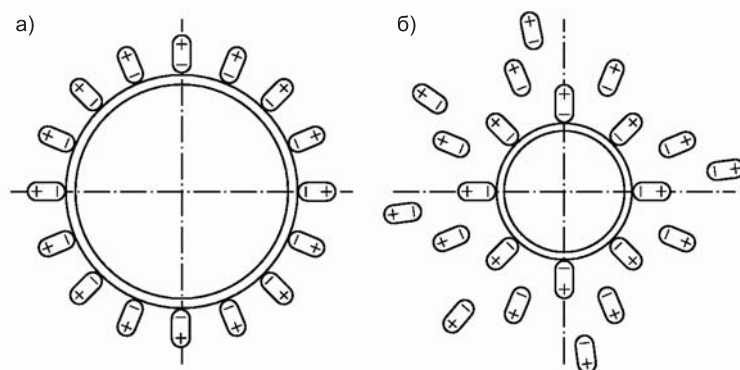


Рис. 2. Механизм образования «виртуального» заряда пузырька, равного реальному заряду, сообщаемому проводящей сфере для сохранения ориентации диполей

a — пузырек неподвижен, *б* — быстро сжимается

Процесс сжатия кавитационного пузырька и особенно последняя его стадия протекают с чрезвычайно высокой скоростью. По данным разных исследователей, скорость движения стенки пузырька составляет от 400 до 1500 м/с, характерное время конечной стадии сжатия — 10^{-6} – 10^{-7} с, а длительность световой вспышки сонолюминесценции — всего десятки пикосекунд.

Высокая скорость сжатия пузырька не позволяет молекулам жидкости переориентироваться, что приводит к образованию «облака» ориентированных диполей (рис. 2, б). Это состояние системы «жидкость — пузырек» является неравновесным и обладает избыточной энергией, получаемой от внешнего источника (акустического поля).

Необходимо отметить принципиальное отличие общепринятого в настоящее время механизма протекания высокоэнергетичных процессов при кавитации от того, которое следует из предложенной модели. Оно заключается в том, что энергия акустического поля концентрируется не в виде энергии сжатого в пузырьке газа, а в виде энергии электрического поля ориентированных дипольных молекул. Следовательно, высокоэнергетичные процессы происходят не в газовой фазе, а в жидкой, в непосредственной близости от пузырька. Поэтому даже в случае чисто вакуумного пузырька должны проявляться эффекты акустической кавитации [7].

В заключение отмечается, что действие сил электростатического противодействия качественно схоже с действием вязкости в том смысле, что быстрое сжатие пузырька требует значительно больших затрат энергии, чем медленное. Однако зависимость электростатических сил от радиуса пузырька значительно сильнее (R^{-4} против R^{-1} для сил вязкости). Поэтому очевидно, что наиболее сильно электростатический эффект будет проявляться для пузырьков малого радиуса, или, что то же самое, для высокочастотного ультразвука. Пузырьки же большого равновесного радиуса, резонанс которых происходит на низких звуковых частотах, менее подвержены влиянию электростатического противодействия, поэтому в данном случае возможны кавитационные эффекты внутри газового пузырька.

Независимо от природы растворенных веществ звук действует на одно вещество — на воду, что приводит к изменению ее физико-химических свойств: увеличению рН, электропроводности воды, увеличению числа свободных ионов и активных радикалов, структуризации и активации молекул.

Активное состояние воды метастабильно и сохраняется в течение определенного времени — периода релаксации, по истечению которого вода возвращается в обычное состояние. Поскольку этот период длится достаточно долго (до нескольких часов), то акустическая активация воды может быть использована в технологии управления энергетическим состоянием водных систем.

Наблюдаемое в эксперименте изменение рН воды на 26% связано с изменением ионного состава и структуры воды. При этом в результате разрыва водородных связей могут содержаться более мелкие ассоциаты. При неизбежном наличии примесей могут образоваться сольватированные структуры.

Проведенные исследования методом акустической эмиссии (АЭ) позволяют объяснить наблюдаемые явления с позиции существующих взглядов на формирование структуры гетерогенных систем [8]. Выявлено три области твердения, которые существенно влияют на прочностные и другие эксплуатационные характеристики. Первая относится к периоду затворения цемента водой, когда идет самопроизвольный процесс коагуляции, в результате чего происходит образование более крупных вторичных частиц, состоящих из скопления более мелких — первичных. Рост частиц приводит к образованию сгустков или хлопьев (флоккул). При активной коагуляции во всем объеме дисперсной среды возникает рыхлая пространственная коагуляционная структура. Такие структуры пересекают гидратирующие силикатные и алюмоферритные образования, раздвигают новообразования из них и тормозят процесс уничтожения последних. Для повышения прочности цементных изделий и улучшения их функциональных характеристик необходим распад образовавшихся агрегатов на первичные частицы и переход коагеля в гель.

Во время проведения исследований замечено, что вода, обработанная акустическим полем, обладает пластифицирующими свойствами, поэтому были проведены экспериментальные исследования влияния акустически активированной воды на структуру и свойства бетона.

На рис. 3 приведены кривые изменения прочности на сжатие цементного камня нормальной плотности в зависимости от продолжительности обработки воды затворения.

На основе активированной воды готовили цементное тесто с $B/C = 0,3$, из которого формовали образцы, твердеющие при нормальных условиях (вольский цемент М400; вода водопроводная ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая»). Активация воды ускоряет процессы схватывания и твердения цемента в начальные сроки. Изменение прочности образцов цементного камня в возрасте 1, 7, 14, 28 сут от времени обработки жидкости носит экстремальный характер. Как показывают экспериментальные данные, максимальная скорость структурообразования в начальный период достигается при 3–4-часовой обработке воды акустическим полем.

На рис. 4 и 5 приведены поверхности разрушения образцов растворных кубов, полученных при значениях $C/P = 1/1$ и $B/C = 0,6$ после их испытания на сжатие. У образцов, затворенных необработанной водой, имеет место развитая объемная макро- и микропористость. У образцов,

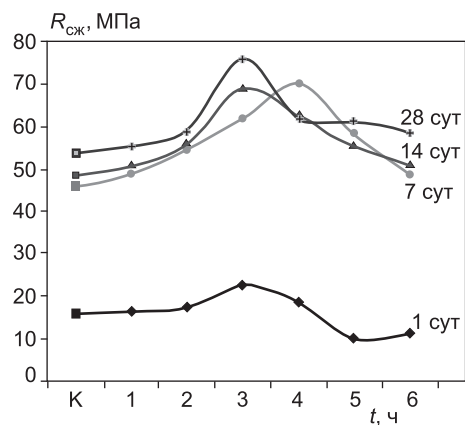


Рис. 3. Изменение прочности цементного камня от времени обработки жидкости затворения в возрасте 1, 7, 14, 28 сут

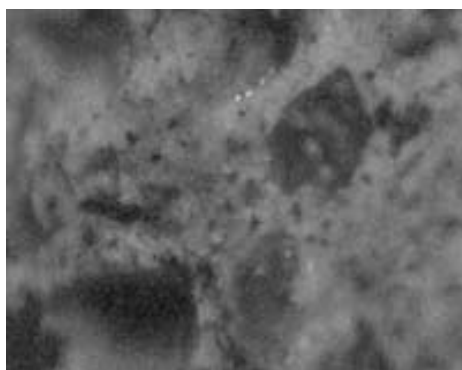


Рис. 4. Поверхность разрушения образца, изготовленного из водопроводной воды

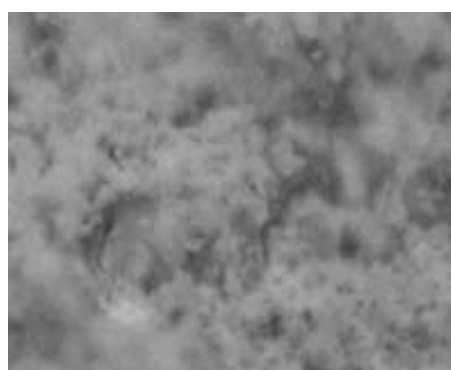


Рис. 5. Поверхность разрушения образца, изготовленного из воды, обработанной акустическим полем

обработанных активированной водой и имеющих аналогичный состав при прочих равных условиях, наблюдается хорошо сформировавшаяся структура, имеющая минимальное количество пор.

Сопоставление свойств цементных композиций, затворенных акустически активированной водой, убеждает в более высокой эффективности способа водоподготовки.

В заключение необходимо отметить, что совершенствование технологии управления энергетическим состоянием водных систем связано с изучением структурно-деструктивных процессов, происходящих в воде, влияния частоты акустического поля на свойства жидкости затворения и соответственно на свойства строительных материалов на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов Р. Б. Инновационный потенциал нанотехнологий в производстве строительных материалов/Р. Б. Родионов//Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.— 2006.— № 8.— С. 72–75.
2. Семенова Г. Д. Влияние асимметричного переменного тока на жидкость затворения цементных систем /Г. Д. Семенова, В. Д. Семенов, С. В. Образцов//Изв. вузов. Строительство.— 1999.— № 10.— С. 31–33.
3. Алтыкис М. Г. Повышение физико-химических свойств бетонов электрохимической активацией воды затворения/М. Г. Алтыкис//Изв. вузов. Строительство.— 1992.— № 3.— С. 63–66.
4. Лазаренко Л. Н. Активация воды в производстве бетона/Л. Н. Лазаренко, Г. В. Ложка, Д. М. Оноприенко//Изв. вузов. Строительство.— 1990.— № 12.— С. 55–57.
5. Авраменко С. В. Электромагнитная активация связанных состояний воды в процессах твердения цементных паст/С. В. Авраменко, А. А. Стехин, Г. В. Яковлева и др.//Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.— 2002.— № 12.— С. 28–30.
6. Маргулис М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов/М. А. Маргулис.— М.: Высш. шк., 1984.— 272 с.
7. Смородов Е. А. Динамика кавитационного пузырька в полярной жидкости/Е. А. Смородов// Письма в ЖТФ.— 2006.— Т. 32.— Вып. 10.— С. 34–40.
8. Фокин Г. А. Акустика в строительстве/Г. А. Фокин, В. А. Смирнов.— Пенза: ПГУАС, 2006.— 360 с.

© Фокин Г. А., Лошканова Я. А., 2008

Получено после доработки 02.11.07

Е. В. КОРНЕЕВА, асп., С. И. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, проф. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

БЕСЦЕМЕНТНАЯ ЗАКЛАДОЧНАЯ СМЕСЬ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ И УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Определены возможности создания новой закладочной смеси из вторичных минеральных ресурсов (отходов промышленности) в связи с проблемой в области утилизации отходов производства.

Отходы промышленных гигантов — горнодобывающих, металлургических и теплотехнических представляют большую экологическую опасность. Образование огромного количества отходов на предприятиях данной инфраструктуры — проблема, требующая немедленного решения. Разработка нового состава и технологии закладочной смеси для выработанных пространств с использованием исключительно отходов промпредприятий объединяет экономические (создание дешевой закладочной смеси) и экологические (обеспечение равновесия окружающей среды) проблемы.

Цель выполняемой научно-исследовательской работы заключается в разработке состава и технологии производства закладочной смеси из вторичных минеральных ресурсов. В составах закладочных смесей выработанных пространств шахт и рудников предлагается использовать техногенные отходы — шлаки сталелитейного производства текущего выхода и горелые породы шахтных отвалов. В качестве активизатора применять шлам — нейтрализованный раствор отработанных электролитов кислотных стартерных и тяговых аккумуляторов предприятий горно-металлургического комплекса и автопредприятий.

В исследованиях использовался мартеновский шлак ООО «Сталь НК» текущего выхода. Были исследованы химический и фазовый состав этих шлаков. В результате химического анализа установлено существенное наличие в шлаках оксидов железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$), магния, кальция, алюминия и незначительное содержание оксида кремния.

Рентгеноструктурный анализ показывает, что исследуемый шлак содержит преимущественно силикат (Ca_2SiO_4), обладающий вяжущими свойствами, и алюмосиликат (Al_2SiO_5), небольшую примесь MnO и соединение $\text{Mn} - \text{Fe} - \text{Si} - \text{O}$, часть магнетита (Fe_3O_4) и чистого железа (Fe). В пробе присутствуют значительные кусочки железа и нерасшифрованная примесь.

Хотя эти минералы почти полностью закристаллизованы, имеют большую плотность упаковки, упорядоченное строение, такой минеральный состав указывает на способность шлака вступать в химические реакции, также наблюдается незначительное количество свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{своб}}$), который является резервом для повышения активности шлакового вяжущего.

Наличие двухкальциевого силиката, обладающего вяжущими свойствами и являющегося составной частью клинкера портландцемента, дает возможность разработки технологии выпуска бесцементного (бесклинкерного) вяжущего из текущего (свежего) шлака, так как в нем содержится большее количество двухкальциевого силиката, чем в отвальном.

Горелые породы шахтных отвалов по содержанию доломитов, известняков и глинистых примесей схожи с золой и микрокремнеземом, что позволяет применять их в качестве добавки в состав вяжущего, так как

мартеновский шлак текущего выхода относится к группе «ультраосновных» материалов (коэффициент основности шлака более 3) $K_{осн} = 4,5$. Горелые породы содержат повышенное количество SiO_2 и Al_2O_3 , $K_{осн} = 0,1$ и относятся к группе «ультракислых».

Наличие в вещественном составе горелых пород активных разновидностей железа, алюминия и кремния, возникающих вследствие нарушения молекулярных связей глинистых минералов при обезвоживании и диспергации частиц в процессе самообжига, обуславливает высокую гидравлическую активность.

В частности, минералогический состав горелых пород Кузбасса представлен следующим примерным соотношением главных составляющих: глинистые сланцы — 48%, песчанистые сланцы — 27, песчаники — 20, углистые сланцы — 3, карбонатные породы — 2%. Для определения гранулометрического состава из терриконилов методом квартования была взята проба, рассеяна через сито с ячейками 5, 10 и 40 мм. Результаты показали, что в породе больше всего содержится мелкой фракции — менее 5 мм.

ВНИИОСуглем совместно со специализированными организациями строительного профиля были проведены лабораторные и опытно-промыш-

ленные работы по использованию шахтных, горелых пород в производстве строительных материалов и изделий на их основе. Установлено, что после дробления и классификации горелой породы получается щебень и горелый песок различных фракций с достаточно высокими физико-механическими свойствами (табл. 1).

Химический состав горелых пород шахты Абашевская приведен в табл. 2. Наличие

Таблица 1
Физико-механические свойства горелых пород

Наименование показателей	Перегоревшие породы шахтных отвалов (горелые породы)
Истинная плотность, г/см ³	2,4–2,6
Насыпная плотность, г/см ³	1,4
Средняя плотность, г/см ³	1,8
Временное сопротивление сжатию, МПа	30,0–130,0

примесей и различие температурных режимов горения влияет на химический состав горельников, поэтому в табл. 2 дан усредненный химический состав пробы.

Таблица 2
Химический состав горелых пород

Содержание элементов, %								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	FeO	$K_2O + Na_2O$	П.п.п.
59,3–77,4	9,0–20	4–5,98	0,7–11,49	0,3–2,4	0,2–0,4	0,35–0,43	8,6–9,96	0,61–3,72

Для создания реакционноспособных минералов при разработке вяжущей композиции на основе молотого мартеновского шлака текущего выхода также необходима добавка-активизатор для активации поверхности шлака и горелой породы.

Введение сульфатных добавок-активизаторов на прочность шлакового вяжущего рассмотрено в работе [1]. При исследовании вяжущих свойств мартеновских шлаков Магнитогорского металлургического комбината было установлено, что при обработке шлака растворами кислот помимо стабилизации структуры шлака к распаду образуются гидросиликаты кальция, в результате чего наблюдается рост прочности системы. По результатам исследований сделано заключение — возможность использования молотого мартеновского шлака в качестве вяжущего может

быть обеспечена применением добавок. Добавки для данной цели должны обладать следующими свойствами:

- при затворении шлака водным раствором добавки она должна возможно полнее связывать свободный оксид кальция;
- продукты, полученные в результате химического взаимодействия оксида кальция с добавкой, должны активизировать гидратацию силикатов кальция или самостоятельно образовывать кристаллический каркас, который впоследствии будет обрастать гидросиликатами кальция.

Таким требованиям отвечают легкорастворимые соли некоторых амфотерных металлов с сильными кислотами. К ним относятся соли Al, Cu, Zn, Fe и др. При выборе добавки в качестве активизатора применяли $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ТУ 6-09-2247-77, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ГОСТ 4148-78 и нейтрализованный травильный раствор Магнитогорского калибровочного завода.

Изучив результаты исследований влияния сульфатных добавок-активизаторов на мартеновские шлаки Магнитогорского металлургического комбината, проведен анализ отходов промышленных производств горно-металлургической инфраструктуры Кузбасса для поиска возможных компонентов альтернативного сульфатного активизатора для разрабатываемого вяжущего. В качестве техногенного сырья с аналогичными свойствами сульфатного возбuditеля твердения выбран нейтрализованный отработанный электролит тяговых и стартерных кислотных аккумуляторов.

Нейтрализованный отработанный электролит кислотных аккумуляторов, так называемый шлам, представляет собой обводненный гель, обладающий высокой пластичностью. Полученный в результате нейтрализации известью шлам имеет в своем составе легкорастворимую соль амфотерного металла — свинца с серной кислотой, чем объясняется наличие в нем сульфата этого металла.

Химический состав шлама из приемного резервуара-накопителя отделения нейтрализации шахты Абашевская приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав шлама

№ п.п	Наименование показателей	Характеристика пробы
1	Плотность раствора, г/см ³	1,207
2	Показатель активности водородных ионов (рН раствора)	< 1,0
3	Среда	Кислая
4	Концентрация раствора, %	28,3
5	Содержание в растворе сульфат-ионов (SO_4^{2-}), %	28,23
6	Содержание в растворе ионов свинца (Pb^{2+}), %	0,139

Для определения состава вяжущего производился расчет соотношения компонентов (шлак:горелые породы) [2]:

$$\text{Сырье с } K_{\text{осн}} > 1 / \text{Сырье с } K_{\text{осн}} < 1.$$

В числителе указан химический состав шлака, в знаменателе — химический состав горелой породы.

$$\frac{[(\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O}) - (n \cdot 0,93\text{SiO}_2 + 0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3) - \rightarrow - (n \cdot 0,93\text{SiO}_2 + 0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3)]x}{-(\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O})} = 1,$$

где n — заданное для вяжущего состава значение $K_{осн} = 1,6$;
 x — количество массовых частей сырья с $K_{осн} > 1$ (шлак) на одну весовую часть сырья с $K_{осн} < 1$ (горелая порода).

Расчет показал, что на 1 часть шлака необходимо добавить 0,33 части горелой породы.

Объем шлака, требуемый в качестве добавки к молотому мартеновскому шлаку, подбирался экспериментально. Влияние содержания шлака на прочность шлакового вяжущего в возрасте 7 сут показано в табл. 4.

Таблица 4

Влияние количества добавки на прочность шлакового вяжущего

Содержание шлака, %	1	4	6	8	9	10	12
Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте 7 сут	1,46	2,6	3	3,42	4	4,7	3,73

Для определения основных характеристик полученного бесцементного шлакового вяжущего на основе мартеновского шлака текущего выхода ОАО «Сталь НК» и добавок-отходов ОАО шахты «Абашевская» ОУК «Южкузбассуголь»: горелых пород шахтного отвала и активизатора-затворителя (нейтрализованного отработанного электролита кислотных аккумуляторов из резервуара-накопителя), так называемого шлака, в Испытательном центре «Строительные материалы и конструкции» «Кузбасс» (ООО ИЦ СММК «Кузбасс») Органа сертификации строительной продукции (ОС «Кузбасстройсертификация») было проведено опытное формование образцов $4 \times 4 \times 16$ см. Образцы выдерживались в естественных условиях при температуре (20 ± 3) С и относительной влажности воздуха $(95 \pm 5)\%$, ГОСТ 310.4-81*. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТов 310.2, 310.3, 310.4.

Результаты эксперимента приведены в табл. 5.

Активность вяжущего на основе молотого мартеновского шлака текущего выхода с добавкой горелой породы и шлака в 28-суточном возрасте достигает 4,86 МПа.

