

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 1 (709)

Январь 2018 г.

Научно-теоретический журнал

Издаётся с марта 1958 г.

Выходит один раз в месяц

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград  
А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва  
А.А. Волков, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., МАДГТУ (МАДИ), Москва  
В.Г. Гагарин, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ, Москва  
М.А.о. Гаджиев, д-р техн. наук, проф., АУАС, Баку, Азербайджан  
У. Гайсбауэр, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет Штутгарт, Германия  
В.В. Дегтярев, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Й. Деспотович, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия  
В.Т. Ерофеев, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИ МордГУ им. Н.П. Огарева, Саранск  
Г.В. Есаулов, акад. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва  
В.И. Жаданов, д-р техн. наук, проф., ОГУ, Оренбург  
М. Иветич, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия  
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград  
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., Юго-ЗапГУ, Курск  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск  
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Ж.С. Нугужинов, д-р техн. наук, проф., Казахстанский МИРР, Караганда, Казахстан  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск  
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (главный редактор), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж  
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Тел. +7 (383) 266 28 59

[www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ**

Мищенко А.В. Моделирование двумерных температурных полей в структурно-неоднородных стержнях с разрывными геометрическими параметрами ....	5
---	---

### **СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ**

Кадисов Г.М. Динамика вантового моста при движении регулярной колонны грузовых автомобилей .....	16
--	----

### **СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Гаусс К.С. Моделирование гидратации портландцемента без минеральных добавок .....	25
---	----

Панова В.Ф., Камбалина И.В., Панов С.А., Карпачева А.А. Модифицированные вяжущие из природных и техногенных пород для получения сухих строительных смесей .....	36
---	----

### **ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

#### **НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.**

#### **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Еськин А.А., Ткач Н.С., Лягуша М.С. Очистка нефтесодержащих вод напорной флотацией с распыливанием жидкости .....	47
---	----

Гириков О.Г. Совершенствование новой технологии глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов .....	57
--	----

Самарин О.Д. Аналитическая оценка возможности исключения вторичного подогрева притока в прямоточных системах кондиционирования воздуха .....	69
--	----

### **ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**

Кузнецов Г.И., Крук Н.В. Мерзлотные подпорные стены в гидротехническом строительстве .....	76
--	----

Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Лаврентьев В.Л., Соколова В.А. Оценка эффективности применения трубчатого дренажа в криолитозоне .....	84
---	----

### **ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Земсков А.В., Клыков М.С. Прогнозирование потребности в ресурсах с учетом надежности расписания .....	96
---	----

### **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

Калугин Ю.Б. Поиск минимального разреза сетевой модели слиянием вершин при оптимизации календарных планов по срокам .....	104
---	-----

### **НАШИ ЮБИЛЯРЫ**

Выдающийся ученый, педагог, новатор (к 80-летию Алексея Игнатьевича Гныри) .....	113
--	-----

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION  
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL  
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL  
INSTITUTIONS

# CONSTRUCTION

No. 1 (709)

January 2018

Scientific-theoretical journal  
Published since March 1958  
Monthly

---

#### EDITORIAL BOARD

- V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia  
A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
A.A. Volkov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
V.A. Vorob'yov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
V.G. Gagarin, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
M.A.o. Hajiyev, DSc (Eng), Prof., Baku, Azerbaijan  
U. Gaisbauer, Dr. – Ing., Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Germany  
V.V. Degtyarev, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
J. Despotović, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia  
V.T. Erofeev, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saransk, Russia  
G.V. Esaulov, Acad. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow, Russia  
V.I. Zhadanov, DSc (Eng), Prof., Orenburg, Russia  
M. Ivetić, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia  
V.A. Ignat'yev, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia  
V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk, Russia  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
P. Lieblang, Dr., Prof., Technische Hochschule, Köln, Germany  
L.S. Lyakhovich, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Tomsk, Russia  
V.M. Mitasov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
V.I. Morozov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia  
Zh. S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Republic of Kazakhstan  
Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg, Russia  
G.I. Pustovetov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk, Russia  
V.G. Sebeshev, Honour. Mem. RAACS, PhD, Prof. (*Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
Yu.L. Skolubovich, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia  
Jong Wan Hu, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea  
Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh, Russia  
Eun Chul Shin, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea

Responsible secretary N.V. Bitkina

*The editorial office's address:*

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008 Russia  
Phone number +7 (383) 266 28 59  
[www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)  
E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## **CONTENTS**

### **THEORY OF STRUCTURES**

Mishchenko A.V. Two-dimensional temperature fields in modeling of structural-heterogeneous rods with geometrical discontinuous parameters .....	5
---	---

### **BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS**

Kadisov G.M. Dinamics of cable-stayed bridge during the movement of a regular column of lorry loads .....	16
---	----

### **BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Gauss K.S. Modeling of the portlandcementate hydration without mineral additives .....	25
--	----

Panova V.F., Kambalina I.V., Panov S.A., Karpacheva A.A. Modified astident from natural and technogenic rocks to obtain dry constraction mixtures .....	36
---	----

### **LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION**

Es'kin A.A., Tkach N.S., Lyagusha M.S. Purification of oily water by dissolved air flotation with spraying of liquid .....	47
--	----

Girikov O.G. The improvement of new technology for deep cleaning of wastewater from heavy metal ions .....	57
--	----

Samarin O.D. The analitic estimation of possibility of elimination of secondary heating of supply air in direct-flow air conditioning systems .....	69
---	----

### **HYDROENGINEERING CONSTRUCTION, HYDRAULICS AND ENGINEERING HIDROLOGY**

Kuznetsov G.I., Kruk N.V. Frozen retaining walls in hydraulic engineering .....	76
---	----

Dzyubenko L.F., Kuznetsova Yu.A., Lavrent'ev V.L., Sokolova V.A. Efficiency evaluation of the tube drainage application in the cryolithozone .....	84
--	----

### **TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION**

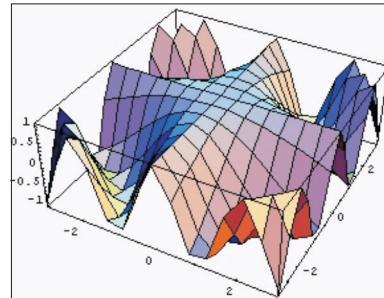
Zemskov A.V., Klykov M.S. Forecasting resource requirements with a schedule of reliability .....	96
--	----

### **SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY**

Kalugin Yu.B. Search of a minimum cut of the network schedule by merging vertices .....	104
---	-----

### **JUBILEE'S ARTICLY**

The outstanding scientist, the teacher, the innovator (to the 80 <sup>th</sup> anniversary of Aleksey Ignat'evich Gnyrya) .....	113
---	-----



## ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.016:536.21

А.В. МИЩЕНКО

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЯХ С РАЗРЫВНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

На основе метода Власова–Канторовича выполнено построение решения задачи о стационарной теплопроводности слоистого стержня при поперечном направлении теплового потока. Особенностью структуры стержня является наличие разрывов ширины слоев в уровнях межслойных границ. Функция распределения температуры в поперечном сечении каждого слоя представлена в виде разложения по тригонометрическим базисным функциям с искомыми переменными амплитудами. Условия сопряжения для температуры и плотности теплового потока представлены в интегральной форме. Выполненное сравнение с численным расчетом неоднородного стержня таврового сечения по методу конечных элементов показало удовлетворительные результаты.

**Ключевые слова:** стационарная теплопроводность, плоское температурное поле, слоистый стержень, метод Власова–Канторовича.

Тепловое воздействие, наряду с силовым и кинематическим, является одним из основных внешних факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние инженерных конструкций различного назначения. Обычно теплотехнические расчеты выполняются для ограждающих систем, изготовленных с применением эффективных изоляционных материалов. Расположение внутри них несущих конструктивных элементов, имеющих совершенно иные физические характеристики материалов, приводит к созданию локальных участков с пониженным термическим сопротивлением. Очевидно, что для обеспечения нормируемого температурного режима внутри здания необходим теплотехнический расчет, выполненный с учетом таких неоднородных участков. С другой стороны, тепловое воздействие оказывает существенное влияние и на напряженно-деформированное состояние самих несущих конструкций. Главным фактором в этом случае является пространственное поле распределения внутренней температуры. Проблема его нахождения осложняется тем, что в результате оптимизации геометрическая форма и пространственное распределение материала в конструкции становятся сложными и могут иметь особенности (разрывы) геометрических и физиче-

ских параметров<sup>1</sup>. В современной строительной практике все шире используются структурно-неоднородные несущие системы. Численные и аналитические исследования показывают [1–4], что аппроксимации температурных полей с помощью простых кусочно-линейных функций [5, 6] в таких конструкциях малопригодны [4].

На рис. 1 приведены результаты численного конечно-элементного решения [4] задачи о стационарной теплопроводности двухслойного неоднородного стержня тавровой формы при поперечном направлении теплового потока – снизу вверх. Подробное описание принятых исходных данных приведено в примере расчета ниже. В соответствии с граничными условиями первого рода теплообмен осуществлялся через верхнюю и нижнюю поверхности. Анализ решений показывает, что лишь в сечении прямоугольной формы изотермы близки к прямым линиям, а по мере нарастания величины разрыва функции ширины сечения  $b(y)$  на границе полки тавра со стенкой наблюдается их искривление, в особенности – в более широком слое (полке).

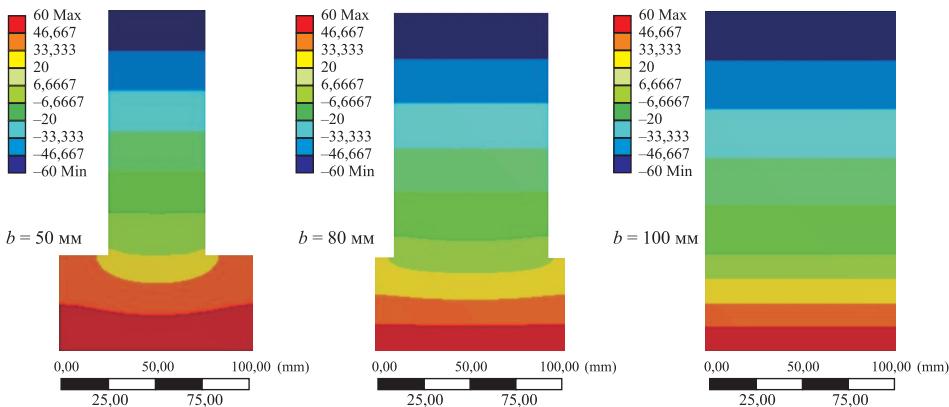


Рис. 1. Двумерное поле температур в тавровых и прямоугольном сечении неоднородных стержней; ширина нижнего слоя  $b_1 = 100 \text{ mm}$ , верхнего –  $b_2 = 50; 80; 100 \text{ mm}$