Таблица 5

Характеристика шлакового вяжущего

Характеристика	Свойства, результаты испытаний
Марка, кг/см ²	50
Состав вяжущего, %:	
мартеновский шлак текущего выхода	70...78
горелые породы шахтных отвалов	23...25
шлак	7
Тонкость помола (проход через сито с сеткой № 008 по ГОСТу 6613), %	47,5
Водошламовое отношение	0,34
Расплыв конуса, см	16,2
Насыпная плотность в рыхлом состоянии, кг/м ³	1660
Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/м ³	1830
Начало схватывания, ч	24
Конец схватывания, ч	50
Равномерность изменения объема: кипячением лепешек в воде	Выдерживает, трещины, искривления отсутствуют
Прочность при естественном твердении 7 сут, МПа:	
при растяжении на изгиб	1,6
при сжатии	4,76
Прочность при естественном твердении 28 сут, МПа:	
при растяжении на изгиб	1,66
при сжатии	4,86

Достоинства полученной вяжущей композиции в том, что она составлена исключительно на основе техногенных отходов, без специального обжига и тепловой обработки исходных компонентов и может быть использована для закладки выработанных пространств шахт и рудников Кузбасса в качестве литой закладочной смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин К. М. Стабилизация структуры и свойств мартеновского шлака для повышения эффективности его использования в строительстве: Дис. ... канд. техн. наук / К. М. Воронин. — Магнитогорск, 1997. — 130 с.
2. Боженов П. И. Комплексное использование минерального сырья и экология / П. И. Боженов. — М.: Изд-во АСВ, 1994. — 264 с.

© Корнеева Е. В., Павленко С. И., 2008

Получено после доработки 08.11.07

УДК 691 : 699.86 : 678.027

Е. Е. МОЛЬКОВА, ассист., И. А. ХРИСТОФОРОВА, А. И. ХРИСТОФОРОВ, доктора техн. наук, профессора (Владимирский государственный университет)

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Рассмотрено применение полимерных вспененных материалов в качестве теплоизоляции в строительстве. Проведено сравнение двух видов ячеистых пластмасс, применяемых в качестве теплоизолирующего слоя в стеновой теплоизоляции. Приведены экспериментальные данные разработанного вспененного материала на основе поливинилхлорида и показана эффективность его использования в качестве теплоизолирующего слоя в слоистых конструкциях.

В условиях развивающегося строительства в России возник дефицит высококачественных теплоизоляционных материалов, связанный с тем, что спрос на них превышает предложение. Благодаря низкому коэффициенту теплопроводности наиболее предпочтительными теплоизоляторами являются ячеистые пластмассы. В настоящее время на рынке строительных материалов они представлены полистирольными (ППС) и карбамидными пенопластами.

Полистирольные пенопласты получают беспрессовым и экструзионным способами. Выпускается ППС различных отечественных и импортных марок. Одна из ведущих зарубежных производителей фирма The Dow Chemical Co. (Англия) выпускает пять типов экструзионного ППС под общей торговой маркой STYROFOAM™: ROOFMATE™ — для крыш, WALLMATE™ — для стен, FLOORMATE™ — для полов, PERIMATE™ — для фундаментов, STYROFOAM™ — для других теплоизоляционных покрытий [1]. На сохранение теплоизоляционных качеств пенопластов главным образом влияет его влагостойкость. Водопоглощение беспрессового ППС составляет 25%. Экструзионный ППС имеет однородную структуру с мелкими замкнутыми порами, его водопоглощение не превышает 2 об. %. В России производят самозатухающий ППС марок ПСБ-С-15, ПСБ-С-25, ПСБ-С-35, ПСБ-С-50, отличающихся плотностью материала и областью применения. Добавляемые антипирены подавляют самостоятельное горение пенопласта, но при возгорании ПСБ-С образуются капли, отделяющиеся от общей массы материала. ППС не подвержен гниению. Согласно ГОСТу 15588-86 «Плиты пенополистирольные. Технические усло-

вия» ППС используется для тепловой изоляции в качестве среднего слоя строительных конструкций при отсутствии контакта с внутренними помещениями.

Карбамидные пенопласты на российском рынке представлены пенопластом нового поколения под названием «Пеноизол» (ТУ 2254001-45581572-98 и ТУ 2254-001-33000727-2000), производимым беспрессовым способом. «Пеноизол» производят в виде плит толщиной 50–200 мм или «крошки». Особенность производства материала заключается в возможности заливки его в жидком виде непосредственно на строительной площадке в пустотелые профили. Отсутствие способности к развитию стабильного процесса горения, к самостоятельному горению после отключения источника зажигания и к образованию расплава при горении свидетельствует о пониженной пожарной опасности «Пеноизола». Материал паропроницаем и способен предотвращать распространение насекомых-паразитов.

Основным недостатком использования этих органических пен является высокая горючесть, малая долговечность.

Свойства ячеистых пластмасс зависят от их плотности и характера структуры, а также от свойств полимера и вспенивающего газа. Физико-механические свойства пенопластов улучшаются с увеличением содержания закрытых ячеек. Преобладающую замкнутую ячеистую структуру имеют прессовые **поливинилхлоридные пенопласты (ППВХ)**, однако данный вид материалов проигрывает по показателям плотности и, как следствие, теплопроводности перед ППС и «Пеноизолом». Вместе с тем поливинилхлоридный пенопласт (ППВХ) имеет высокие прочностные характеристики, по горючести относится к классу Г1, его долговечность превышает 50 лет [2]. Разработка композиций для получения ППВХ с плотностью на уровне полистирольного пенопласта, повышение его конкурентоспособности на рынке строительных материалов является, несомненно, актуальной задачей.

Анализ патентной литературы показал, что наиболее интенсивные работы по модифицированию и совершенствованию технологии ППВХ проводились в период 50–80-х гг. XX в. Основными разработчиками в этой области являлись японские ученые, которые отдавали предпочтение экструзионным вспененным материалам на основе поливинилхлорида (ПВХ). Методом экструдирования расплава композиции получают самые легкие ППВХ (70 кг/м^3) [3]. Такие материалы имеют неравномерную и незамкнутую структуру, что значительно повышает водопоглощение вспененного материала. Метод экструзии требует значительных капитальных вложений. ППВХ, полученные прессовым методом [4–6], имеют замкнутую мелкоячеистую структуру, малые водопоглощение и теплопроводности, высокие прочностные характеристики, необходимые для монтажа теплоизоляционных стеновых панелей. В настоящее время в России производят жесткий ППВХ только по прессовой технологии плотностью более 100 кг/м^3 [7, 8].

В табл. 1 представлены сравнительные свойства теплоизоляционных органических пеноматериалов.

Плотность ячеистых пластмасс зависит от плотности полимера и содержания газообразователя. Для каждого вида пластмасс имеется предельное количество вспенивающего агента, выше которого снижение плотности не происходит. Поэтому целью данной работы явилось изучение влияния газообразователя на плотность вспененного материала на основе поливинилхлорида.

При производстве жесткого ППВХ в композицию вводят газообразователь — карбонат аммония $((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3)$, что позволяет получать пенопласт с плотностью более 100 кг/м^3 [7]. В данной работе предлагается использо-

Таблица 1

Свойства полимерных теплоизоляционных материалов, выпускаемых промышленностью в России

Показатель	ППС (STYROFOAM™)	ПСБ-С	«Пеноизол»	ПХВ-1
Плотность, кг/м ³	40–150	15–50	8–25	100–130
Теплопроводность, Вт/м·°С	0,028–0,05	0,03–0,04	0,035–0,047	0,03–0,041
Прочность при сжатии (при 10%-й линейной деформации), МПа	0,2–0,5	0,25	0,003–0,025	0,4–0,7
Водопоглощение, %	1–2	0,5–1,5	10–20	2,5
Диапазон рабочих температур, °С	–50...+75	–50...+85	–50...+120	–60...+60
Группа горючести	Г2	Г2	Г3	Г1
Долговечность, лет	30	25	30–35	50

вать вместе с минеральным газообразователем органический газообразователь — азодикарбонамид (ЧХЗ-21), смешанный с активатором разложения. Присутствие в системе разлагающегося при высокой температуре органического вспенивающего агента обеспечивает равномерную и мелкоячеистую структуру.

Таблица 2

**Влияние содержания ЧХЗ-21 на свойства
ППВХ [(NH₄)₂CO₃ = 16 мас.ч,
ПВХ = 100 мас.ч]**

Содержа- ние азоди- карбонами- да, мас.ч	τ _{всп} , мин	кг/м ³	сж,10% МПа	Вт/м·°С	Усадка объем- ная, %
0,0	32	340±24	4,02±0,4	0,101	11
0,5	32	270±18	1,43±0,2	0,081	5
1,0	52	240±14	1,23±0,1	0,071	3
2,0	32	218±11	1,07±0,05	0,065	0,4
3,0	36	80±4	0,46±0,05	0,028	1

В табл. 2 представлены экспериментальные данные, иллюстрирующие изменение плотности ППВХ на стадии вспенивания заготовки. В результате исследования выяснилось, что увеличение концентрации ЧХЗ-21 приводит к снижению плотности получаемого материала.

Дальнейшее изучение свойств полученного ППВХ показало, что сорбционная влажность пеноматериала составила 0,7%, водопоглощение при полном погружении образца в воду за 24 ч — 1,9%, собственная влажность материала — 2,9%, паропроницаемость — 0,27 мг/Па·м·ч. Российским производителем теплоизоляционных материалов на основе ПВХ является фирма «Инкомпен» (г. Владимир). Для сравнения конкурентоспособности разработанного материала был выбран пенопласт марки ПХВ-1, выпускаемый этой фирмой, свойства которого приведены в табл. 1. Стоимость разработанного материала снизилась на 15% по сравнению с материалом ПХВ-1 [8].

Исследования показали, что применение ЧХЗ-21 в композиции, содержащей минеральные газообразователи для получения жесткого ППВХ, позволяет снизить плотность готового ячеистого материала до 80 кг/м³. Прочность полученного материала при снижении плотности на 20% остается достаточно высокой, а коэффициент теплопроводности достаточно низким, что подтверждает возможность использования разработанного материала для теплоизоляции зданий. Высокая огнестойкость и долговечность нового ППВХ, безопасность его использования в строительных конструкциях обуславливают эффективность применения ячеистого материала в качестве теплоизолирующего слоя.

Разработанный поливинилхлоридный пенопласт составит конкуренцию существующим ячеистым пластмассам, позволит расширить ассортимент полимерных строительных материалов и снизить дефицит качественных теплоизоляционных материалов в строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экструдированный пенополистирол STYROFOAM <http://www.styrofoam-xps.com> (ноябрь 2007 г.).
2. Гильдебранд Х. Полимерные материалы в строительстве: Пер. с нем./Х. Гильдебранд.— М.: Стройиздат, 1969.— 272 с.
3. Заявка 397745 Япония, МКИ⁵ С 08 J 9/14, В 29 С 47/00/Хаттори Эдзи; Асахи касэй когё к.к.— № 1-234726; Заявл. 12.09.89; Оpubл. 23.04.91.
4. Берлин А. А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров/А. А. Берлин, Ф. А. Шутов.— М.: Наука, 1980.— 504 с.
5. А.с. 1703664 СССР, МКИ⁵ С 08 L 27/06, 9/02, 9/06, С 08 K 13/02 /Л. А. Мельник, Н. П. Вихирева, Л. И. Бердник, В. А. Соломаха; НПО Эластик.— № 4746516/05; Оpubл. 07.01.92, Бюл. № 1.
6. Заявка 2223494 Великобритания, МКИ С 08 J 9/10/Chn Shiu Liang; Rockoell Ind Co Ltd.— № 8820473.0; Оpubл. 11.04.90; НКИ С 3 С.
7. Христофоров А. И. Исследование процесса газовыделения при получении пенопласта на основе поливинилхлорида/А. И. Христофоров, И. А. Христофорова, Е. Е. Молькова// Изв. вузов. Химия и химическая технология.— 2004.— Т. 47. — Вып. 1.— С. 53–56.
8. Пат. 2177965 Россия, МПК⁷ С 08 L 27/06/Произв.-коммерч. фирма «ИНКОМПЕН», Владимир. гос. ун-т; А. И. Христофоров, И. А. Христофорова, Е. Б. Пыленкова.— № 2000108424/04; Заявл. 04.04.2000; Оpubл. 10.01.2002. Рус.

© Молькова Е. Е., Христофорова И. А., Христофоров А. И., 2008

Получено после доработки 26.11.07

УДК 691.421-431:536.485

Е. С. АБДРАХИМОВА, канд. техн. наук (Самарский государственный архитектурно-строительный университет)

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Проведенные исследования показали, что фазовый состав (стеклофаза, муллит, кристобалит и гематит) влияет на морозостойкость керамического кирпича.

В литературе недостаточно сведений о том, как влияет количество стеклофазы на показатели морозостойкости керамического кирпича. Существуют противоречивые сведения по поводу влияния стеклофазы на морозостойкость керамических изделий.

По данным одних авторов, благодаря стеклофазе происходит изоляция глинистых частиц, что снижает набухаемость черепка, делает его более устойчивым к агрессивному воздействию влаги и мороза [1]. Набухание черепка, по сведениям других авторов, может происходить вследствие гидролиза стеклофазы [2, 3]. Некоторые исследователи считают, что под действием воды происходит накопление ее в молекулярной форме, при этом конденсируются группы SiO–OH [4, 5]. Это ведет к изменению решетки Si–O–Si стекла и образованию выщелочного слоя с особыми структурными свойствами, существенно влияющими на прочностные характеристики материала. Можно предположить, что аналогично будет происходить разрушение стеклофазы керамического черепка под воздействием влаги как в процессе испытаний на морозостойкость, так и в процессе эксплуатации изделий.

В настоящей работе были проведены исследования по определению влияния фазового состава на морозостойкость керамического кирпича из оптимального состава с использованием отхода минеральной ваты [6]. Для исследования были взяты два состава, мас. %: 1) образцовая глина — 100; 2) образцовая глина — 65, продукт сгорания базальтовой шихты — 35. Химический состав исследуемых компонентов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химические составы компонентов

Компоненты	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	R ₂ O	SO ₃	П.п.п.
Образцовая глина	57,13	19,25	2,0	1,32	5,72	1,5	1,01	8,8
Продукт сгорания базальтовой шихты	15,3	7,98	31,2	7,6	10,6	6,79	0,98	19,3

Изготовление кирпича производилось пластическим методом. Высушенные изделия обжигались при температурах 1000 и 1050°C.

Повышенное содержание в продукте сгорания — базальтовой шихте — Fe₂O₃ и R₂O способствует появлению жидкой фазы при 950°C (рис. 1). Под микроскопом в исследуемых образцах состава № 2 при температуре обжига 950°C наблюдаются бесцветные, желтоватые и бурые стекла с показателями преломления N от 1,50 до 1,54, появившиеся в результате плавления шпатов и смешанослойных глинистых образований.

Спекание керамического кирпича идет с участием жидкой фазы, от свойств которой во многом зависит процесс формирования структуры материала [1]. Повышение реакционной способности жидкой фазы по отношению к тугоплавким кристаллическим составляющим дает возможность интенсифицировать процесс спекания, что позволяет уменьшить расход топлива.

При повышении температуры обжига до 1000°C количество стеклофазы увеличивается (рис. 2) и при этом в обоих составах образуется кристобалит [6].

Зависимость морозостойкости кирпича от его фазового состава приведена в табл. 2. Содержание стеклофазы в образцах из состава № 2 больше, чем в образцах из состава № 1, соответственно и морозостойкость у них выше. Кроме того, в образцах из состава № 1 образуется больше кристоба-

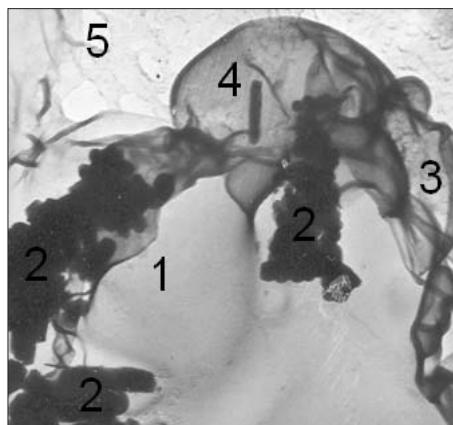


Рис. 1. Микроструктура образца состава № 2. Температура обжига 950°C
1 — стеклофаза; 2 — органика; 3 — полевои шпат; 4 — гематит; 5 — кварц. Увеличение 40 000

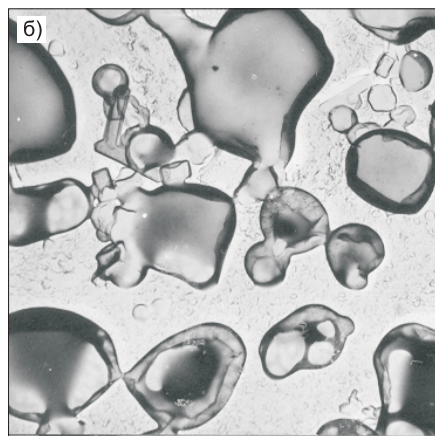
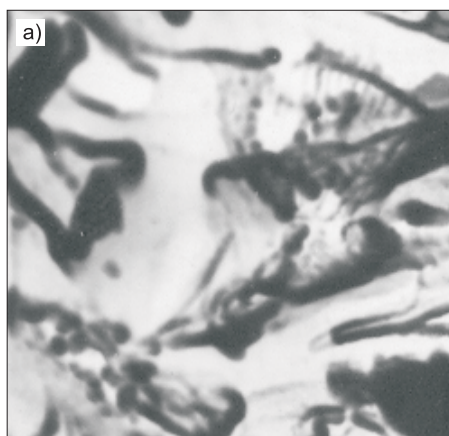


Рис. 2. Микроструктура образцов составов № 1 (а) и № 2 (б). Температура обжига 1050°C. Увеличение 23 000

Таблица 2
Зависимость морозостойкости кирпича от фазового состава

№ сос- тава	Содержание основных фаз, %					Морозо- стойкость, циклы
	Стекло- фаза	Кварц	Кристо- балит	Муллит	Гематит	
Температура обжига, 1000°C						
1	10-15	30-40	10-12	—	5-7	29
2	15-20	30-40	8-10	3-5	3-5	45
Температура обжига, 1050°C						
1	25-30	25-30	15-20	—	9-12	32
2	30-35	25-30	12-15	5-8	7-9	58

ратуре 1000°C, после 42 циклов попеременного замораживания и оттаивания имели микротрещины размером $25\text{--}100 \cdot 10^{-6}$ м, расположенные параллельно плоскости изделий, а при температуре обжига 1050°C аналогичные трещины имелись после 55 циклов.

Таким образом, проведенные исследования показали, что фазовый состав влияет на морозостойкость керамического кирпича.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В. Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики/В. Ф. Павлов.— М.: Стройиздат, 1977.— 272 с.
2. Куколев Г. В. Химия кремния и физхимия силикатов/Г. В. Куколев.— М.: Высш. шк., 1966.— 250 с.
3. Куколев Г. В. Сборник трудов по химии и технологии силикатов/Г. В. Куколев, И. С. Щеглов.— М.: Госстройиздат, 1957.— 28 с.
4. Кайнарский И. С. Физико-химические основы керамики/И. С. Кайнарский, Н. Г. Орлова.— М.: Наука, 1956.— 128 с.
5. Будников П. П. Химическая технология керамики и огнеупоров/П. П. Будников, Д. В. Полубояринов.— М.: Стройиздат, 1972.— 550 с.
6. Абдрахимова Е. С. Отходы производства минеральной ваты в производстве кирпича/Е. С. Абдрахимова, Е. В. Вдовина, А. В. Абдрахимов, В. З. Абдрахимов // Жилищное строительство.— 2007.— № 5.— С. 21–22.

© Абдрахимова Е. С., 2008

Получено 03.08.07

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.003 : 658.012.22

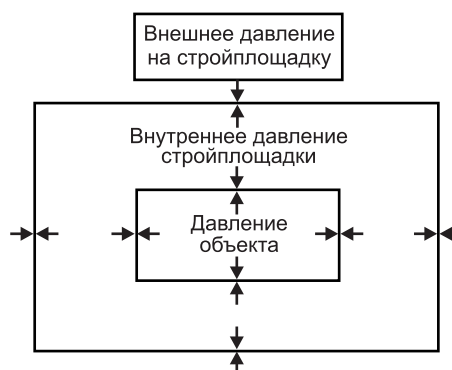
С. А. БОЛОТИН, д-р техн. наук, проф., **М. М. МАЛКИН**, асп. (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА

Показана необходимость технико-экономического исследования размеров площади стройгенплана с учетом влияния арендной ставки за используемую под строительство землю. В результате будет обеспечено интерактивное и оптимальное проектирование календарного и строительного генерального плана, обеспечивающее синергетический эффект.