Наряду с выполнением численных решений для подобных задач теплопроводности [1, 2], интерес представляет построение аналитических решений приемлемой трудоемкости на основе специальным образом подобранных функций, моделирующих двумерные температурные поля в неоднородных стержнях, с феноменологическим учетом возникающих особенностей. Выявление данных полей позволяет посредством физических зависимостей находить напряженное состояние в неоднородной структуре [5, 6] за исключением зон краевых эффектов [4, 7, 8]. Вопросу построения вариантов таких решений и посвящена данная статья.

Неоднородный стержень представлен кусочно-однородной поперечно-слоистой средой (рис. 2). В нем имеется  $s$  слоев (фаз), выполненных

<sup>1</sup> Немировский Ю.В., Мищенко А.В., Вохмянин И.Т. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем. Новосибирск: НГАСУ, 2004; Мищенко А.В. Способ формирования нелинейных физических соотношений в прямых и обратных задачах расчета многофазных стержней // Вестн. ЮУрГУ. Стр-во и архитектура. 2014. Т. 14. № 3.

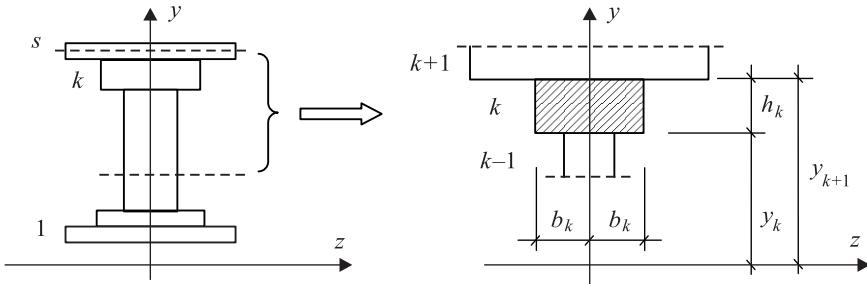


Рис. 2. Схема поперечного сечения (и ее фрагмент справа) поперечно-слоистого стержня

из различных однородных материалов с коэффициентами теплопроводности  $\lambda_k$  ( $k = 1, \dots, s$ ). Ось  $x$  имеет продольное направление, а структура в целом обладает свойствами симметрии относительно плоскости  $xy$ . Фазы отделены друг от друга цилиндрическими поверхностями  $y_k(x)$  ( $k = 1, \dots, s + 1$ ), пронумерованными снизу вверх, с образующими, параллельными оси  $z$ . Направлением реализации неоднородности структуры является поперечная ось  $y$ . Привязка стержня к плоскости  $y = 0$  – произвольная. В нормальном к оси  $x$  сечении стержня слои имеют прямоугольную форму с размерами  $2b_k$ ,  $h_k = y_{k+1} - y_k$ . В уровне  $k$ -й границы  $y = y_k$  функция  $b(y)$  имеет разрыв  $\Delta b_k = b_{k,\max} - b_{k,\min}$ , здесь  $b_{k,\max} = \max(b_{k-1}, b_k)$  – максимальное, а  $b_{k,\min} = \min(b_{k-1}, b_k)$  – минимальное значение ширины смежных слоев. В результате на межслойной границе  $y = y_k$  образуется два участка: общий участок границы  $z \in [0, b_{k,\min}]$  и участок разрыва контакта  $z \in [b_{k,\min}; b_{k,\max}]$ .

Теплообмен осуществляется через верхнюю ( $u$ ) и нижнюю ( $d$ ) поверхности, на остальных – отсутствует. При использовании граничных условий первого рода (Дирихле) снизу и сверху заданы изменения температур  $\Delta t_d$ ,  $\Delta t_u$  соответственно, а в случае применения условий второго рода (Неймана) на данных поверхностях задаются плотности тепловых потоков  $q_d$ ,  $q_u$  [9, 10].

Задачу о нахождении искомых температурных полей  $t_k(x, y, z)$  ( $k = 1, \dots, s$ ) будем рассматривать на основе уравнения стационарной теплопроводности. Считая продольные градиенты геометрических параметров стержня и параметров внешнего температурного поля малыми, будем рассматривать двумерную задачу нахождения функций  $t_k(y, z)$  ( $k = 1, \dots, s$ ) в правой полуплоскости  $yz$   $s$ -слойного сечения стержня (рис. 2) на основе уравнения Лапласа [9, 10]

$$\nabla^2 t_k(y, z) = 0, \quad (k = 1, \dots, s). \quad (1)$$

Полагая постоянство величин  $\Delta t_d$ ,  $\Delta t_u$ ,  $q_d$ ,  $q_u$  в направлении оси  $z$ , потребуем удовлетворения условий