В области организационного проектирования строительства выделяют два по степени важности документа — календарный план и стройгенплан. Подавляющее число научно-практических работ, ориентированных на поиск оптимальных решений, находится в сфере календарного планирования. Это связано с тем, что такой объект, как календарный план, может быть достаточно просто формализован с позиции его математического описания и, следовательно, задача его оптимизации сводится либо к применению известного метода математического программирования, либо к разработке нового. В этом отношении стройгенплан является более неоднородным (гетерогенным) объектом. На стройгенплане размещаются совершенно различные по своим функциям объекты строительного хозяйства — это объекты производственной базы, материально-технического снабжения, инженерной инфраструктуры и т.д. и т.п. Общепринятым критерием их эффективной планировки является минимизация площади строительной площадки. А если учесть то, что стоимость прав собственности на землю все время растет, то становится понятной актуальность минимизации площади стройгенплана.

Системное объединение разнородных объектов в единой модели привело нас к следующему ее описанию. Изнутри строительная площадка, как правило, ограничивается строящимся объектом, а снаружи внешним ограждением. Геометрически как отдельный строительный объект, так и его внешнее ограждение представляют собой замкнутые линии, площадь между которыми определяет эксплуатируемый во время строительства земельный участок (рисунок). Рассмотрим вопрос, почему при проектировании образуется та или иная конфигурация земельного участка?



Аналоговая модель формирования строительной площадки

Обобщенно на этот вопрос можно ответить следующим образом. Расширению периферийной границы препятствует вполне определенное давление внешних факторов, к которым можно отнести:

- невозможность ограничения движения внешнего транспорта, определяемую уполномоченным органом ГИБДД;
- занятость внешней территории построенными объектами недвижимости и их охранными зонами;
- нежелание собственника внешней территории предоставлять право ее использования под строительные нужды;
- высокая арендная плата за временное использование земли и т. п.

Таким образом, можно положить, что по контуру внешней границы на стройплощадку действует некоторое абстрактное давление, изменяющееся от сравнительно малых величин (свободная территория) до практически бесконечного «противодавления» (расширению стройплощадки мешает уже построенное здание).

В отличие от внешней внутренняя граница определяется контуром строящегося объекта. В большинстве случаев внедрение стройплощадки в пределы этого контура не допускается. Однако в отдельных случаях из-за ограниченности внешней территории приходится использовать площадь внутри строящегося объекта, например, под башенный кран, под склад, под размещение временных помещений и т.д. Как правило, при внедрении строительной площадки внутрь строящегося объекта возникают дополнительные затраты, связанные с непроизводительной заделкой

образующихся при этом строительных проемов. В результате экономически нецелесообразное препятствие проникновению строительной площадки внутрь строящегося объекта можно представить соответствующим давлением объекта строительства на стройплощадку. В итоге рассмотрения модели получаем: размеры стройплощадки ограничивают внешнее давление и давление объекта.

Для окончательного определения формы строительной площадки необходимо рассмотреть ее внутреннее давление на внешние границы. Действительно, для того чтобы организовать строительное производство, нужно предусмотреть площади под объекты производственной базы; объекты управления и производственного быта; материально-техническое обеспечение; подъемно-транспортное оборудование; инженерные сети; дорожное хозяйство и др.

Многие из перечисленных объектов рассчитываются исходя из соответствующих нормативов. Так, например, расположение монтажных кранов должно удовлетворять нормам, регламентированным сводом правил [1], а их безопасная эксплуатация правилам, определенным в [2], требования безопасности труда в строительстве определены СНиП [3], а гигиенические требования к организации строительного производства изложены в [4]. Удовлетворение всем этим и другим подобным условиям требует определенной площади строительной площадки, образование которой может быть интерпретировано как рост внутреннего давления. Следовательно, результатом проектирования стройгенплана является формирование такой конфигурации строительной площадки, при которой внутреннее давление, моделирующее потребности строительного производства, уравнивается внешним противодавлением, моделирующим соответствующие пространственные и экономические ограничения.

При этом пространственные ограничения можно разделить на безусловные и условные. Безусловные ограничения должны выполняться безотносительно к любым условиям. В первую очередь, к таким ограничениям следует отнести естественные ограничения строительной площадки, связанные с существующими недвижимыми объектами или с охранными зонами вокруг них. Условные же ограничения могут быть изменены в зависимости от возникновения или отсутствия определенной ситуации. А если иметь в виду, что на процесс возникновения некоторых условий можно влиять экономически, то этот вид ограничений можно также интерпретировать в терминах экономических ограничений.

Выделяя экономические ограничения в задачах возможной оптимизации стройгенплана, нельзя обойти вопросы, связанные с определением стоимости земли. Для этого в оценочной практике используются различные методы [5].

Метод *сравнения продаж* применяется для оценки земельных участков как занятых зданиями, строениями и сооружениями, так и незанятых земельных участков. Условием применения данного метода является наличие информации о ценах сделок с земельными участками, являющимися аналогами оцениваемого.

Методы *выделения и распределения* применяются для оценки застроенных земельных участков при наличии информации о ценах сделок с едиными объектами недвижимости, аналогичными единому объекту недвижимости, включающему в себя оцениваемый земельный участок и соответствие улучшений земельного участка его наиболее эффективному использованию. Для первого из этих методов дополнительно требуются сведения о стоимости улучшений, а для второго — наличие информации о наиболее вероятной доле земельного участка в рыночной стоимости единого объекта недвижимости.

Метод *капитализации земельной ренты* применяется для оценки застроенных и незастроенных земельных участков. Условие применения метода — это возможность получения земельной ренты от оцениваемого земельного участка, а цена участка определяется отношением ренты к коэффициенту капитализации. При этом под капитализацией земельной ренты понимается определение на дату проведения оценки стоимости всех будущих равных между собой или изменяющихся с одинаковым темпом величин земельной ренты за равные периоды времени.

Метод *предполагаемого использования* также базируется на возможности использования земельного участка способом, приносящим доход, а расчет стоимости земельного участка определяется путем дисконтирования всех доходов и расходов, связанных с использованием земельного участка. То есть по сути дела в рамках данного метода снимается ограничение на равномерность или на равноизменяемость земельной ренты.

Метод *остатка* применяется для оценки земельных участков при условии его застройки объектами, приносящими доход:

- расчет стоимости воспроизводства или замещения улучшений, соответствующих наиболее эффективному использованию оцениваемого земельного участка;

- расчет чистого операционного дохода от единого объекта недвижимости за определенный период времени на основе рыночных ставок арендной платы;

- расчет рыночной стоимости единого объекта недвижимости путем капитализации чистого операционного дохода за определенный период времени;

- расчет рыночной стоимости земельного участка путем вычитания из рыночной стоимости единого объекта недвижимости стоимости воспроизводства или замещения улучшений.

Перечисленные методы оценки применимы для рыночной оценки земли и арендной платы за нее в интересах собственника. Если собственностью распоряжается региональное правительство, то арендная плата устанавливается централизованно [6]. В результате для строителей возникает задача определения усредненной арендной платы по возмещению собственникам земельных участков убытков, связанных с их временным занятием [7]. Таким образом, при организационном проектировании стройплощадки экономически актуальным становится произведение площади стройгенплана на арендную ставку по ее использованию.

При проектировании стройгенплана его площадь будет зависеть от площади временных зданий и сооружений, определяемой численностью наиболее загруженной смены, и эта численность в первом приближении будет тем меньше, чем будет больше общая продолжительность строительства, определяемая календарным планом. Площадь складирования также будет меньше, если уменьшается темп строительства и соответственно увеличивается общая продолжительность. Таким образом, при уменьшении продолжительности строительства приближается срок получения дохода от создаваемой недвижимости и уменьшается срок занятия площади под стройплощадку, но при этом увеличивается сама площадь, которая к тому же может иметь некоторый предел, определяемый безусловными ограничениями.

Выводы. Описанные факторы приводят к необходимости постановки и проведению технико-экономического исследования по количественному анализу потенциальных возможностей проектирования оптимальных строительных генеральных планов. Результатом данного анализа должно стать, в частности, установление влияния арендной ставки за используемую под строительство землю на оптимизационный эффект, связанный с вариацией продолжительностей выполняемых работ и их обес-

печением трудовыми и машинными ресурсами. На основе результатов анализа может быть разработана соответствующая оптимизационная процедура, которая позволит в максимальной степени обеспечить интерактивное и оптимальное проектирование календарного плана и строительного генерального плана, обеспечивающее синергетический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 12-103-2002 «Пути наземные рельсовые крановые. Проектирование, устройство и эксплуатация».
2. ПБ 10-382-00 «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов».
3. СНиП 12-03-2001 «Безопасность труда в строительстве». Ч. 1, 2.
4. СанПиН 2.2.3.1384-03 «Гигиенические требования к организации строительного производства и строительных работ».
5. Методические рекомендации по определению рыночной стоимости земельных участков. Распоряжение МинИмущества РФ от 6.03.2002 № 568-р.
6. О методиках определения арендной платы за земельные участки. Постановление правительства С.-Петербурга от 14.09.2004 № 1561.
7. Правила возмещения собственникам земельных участков, землепользователям, землевладельцам и арендаторам земельных участков убытков, причиненных изъятием или временным занятием земельных участков, ограничением прав собственников земельных участков, землепользователей, землевладельцев и арендаторов земельных участков либо ухудшением качества земель в результате деятельности других лиц. Постановление Правительства РФ от 7.05.2003 № 262.

© Болотин С. А., Малкин М. М., 2008

Получено 17.12.07

УВД 69.003.12

А. Г. КУЗЬМИНСКИЙ, д-р экон. наук, проф., **В. А. ИЗАТОВ**, канд. экон. наук, доц., **А. В. НАДЕИН**, инж. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СМЕТНОЙ ЦЕНЫ НА СТРОИТЕЛЬНУЮ ПРОДУКЦИЮ В ПРОГНОЗНОМ УРОВНЕ ЦЕН НА РЕСУРСЫ И ТАРИФЫ С УЧЕТОМ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНВЕСТОРА

Предложена методика формирования цен на строительную продукцию в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы ресурсным методом с использованием трансформированной исходной информации с учетом инвестиционных возможностей инвестора. Практическое использование методики позволяет снизить трудоемкость формирования данного вида цены во много раз и существенно повысить уровень достоверности будущих объемов капитальных вложений в строительство объекта.

Прогнозная сметная стоимость строительства объекта (ПСССО) есть цена строительной продукции инвестора, сформированная инвестором до начала строительства объекта в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы [1].

ПСССО формируется на здания и сооружения в том случае, когда реализация проекта требует значительных объемов капитальных вложений и длительных сроков строительства.

ПСССО предопределяет фактические объемы капитальных вложений на момент окончания реализации проекта, т. е. окончания строительства объекта.

Теоретически ПСССО по сумме равна будущей цене на строительную продукцию инвестора — «инвесторской сметной стоимости строительства объекта» (ИСССО).

Практическое получение равенства этих цен на строительную продукцию сопряжено с определенными трудностями. Это неопределенность в изменении рыночных цен на ресурсы и тарифы; отсутствие норм продолжительности строительства объектов, учитывающих разные инвестиционные возможности инвестора; отсутствие официальных методик формирования ПСССО и др.

В таблице приведены характеристики методов формирования ПСССО, опубликованных в печати и предлагаемых авторами.

Характеристика методик формирования ПСССО

№ п.п	Показатели	Методики	
		Экспресс-метод	Предлагаемый метод
1	Особенность метода	С использованием ОСССО	Без использования ОСССО
2	Суть методики	В процессе расчета формируется компенсационный фонд в прогнозном уровне цен на ресурсы	В процессе расчета формируется ПСССО
3	Срок строительства	По нормам продолжительности строительства или принятому сроку строительства	Исходя из инвестиционных возможностей инвестора
4	Перераспределение капитальных вложений по сроку строительства	По нормам строительного дела	Формируется в процессе расчета
5	Норма инфляции	По нормам Закона «О государственном бюджете»	Прогнозная
6	Метод формирования сметной стоимости СМР в составе ПСССО	—	Ресурсный с использованием трансформированной информации
7	Достоинства	Реализуется вручную с помощью расчетной таблицы при незначительной трудоемкости расчета	Обеспечивает более достоверный результат за счет учета инвестиционных возможностей инвестора; реализуется на ПЭВМ
8	Недостатки	Обеспечивает приближенный результат счета	

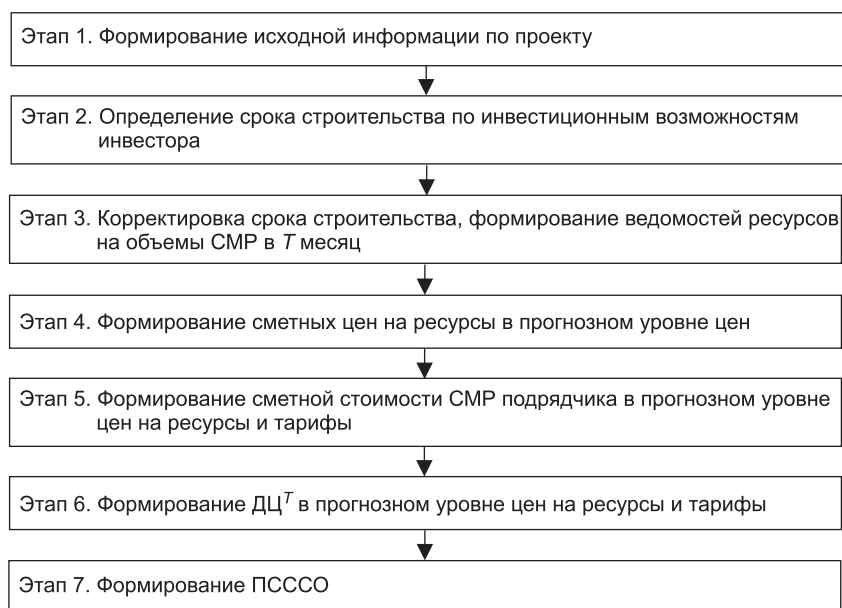
Алгоритм предлагаемой методики показан на рисунке.

По предлагаемой методике ПСССО формируется в 7 этапов.

На **первом** этапе определяется необходимая информация:

- ведомость объемов СМР по объекту;
- ведомость объемов ресурсов по объекту;
- информация об инвестиционной возможности инвестора;
- перечень и нормы лимитных затрат подрядчика;
- перечень и нормы затрат инвестора по инвестиционному циклу;
- метод формирования инвесторской сметной стоимости СМР в составе сметной стоимости СМР подрядчика;
- метод формирования сметной стоимости ресурсов в прогнозном уровне цен;
- нормы накладных расходов и сметной прибыли;
- ГЭСН;
- вычислительный продукт САП.

На **втором** этапе определяется срок строительства, исходя из инвестиционных возможностей инвестора, по рекомендуемой формуле



Алгоритм формирования ПСССО при сроке строительства, определенном по инвестиционным возможностям инвестора

$$T_{\text{и}} = \frac{\text{ОСССО}}{K_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{и}}$ — срок строительства объекта по инвестиционным возможностям инвестора, мес;

ОСССО — оценка сметной стоимости строительства объекта, сформированная инвестором до начала строительства, в текущем уровне цен на ресурсы и тарифы, р.;

$K_{\text{и}}$ — объем инвестиций, выделяемый инвестором по своим инвестиционным возможностям на строительство объекта в месяц, р.

На **третьем** этапе выполняется корректировка (оптимизация) срока строительства с учетом особенностей объемно-планировочного и конструктивного решения объекта и технических параметров, определяющих интенсивность использования ресурсов.

Корректировка (оптимизация) срока строительства объекта выполняется с применением математических методов линейного программирования – сетевого моделирования и вычислительного продукта САП.

Конечной целью работы третьего этапа является формирование ведомостей расхода ресурсов на каждый месяц срока строительства объекта. Ресурсы в ведомости должны обобщаться по трем группам – труд, строительные машины и строительные материалы, при условии

$$j = j_1 \quad j_2 \quad j_3, \quad j_1 \quad j_2 \quad j_3 = 0,$$

где $j = (j = 1, \dots, m)$ — множество ресурсов;

$j_1 = (j = 1, \dots, m_1)$ — ресурс-труд, чел.-ч;

$j_2 = (j = m_1 + 1, \dots, m_2)$ — ресурсы — строительные материалы и механизмы, маш.-ч;

$j_3 = (j = m_2 + 1, \dots, m_3)$ — ресурсы — строительные материалы и конструкции в потребительских единицах измерения.

На **четвертом** этапе формируют сметные цены на ресурсы в прогнозном уровне цен на каждый месяц принятого срока строительства объекта.

Формирование сметной стоимости ресурсов в прогнозном уровне цен рекомендуется выполнять базисно-индексным методом по приведенной формуле

$$C_j^t = C_j^\delta \cdot I_j^t, \quad (2)$$

где C_j^t — сметная стоимость j -вида ресурсов в прогнозном уровне цен в t -месяц срока строительства объекта, р.;

C_j^δ — сметная стоимость j -вида ресурсов в базисном уровне цен, р.;

I_j^t — прогнозный коэффициент изменения сметных цен j -вида ресурсов на t -месяц срока строительства;

t — порядковый номер месяца срока строительства объекта, $t = \overline{1, T}$;

T — принятая продолжительность строительства объекта в месяцах;

j — виды ресурсов (труд, строительные материалы, строительные машины), $j = \overline{1, m}$.

Прогнозный индекс рекомендуется формировать методом экстраполяции.

На **пятом** этапе формируется сметная стоимость СМР подрядчика в составе прогнозной договорной цены на строительную продукцию.

Базой формирования сметной стоимости СМР подрядчика является сумма инвесторской сметной стоимости СМР [1].

Инвесторскую сметную стоимость СМР можно формировать одним из рекомендованных методов. Но их применение значительно увеличивает трудоемкость расчета.

Поэтому при формировании инвесторской сметной стоимости СМР рекомендуется использовать идеи и возможности ресурсного метода с использованием трансформированной исходной информации и выполнять расчеты по предлагаемой нами модели:

$$C_{\text{и}}^T = \sum_{t=1}^T C_{\text{и}}^t = \sum_{t=1}^T \left[\Phi \Pi_{\delta}^t \cdot K_1^t \cdot I_1^t \cdot \left(1 + \frac{H_p}{100} + \frac{П_c}{100} \right) + \mathcal{E} M_{\delta}^t \cdot K_2^t \cdot I_2^t + M_{\delta}^t \cdot K_3^t \cdot I_3^t \right], \quad (3)$$

где $C_{\text{и}}^T$ — инвесторская сметная стоимость СМР в составе ПДЦ на объемы работ по объекту при сроке строительства T в прогнозном уровне сметных цен на ресурсы и тарифы, р.;

$C_{\text{и}}^t$ — инвесторская сметная стоимость СМР в составе ПДЦ на объемы работ, выполненные в t -месяц в прогнозном уровне сметных цен на ресурсы и тарифы, р.;

t — порядковый номер месяца принятого срока строительства, $t = \overline{1, T}$;

$\Phi \Pi_{\delta}^t$ — фонд заработной платы рабочих-строителей и механизаторов по строке ведомости объемов ресурсов в t -месяц, принятой за базу трансформации исходной информации, в базисном уровне сметных цен, р.;

K_1^t — показатель трансформации исходной информации по группе ресурсов «заработная плата» по ведомости объемов ресурсов в t -месяц;

I_1^t — прогнозный индекс изменения нормы заработной платы в t -месяце, раз;

H_p — норма накладных расходов по виду строительства от суммы фонда оплаты труда рабочих-строителей и механизаторов, %;

$П_c$ — среднеотраслевая норма сметной прибыли от суммы фонда оплаты труда рабочих-строителей и механизаторов, %;

\mathcal{M}_8^t — сметная стоимость использования строительных машин по строке ведомости объемов ресурсов в t -месяц, принятой за базу трансформации исходной информации в базисном уровне цен на ресурсы, р.;
 K_2^t — показатель трансформации исходной информации по группе ресурсов «строительные машины» по ведомости объемов ресурсов в t -месяц;
 I_2^t — прогнозный индекс изменения сметной стоимости эксплуатации строительных машин в t -месяц, раз;
 \mathcal{M}_8^t — сметная стоимость строительных материалов по строке ведомости объемов ресурсов в t -месяц, принятой за базу трансформации исходной информации в базисном уровне цен на ресурсы, р.;
 K_3^t — показатель трансформации исходной информации по группе ресурсов «строительные материалы» по ведомости объемов ресурсов в t -месяц;
 I_3^t — прогнозный индекс изменения сметной стоимости материалов в t -месяц, раз.

Формирование показателей трансформации исходной информации по группам ресурсов в составе прямых затрат выполняется на основании ведомости стоимости ресурсов t -месяца в объеме оптовых цен базисного уровня цен по модели

$$K_\alpha^t = \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \sum_{j=1}^m O_{j\alpha}}{O_{j\alpha}}, \quad (4)$$

где t — порядковый номер принятого срока строительства, $t = \overline{1, T}$;

j — виды ресурсов в группах затрат ;

— номер группы ресурсов, $\alpha = \overline{1, 3}$ (где α_1 — труд, α_2 — строительные машины и α_3 — строительные материалы);

$\sum_{\alpha=1}^3 \sum_{j=1}^m O_{j\alpha}$ — стоимость ресурсов j в группе ресурсов по ведомости ре-

сурсов на t -месяц, в оптовых ценах базисного уровня цен, р.;

$O_{j\alpha}$ — стоимость ресурса j , в группе ресурсов , по ведомости ресурсов на t -месяц, в строке, принятой за базу трансформации исходной информации, в оптовых ценах базисного уровня цен, р.

Сметная стоимость СМР подрядчика состоит из инвесторской сметной стоимости СМР и лимитируемых затрат. Сметная стоимость СМР подрядчика — первая составляющая договорной цены на строительную продукцию.

Сметная стоимость СМР подрядчика в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы (C_n^T) формируется на объект по модели

$$C_n^T = \sum_{t=1}^T C_n^t = \sum_{t=1}^T C_{и}^t \cdot \sum_{l=1}^L \left(1 + \frac{l_3}{100} \right), \quad (5)$$

где C_n^t — сметная стоимость СМР подрядчика в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы, сформированная на сумму инвесторской сметной стоимости СМР, р.;

$C_{и}^t$ — сумма инвесторской сметной стоимости СМР, сформированная на объемы ресурсов, используемых в t -месяц срока строительства T , в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы, р.;

l_3 — нормы лимитируемых затрат, учитываемых подрядчиком, в процентах от суммы инвесторской сметной стоимости СМР, $l_3 = \overline{1, L}$.

На **шестом** этапе формируется договорная цена на строительную продукцию в составе ПСССО. Состав договорной цены

$$ДЦ^T = ДЦ_1^T + ДЦ_2^T + ДЦ_3^T, \quad (6)$$

где $ДЦ_1^T$ — первая часть, сметная стоимость СМР подрядчика на объем объекта, р.;

$ДЦ_2^T$ — вторая часть (если предусматривается договором подряда), затраты на инфраструктуру подрядчика, р.;

$ДЦ_3^T$ — третья часть, сумма налога на добавленную стоимость, р.

Модели формирования частей договорной цены:

$$ДЦ_1^T = \sum_{t=1}^T C_n^t; \quad (7)$$

$$ДЦ_2^T = \sum_{t=1}^T C_n^t \cdot \frac{H_n}{100}, \quad (8)$$

где H_n — норма затрат на инфраструктуру подрядчика от базы счета — сметной стоимости СМР подрядчика, %;

$$ДЦ_3^T = \left(\sum_{i=1}^T C_n^i + \sum_{i=1}^T C_n^i \cdot \frac{H_n}{100} \right) \cdot \frac{НДС}{100} = \sum_{t=1}^T \left[C_n^t \cdot \left(1 + \frac{H_n}{100} \right) \right] \cdot \frac{НДС}{100}, \quad (9)$$

где НДС — норма налога на добавленную стоимость по закону, %.

$ДЦ^T$ в составе ПСССО формируется по модели

$$ДЦ^T = \sum_{t=1}^T \left[C_n^t \cdot \left(1 + \frac{H_n}{100} \right) \right] \cdot \left(1 + \frac{НДС}{100} \right). \quad (10)$$

Примечание. Недостатком Закона «О налоге на добавленную стоимость» является то, что в нем за базу счета приняты сметные затраты подрядчика, а не сумма добавленной стоимости, содержащаяся в них. Это обстоятельство приводит к неоправданному увеличению сметных цен на строительную продукцию.

При условии, что за базу счета принята «добавленная стоимость подрядчика», $ДЦ^T$ нужно формировать по следующей модели:

$$ДЦ^T = \sum_{t=1}^T \left[C_n^t \cdot \left(1 + \frac{H_n}{100} \right) + (C_n^T - O_j^t) \cdot \frac{НДС}{100} \right], \quad (11)$$

где O_j^t — сумма оптовых цен на ресурсы, использованные в t -месяце, в прогнозном уровне цен, р.

На **седьмом** этапе формируется ПСССО.

В состав ПСССО входят две группы затрат: подрядчика — в объеме договорной цены на строительную продукцию и заказчика — затрат на всех стадиях инвестиционного цикла.

Формирование выполняется по модели

$$ПСССО = \sum_{t=1}^T ДЦ^T + \sum_{t=0}^T (Z_n^{t=0} + Z_n^t), \quad (12)$$

где $ДЦ^T$ — сумма договорной цены на строительную продукцию подрядчика в прогнозном уровне цен на ресурсы и тарифы, р.;

$Z_n^{t=0}$ — затраты инвестора (заказчика) до начала строительства объекта в текущем уровне цен, р.;

Z_n^t — затраты инвестора (заказчика) в период строительства, в прогнозном уровне цен, р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьминский А. Г. Ценообразование и сметное нормирование в строительстве: Учеб. пособие / А. Г. Кузьминский, А. И. Щербаков. — 3-е изд., перераб. и доп. — Новосибирск: МАН, 2004. — 556 с.
2. Изатов В. А. Методическое обеспечение использования ресурсного метода в ценообразовании на строительную продукцию: Автореф. дис. ... канд. экон. наук / В. А. Изатов. — Новосибирск: НГАСУ, 2006.

© Кузьминский А. Г., Изатов В. А., Надеин А. В., 2008

Получено 03.12.07

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.41

А. Д. КУРНОСОВ, канд. техн. наук, засл. эколог РФ (ФГУ «Ленское государственное бассейновое управление водных путей и судоходства», г. Якутск)

ЗАЩИТА ОТ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ РЕК АРКТИЧЕСКОГО БАСЕЙНА РОССИИ

Обобщается опыт гидротехнического строительства с целью активной защиты от разрушения берегов арктических рек в условиях выхода в русла вечной мерзлоты. Предлагаются методики проектирования берегозащитных шпор, разработанные на основе использования оригинальных авторских эмпирических и аналитических зависимостей.

Защита берегов от размыва потоком и разрушения плавающим льдом на арктических реках имеет специфические особенности и весьма сложна. Процесс разрушения отличается от свойственного рекам умеренного климата, где оползни возникают в половодье при незначительной термоабразии. Размыв берега в основном наблюдается при высоких и средних уровнях воды, а в межень деформации массивов уменьшаются из-за того, что берега обсыхают, а также вследствие падения скорости течений и высоты волн. На арктических реках с выходом в русло вечномерзлых грунтов процесс разрушения берегов сопровождается образованием ниш глубиной, достигающей десятков метров, как правило, расположенных на высоте, соответствующей уровням обеспеченностью не менее 50%, при которых температура воды становится выше 10°C [1]. Обрушение многотонных массивов негативно влияет на русловые процессы и существенно вредит окружающей водной среде, в частности, жизнедеятельности экосистем, так как обрушивающийся бедный питательными веществами и бентосом грунт засыпает нерестилища, нагульные акватории и зимовальные ямы осетровых и других ценных рыб, обычно расположенных у высоких вогнутых берегов, где ниши образуются наиболее часто [2, 3].

Вторая особенность арктических рек — обычно существенная ширина русла, что требует при их выправлении комбинированных мероприятий, включающих строительство берегозащитных сооружений и разработку регуляционных дноуглубительных прорезей. Иначе кардинально преобразовать русло и поток по всей их ширине невозможно.

Опыт гидротехнического строительства для защиты грунтовых массивов от размыва потоком, волнами и навала в результате плавающего льда на арктических реках Якутии и Северо-Востока Сибири

показывает, что для сохранения берегов и прибрежных территорий наиболее эффективны берегозащитные шпоры. Однако конструкции таких сооружений, относящихся к средствам активного действия, и их расстановка потребовали существенных изменений по сравнению с условиями умеренного климата, где не проявляется влияние вечной мерзлоты и разжижения грунта в береговых склонах в результате термоэрозии.

Обобщая опыт берегозащитных работ на реках во всех регионах России и дополнив его многолетними наблюдениями автора на севере, считаем возможным рекомендовать следующие предложения, позволяющие повысить эффективность подобных мероприятий.

Берегозащитная шпора из грунта представляет собой короткую (20–100 м) высокую полузапруды с отметкой головы, превышающей на 2,5–3,5 м проектный уровень и продольным уклоном гребня 1:10–1:25, сопрягающуюся в корневой части с берегом на высоте возможного образования ниш. Заложение речного откоса головы шпоры устанавливается по результатам гидравлического расчета из условий предупреждения образования воронки размыва. Пример конструкции берегозащитной шпоры, построенной на р. Лене в зоне Якутска, показан на рис. 1. Заложения напорного и сливного откосов назначаются в зависимости от технологии строительства и рода грунта, из которого отсыпает сооружение.

Располагают шпору нормально к направлению течения из расчета обеспечения наименьшего объема строительных работ.

Система берегозащитных шпор вызывает местное изменение движения потока у защищаемого берега и образует за каждой из них зоны водоворотных вторичных течений с малыми скоростями. При этом не только резко замедляется размыв, но, наоборот, создаются условия отложения наносов возле берега — в пространствах между шпорами. Кроме того, при устройстве берегозащитных шпор берег приобретает новую прерывистую пологую форму, для которой не опасны большие скорости течения (чем положе откос, тем он устойчивее против размыва).

Для экономии затрат на крепление, значительно превосходящих стоимость отсыпки самого тела сооружения, важное значение имеет сокращение площади крепления. Поэтому на участках рек, где нет больших волн, защищаются только гребень и речной откос головы берегозащитных шпор, а напорный и сливной откосы остаются незащищенными. Таким образом, укрепляется не больше 15–20% общей поверхности шпоры. Конструкция и характеристики крепления речного откоса определяются его заложением, от величины которого зависит глубина воронки размыва.

Гидравлический и прочностные расчеты берегозащитных шпор состоят из следующих элементов.

Первоочередной задачей при проектировании берегозащитных мероприятий с применением средств активного действия — берегозащитных шпор является определение оптимального междушпорного расстояния в системе сооружений.

Методика определения расстояний между шпорами основана на закономерностях взаимодействия сооружения с обтекающим его потоком. Как известно, при воздействии на поток одиночной незатопляемой шпоры, последняя создает в нем водоворотные зоны, скорости течения в которых значительно меньше, чем в транзитном потоке, и направлены преимущественно обратно основному потоку, что является условием защиты берега и отложения наносов при берегозащите. Пространство, занятое водоворотными течениями, условно можно разбить на три зоны: верхнюю водоворотную, малую низовую водоворотную и большую низовую

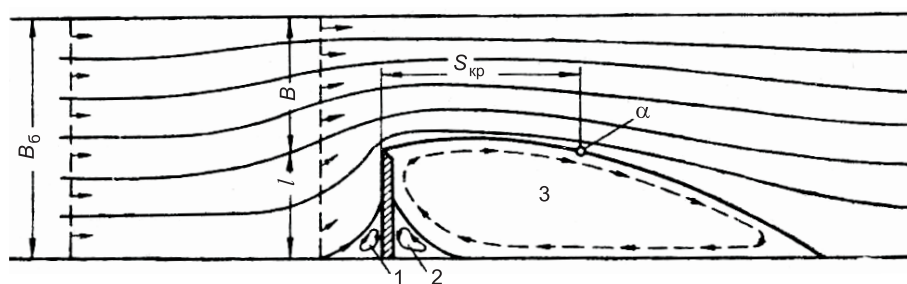


Рис. 2. Схема воздействия на поток одиночной шпоры

1 — верховая водоворотная зона; 2 — малая низовая водоворотная зона; 3 — большая низовая водоворотная зона; B_0 — бытовая ширина русла; B — ширина стесненного русла; l — проекция длины сооружения на живое сечение; $S_{кр}$ — критическое расстояние от головы шпоры до точки выклинивания; α — точка выклинивания

шую ширину русла, чем шпора. Затем кривая растекания трансформируется в кривую расширения, так как влияние сооружения снижается и ширина транзитного потока начинает увеличиваться. Ширина же водоворотной зоны постепенно становится меньшей и в некотором створе равной длине сооружения. Точка на кривой растекания, соответствующая этому створу, называется точкой выклинивания, а расстояние от головы до точки выклинивания — критическим ($S_{кр}$). Ниже по течению расширение транзитного потока проходит интенсивнее, и ширина водоворотной зоны уменьшается до тех пор, пока совсем не исчезнет.

При возведении системы сооружений структура обтекающего их потока существенно изменяется (рис. 3). Если расстояние между сооружениями принято меньше критического, транзитный поток обтекает головы шпор, минуя промежутки между сооружениями. При этом в последних создаются замкнутые водоворотные области, охватывающие все междушпорное пространство. Если расстояние между шпорами больше критического, то транзитный поток начинает захватывать пространства между сооружениями, а при достаточно больших расстояниях водоворотные области разобщаются и взаимное влияние сооружений друг на друга прекращается.

При проектировании берегозащитных систем, когда нет необходимости в расчете кривой растекания, а требуется определить лишь местонахождение точки выклинивания, расстояние от головы шпоры до этой точки можно вычислить приближенными методами расчета, приводимыми ниже.

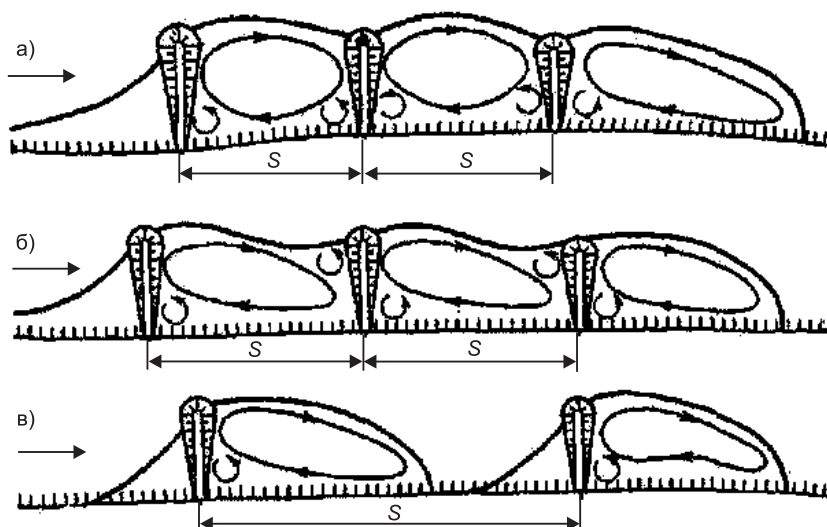


Рис. 3. Схема обтекания потоком системы шпор при расстоянии между ними: а — меньше критического; б — равно критическому; в — больше критического

Если система шпор возводится на прямолинейном или слабоизвилистом участке русла, то критическое расстояние между шпорами можно вычислить по формуле

$$S_{кр} = \cdot l_{п}, \quad (1)$$

где — коэффициент, зависящий от степени стеснения потока;
 $l_{п}$ — проекция длины шпоры на плоскость живого сечения потока.

Коэффициент зависит, прежде всего, от степени стеснения русла сооружениями — отношения проекции длины шпоры на живое сечение потока при бытовой ширине русла B_6 ; средней высоты гребня Z к средней бытовой глубине русла $T_{ср}$ по оси сооружения; средней бытовой глубины к максимальной.

При подборе коэффициента необходимо учитывать данные о характеристиках русла и гидравлике потока у размываемого берега. Приведенный коэффициент гидравлического трения определяется по зависимости

$$= \frac{2g}{C^2} \cdot \frac{B_6}{T_{ср}}, \quad (2)$$

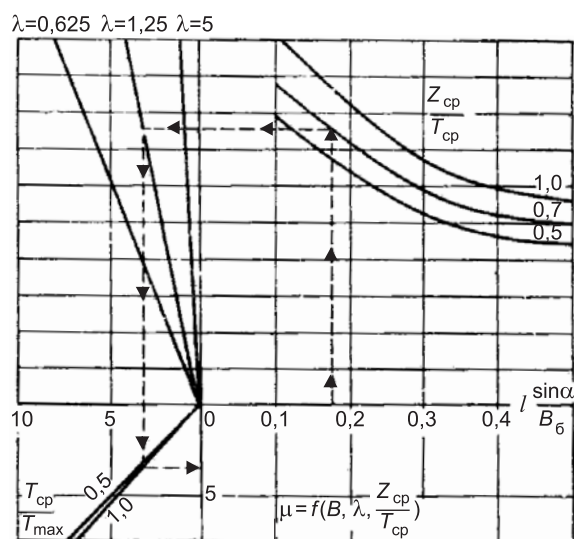


Рис. 4. Номограмма для определения расстояния от головы шпоры до точки выклинивания кривой растекания на прямолинейных и слабо изогнутых участках рек

ниями, проектирующимися у выпуклого берега, вычисляют по формуле

$$S_{кр} = \cdot \Theta. \quad (3)$$

Первая координата определяется по формуле

$$= r_0 + l_{п}, \quad (4)$$

где r_0 — радиус кривизны выпуклого берега.

Вторая — угол планового расположения шпоры в радианах по зависимости

$$\Theta = \mu - \frac{l_{п}^2}{B_6 \cdot r_0} \cdot \frac{\ln\left(\frac{B_6}{r_0} + 1\right)}{\ln\left(\frac{l_{п}}{r} + 1\right)}. \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения;

C — коэффициент Шези, определяемый шероховатостью русла.

Численное значение коэффициента при прямолинейном или слабо изогнутом русле можно определить по номограмме, приведенной на рис. 4.

При проектировании шпор на криволинейном участке, согласно методике В. В. Дегтярева [4], точки кривой растекания за сооружениями задаются в полярных координатах (радиусом-вектором и углом Θ). Координату точки выклинивания, а следовательно, и расстояние между сооружениями, проектирующимися у выпуклого берега, вычисляют по формуле

Если шпоры проектируют у вогнутого берега, полярные координаты точки выклинивания рассчитывают по формулам:

$$= r \cdot \left(1 + \frac{B_6}{r_0}\right)^{1-l_n/B_6}; \quad (6)$$

$$\Theta = \frac{\mu \cdot l_n}{B_6 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0 + B_6}\right)}. \quad (7)$$

При строительстве не одиночной, а системы берегозащитных шпор гидравлическое сопротивление каждой из них неодинаково и зависит от места, занимаемого в системе (n), угла расположения шпоры в плане, степени стеснения потока по ширине l_n/B_6 , отношения средней высоты шпоры от основания Z_{cp} к средней глубине потока T_{cp} . Учитывается и характеристика реки, определяемая согласно рекомендациям Н. А. Ржаницына приведенным коэффициентом гидравлического трения. Отношение коэффициента гидравлического сопротивления конкретной шпоры системы к сопротивлению одиночного сооружения $\mu/\mu_{од}$, так же как и значение коэффициента μ , можно определить по номограмме, приведенной на рис. 5.

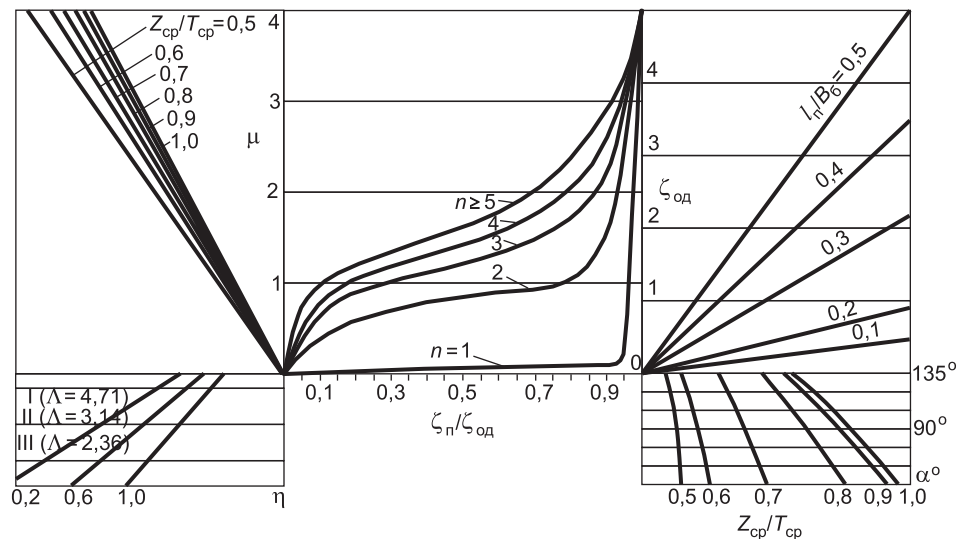


Рис. 5. Номограмма для приближенного определения коэффициента гидравлического сопротивления шпоры, входящей в систему берегозащиты, μ по сравнению с гидравлическим сопротивлением одиночного сооружения $\mu_{од}$

Последние исследования взаимодействия потока и системы незатопляемых берегозащитных шпор у прямолинейного или слабоизогнутого берега с учетом взаимного подпора, оказываемого соседними сооружениями, с различными заложениями речного откоса головы, выявили связь между величиной заложения откоса с длиной водоворотной зоны как у одиночного сооружения, так и в системе из нескольких шпор при малых степенях стеснения (0,05–0,1), характерных для участков больших рек. Данное обстоятельство позволяет учитывать реальный поперечный профиль сооружения и увеличивать междушпорное расстояние на 10–20%. Данный метод применим на участках, где степень стеснения потока шпорами сравнительно мала и не приводит к активному воздействию сооружений на транзитный поток подобно полузапрудам, и поэтому

гидравлическими сопротивлениями, согласно натурным данным, можно пренебречь.