- (a)  $t_1(y_1, z) = \Delta t_d$ ,  $z \in [0, b_1]$ ,
- $t_s(y_{s+1}, z) = \Delta t_u$ ,  $z \in [0, b_s]$ ,
- (б)  $t_k(y_{k+1}, z) = t_{k+1}(y_{k+1}, z)$ ,  $z \in [0, b_{k,\min}]$ ,  $k = 1, \dots, s-1$ ,
- (в)  $\lambda_k \frac{\partial t_k(y_{k+1}, z)}{\partial y} = \lambda_{k+1} \frac{\partial t_{k+1}(y_{k+1}, z)}{\partial y}$ ,  $z \in [0, b_{k,\min}]$ ,  $k = 1, \dots, s-1$ ,  $(2)$

$$(г) \frac{\partial t_k(y_{k+1}, z)}{\partial y} = 0, \quad z \in [b_{k, \min}, b_{k, \max}], \quad k = 1, \dots, s-1,$$

$$(д) \frac{\partial t_k(y, b_k)}{\partial z} = 0, \quad y \in [y_k, y_{k+1}], \quad k = 1, \dots, s,$$

среди которых: граничные условия первого рода на нижней и верхней поверхностях (а), условия сопряжения температур (б) и плотностей тепловых потоков (в) на общих участках межслойных границ, условия отсутствия теплообмена на горизонтальных участках разрыва функции ширины (г) и на боковой поверхности слоев (д). При использовании граничных условий второго рода равенства (а) заменяются следующими:

$$(е) \begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial t_1(y_1, z)}{\partial y} &= q_d, \quad z \in [0, b_1], \\ \lambda_s \frac{\partial t_s(y_{s+1}, z)}{\partial y} &= q_u, \quad z \in [0, b_s], \end{aligned}$$

при дополнительных условиях разрешимости граничной задачи:  $b_1 q_d = b_s q_u$  и задании температуры  $t(y_*, z_*)$  в некоторой точке слоистой структуры [9].

Рассмотрим способ построения приближенного решения краевой задачи (1) – (2). Аппроксимируем двумерное поле температуры в  $k$ -м слое функцией

$$t_k(y, z) = t_k^{(0)}(y) + \Phi_k(y, z), \quad (k = 1, \dots, s), \quad (3)$$

$$t_k^{(0)}(y) = c_{k1} + c_{k2}y, \quad (4)$$

содержащей базовую полилинейную аппроксимацию  $t_k^{(0)}(y)$ , являющуюся точным решением задачи для поперечно-слоистой структуры (рис. 2) без разрывов ширины, и поправочную функцию  $\Phi_k(y, z)$ , отражающую нелинейность распределения температуры в силу наличия разрывности ширины слоев. Представим поправочную функцию согласно методу Власова–Канторовича [9]

$$\Phi_k(y, z) = \sum_{j=1}^n A_{kj}(y) f_{kj}(z), \quad (k = 1, \dots, s) \quad (5)$$

с использованием  $n$  заданных базисных функций  $f_{kj}(z)$ , удовлетворяющих граничным условиям (2, д), с искомыми амплитудами  $A_{kj}(y)$ .

Исходя из феноменологических соображений о характере распределения температуры в  $k$ -м слое в направлении оси  $z$  (см. рис. 1) и требования о выполнении условий (2, д), примем базисные функции в виде

$$f_{kj}(z) = \cos \frac{j\pi z}{b_k} - 1, \quad (j = 1, 2, \dots). \quad (6)$$

Из них качественно требуемую форму распределения (с точностью до знака) имеет первая функция ( $j = 1$ ), а остальные ( $j > 1$ ) позволяют выполнить ее уточнение.

Другим вариантом базисных функций могут являться балочные функции прогибов при наличии в балке жесткой заделки на левом и плавающей – на правом конце. Задание переменной изгибной жесткости либо переменной координаты промежуточного цилиндрического шарнира на оси балки позволяет определенным образом изменять форму балочной функции.

Для определения вида функций  $A_{kj}(y)$  подставим аппроксимацию (3)–(5) в уравнение (1) и выполним ортогонализацию полученной невязки

$$\sum_{j=1}^n \int_0^{b_k} \left[ f_{kj} \frac{d^2 A_{kj}}{dy^2} + A_{kj} \frac{d^2 f_{kj}}{dz^2} \right] f_{ki} dz = 0, \quad (i = 1, \dots, n).$$

В результате для  $k$ -го слоя получим систему уравнений

$$\mathbf{a}_k \mathbf{A}_k'' + \mathbf{d}_k \mathbf{A}_k = 0, \quad (7)$$

записанную с использованием числовых квадратных матриц  $\mathbf{a}_k = \{a_{ij}^{(k)}\}$ ,  $\mathbf{d}_k = \{d_{ij}^{(k)}\}$  и вектор-функции  $\mathbf{A}_k(y)$ :

$$a_{ij}^{(k)} = \int_0^{b_k} f_{ki} f_{kj} dz, \quad d_{ij}^{(k)} = \int_0^{b_k} f_{ki} \frac{d^2 f_{kj}}{dz^2} dz,$$

$$\mathbf{A}_k(y) = [A_{k1}(y) A_{k2}(y) \dots A_{km}(y)]^\top, \quad \mathbf{A}_k''(y) = \frac{d^2}{dy^2} \mathbf{A}_k(y).$$