Наряду с положительным эффектом, заключающимся в повышении устойчивости защищаемых участков берегов против воздействия течения, волн и ледохода, одновременно проявляются и негативные воздействия шпор на русло в виде местного размыва у их голов с образованием глубоких воронок, уменьшающих устойчивость откосов сооружений и приводящих к повреждению голов в первые годы эксплуатации берегозащитной системы. Происходит это потому, что в конечном итоге действие шпор выражается в отклонении от берега части потока, ранее протекавшего вдоль него, и в увеличении скорости течения у головы шпоры, вызывающего размыв. Наблюдения показывают, что отклоняемый сооружением поток сосредоточивается у головы шпоры, поэтому вполне естественно здесь происходят значительные деформации. Размыв дна у головы сооружения продолжается до тех пор, пока не формируется новая форма живого сечения русла, достаточная для пропуска части расхода воды, отжатого сооружением. После этого речной откос шпоры становится устойчивее.

Интенсивность, характер и размер циркуляционных течений, а следовательно, форма и глубина воронки размыва дна в зоне берегоукрепления зависят от ряда гидравлических, геологических и конструктивных параметров.

В качестве базовой формулы для прогноза глубины воронки размыва у головы шпоры была предложена эмпирическая формула, учитывающая гидрологические и криогенные условия рек Якутии, протекающих в криозолитозоне:

$$T_{\text{разм}} = \left(\frac{2T_6}{0,5l_{\text{ш}} + T_6} + 0,02 \frac{v_{\text{г}} - v_{\text{нр}}}{\omega} \right) \cdot l_{\text{ш}} \cdot k_m \cdot k_{\alpha}, \quad (8)$$

где $T_{\text{разм}}$ — глубина воронки размыва;

T_6 — бытовая глубина на вертикали у головы шпоры перед возведением сооружения;

$l_{\text{ш}}$ — длина шпоры;

$v_{\text{г}}$ — скорость течения у головы шпоры после постройки сооружения;

$v_{\text{нр}}$ — неразмывающая скорость для донного аллювия в зоне головы сооружения;

m — заложение откоса головы шпоры;

ω — гидравлическая крупность донного аллювия у головы сооружения;

k_m — коэффициент, учитывающий влияние на глубину размыва заложения откоса головы шпоры ($k_m = 1 - 0,03m - 0,02m^2$);

k — коэффициент, учитывающий положение оси шпоры относительно направления течения у головы сооружения ($k = 0,73 + 0,17 - 0,01^2$).

Результаты экспериментов и натурных наблюдений показывают, что чем положе откос, тем меньше глубина воронки размыва.

В результате анализа зависимости, определяющей значения коэффициента k_m , было выявлено следующее.

При определенных значениях величины заложения откоса головы шпоры (около 6,4), находимого как решение квадратного уравнения, приравненного нулю, соответственно и сам коэффициент k_m равен нулю, а при этом выражение (8) также приводится к нулю.

Полученный результат при $k_m = 0$ и соответственно $T_{\text{разм}} = 0$ может ошибочно трактоваться как универсальная постоянная величина для получения устойчивых заложений головы шпоры, не приводящих к образованию воронок размыва для любых донных отложений в зоне головы сооружения. Однако при определении значений k_m нельзя не учитывать разную степень размыва различных видов грунтов русла при одном и том

же значении заложения откоса головы из-за отличий неразмывающей скорости для грунтов различной крупности.

Например, для песчаного грунта воронка местного размыва не образуется при заложениях речного откоса головы, равных 6–6,4, а для галечника или при мощности зоны около головы полузапруды горной массой это значение составит 5.

С учетом вышеизложенного, а также принимая во внимание, что выражение для определения коэффициента k_m основано на экспериментах с песчаными грунтами мелкой и средней крупности, методика определения глубины воронки размыва с учетом разных типов грунтов усовершенствована.

На основании всестороннего анализа эмпирических данных для определения значений $k_m = f(m)$, найденных в ряде источников (рис. 6), выполнена их аппроксимация и получено уточненное базовое выражение для определения коэффициента k_m (мелкий песок) в виде $k_m = 1,04 - 0,194m$.

Для учета зависимости коэффициента k_m непосредственно от значения неразмывающей скорости для различных грунтов, в формулу (8) вводится корректирующий множитель k_v , учитывающий отличие гранулометрического состава донного аллювия от мелкого песка в каждом расчетном случае: $k_v = v_{\text{нр(м. песка)}} / v_{\text{нр(грунта)}}$.

После внесения дополнений формула (8) примет следующий вид:

$$T_{\text{разм}} = \left(\frac{2T_6}{0,5l_{\text{ш}} + T_6} + 0,02 \frac{v_{\text{г}} - v_{\text{нр}}}{\omega} \right) \cdot l_{\text{ш}} \cdot k_m \cdot k_{\alpha} \cdot k_v. \quad (9)$$

В таблице приводятся результаты расчетов по формуле (9) для проектируемых берегозащитных шпор у пос. Нижний Бестях на средней Лене при следующих исходных данных: длина сооружений 40 м, глубина у головы 6 м, скорость у головы 1,2 м/с.

Следует особо отметить необходимость поддержания существующих защитных сооружений в рабочем состоянии, поскольку имеется мнение, что сооружения берегозащиты становятся как бы естественными частями природного рельефа и не требуют ремонта. Однако оно ошибочное. Берегозащитные сооружения так же требуют проведения регулярного обследования их состояния, ремонтных работ и технического обслуживания, как и любые другие здания и сооружения. В этом случае огромные средства, затраченные на строительство защитных сооружений, будут «работать» еще в течение длительного времени.

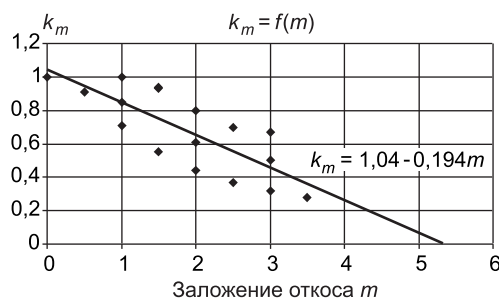


Рис. 6. Результаты анализа эмпирических значений заложения речного откоса головы шпоры

Результаты расчетов глубины воронки размыва

Тип грунта в русле у головы шпоры	Заложение речного откоса m	Глубина воронки по (9), м
Песок	3	7,0
	5	1,07
	6	Воронка не образуется
Мощение гравийно-щебеночной смесью ($d = 100$ мм)	3	4,22
	5	0,64
	6	Воронка не образуется
Мощение горной массой ($d = 200$ мм)	3	2,9
	5	0,44
	6	Воронка не образуется

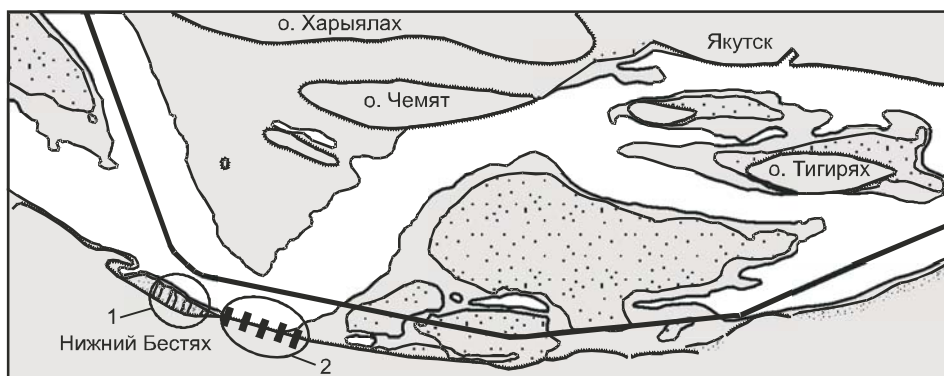


Рис. 7. Реконструкция судоходной трассы со строительством берегозащитных шпор на р. Лене у пристани Нижний Бестях

1 — построенные берегозащитные шпоры; 2 — дополнительные шпоры, строительство которых будет осуществлено в 2008 г.

В настоящее время строительство берегозащитных сооружений осуществляется довольно редко (при острой необходимости и при наличии у заказчика денежных средств) и носит, как правило, сугубо локальный характер. Причем самым важным требованием при выборе конструкций берегозащитных сооружений в последние годы является обеспечение максимально эффективной защиты при минимальных затратах.

В заключение необходимо подчеркнуть, что при выполнении берегозащитных работ необходимо учитывать то, что основополагающим в назначении конструкций берегозащитных сооружений в современных условиях является тщательный анализ природных условий и поиск оптималь-



Рис. 8. Общий вид эксплуатирующихся берегозащитных шпор

ных решений, исходя из назначения и значимости защищаемого участка. Очень важно при этом гармоничное соотношение параметров берегозащитных сооружений, адекватное условиям защищаемого объекта.

Предлагаемая методика использована при проектировании системы берегозащитных шпор на ряде рек арктического бассейна России. На рис. 7 проиллюстрирован частично реализованный в настоящее время проект, принятый исполнительной дирекцией по ликвидации последствий весеннего паводка и организации восстановительных работ в Республике Саха (Якутия) [5]. На рис. 8 демонстрируется фотография эксплуатирующихся шпор системы.

Защитные шпоры применены при перекрытии Городской протоки р. Лены в Якутске, на р. Колыме в Зырянке, на Вилые. В Обь-Иртышском бассейне берегозащитные шпоры построены на реках Конде, Тоболе, Туре и эксплуатируются уже почти 50 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долженко Ю. А. Эффективность и экологическая безопасность обеспечения судоходных глубин на устьевых барах арктических рек Якутии/Ю. А. Долженко.— Новосибирск: Сибирское соглашение, 2005.— 236 с.
2. Курносов А. Д. Проблемы и пути решения экологической безопасности на водном транспорте в Ленском бассейне/А. Д. Курносов//Экологическая безопасность реки Лены: Матер. респ. науч.-практ. конференции.— Якутск, 2001.— С. 97–99.
3. Эколого-эпидемиологическая оценка качества вод реки Лены/Е. Д. Савилов, Ю. А. Долженко, А. П. Протодяконов и др. — Новосибирск: Наука, 2006.— 136 с.
4. Дегтярев В. В. Выправление рек и строительные работы/В. В. Дегтярев.— М.: Транспорт, 1978.— 253 с.
5. Хмелев В. А. Изменение планового расположения судоходной трассы на реке Лене в районе г. Якутск/В. А. Хмелев//Молодые ученые — внутреннему водному транспорту Сибири: Сб. науч. тр.— Новосибирск: НГАВТ, 2003.— С. 97–109.

© Курносов А. Д., 2008

Получено 17.12.07

УДК 626/627

Ю. А. КУЗНЕЦОВА, ст. препод. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В БЕТОНЕ АНКЕРНЫХ ОПОР ТУРБИННЫХ ВОДОВОДОВ

Анализируются напряженно-деформированное состояние и процессы трещинообразования в сталежелезобетонных анкерных опорах турбинных водоводов высоконапорного гидроузла.

В гидротехническом строительстве широкое распространение получили сталежелезобетонные конструкции (турбинные водоводы, спиральные камеры), которые характеризуются значительными размерами и большими площадями поперечных сечений. Массивные железобетонные конструкции — это составная часть сооружений, имеющих высокий класс капитальности и рассчитанных на продолжительный период эксплуатации, поэтому важным вопросом является надежность и долговечность таких конструкций. В данной статье рассматриваются проблемы трещинообразования в анкерных опорах сталежелезобетонных турбинных водоводов на примере Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС).

На низовой грани плотины Саяно-Шушенской ГЭС (высота плотины 245 м, протяженность по гребню 1066 м, ширина у основания 105,7 м, ширина гребня 25 м) расположены 10 сталежелезобетонных турбинных водоводов [1].

Водовод имеет постоянный внутренний диаметр 7,5 м. Общая длина одной нитки трубопровода 217,3 м. Верхнее колено трубопровода сопрягается с водоприемником. Нижнее колено устраивается на подходе трубопровода к спиральной камере турбины. Железобетонная оболочка колена вместе с переходным участком от диаметра 7,5 м к диаметру 6,5 м образует анкерную опору, которая передает усилия по плоскостям контакта на скалу основания (рис. 1). На переходном участке железобетонная облицовка отделена от металлической оболочки трубопровода мягкой прокладкой. Между бетоном анкерной опоры и массивом агрегатного блока устроен уширенный шов (50 мм). Эти мероприятия обеспечивают свободу деформаций металла оболочки и исключают передачу усилия через бетон на массив агрегатного блока.

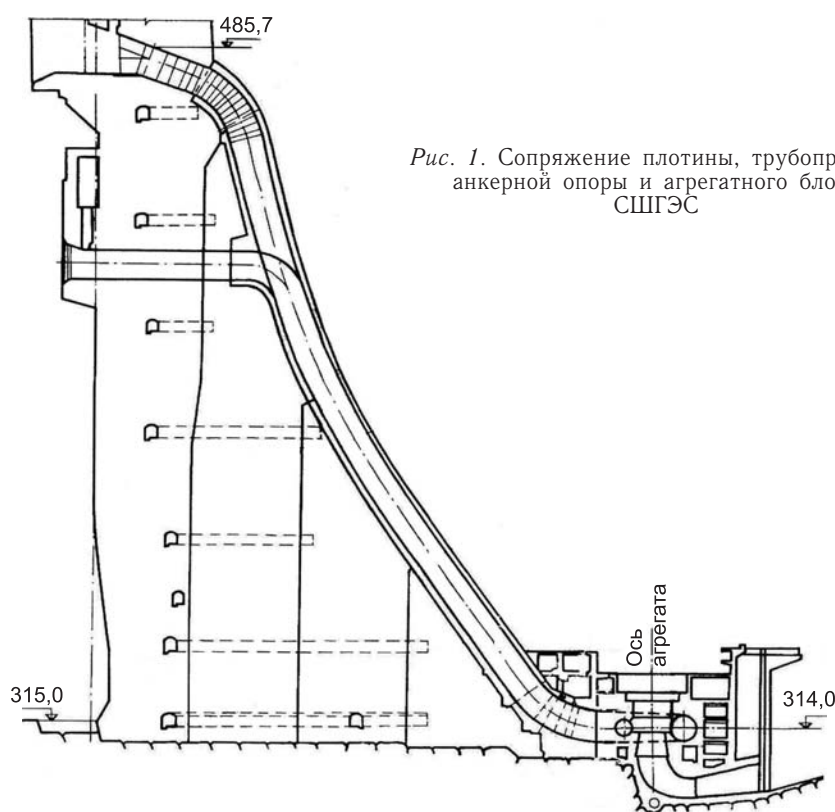


Рис. 1. Сопряжение плотины, трубопровода, анкерной опоры и агрегатного блока СШГЭС

Анкерная опора имеет прямоугольное сечение и прианкерена к низовой грани плотины и скальному основанию. Средняя толщина бетона облицовки 1,5 м. В ней установлена в два ряда арматура периодического профиля, расстояние между внешним и внутренним арматурными кольцами 1,2 м. Внутренняя кольцевая арматура диаметром $d = 70$ мм, класса АП, радиус кольца $R_k = 398$ см. Внешняя кольцевая арматура $d = 60$ мм, класса АП, $R_k = 510$ см. Продольная арматура $d = 25$ мм, класса АП с шагом 20 см.

Для возведения железобетонных оболочек турбинных водоводов использовался бетон марки М 250, МРЗ-100 на портландцементе М 400.

После наполнения водохранилища до проектных отметок и ввода блоков в работу на боковых поверхностях анкерных опор образовалось

множество крупных трещин. За пятилетний период эксплуатации сооружения в проектом режиме процесс трещинообразования продолжился. Это обстоятельство потребовало контроля за изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) водоводов для оценки их эксплуатационной надежности, а в случае необходимости — принятия обоснованных конструктивных мер по ее обеспечению.

Обнаруженные трещины (рис. 2) можно условно разбить на три группы.

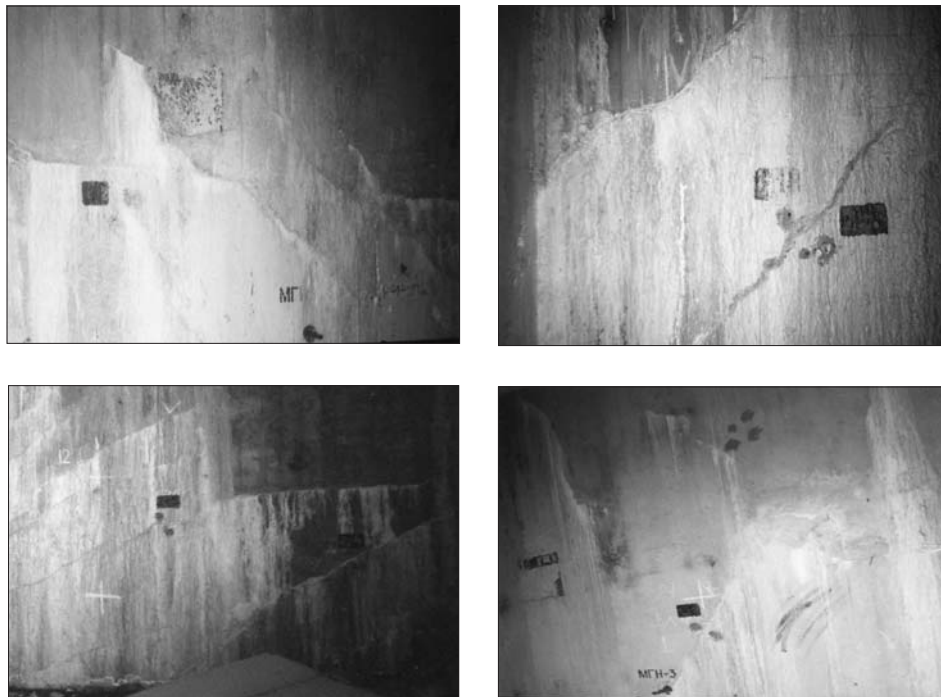


Рис. 2. Фотографии трещин на наружных поверхностях анкерных опор

1. Сеть трещин, ориентированная параллельно оси водоводов. Это объясняется выходом на наружные поверхности радиальных трещин вследствие работы водоводов как нетрещиностойких железобетонных конструкций в кольцевом направлении на действие внутреннего давления в водоводе. Такой тип трещин наблюдается на той части анкерных опор, где нет войлочной прокладки между металлической оболочкой и железобетонной облицовкой.

2. Наклонные трещины, возникшие от действия поперечной силы после поворота плотины от гидростатической нагрузки. Большинство наклонных трещин расположено в средней части анкерной опоры.

3. Единичные вертикальные трещины, расположенные вблизи скального основания. Такие трещины могли возникнуть в процессе возведения и после остывания бетона из-за перепада температур, возникшего в процессе разогрева молодого бетона, между бетоном и скальным основанием.

Анализ натурных наблюдений за НДС анкерных опор, приведенный в [2], позволил выявить систему наклонных сопряженных трещин, которые образуют между собой острый угол (рис. 3). Это обстоятельство однозначно подтверждает тот факт, что в данном случае процесс трещинообразования в бетоне идет в соответствии с критерием Кулона — Мора при $\varphi \neq \pi/2$.

Условие прочности Кулона — Мора имеет вид:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\cos\varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\operatorname{tg}\varphi = c, \quad (1)$$

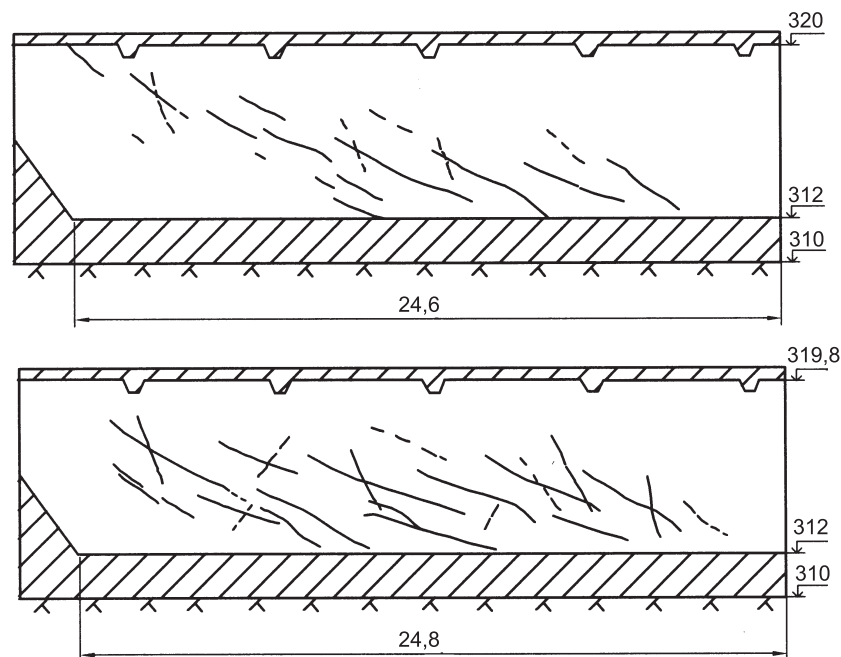


Рис. 3. Наклонные сопряженные трещины на боковых поверхностях анкерных опор ГА 4 и ГА 5

где σ_1, σ_3 — максимальные растягивающие и максимальные сжимающие главные напряжения (причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, σ_2 — среднее по величине главное напряжение);

φ — угол внутреннего трения;

c — удельное сцепление.

Элементарные площадки, на которых выполняется условие, называют площадками предельного равновесия. Их две, они наклонены друг к другу под углом $\pm(\pi/2 - \varphi)$.

Наблюдаемые трещины не являются трещинами отрыва, поскольку трещина отрыва не имеет сопряженных. Дело в том, что направление трещины отрыва может быть получено из критерия Кулона — Мора при $\varphi = \pi/2$, но в этом случае обе сопряженные трещины сливаются в одну, перпендикулярную направлению действия максимального нормального напряжения.

Направление трещин можно определить по зависимостям, приведенным в [2], но для этого необходимо знать по результатам лабораторных экспериментов угол внутреннего трения φ и коэффициент дилатансии α . Поскольку результаты опытов по определению коэффициента дилатансии для бетона отсутствуют, то для простоты примем, что в момент разрушения $\alpha = \tan \varphi$. В этом случае направление действия наибольшего сжимающего напряжения является биссектрисой острого угла между сопряженными трещинами. Такой подход к определению главных осей напряжений основан на классическом критерии прочности. Далее будем связывать направления образующихся в бетоне трещин с предельными плоскостями Кулона — Мора, которые могут быть определены на основе экспериментальных исследований на бетоне. Как показывают результаты опытов, проведенных во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (В. А. Логунова, А. Н. Малахова), паспорт прочности может быть принят в виде прямолинейной огибающей Кулона — Мора. Точка касания огибающей с большим кругом Мора (точка, отображающая предельное состояние тела) определяет две смежные предельные плоскости, проходящие через вто-

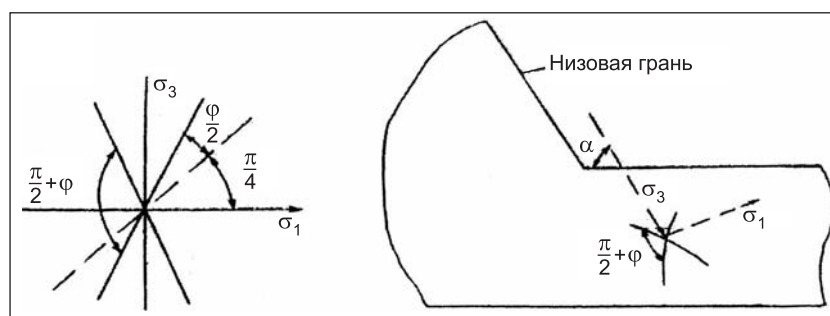


Рис. 4.

рое главное направление и образующие между собой острый угол $\psi = (\pi/2 - \varphi)$ (рис. 4). Главные направления 1 и 3 являются биссектрисами тупого и острого углов соответственно.

В анкерной опоре агрегата 1 значения угла между сопряженными трещинами, расположенными на удалении 5–7 м от низовой грани, изменялись в пределах $\psi = 40\text{--}50^\circ$. Отсюда следует, что угол внутреннего трения должен изменяться в диапазоне $\varphi = 50\text{--}40^\circ$. Направление наибольшего сжимающего напряжения σ_3 составляет с плоскостью горизонта острый угол $\alpha \approx 60^\circ$. Это направление примерно параллельно поверхности низовой грани. Действительно, при действии гидростатического давления воды со стороны напорной грани и ввиду стесненности перемещений в основании происходит изгиб плотины в направлении потока, что и приводит к максимальному сжатию поверхности слоев низовой грани.

В средней части анкерной опоры агрегата (ГА) 3 угол между сопряженными трещинами $\psi = 50^\circ$; $\varphi = 90^\circ - \psi = 40^\circ$; $\alpha = 60\text{--}70^\circ$.

В средней части анкерной опоры агрегата 5 $\psi = 60^\circ$; $\varphi = 30^\circ$; $\alpha \approx 60^\circ$.

Что касается анкерных опор агрегатов 6–10, то четкая картина близко расположенных сопряженных трещин здесь не просматривается, и поэтому невозможно сделать однозначный вывод относительно ориентации главных осей напряжений. Здесь, как правило, отмечаются одиночные трещины разной ориентации в зависимости от расстояния до низовой грани.

Поскольку свойства бетонной облицовки анкерных опор примерно одинаковы, то уменьшение угла внутреннего трения, полученное из анализа направлений сопряженных трещин, при удалении опор от берега к руслу свидетельствует о разной степени сжатия железобетонной оболочки водоводов (ближе к середине русла степень сжатия выше).

При анализе трещин на агрегатах 6–10 и с учетом уменьшения угла внутреннего трения возможна реализация двух различных случаев напряженного состояния. В первом случае можно предположить, что оба напряжения в плоскости обнажения становятся сжимающими и тогда $\sigma_1 = 0 > \sigma_2 > \sigma_3$, т.е. первое главное направление перпендикулярно плоскости обнажения. В этом случае след трещины на свободной поверхности будет совпадать с направлением σ_2 , а направление наибольшего сжатия ему перпендикулярно. Как следует из условия Кулона — Мора для данного напряженного состояния, напряжение σ_3 в момент разрушения на поверхности обнажения полностью определяется следующим образом:

$$\sigma_3 = \frac{2\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} c = -\sigma_c. \quad (2)$$

Во втором случае можно предположить, что в силу некоторых причин (неоднородность, анизотропия) система сопряженных трещин еще не образовалась, тогда ее можно достроить и определить направление глав-

ных осей напряжений. В этом случае качественно напряженное состояние будет тем же, что и в анкерных опорах агрегатов 1–5. Что касается величин главных нормальных напряжений, то они могут быть определены из критерия прочности:

$$\sigma_3 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_c, \quad (3)$$

где σ_c — предел прочности на одноосное сжатие. Если известно одно из напряжений, например σ_1 , то можно определить и σ_3 .

Наблюдения за поведением трещин на боковых поверхностях анкерных опор показали, что:

- вертикальные трещины при росте уровня воды в верхнем бьефе (УВБ) закрываются вследствие увеличения продольного сжатия анкерных опор при более высоких УВБ;

- наклонные трещины в средней части анкерных опор, наоборот, при росте УВБ раскрываются и достигают максимального раскрытия при НПУ. Это объясняется увеличением глубины воронки оседания при высоких НПУ и возрастанием роли изгиба в продольном направлении;

- раскрытие трещин, ориентированных вдоль оси водоводов, зависит от внутреннего давления в водоводах.

На Саяно-Шушенской ГЭС в период 1992–2005 гг. проводились экспериментальные наблюдения за НДС анкерных опор в эксплуатационный период с использованием деформационного метода, предложенного Институтом горного дела СО РАН [3–6]. С этой целью на боковых поверхностях анкерных опор оборудованы четырехкомпонентные розетки для измерения деформаций (база измерения $l = 1$ м). Величины приращений напряжений при наполнении водохранилища в помещениях анкерных опор получены путем пересчета измеренных деформаций с использованием аппарата теории упругости (модуль упругости бетона $E = 40 \cdot 10^3$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0,16$ приняты по данным лаборатории гидротехнических сооружений СШГЭС). Измеренные деформации скорректированы на величину свободной деформации бетона, вызванной изменением температуры воздуха в помещениях анкерных опор ($\alpha^6 = 1 \cdot 10^{-5}$) [4].

На рис. 5 показан характер изменения напряжений на анкерных опорах при наполнении водохранилища. При этом за нулевой цикл принимались показания при минимальных отметках в каждом цикле наполнения. Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее:

- характер изменения напряжений существенно зависит от местоположения станций на горизонтальном участке опоры (удаления станций от низовой грани) и расположения самой опоры в створе плотины. Вблизи низовой грани отмечается сжатие, в центральной части опоры — сдвиг, в конце горизонтального участка — сдвиг с растяжением или растяжение; наибольший прирост сжимающих напряжений отмечается в опорах русловых секций, наименьший — вблизи береговых примыканий;

- к особенностям нагружения опоры водовода ГА 1 относится наличие участка перелома;

- на опорах водоводов ГА 4, ГА 8 (по другим нет информации) отмечается асимметрия в нагрузках: левая сторона опор в 1,4–1,5 раза пригружается сильнее правой (одна из возможных причин — неравномерная осадка основания на этих участках);

- в процессе деформирования анкерных опор за наблюдаемый период отмечаются постоянно нарастающие остаточные деформации в обделке.

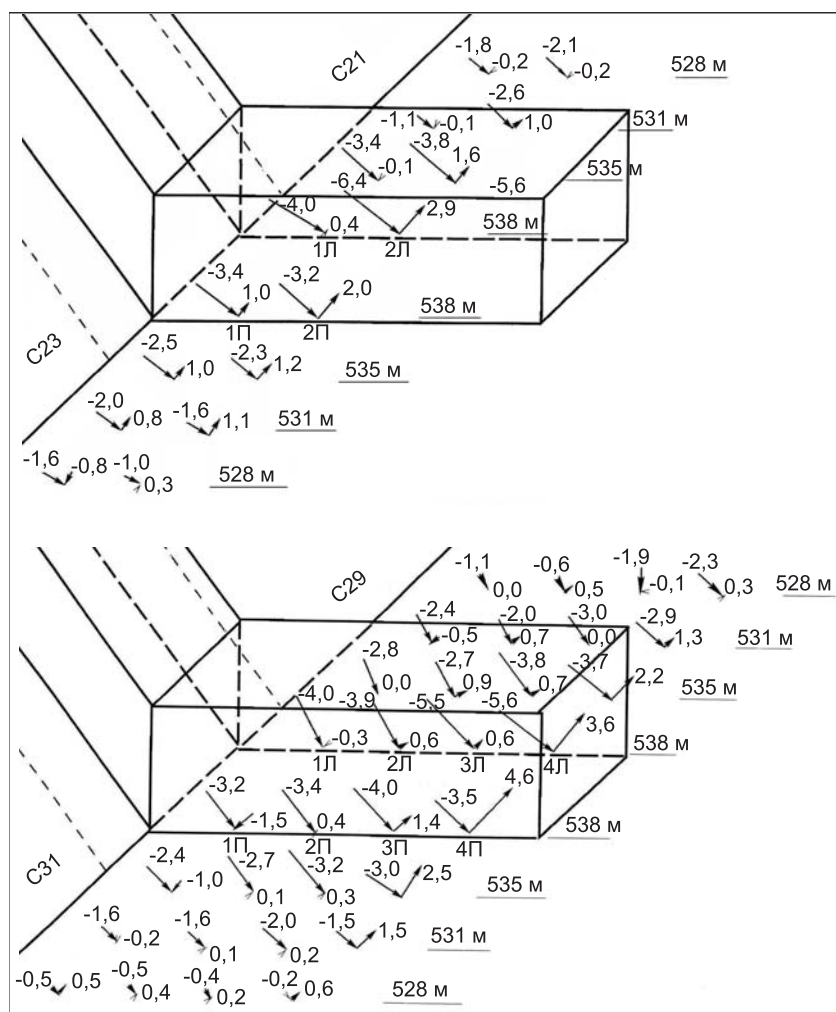


Рис. 5. Приращения напряжений (МПа) на анкерной опоре водоводов ГА 4 и ГА 8 при наполнении водохранилища

Выводы. Для получения оценок параметров напряженно-деформированного состояния в бетоне анкерных опор необходимо проведение комплекса исследований, включающего теоретические, лабораторные исследования и натурные наблюдения. Одним из основных является постановка и решение задачи о напряженном состоянии металлической оболочки и бетона облицовки анкерных опор, реализация которой возможна методами теории упругости для кусочно-однородных областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций/В. И. Брызгалов.— Красноярск: Сиб. изд. дом «Суриков», 1999.— 560 с.
2. Барышников В. Д. О напряженном состоянии и направлениях трещинообразования в бетоне/В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова, В. А. Булатов и др. // Изв. вузов. Строительство.— 1998.— № 4–5.— С. 41–48.
3. Брызгалов В. И. Контроль напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС/В. И. Брызгалов, В. Д. Барышников, В. А. Булатов и др. // Гидротехническое строительство.— 2000.— № 10.— С. 59–62.
4. Барышников В. Д. Некоторые особенности развития деформационных процессов при эксплуатации гидросооружений Саяно-Шушенской ГЭС/В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова // Гидротехническое строительство.— 1999.— № 3.— С. 38–41.

5. Барышников В. Д. Экспериментально-аналитический метод контроля развития деформационных процессов в бетоне при проведении инъектирования разуплотненных зон / В. Д. Барышников, В. А. Булатов, Л. Н. Гахова // Изв. вузов. Строительство. — 2001. — № 5. — С. 54–60.
6. Булатов В. А. Формирование контрольно-измерительного комплекса гидросооружений Саяно-Шушенской ГЭС в строительно-эксплуатационный период / В. А. Булатов, Л. С. Пермякова // Гидротехническое строительство. — 1998. — № 9. — С. 32–34.

© Кузнецова Ю. А., 2008

Получено 03.12.07

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 662.997

О. А. СОТНИКОВА, д-р техн. наук, проф., **Д. М. ЧУДИНОВ**, канд. техн. наук, ассист., **Т. В. ЩУКИНА**, канд. техн. наук, доц. (Воронежский архитектурно-строительный университет)

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕЛИОУСТАНОВОК

Для проектирования систем альтернативного теплоснабжения зданий необходимы точные данные о ресурсах солнечной энергии на территории РФ. Учитывая ограниченность актинометрических сведений, получены уравнения регрессии валового потенциала солнечной радиации в зависимости от широты местности. Введен поправочный коэффициент, позволяющий приблизить расчетные параметры к реальным климатическим условиям в зависимости от среднестатистической облачности.

Эффективное использование солнечной энергии в теплоснабжении зданий может быть осуществлено, если на стадии проектирования выполнено исследование климатических условий района строительства, произведен точный расчет рабочих параметров оборудования и на базе полученных данных сделан выбор рациональной схемы конструктивного исполнения системы. Для достижения в процессе эксплуатации оптимальных режимов функционирования гелиоустановок необходимо также иметь более полные сведения о ресурсах солнечной радиации в местностях их размещения.

Ограничение фактических данных актинометрических наблюдений на территории России [1] и неточность расчетов по существующим зависимостям для определения потенциала солнечной энергии [2] не всегда позволяют получить реальную оценку этой величины. Приблизить расчетные значения к конкретным климатическим условиям предлагается аппроксимирующими зависимостями, полученными в результате обработки данных многолетних наблюдений [3]. Представленные в табл. 1 уравнения регрессии позволяют определить среднемесячное поступление солнечной энергии на горизонтальную поверхность при безоблачном небе для соответствующей географической широты.

При проектировании пассивных систем альтернативного теплоснабжения необходимо знать тепловой поток от солнечной радиации, направленной на вертикальные поверхности. Данные параметры можно определить с помощью аппроксимирующих зависимостей, приведенных в табл. 2.

Несмотря на низкий КПД пассивных систем солнечного отопления, их использование в условиях средней полосы России позволит сократить потребление традиционных видов энергии на 30–40%, а в южных регионах,

Таблица 1

Аналитические зависимости для определения валового потенциала солнечной энергии (прямой и рассеянной) на горизонтальную поверхность при безоблачном небе, МДж/м²

Расчетный период	Уравнение*
Январь	$I = -614,08 \cdot \ln(\varphi) + 2586,09$
Февраль	$I = -600,56 \cdot \ln(\varphi) + 2638,10$
Март	$I = -0,16 \cdot \varphi^2 + 5,41 \cdot \varphi + 677,87$
Апрель	$I = -364,69 \cdot \ln(\varphi) + 2108,73$
Май	$I = -150,26 \cdot \ln(\varphi) + 1444,03$
Июнь	$I = 0,00005571 \cdot \varphi^5 - 0,01486526 \cdot \varphi^4 + 1,57018502 \cdot \varphi^3 - 82,03553868 \cdot \varphi^2 + 2117,99506113 \cdot \varphi - 20707,95629264$
Июль	$I = 0,00163130 \cdot \varphi^4 + 0,34016927 \cdot \varphi^3 - 26,31315104 \cdot \varphi^2 + 896,02144210 \cdot \varphi - 12226,70616884$
Август	$I = -322,42 \cdot \ln(\varphi) + 1988,98$
Сентябрь	$I = -570,53 \cdot \ln(\varphi) + 2779,51$
Октябрь	$I = -762,80 \cdot \ln(\varphi) + 3343,38$
Ноябрь	$I = -650,10 \cdot \ln(\varphi) + 2760,50$
Декабрь	$I = -623,75 \cdot \ln(\varphi) + 2596,38$
Год	$I = -5345,15 \cdot \ln(\varphi) + 27218,19$

* φ , °с.ш. — географическая широта местности

например, в Краснодарском крае, при благоприятных метеоусловиях и рациональной планировке зданий необходимость в тепловой энергии может быть покрыта до 70% [4]. Повысить эффективность пассивного солнечного теплоснабжения для его внедрения в более северные районы можно при использовании недорогих теплоизолирующих и экранирующих подвижных средств защиты, работающих в автоматическом режиме [4].

Существенное влияние на эффективность гелиосистем оказывает облачность климатической зоны, где они установлены. Часто, несмотря на достаточно высокий уровень температур наружного воздуха переходного и холодного периодов года, в некоторых регионах наблюдаются нестабильные режимы функционирования оборудования, приводящие к низким нестабильным параметрам теплоносителя. Это особенно характерно для некоторых территорий Приморского края [1]. В этих случаях для учета изменения валового потенциала солнечной энергии предлагается использовать поправочный коэффициент его ослабления, величина которого учитывает среднестатистическую облачность различных регионов ψ . Он оценивается как отношение значения валового потенциала солнечной радиации при действительных условиях облачности (I_{Σ}^o) к валовому потенциалу солнечной радиации при безоблачном небе (I_{Σ}^a)

$$\psi = I_{\Sigma}^o / I_{\Sigma}^a. \quad (1)$$

Некоторые из полученных поправочных коэффициентов ослабления валового потенциала солнечной энергии представлены в табл. 3.

Приведенные в табл. 1–3 уравнения позволяют в отсутствии фактических актинометрических наблюдений для конкретного района строительства определить ресурсы солнечной энергии с погрешностью до 5%. Выполнение расчетов по предложенным зависимостям необходимо для более точного подбора оборудования, на базе которого можно смонтировать гелиоустановку, максимально приближенную к реальным условиям.