Принимая базисные функции в виде (6), получим

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1,5b_k, & i=j, \\ b_k, & i \neq j, \end{cases} \quad d_{ij}^{(k)} = \begin{cases} -0,5\pi^2/b_k, & i=j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Система (7) имеет решение

$$\mathbf{A}_k(y) = \sum_{j=1}^n (\xi_{j1} \mathbf{v}_j e^{\lambda_j y} + \xi_{j2} \mathbf{v}_j e^{-\lambda_j y}), \quad (8)$$

где  $\pm\lambda_j$  – собственные числа системы уравнений (7), являющиеся корнями характеристического уравнения

$$\det(\mathbf{a}_k \lambda^2 + \mathbf{d}_k) = 0, \quad (9)$$

$\mathbf{v}_j = [v_{j1} v_{j2} \dots v_{jn}]^\top$  – собственный вектор системы (7), соответствующий числу  $\lambda_j$ ;  $\xi_{j1}, \xi_{j2}$  ( $j = 1, \dots, n$ ) – неопределенные постоянные.

Используя решение (8), видоизменяя его, окончательно представим искомую аппроксимацию (3) в виде:

$$t_k(y, z) = c_{k1} + c_{k2} \frac{y}{h} + \sum_{j=1}^n \bar{A}_{kj}(y) \left( \cos \frac{j\pi z}{b_k} - 1 \right), \quad (k = 1, \dots, s), \quad (10)$$

$$\bar{A}_{kj}(y) = g_0(y) (c_{kj1} e^{\lambda_j y} + c_{kj2} e^{-\lambda_j y}),$$

$$g_0(y) = h^{-2}(y_{s+1} - y)(y - y_1), \quad h = y_{s+1} - y_1,$$

содержащую  $n_p = 2s(1+n)$  параметров. Функция  $g_0(y)$  обеспечивает возможность точного непрерывного выполнения граничных условий (2, а).

Поскольку нахождение точного решения задачи (1), (2) в данном случае не представляется возможным, то, ослабив требования (1), (2), выполним, во-первых, замену условий (б), (в), (г), (1) интегральными условиями, во-вторых, с целью обеспечения баланса числа искомых параметров и уравнений заменим каждое из условий (б) на  $m = n$  интегральных равенств, записанных для частичных интервалов, в-третьих, исключим из рассмотрения условия (д) в силу их автоматического выполнения для функции (10). Тогда для задачи Дирихле получим

$$(a) \quad t_1(y_1, z) = c_{11} + c_{12}h^{-1}y_1 = \Delta t_d, \\ t_s(y_{s+1}, z) = c_{s1} + c_{s2}h^{-1}y_{s+1} = \Delta t_u,$$

$$(б) \quad \int_{b_{k,j}}^{b_{k,j+1}} t_k(y_{k+1}, z) dz = \int_{b_{k,j}}^{b_{k,j+1}} t_{k+1}(y_{k+1}, z) dz, \quad \begin{array}{l} k = 1, \dots, s-1, \\ j = 1, \dots, m, \\ b_{k,j} = b_{k,\min}(j-1)/m, \end{array}$$

$$(в) \quad \lambda_k \int_0^{b_{k,\min}} \frac{\partial t_k(y_{k+1}, z)}{\partial y} dz = \lambda_{k+1} \int_0^{b_{k,\min}} \frac{\partial t_{k+1}(y_{k+1}, z)}{\partial y} dz, \quad k = 1, \dots, s-1, \quad (11)$$

$$(г) \quad \int_{b_{k,\min}}^{b_{k,\max}} \frac{\partial t_k(y_{k+1}, z)}{\partial y} dz = 0, \quad k = 1, \dots, s-1,$$

$$(ж) \quad \sum_{j=1}^n \int_{y_k}^{y_{k+1}} \int_0^{b_k} \left[ f_{kj} \frac{d^2 \bar{A}_{kj}}{dy^2} + \bar{A}_{kj} \frac{d^2 f_{kj}}{dz^2} \right] f_{ki} dy dz = 0, \quad \begin{array}{l} k = 1, \dots, s, \\ i = 1, \dots, n. \end{array}$$

Система (11) содержит  $n_{eqv} = 2s(1+n) - n$  линейных уравнений относительно  $n_p$  искомых параметров. В качестве  $n$  недостающих уравнений могут быть использованы дополнительные уравнения из групп (б), (в) или (г), сформулированных для частичных интервалов. Кроме того, возможны ситуации отсутствия разрыва ширины на некоторых межслойных границах, приводящих к исключению из системы соответствующего числа уравнений типа (г). В общем случае, введя для каждой межслойной границы признак наличия разрыва функции ширины  $r_i = 0; 1$  ( $i = 1, \dots, s+1$ ), проиллюстрируем соответствие числа искомых параметров и составляемых уравнений следующей таблицей.

Здесь использованы обозначения: ГУ – граничные условия, НТ, НТП, ОН – уравнения непрерывности температуры, непрерывности плотности теплового потока, уравнения ортогонализации невязки исходных дифференциальных уравнений,  $n_r = \sum_{i=1}^{s-1} r_i$ . В таблице приведены строки, соответствую-

## Типы уравнений, формируемых для преобразованной краевой задачи

Номера границ $i$	Номера смежных слоев		Межслойные разрывы		Уравнения						
			$r_i$	$\Delta b_i$	ГУ: верх/ низ	НТ	НТП		$\Delta q = 0$		ОН
							осн.	доп.	осн. $r_i$	доп.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	—	1	—	—	1	—	—	—	—	—	$n$
2	1	2	1	$\Delta b_2$	—	$n$	1	0	1	0	$n$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$k$	$k-1$	$k$	0	0	—	$n$	1	1	0	0	$n$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$i$	$i-1$	$i$	1	$\Delta b_{\max}$	—	$n$	1	0	1	$n$	$n$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$s$	$s-1$	$s$	1	$\Delta b_s$	—	$n$	1	0	1	0	$n$
$s+1$	$s$	—	—	—	1	—	—	—	—	—	$n$
						2	$n(s-1)$	$s-1$	$s-1-n_r$	$n_r$	$n$
											$s \cdot n$

щие двум начальным и двум конечным регулярным границам с наличием разрывов ширины, одной промежуточной  $k$ -й – без разрыва ширины и одной  $i$ -й – с максимальным разрывом для записи  $n$  дополнительных уравнений. Складывая суммы, приведенные внизу столбцов, получим  $n_{eqv} = n$ .

Рассмотрим пример построения решения (10) задачи (1), (11) для неоднородного стержня, исследованного в [4]. В поперечном сечении стержень имел форму тавра (см. рис. 1) с параметрами:  $\lambda_1 = 58$  Вт/м/гр,  $\lambda_2 = 2\lambda_1$ ,  $b_1 = 100$  мм,  $b_2 = 50$  мм,  $h_1 = 50$  мм,  $h_2 = 125$  мм,  $y_2 = 0$ ,  $\Delta t_d = 60$  °C,  $\Delta t_u = -60$  °C.

Конечно-элементный расчет выполнен в среде Ansys-17 с использованием элементов типа «гексаэдр». Сгенерированная пространственная модель в продольном направлении содержала 400 элементов; 20 и 10 – по ширине и высоте полки; 10 и 25 – по ширине и высоте стенки. Общее число КЭ составило 180 000.

Приняв по две базисные функции в (10) для каждого слоя, определив решением (9) собственные числа  $\lambda_{k1} = \pm\pi/b_k$ ,  $\lambda_{k2} = \pm\pi\sqrt{5}/(5b_k)$ , составим для определения искомых параметров 12 уравнений (11), в числе которых: два условия (а), три условия (б) –  $m = 3$ , два условия (в), одно типа (г) для участка разрыва и четыре условия ортогональности (ж). В результате получим:

$$[c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16}] = [9,91; -175,33; -53,84; -1,72; -34,32; 10,22],$$

$$[c_{21}, c_{22}, c_{23}, c_{24}, c_{25}, c_{26}] = [10,07; -98,10; 0,00; 0,40; 0,0089; -4,33].$$

Параметры  $c_{k1}, c_{k2}$  ( $k = 1, \dots, s = 2$ ) определяют полилинейное распределение температуры (4) на оси симметрии сечения, а  $c_{k3}, c_{k4}, c_{k5}, c_{k6}$  – амплитуды  $\bar{A}_{kj}(y)$  ( $j = 1, 2$ ) базисных функций в (10).

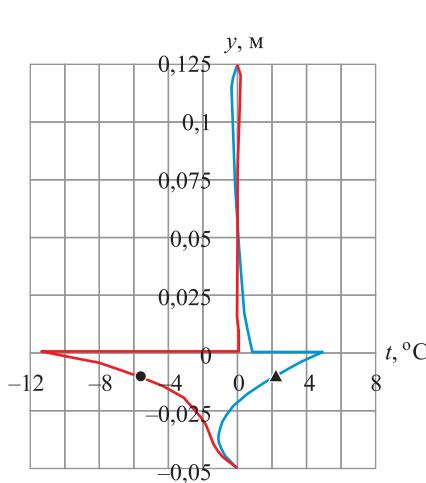


Рис. 3. Графики амплитуд  $\bar{A}_{1j}(y)$ ,  
 $\bar{A}_{2j}(y)$  функции (10)  
● –  $j = 1$ , ▲ –  $j = 2$

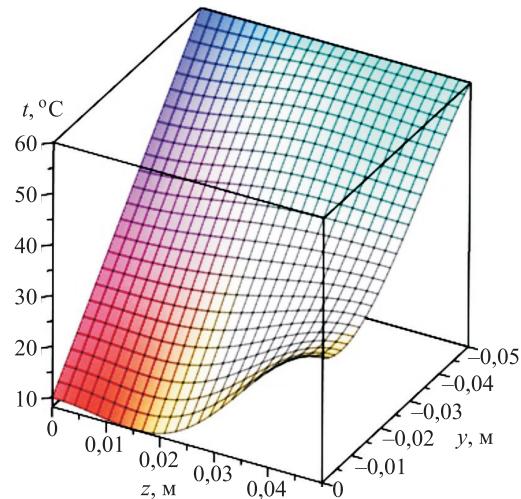


Рис. 4. Распределение температуры в полке тавра (правая половина по рис. 1, 2)

Графики амплитуд, приведенные на рис. 3, показывают, что в силу наличия участка разрыва ширины сечения наиболее значимые отклонения от полилинейной функции (4) наблюдаются в полке тавра в окрестности ее границы со стенкой (рис. 4), что согласуется с результатами численных расчетов. Наибольший вклад дает первая форма ( $j = 1$ ). Абсолютные максимальные ее значения в 2,3 раза превышают значения амплитуды второй функции ( $j = 2$ ). В стенке тавра нелинейные поправки невелики и распределение температуры близко к линейному.