Таблица 2

**Валовый потенциал солнечной энергии (прямой и рассеянной)
на вертикальную поверхность при безоблачном небе в зависимости
от географической широты, МДж/м²**

Ориентация	Уравнение*
<i>Январь</i>	
В/З	$I = -413,98 \cdot \ln(\varphi) + 1768,02$
ЮВ/ЮЗ	$I = -680,79 \cdot \ln(\varphi) + 3042,72$
Ю	$I = -936,33 \cdot \ln(\varphi) + 4171,65$
<i>Февраль</i>	
В/З	$I = -0,07 \cdot \varphi^2 + 1,47 \cdot \varphi + 323,36$
ЮВ/ЮЗ	$I = -0,15 \cdot \varphi^2 + 8,96 \cdot \varphi + 369,71$
Ю	$I = -0,42 \cdot \varphi^2 + 34,34 \cdot \varphi - 93,86$
<i>Март</i>	
СВ/СЗ	$I = 0,01345 \cdot \varphi^3 - 2,13095 \cdot \varphi^2 + 107,24306 \cdot \varphi - 1553,64286$
В/З	$I = 0,01259 \cdot \varphi^3 - 2,13393 \cdot \varphi^2 + 113,60218 \cdot \varphi - 1547,21429$
ЮВ/ЮЗ	$I = 0,01519 \cdot \varphi^3 - 2,54315 \cdot \varphi^2 + 139,13790 \cdot \varphi - 1924,07143$
Ю	$I = 0,01606 \cdot \varphi^3 - 2,96503 \cdot \varphi^2 + 176,29365 \cdot \varphi - 2718,28571$
<i>Апрель</i>	
С	$I = 0,00162 \cdot \varphi^3 - 2,22004 \cdot \varphi^2 + 9,26822 \cdot \varphi - 5,25325$
СВ/СЗ	$I = 0,00773 \cdot \varphi^3 - 1,17025 \cdot \varphi^2 + 57,22610 \cdot \varphi - 654,45455$
В/З	$I = -0,01117 \cdot \varphi^3 + 1,76021 \cdot \varphi^2 - 88,23449 \cdot \varphi + 1859,89610$
ЮВ/ЮЗ	$I = 0,23 \cdot \varphi^2 - 16,08 \cdot \varphi + 772,91$
Ю	$I = -0,02083 \cdot \varphi^3 + 3,13988 \cdot \varphi^2 - 145,07738 \cdot \varphi + 2568,28571$
<i>Май</i>	
С	$I = -0,00005759 \cdot \varphi^5 + 0,01530574 \cdot \varphi^4 - 1,62121667 \cdot \varphi^3 +$ $+85,54976144 \cdot \varphi^2 - 2247,25995058 \cdot \varphi + 23648,71503622$
СВ/СЗ	$I = 0,000005256 \cdot \varphi^6 - 0,001765794 \cdot \varphi^5 + 0,245081715 \cdot \varphi^4 -$ $-17,982568748 \cdot \varphi^3 + 735,471251928 \cdot \varphi^2 -$ $-15892,933393865 \cdot \varphi + 142050,111341135$
В/З	$I = -0,07 \cdot \varphi^2 + 10,10 \cdot \varphi - 169,70$
ЮВ/ЮЗ	$I = 0,05 \cdot \varphi^2 + 5,64 \cdot \varphi + 147,84$
Ю	$I = -0,07 \cdot \varphi^2 + 19,80 \cdot \varphi - 356,09$
<i>Сентябрь</i>	
СВ/СЗ	$I = 0,04 \cdot \varphi^2 - 5,47 \cdot \varphi + 372,00$
В/З	$I = -0,06 \cdot \varphi^2 + 5,16 \cdot \varphi + 268,43$
ЮВ/ЮЗ	$I = -0,19 \cdot \varphi^2 + 22,62 \cdot \varphi - 130,29$
Ю	$I = 0,02214 \cdot \varphi^3 - 3,88690 \cdot \varphi^2 + 228,54464 \cdot \varphi - 3894,35714$
<i>Октябрь</i>	
СВ/СЗ	$I = -231,51 \cdot \ln(\varphi) + 1024,80$
В/З	$I = -333,12 \cdot \ln(\varphi) + 1572,20$
ЮВ/ЮЗ	$I = -156,44 \cdot \ln(\varphi) + 1107,66$
Ю	$I = -0,33 \cdot \varphi^2 + 30,90 \cdot \varphi - 97,50$
<i>Ноябрь</i>	
В/З	$I = -0,06 \cdot \varphi^2 - 0,37 \cdot \varphi + 350,50$
ЮВ/ЮЗ	$I = -0,22 \cdot \varphi^2 + 13,16 \cdot \varphi + 293,79$
Ю	$I = -0,46 \cdot \varphi^2 + 34,68 \cdot \varphi - 18,36$
<i>Декабрь</i>	
В/З	$I = 0,04 \cdot \varphi^2 - 10,96 \cdot \varphi + 587,07$
ЮВ/ЮЗ	$I = -0,15 \cdot \varphi^2 + 1,11 \cdot \varphi + 645,64$
Ю	$I = -0,37 \cdot \varphi^2 + 19,05 \cdot \varphi + 476,00$

* φ , °с.ш. — географическая широта местности

Таблица 3

Поправочный коэффициент ослабления валового потенциала солнечной энергии ψ для некоторых регионов России

Показатели	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Северо-Кавказский регион												
<i>Махачкала</i>												
Поправочный коэффициент	0,48	0,48	0,51	0,68	0,76	0,79	0,79	0,79	0,69	0,60	0,47	0,42
<i>Краснодар</i>												
Поправочный коэффициент	0,48	0,53	0,53	0,61	0,68	0,72	0,74	0,71	0,67	0,61	0,46	0,35
<i>Сочи</i>												
Поправочный коэффициент	0,51	0,55	0,53	0,61	0,69	0,80	0,83	0,83	0,75	0,71	0,62	0,48
Средний поправочный коэффициент региона	0,51	0,53	0,54	0,65	0,73	0,77	0,78	0,79	0,71	0,64	0,49	0,40
Центрально-черноземный регион												
<i>Воронеж</i>												
Поправочный коэффициент	0,52	0,53	0,55	0,57	0,66	0,71	0,67	0,66	0,62	0,53	0,41	0,37
<i>Каменная степь (Воронежская область)</i>												
Поправочный коэффициент	0,53	0,61	0,57	0,61	0,70	0,72	0,69	0,71	0,63	0,52	0,40	0,42
<i>Курск</i>												
Поправочный коэффициент	0,52	0,64	0,52	0,56	0,65	0,69	0,66	0,66	0,60	0,50	0,34	0,38
Средний поправочный коэффициент региона	0,52	0,59	0,54	0,58	0,67	0,70	0,67	0,68	0,61	0,52	0,38	0,40
Центральный регион												
<i>Павелец (Рязанская область)</i>												
Поправочный коэффициент	0,55	0,65	0,58	0,61	0,66	0,69	0,67	0,68	0,67	0,67	0,43	0,42
<i>Москва</i>												
Поправочный коэффициент	0,50	0,58	0,56	0,61	0,67	0,70	0,65	0,67	0,60	0,49	0,38	0,35
<i>Иваново</i>												
Поправочный коэффициент	0,37	0,42	0,35	0,34	0,32	0,33	0,33	0,34	0,30	0,32	0,26	0,33
Средний поправочный коэффициент региона	0,37	0,42	0,35	0,34	0,32	0,33	0,33	0,34	0,30	0,32	0,26	0,33
Северо-Западный регион												
<i>Валдай (Новгородская область)</i>												
Поправочный коэффициент	0,45	0,53	0,59	0,60	0,64	0,68	0,65	0,62	0,53	0,43	0,33	0,39
<i>Санкт-Петербург</i>												
Поправочный коэффициент	0,29	0,39	0,50	0,54	0,62	0,66	0,64	0,59	0,52	0,42	0,25	0,19
<i>Николаевское (Ленинградская область)</i>												
Поправочный коэффициент	0,42	0,50	0,56	0,58	0,64	0,70	0,65	0,65	0,55	0,47	0,31	0,43
Средний поправочный коэффициент региона	0,4	0,50	0,56	0,58	0,65	0,69	0,65	0,63	0,53	0,44	0,31	0,33

Показатели	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Северный регион												
<i>Вологда</i>												
Поправочный коэффициент	0,47	0,58	0,69	0,64	0,62	0,66	0,68	0,64	0,51	0,42	0,43	0,49
<i>Архангельск</i>												
Поправочный коэффициент	0,44	0,45	0,57	0,61	0,60	0,67	0,66	0,60	0,46	0,43	0,39	—
<i>Верхняя Тойма (Архангельская область)</i>												
Поправочный коэффициент	0,51	0,48	0,66	0,67	0,56	0,63	0,67	0,56	0,42	0,35	0,39	0,40
Средний поправочный коэффициент региона	0,50	0,47	0,62	0,65	0,62	0,66	0,66	0,57	0,44	0,45	0,38	0,37
Дальневосточный регион												
<i>Владивосток</i>												
Поправочный коэффициент	0,96	0,90	0,77	0,67	0,59	0,52	0,51	0,58	0,69	0,73	0,75	0,85
<i>Уссурийск</i>												
Поправочный коэффициент	0,90	0,88	0,76	0,70	0,65	0,66	0,65	0,68	0,72	0,72	0,79	0,83
<i>Благовещенск</i>												
Поправочный коэффициент	0,63	0,75	0,73	0,76	0,79	0,81	0,81	0,75	0,68	0,56	0,53	0,53
Средний поправочный коэффициент региона	0,79	0,83	0,77	0,72	0,66	0,65	0,62	0,64	0,66	0,70	0,68	0,71

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попель О. С. Анализ показателей эффективности использования солнечных водонагревательных установок / О. С. Попель, С. Е. Фрид, Ю. Г. Коломиец // Сантехника, отопление, кондиционирование. — 2004. — № 4. — С. 104–109.
2. Гамбург П. Ю. Расчет солнечной радиации в строительстве / П. Ю. Гамбург. — М.: Стройиздат, 1966. — 140 с.
3. Сотникова О. А. Экономическая эффективность использования солнечных систем горячего водоснабжения / О. А. Сотникова, Д. М. Чудинов // АВОК. — 2007. — № 2. — С. 88–94.
4. Щукина Т. В. Солнечное теплоснабжение зданий и сооружений / Т. В. Щукина. — Воронеж: ВГАСУ, 2007. — 121 с.

© Сотникова О. А., Чудинов Д. М., Щукина Т. В., 2008

Получено 29.11.07

М. И. ШИЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., А. М. ШИЛЯЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц., Е. М. ХРОМОВА, канд. физ.-мат. наук, доц., Ю. Н. ДОРОШЕНКО, канд. техн. наук, доц. (Томский государственный архитектурно-строительный университет)

О КОНДЕНСАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМАХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В ПРОТИВОТОЧНЫХ ФОРСУНОЧНЫХ СКРУББЕРАХ И ПЕННЫХ АППАРАТАХ

Проведен анализ опытных данных А. Ю. Вальдберга и Н. М. Савицкой по улавливанию пыли и подтверждены механизмы конденсационного улавливания пыли в пенных аппаратах (диффузионный) и в противоточных форсуночных скрубберах (инерционный), ранее установленные авторами настоящей работы.

В [1–3] проведено обобщение опытных данных по улавливанию субмикронных пылей (сажи, получаемой электрокрекингом метана) за счет конденсационного эффекта в пенных аппаратах (ПА) и противоточных форсуночных скрубберах (ПФС) одной зависимостью от перепада влагосодержания на аппаратах. В качестве обоснования такого обобщения представлены опытные данные по эффективности пылеулавливания как для ПА, так и для ПФС, располагающиеся с кажущимся допустимым разбросом вблизи одной для обоих аппаратов предполагаемой осредненной кривой (рис. 1). Параметры опытов приведены в табл. 1. Однако такое обобщение неправомерно, поскольку физические механизмы, определяющие процесс осаждения частиц в этих аппаратах, разной природы: в ПА — диффузионный, в ПФС — инерционный, реализующийся за счет укрупнения частиц конденсатом [4]. Условия выполнения экспериментальной работы [2] проясняют причину незначительного разброса точек от одной кривой для ПА и ПФС. Суть сложившегося заблуждения авторов объясняется тем, что опытная установка представляла собой совмещение двух аппаратов — ПА и ПФС (рис. 2). На этом основании и последовал далеко идущий вывод: «вид зависимости (для эффективности) остается постоянным для аппаратов различного типа».

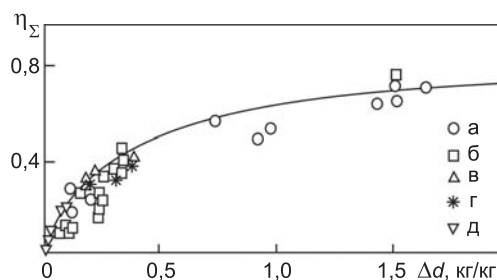


Рис. 1. Эффективность конденсационного осаждения пыли

Рис. 2. Схема опытной установки
1 — корпус; 2 — оросительное устройство;
3 — провальная тарелка

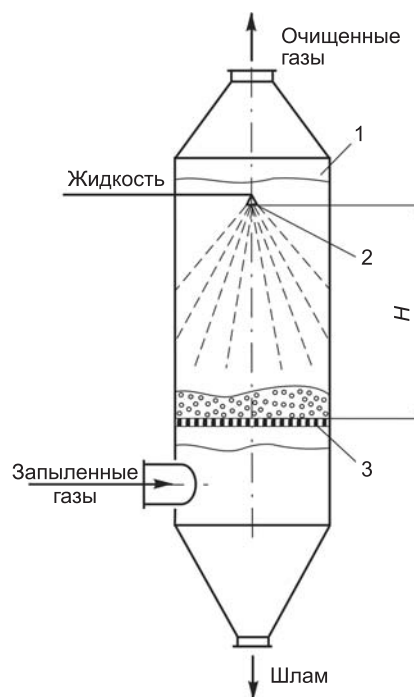


Таблица 1

Параметры опытов к рис. 1

Точки	Технологический процесс	Абсолютное давление газов, кПа	Вид скруббера	Улавливаемая пыль (z — концентрация пыли на входе в аппарат, г/м ³)
<i>a</i>	Электрокрекинг метана	140	Полый, $D_{\text{ап}} = 3,0$; тарельчатый, $D_{\text{ап}} = 1,6$	Сажа, $z = 2,6...3,0$
<i>b</i>	Огневое обезвреживание промстоков на опытной установке	100	Тарельчатый, $D_{\text{ап}} = 0,48$; вентури, диаметр горловины 0,07 м	Соли натрия, $z = 0,5...3,6$
<i>в</i>	Огневое обезвреживание промстоков в производстве капролоктама	100	Тарельчатый, $D_{\text{ап}} = 2,8$	Соли натрия, $z = 0,6$
<i>г</i>	Термоокислительный пиролиз метана	111...112	С уголковой насадкой, $D_{\text{ап}} = 2,8$	Сажа, $z = 1,6$
<i>д</i>	МГД-установка открытого типа	46...66	Тарельчатый, $D_{\text{ап}} = 1,4$	Поташ, $z = 5...7$

В свете вышесказанного проанализируем работу [2]. Сначала приведем цитаты, дающие информацию об условиях проведения эксперимента, необходимую для анализа: «Для подтверждения корректности полученной (обобщенной) зависимости были проведены экспериментальные исследования с использованием двух типов пылеуловителей — полого и тарельчатого скрубберов. Диаметр аппаратов составлял 0,3 м, высота рабочей части — 1,2 м, вода на орошение аппаратов подавалась центробежной форсункой с заполненным факелом распыла. Форсунка была установлена (заметим, одна!) по центру в верхней части аппаратов. Тарельчатый скруббер был оснащен тремя щелевыми провальными тарелками (значит, сверху форсункой создавался пенный слой, в котором реализовывался процесс пылеулавливания по «ударному» механизму) со свободным сечением 0,287 м²/м² и шириной щели 4 мм».

Далее: «Для противоточной схемы использовались две марки пыли..., параметры которых на входе в аппарат (при пересчете на плотность, равную 1000 кг/м³) соответственно составляли: $d_{50} = 4,8$ мкм, $lg = 0,2$, начальная концентрация 0,26...0,66 г/нм³ и $d_{50} = 8,3$ мкм, $lg = 0,275$, начальная концентрация — 0,28...1,38 г/нм³».

Для исследования тарельчатого скруббера: «Параметры пыли на входе в аппарат составляли (при пересчете на плотность, равную 1000 кг/м³): $d_{50} = 8,3$ мкм, $lg = 0,275$, начальная концентрация — 0,26...0,88 г/нм³».

Экспериментальные данные при исследовании скрубберов, работающих в различных тепловых режимах [2], приведены в табл. 2.

Рассмотрим данные эксперимента для полого скруббера, работающего в противотоке, и для тарельчатого.

Полый скруббер, противоток. Опыт № 1: средняя температура воздуха в скруббере $t_{\text{ср}} = 58,3^{\circ}\text{C}$; плотность воздуха $\rho = 1,065$ кг/м³, скорость воздуха на полное рабочее сечение аппарата

$$V_{\text{в}} = \frac{195 \cdot 4}{3600 \cdot 1,065 \cdot 3,14 \cdot 0,3^2} = 0,72 \text{ м/с};$$

коэффициент орошения $\tilde{q} = 2,25 \cdot 10^{-3}$ м³/м³; перепад влагосодержания $\Delta d = 0,222$ кг/кг сух. возд.; динамическая вязкость воздуха $\eta = 20 \cdot 10^{-6}$ Па·с; давление на форсунке $P_{\text{ж}} = 0,09 \cdot 10^6$ Па; геометрическая высота рабочей части скруббера $H = 1,2$ м.

Таблица 2

Обобщение экспериментальных данных [2]

№ опыта	Массовый расход воздуха, кг/ч	Гидравлическое сопротивление скруббера, Па	Удельное орошение, л/м³	Давление распыла, МПа	Температура, С		Режим работы	Изменение влагосодержания, кг/кг сух. возд.	Σэ	Σр
					перед скруббером	после скруббера				
Полый скруббер, противоток										
1	195	98	2,25	0,09	70,6	46	Конденсация	0,222	0,864	0,858
2	230	147	3,55	0,25	72,4	25	То же	0,324	0,981	0,993
3	263	276	3,60	0,25	71,0	29	То же	0,280	0,944	0,994
4	284	190	2,11	0,09	70,7	14	Охлаждение без массообмена	—	0,565	—
5	284	200	4,20	0,25	72,0	10	То же	—	0,938	—
Тарельчатый скруббер										
1	280	157	1,57	0,06	62	27	Охлаждение без массообмена	—	0,685	0,704
2	282	245	4,88	0,25	61	17	То же	—	0,948	—
3	350	118	1,48	0,06	72	57	Конденсация	0,181	0,710	0,704
4	279	245	2,77	0,1	73	47,5	То же	0,263	0,897	—

При заданном давлении на форсунке среднемассовый размер капель для оценочных расчетов можно принять равным $\delta_k = 800$ мкм [5]. По условиям опыта условная плотность частиц $\rho_m = 10^3$ кг/м³, медианный размер частиц $\delta_{50} = 4,8$ мкм, $\delta_{50} = 1,585$ и $\delta_{50} = 8,3$ мкм, $\delta_{50} = 1,88$. Поскольку замечания, какой пыли отвечают опыты № 1–5, представленные в табл. 2, в статье отсутствуют, последующий анализ проведем для средних параметров $\delta_{50} = 6,55$ мкм, $\delta_{50} = 1,73$ и на среднюю входную концентрацию частиц пыли $c = 0,83 \cdot 10^{-3}$ кг/нм³.

Предположим, что все водяные пары конденсируются на капле. Тогда [4]

$$\frac{\delta_k}{\delta_{k0}} = \left(1 + \frac{\rho \Delta d}{\rho_{ж} \tilde{q}}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(1 + \frac{1,065 \cdot 0,022}{10^3 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3}}\right)^{\frac{1}{3}} = 1,03.$$

Согласно полученному результату, размер капли меняется мало и, следовательно, ожидать повышения эффективности пылеулавливания за счет конденсации водяных паров на капли нет оснований. Однако эффект интенсификации пылеулавливания за счет конденсации водяных паров в аппарате в целом для данного опыта имеет место.