Графики температуры  $t_k(y, z)$  (10) при фиксированных значениях координаты  $y$  отражены на рис. 5 сплошными линиями, а пунктиром – показаны

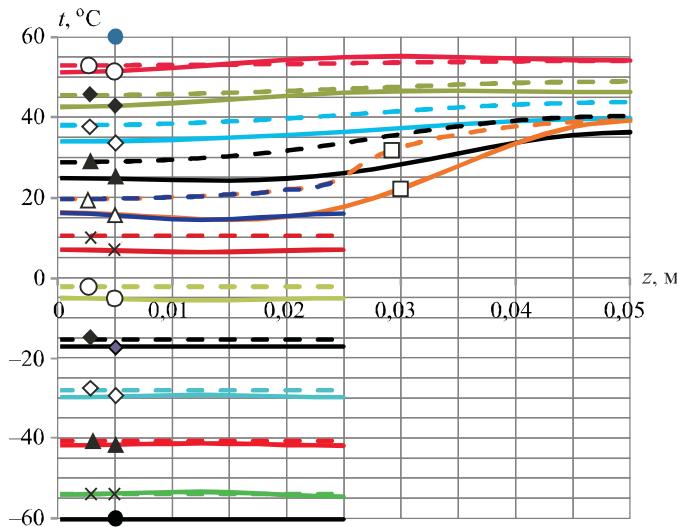


Рис. 5. Графики температуры  $t(y, z)$  при различных значениях  $y$   
1 (●), 2 (○), 3 (◆), 4 (◇), 5 (▲), 6 (□) – в полке при  $y = -0,05; -0,04;$   
 $-0,03; -0,02; -0,01; 0; 7 (\Delta), 8 (x), 9 (○), 10 (◆), 11 (◇), 12 (▲),$   
 $13 (x), 14 (●)$  – в стенке при  $y = 0; 0,015; 0,035; 0,055; 0,075; 0,095;$   
 $0,115; 0,125$  соответственно

результаты численного расчета [4]. Использование трех интегральных условий сопряжения (11, б) позволяет добиться хорошего совпадения температур  $t_1$ ,  $t_2$  на общем участке границы слоев (линии 6 и 7). Для 14 уровней  $y_1, \dots, y_{14}$  (рис. 5) погрешности  $\max_z [t_{\text{МКЭ}}(y, z) - t(y, z)] / \Delta t_d$  в процентах соответственно составили: 0; 2,8; 5,2; 7,0; 12,6; 22,3; 14,7; 6,0; 4,5; 3,4; 2,4; 1,5; 0,9; 0. Наибольшее расхождение результатов расчета температуры наблюдается в окрестности угловой точки при  $y = 0, z = 0,025$  на межслойной границе. По мере удаления от нее результаты быстро сближаются и на внешних границах полностью совпадают (линии 1, 14).

Предложенный вариант построения аналитического решения задачи стационарной теплопроводности слоистого стержня при поперечном направлении теплового потока характеризуется удовлетворительной точностью и трудоемкостью, приемлемой для выполнения последующего решения задачи термоупругости в рамках технических теорий стержней Тимошенко или Бернулли, что составляет предмет дальнейших исследований. Интерес также представляет нахождение температурных полей и напряженного состояния в стержнях с более сложной многослойной структурой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Методы решения параболических и гиперболических уравнений теплопроводности / под ред. Э.М. Карташова. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 280 с.
2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
3. Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В., Назаренко С.А. Теплопроводность и термоупругость многослойных конструкциях. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 304 с.
4. Мищенко А.В., Калинкин С.А. Напряженное состояние слоисто-неоднородных стержней при стационарном тепловом воздействии // Тр. НГАСУ. Новосибирск: НГАСУ, 2017. Т. 20. № 2(65). С. 29–42.
5. Мищенко А.В. Нелинейное термоупругое деформирование многофазных стержней // Стройт. механика инж. конструкций и сооружений. 2014. № 4. С. 42–51.
6. Мищенко А.В. Напряжения в слоистых стержнях переменного сечения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13. № 4. С. 537–547.
7. Янковский А.П., Немировский Ю.В. Особенности деформирования образцов с покрытиями при локализованных нагрузлениях // Физ. мезомеханика. 2007. Т. 10. № 2. С. 29–42.
8. Васильев В.В. Механика конструкций из композитных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.
10. Немировский Ю.В., Янковский А.П. Теплопроводность однородных и композитных тонкостенных конструкций. Новосибирск: Арт-Авеню, 2008. 512 с.

**Мищенко Андрей Викторович**, д-р техн. наук, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 21.12.17

**Mishchenko Andrey Viktorovich**, DSc, Ass. Professor  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **TWO-DIMENSIONAL TEMPERATURE FIELDS IN MODELING OFE STRUCTURAL-HETEROGENEOUS RODS WITH GEOMETRICAL DISCONTINUOUS PARAMETERS**

Decision of stationary heat conductivity by composite rod task is executed on the basis of Vlasov–Kantorovich method. Heat flow have the transverse direction. Availability of discontinuous width function in layered bounds is the structural characteristic of composite rod. The temperature distribution function is realized by decomposition in trigonometric basic functions with required variable amplitude in the cross sections of each layer. Temperature and heat flow density accordance conditions are realized in the integrated form. Contented result were obtained by numerical computation of T-shape cross section heterogeneous rods according to finite-element method.