В этой связи естественно предположить, что повышение эффективности проявляется за счет конденсации водяных паров на частицах пыли. Оценим увеличение диаметра частицы медианного размера, полагая, что весь конденсат оседает на частицах [4]:

$$\frac{\delta_{\delta k}^{50}}{\delta_{50}} = \left(1 + \frac{\rho \Delta d \rho_m}{\rho_{ж} c_{\delta}}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(1 + \frac{1,065 \cdot 0,222 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 0,83 \cdot 10^{-3}}\right)^{\frac{1}{3}} = 6,59.$$

Как видно из результата, размер частицы увеличился весьма существенно. Размер частицы с конденсатом на поверхности будет иметь величину

$$\delta_{\delta k}^{50} = 6,59 \cdot \delta_{50} = 6,59 \cdot 6,55 = 43 \text{ мкм}.$$

Определим число Стокса для исходных частиц:

$$\text{Stk}_{50} = \tau_{50} \frac{W}{\delta_k}, \quad \tau_{50} = \frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18\mu} = \frac{10^3 \cdot 6,55^2 \cdot 10^{-12}}{18 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 1,19 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Здесь $W = V_{ks} + V_B$, $V_{ks} = 4,7$ м/с — скорость стационарного осаждения капли размером $d_k = 800$ мкм в воздухе [4]. Так что

$$\text{Stk}_{50} = 1,19 \cdot 10^{-4} \frac{4,7 + 0,72}{8 \cdot 10^{-4}} = 0,806.$$

Число Стокса для частицы с конденсатом на поверхности увеличится в $6,59^2$ раза:

$$\text{Stk}_{50,k} = 0,806 \cdot 6,59^2 = 35$$

и $\lg \text{Stk}_{50,k} = 1,54$. По номограммам [4] определяем $K_{\Sigma \text{cp}} = 0,0001$ и $\Sigma_{\text{cp}} = 0,9999$. Эта величина значительно превосходит опытное значение эффективности $\Sigma_{\text{э}} = 0,864$.

В связи с вышеполученным результатом заметим, что форсунка, генерирующая капли, имеет определенный корневой угол распыла жидкости, и поскольку она одна, то не все рабочее пространство покрывается каплями. В данном случае уместно ввести либо эффективную высоту $H_{\text{эф}}$, меньшую H , либо эффективное значение коэффициента орошения $\tilde{q}_{\text{эф}}$, меньшее \tilde{q} , в такое же число раз.

При этом надо принять во внимание, что капли, достигающие при движении под углом к оси стенки аппарата, уходят из потока и больше не участвуют в столкновительном процессе с частицами.

Не рассматривая динамику движения капель и их траектории, для расчета ориентировочно примем $H_{\text{эф}} = 0,43$ м и оценим эффективность пылеулавливания по медианному размеру частиц с конденсатом на поверхности при одной и той же эффективной высоте $H_{\text{эф}} = 0,43$ м для всех опытов по формуле

$$K_{d50} = \exp \left(-\frac{3}{2} \frac{(V_{\text{кы}} + V_{\text{г}})}{V_{\text{кы}}} \tilde{q} \frac{H}{d_k} h_{\text{Stk}} \right).$$

Опыт № 1: $t_{\text{cp}} = 58,3^\circ\text{C}$; $\rho = 1,065$ кг/м³, $V_B = 0,72$ м/с; $\tilde{q} = 2,25 \cdot 10^{-3}$ м³/м³; $\Delta d = 0,222$ кг/кг сух. возд.; $P_{\text{ж}} = 20 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $P_{\text{ж}} = 0,09 \cdot 10^6$ Па.

$$\eta_{\text{Stk}} = \left(\frac{\text{Stk}_{50,k}}{\text{Stk}_{50,k} + 0,125} \right)^2 = \left(\frac{35}{35 + 0,125} \right)^2 = 0,993;$$

$$K_{850} = \exp \left(-\frac{3}{2} 2,25 \cdot 10^{-3} \frac{0,43}{8 \cdot 10^{-4}} \frac{(0,72 + 4,7)}{4,7} 0,933 \right) = 0,142;$$

$\Sigma_p = 0,858$ (опыт: $\Sigma_{\text{э}} = 0,864$). Различие составляет 0,7%.

Опыт № 2: $t_{\text{cp}} = 48,7^\circ\text{C}$; $\rho = 1,1$ кг/м³; $V_B = 0,82$ м/с; $\tilde{q} = 3,55 \cdot 10^{-3}$ м³/м³; $\Delta d = 0,324$ кг/кг сух. возд.; $P_{\text{ж}} = 20 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $P_{\text{ж}} = 2,5 \cdot 10^5$ Па.

С учетом повышения давления жидкости на форсунке размер капли по сравнению с предыдущим случаем уменьшится в $\left(\frac{0,9}{2,5} \right)^{-0,35} = 1,43$ раза

[5], т.е. получим $\delta_k = \frac{800}{1,43} = 560$ мкм, $V_{ks} = 3,93$ м/с.

Определим увеличение диаметра частицы медианного размера за счет конденсации водяных паров на частицах пыли:

$$\frac{\delta_{\delta_k}^{50}}{\delta_{50}} = \left(1 + \frac{1,1 \cdot 0,324 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 0,83 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{3}} = 7,64; \quad \delta_{\delta_k}^{50} = 7,64 \cdot 6,55 = 50 \text{ мкм};$$

$$\text{Stk}_{50} = \tau_{50} \frac{V_{ks}^0 + V_r}{\delta_{k0}} = 1,19 \cdot 10^{-4} \frac{3,93 + 0,82}{8 \cdot 10^{-4}} = 0,707;$$

$$\text{Stk}_{50,k} = 0,707 \cdot 7,64^2 = 41,3;$$

$$\eta_{\text{Stk}} = \left(\frac{\text{Stk}_{50,k}}{\text{Stk}_{50,k} + 0,125} \right)^2 = \left(\frac{41,3}{41,3 + 0,125} \right)^2 = 0,994;$$

$$K_{\delta 50} = \exp \left(-\frac{3}{2} 3,55 \cdot 10^{-3} \frac{0,43}{5,6 \cdot 10^{-4}} \frac{(3,93 + 0,82)}{3,93} 0,994 \right) = 0,0073;$$

$\Sigma_p = 0,993$ (опыт: $\Sigma_p = 0,981$). Различие составляет 1,1%.

Опыт № 3: $t_{cp} = 50^\circ\text{C}$; $\rho = 1,09 \text{ кг/м}^3$; $V_b = 0,95 \text{ м/с}$; $\tilde{q} = 3,60 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\Delta d = 0,280 \text{ кг/кг сух. возд.}$; $\mu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $P_{ж} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Здесь также примем $\delta_k = 560 \text{ мкм}$.

По расчету получаем:

$$\frac{\delta_{\delta_k}^{50}}{\delta_{50}} = 7,26; \quad \delta_{\delta_k}^{50} = 47,5 \text{ мкм}; \quad \text{Stk}_{50,k} = 42,5;$$

$$\eta_{\text{Stk}} = \left(\frac{42,5}{42,5 + 0,125} \right)^2 = 0,9941;$$

$$K_{\delta 50} = \exp \left(-\frac{3}{2} 3,60 \cdot 10^{-3} \frac{0,43}{5,6 \cdot 10^{-4}} \frac{(3,93 + 0,95)}{3,93} 0,9941 \right) = 0,00598;$$

$\Sigma_p = 0,994$ (опыт: $\Sigma_p = 0,944$). Различие составляет 5,2%.

Из согласованности результатов расчета по экспоненциальной формуле для коэффициентов проскока с экспериментом следует важный практический вывод: расчет полного проскока с достаточной достоверностью можно проводить, не пользуясь номограммами, а непосредственно по формуле для фракционного проскока, подставляя в нее вместо размера частиц фракции медианный размер логарифмически нормального распределения всей пыли. Однако при высоких значениях δ_k такого согласования не должно быть. Действительно, суммарный проскок в соответствии с теоремой о среднем можно представить в виде

$$K_{\Sigma} = \int_0^{\delta_{\max}} K_{\delta} g(\delta) d\delta = K_{\delta}(\delta_{cp}),$$

где δ_{cp} — некоторое среднее значение размера δ в интервале $(0, \delta_{\max})$.

Величина δ_{cp} будет тем ближе к δ_{50} логарифмически нормального закона распределения, чем уже интервал отклонения размеров частиц от δ_{50} , т.е. чем ближе δ_k к 1. Во всяком случае, до $\delta_k = 2$, как показывает эксперимент, такой рекомендацией пользоваться правомерно.

Тарельчатый скруббер (пенный аппарат). Опыты № 1 и 3 соответствуют самому низкому значению коэффициента орошения при совместной работе ПФС и ПА (см. рис. 2). Следует ожидать, что в этих слу-

чаях улавливание частиц после пенного слоя ПА на капли орошающей жидкости незначительно и эффективность определяется только работой решетки ПА. Поскольку отверстия решетки щелевые, проведем расчет по формуле для фракционного проскока для ЦБА по медианному размеру частиц δ_{50} [4]:

$$K_{\delta} = e^{a \text{Stk}_{50}^n} \quad (a=3,85; \quad n=0,5), \quad (1)$$

где

$$\text{Stk}_{50} = \tau_{50} \frac{V_0}{d_r}; \quad (2)$$

$$d_r = 2l_{\text{щ}};$$

$l_{\text{щ}}$ — ширина щели;

V_0 — скорость воздуха в щелях;

$$\tau_{50} = \frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18\mu};$$

ρ_m — плотность частиц; в данном случае фракционный состав приведен к $\rho_m = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\delta_{50} = 8,3 \text{ мкм}$, $\lg \sigma = 0,275$ ($\sigma = 1,9$); $\mu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

По опытным данным скорость на все сечение аппарата $U = 1,1 - 1,4 \text{ м/с}$, живое сечение $S_0 = 0,287 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $l_{\text{щ}} = 4 \text{ мм}$, $V_0 = \frac{1,1-1,4}{0,287} = 3,5 - 4,9 \text{ м/с}$.

Тогда

$$d_r = 2l_{\text{щ}} = 8 \text{ мм}, \quad \tau_{50} = \frac{10^3 \cdot 8,3^2 \cdot 10^{-12}}{18 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 1,91 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

$$\text{Stk}_{50} = 1,91 \cdot 10^{-4} \frac{4,2}{8 \cdot 10^{-3}} = 0,1.$$

Так что $K_{\delta} = e^{-3,85\sqrt{0,1}} = 0,296$, $\delta_{50} = 0,704$ (опытное значение: $\delta_{50} = 0,685$ (опыт № 1) и $\delta_{50} = 0,710$ (опыт № 3)).

По универсальной номограмме для инерционных пылеуловителей [4] при

$$\alpha = a \text{Stk}_{50}^n = 3,85\sqrt{0,1} = 1,217; \quad \lg \alpha = 0,0853, \quad \sigma^n = \sqrt{1,9} = 1,38$$

получим $K_{\Sigma} = 0,31$ и $\delta_{\Sigma} = 0,69$, что согласуется с опытными данными.

Отсюда следует, что расчет полной эффективности для ПА можно вести по формуле (1), определяя стоксовское число по медианному размеру частиц.

В рассматриваемом случае в оценочном расчете принят один ряд решеток из трех, поскольку, как известно [6], от решетки к решетке, особенно для провалных, эффективность пылеулавливания резко снижается.

Выводы. Согласование опытных данных с расчетом свидетельствует о том, что для крупных частиц (в данном случае $\delta_{50} = 8,3 \text{ мкм}$) основной механизм осаждения — инерционный, а конденсация осуществляется не на частицах, а на внутренних поверхностях пузырей, формирующихся на отверстиях решетки. Однако диффузионная скорость, действующая на частицы, будет намного меньше скорости за счет их центробежного дрейфа в радиальном направлении. При этом надо иметь в виду, что идет массообмен между влажным воздухом и каплями орошающей жидкости над пенным слоем и при высоких коэффициентах орошения значительная часть перепада влагосодержания может приходиться на пространство над поверхностью пенного слоя. Это означает, что весь перепад влагосодер-

жания, зафиксированный в опытах, нельзя относить только к пенному слою (к конденсации в пузырях).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов В. Н. Очистка газов мокрыми фильтрами/В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг.— М.: Химия, 1972.— 247 с.
2. Вальдберг А. Ю. Расчет пылеулавливания при работе скрубберов в конденсационном режиме/А. Ю. Вальдберг, Н. М. Савицкая//ТОХТ.— 1993.— Т. 27.— № 5.— С. 526–530.
3. Вальдберг А. Ю. К расчету эффективности мокрых пылеуловителей/А. Ю. Вальдберг//ТОХТ.— 1987.— Т. 21.— № 3.— С. 407–411.
4. Шияев М. И. Методы расчета пылеуловителей/М. И. Шияев, А. М. Шияев, Е. П. Грищенко.— Томск: ТГАСУ, 2006.— 385 с.
5. Витман Л. А. Распыливание жидкостей форсунками/Л. А. Витман, Б. Д. Кацнельсон, И. И. Палеев.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.— 264 с.
6. Гордон Г. М. Пылеулавливание и очистка газов/Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов.— М.: Металлургия, 1964.— 499 с.

© Шияев М. И., Шияев А. М., Хромова Е. М., Дорошенко Ю. Н., 2008

Получено 25.12.07

УДК 628.16.628.162

Л. В. ПРИЙМАК, инж. (Сибирский федеральный университет, Институт архитектуры и строительства, г. Красноярск)

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ПРИ РЕАГЕНТНОМ ОБЕСФТОРИВАНИИ ВОДЫ

Приведены экспериментальные данные по определению состава комплексов, образующихся в воде при обработке алюмосодержащими реагентами, и результаты дробного дозирования реагентов. Изучение состава комплекса подтверждает эффективность и целесообразность дробного дозирования реагентов. Рекомендованы режимы реагентного обесфторивания для сокращения расхода коагулянта и снижения его требуемой дозы.

С целью сокращения расхода реагента при обесфторивании природных вод проводились исследования по установлению состава образующихся алюмофторидных комплексов. Природные воды с концентрацией фтора 7–9 мг/л обрабатывались алюмосодержащими реагентами — сульфатом и оксихлоридом алюминия.

Исследования проводились для изучения оптимальных соотношений доз вводимого алюмосодержащего реагента и извлекаемого фтора.

По данным некоторых исследований [1, 2] наиболее полное извлечение фтора из воды солями алюминия происходит в слабокислой среде, при этом доза сульфата алюминия, необходимая для глубокого обесфторивания, составляет 12 мг по иону алюминия на 1 мг извлекаемого фтора.

Изучение состава фторсодержащего комплекса проводили на основе ионного баланса присутствующих в воде анионов и катионов до и после обработки воды разными дозами алюмосодержащих реагентов [3].

Объем воды (5 л) обрабатывался в заданном соотношении реагента (по иону алюминия) относительно содержания ионов фтора. Соотношения вводимого реагента к иону фтора составляли на 1 г/моль F — 2, 4, 6, 8, 10, 12 г/моль Al. Затем объем воды делили на 5 частей и корректировали pH 2%-м раствором NaOH.

В каждой серии проб обработанная вода перемешивалась и отстаивалась в статических условиях в течение 2 ч. Осветленная вода анализиро-

валась на содержание F^- , SO_4^{2-} , Al^{3+} . Значения pH обрабатываемой воды контролировали pH-метром со стеклянным электродом. Концентрации не связанных в комплекс ионов определяли по стандартным методикам.

Экспериментальные данные по определению состава комплексов, образующихся в воде при обработке алюмосодержащими реагентами, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав алюмофторидного комплекса

Соотношение г/моль F на г/моль Al	Фтор		Алюминий		Моль Al моль F
	мг/л	Δ , моль/л	мг/л	Δ , моль/л	
1 : 2	2,76	0,22	0,8	0,49	2,2
1 : 4	2,14	0,26	5,0	0,85	3,3
1 : 6	1,07	0,31	11,0	1,15	3,7
1 : 8	0,78	0,33	1,95	2,0	6,1
1 : 10	0,69	0,33	4,5	2,43	7,4
1 : 12	0,39	0,35	5,6	2,9	8,3

Увеличение дозы алюминия приводит к росту относительного количества ионов Al^{3+} , входящих в его состав, причем при дозе вводимого реагента 1:2 относительное количество ионов алюминия, входящих в комплекс, пропорционально с коэффициентом, близким к единице.

При обработке фторсодержащей воды более высокими дозами образование алюмофторидного комплекса идет с коэффициентом пропорциональности 0,7, что свидетельствует о превышении необходимых доз.

Применение реагентного метода обесфторивания природной воды в одну ступень в соответствии с рекомендациями нормативной и справочной литературы [1, 2] требует введения больших доз коагулянта и дополнительно приводит к сверхнормативному увеличению солесодержания и остаточной концентрации ионов алюминия.

Для сокращения дозы алюмосодержащего реагента и получения требуемой степени очистки исследовалось дробное дозирование [4].

Исследования проводились на воде с исходной концентрацией фтора 7 мг/л в двух режимах: при разовом введении реагента (6 г/моль на 1 г/моль фтора) и дробном (порциями в весовом соотношении на 1 г/моль фтора 2 г/моль алюминия, через разные интервалы времени) (табл. 2).

При режиме однократного введения реагента наблюдалось снижение концентрации фтора с 7 до 2,5 мг/л.

Исследования подтвердили, что снижение концентрации фтора в процессе реагентной обработки неодинаково во времени. В начальный период сорбция фтора идет более интенсивно, затем с течением времени процесс сорбции замедляется.

Это объясняется снижением сорбционной способности гидроокисного осадка со временем, так как в начальный период образованные хлопья гидроксида алюминия обладают более высокой сорбционной способностью.

Таблица 2

Кинетика процесса обесфторивания при различных интервалах времени дозирования реагента

Интервал времени, мин	Исходная концентрация фтора, мг/л	Остаточная концентрация фтора (мг/л) при кратности			Количество извлекаемого фтора, %
		1	2	3	
0,5	7,0	5,77	3,22	1,08	91
1	7,0	5,74	3,19	1,05	90
2	7,0	5,85	3,23	1,13	86
3	7,0	5,91	3,31	1,25	85

Таблица 3

Глубина обесфторивания при различных исходных концентрациях фтора

Исходная концентрация фтора, мг/л	Остаточная концентрация фтора (мг/л) при кратности дозирования реагента				
	1	2	3	4	5
7	5,1	2,2	0,69	0,5	0,47
9	5,74	3,19	1,05	0,92	0,72
11	6,0	3,46	1,2	0,96	0,77

Эффективность процесса реагентного обесфторивания зависит не только от дозы реагента, но и от кратности его введения в обрабатываемую воду, а также от времени контакта реагента с водой.

Исследование сорбции ионов фтора при дробном дозировании реагента показало, что процесс обесфторивания происходит более интенсивно с интервалом времени 0,5–1 мин [5].

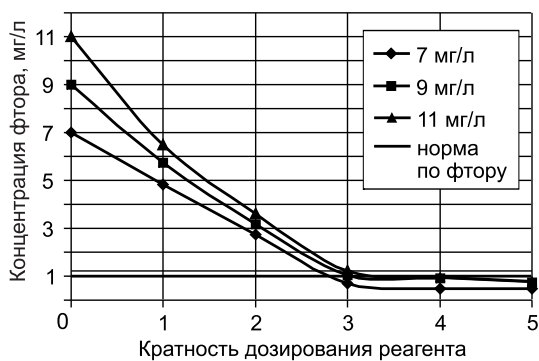
Применение дробного дозирования позволяет:

- получить более глубокую степень обесфторивания при одной и той же дозе реагента;
- сократить расход коагулянта и снизить требуемую дозу на 40–60%.

При дробной реагентной обработке воды с исходной концентрацией фтора 7, 9, 11 мг/л (табл. 3) оптимальная кратность дозирования реагента равна 3 (рисунок).

Выводы. 1. Изучение состава комплекса подтверждает эффективность и целесообразность дробного дозирования реагентов, которое позволяет достичь требуемой глубины обесфторивания при меньших затратах алюмосодержащего коагулянта.

2. Оптимальная доза разового введения реагента должна быть 1:2, 1:3. Передозировка реагента приводит к избытку ионов алюминия в обработанной воде.



Изменение концентрации фтора при дробном дозировании реагента (интервал времени 1 мин)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николадзе Г. И. Улучшение качества подземных вод/Г. И. Николадзе.— М.: Стройиздат, 1987. — 240 с.
2. Фрог Б. Н. Водоподготовка: Учеб. пособие для вузов/Б. Н. Фрог, А. П. Левченко.— М.: Изд-во МГУ, 1996.— 680 с.
3. Приймак Л. В. Исследование процесса комплексообразования при реагентном обесфторивании воды/Л. В. Приймак//Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения.— Вып. 9.— Красноярск, 2005.— С. 148–150.
4. Приймак Л. В. Интенсификация процессов реагентного обесфторивания воды/Л. В. Приймак, Т. Я. Пазенко, Л. В. Стафейчук: Материалы регион. науч.-практ. конференции, 24–26 апреля, 2002 г., г. Тюмень, с. 25–27.
5. Пазенко Т. Я. Технология обесфторивания природной воды/Т. Я. Пазенко, Л. В. Стафейчук, Л. В. Приймак: Материалы 61-й науч.-техн. конференции НГАСУ (Сибстрин), 6–9 апреля, 2004 г.

© Приймак Л. В., 2008

Получено 26.11.07