**К e y w o r d s:** stationary heat conductivity, plane temperature field, composite rod, Vlasov–Kantorovich method.

### **REFERENCES**

1. Kudinov V.A., Kudinov I.V. Metody resheniy parabolicheskikh i giperbolicheskikh uravneniy teploprovodnosti [Decision methods of parabolic and hyperbolic heat conductivity equations]. Moscow, Publishing house «Librokom», 2012. 280 p. (in Russian)
2. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Vichislitel'naya teploperedacha [Calculating heat transmission ]. Moscow, Editorial URSS, 2003. 784 p. (in Russian)
3. Kudinov V.A., Averin B.V., Stepanuk E.V., Nazarenko S.A. Teploprovodnost'i termouprugost'v mnogosloynykh konstruktsiyakh [Heat conductivity and thermoelasticity in multilayered constructions]. Samara; Samara State Technical University, 2008. 304 p. (in Russian)
4. Mishchenko A.V., Kalinkin S.A. Napryazhennoe sostoyanie sloistoneodnorodnykh sterzhney pri statcionarnom teplovom vozdeystviyu [Stress state of layered-heterogeneous rods on the stationary temperature influence]. Trudy NGASU [Proceeding of NSUACE]. Novosibirsk, NSUACE, 2017. Vol. 20. No. 2(65). Pp. 29–42. (in Russian)
5. Mishchenko A.V. Nelineynoe termouprugoe deformirovanie mnogofaznykh sterzhney [Non-linear thermoelastic deformation of the multiphase rods]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2014. No. 4. Pp. 42–51. (in Russian)
6. Mishchenko A.V. Napryazheniya v sloistykh sterzhnyakh peremennogo secheniya [Stresses on the layered rods of variable cross sections]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy [Composite Mechanics and Design]. 2007. Vol. 13. No. 4. Pp. 537–547. (in Russian)
7. Yankovskiy A.P., Nemirovskiy Yu.V. Osobennosti deformirovanya obraztsov s pokrytiyami pri lokalizovannyykh nagruzheniyakh [Peculiarity of test covering beams deformation on the local loading]. Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanic]. 2007. Vol. 10. No. 2. Pp. 29–42. (in Russian)

8. Vasil'ev V.V. Mekhanika konstruktsiy iz kompozitnykh materialov [Mechanics of the Composite Material Structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 272 p. (in Russian)
  9. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki [Mathematical physics equations]. Moscow, Science, 1966. 724 p. (in Russian)
  10. Nemirovskiy Yu.V., Yankovskiy A.P. Teploprovodnost' odnorodnykh i kompozitnykh tonkostennyykh konstruktsiy [Heat conductivity of homogeneous and heterogeneous thin-walled design]. Novosibirsk, Art-Avenyu, 2008. 512 p. (in Russian)
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.04

Г.М. КАДИСОВ

### ДИНАМИКА ВАНТОВОГО МОСТА ПРИ ДВИЖЕНИИ РЕГУЛЯРНОЙ КОЛОННЫ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Рассмотрены вынужденные колебания вантового моста с пролетным строением складчатой системы с жесткими поперечными диафрагмами. Колебания вызваны движением с постоянной скоростью регулярной колонны грузовых автомобилей. Исследование процесса колебаний выполняется путем численного решения системы интегральных уравнений Вольтерра первого рода. Установлена зависимость между скоростью движения колонны, отношением шага ее регулярности к периоду системы и моментом возникновения резонанса.

Ключевые слова: вантовый мост, складка, пylon, ванты, колонна автомобилей, резонанс.

История вопроса о воздействии подвижной нагрузки на мосты изложена в [1], при этом отмечены четыре варианта задачи о движении груза по балке с учетом и без учета массы. Решения задач о динамике мостов представлены в [2 – 4]. Решения пространственных задач о динамике однопролетных и неразрезных многопролетных автодорожных мостов под воздействием одиночных или регулярной колонны грузовых автомобилей даны в [5]. Особенности динамики железнодорожных мостов достаточно подробно рассмотрены в [6].

Ниже рассматриваются особенности решения задач динамики вантовых мостов в пространственной постановке. Так, при движении одного автомобиля по однопролетному строению наибольшее динамическое воздействие оказывается при скорости значительно меньшей критической, при которой автомобиль за время, равное половине основного периода собственных колебаний пролетного строения, успевает пройти весь пролет. В случае регулярной колонны автомобилей наибольший динамический эффект проявляется при скорости, обеспечивающей продвижение колонны на один шаг регулярности за один период свободных колебаний вантового моста. Ниже представлены особенности решения задачи о совместных колебаниях вантового моста с подвижной инерционной нагрузкой.

**Уравнения динамики системы «вантовый мост + колонна автомобилей».** Для решения поставленной задачи сначала необходимо определить

основные динамические свойства вантового моста, в основном собственные частоты и собственные формы. Методы решения задач на собственные значения изложены в [7].

Для определения собственных частот и собственных форм вантового моста сначала необходимо решить вспомогательные задачи на собственные значения для раздельных его конструкций – складки и пилона. Для складки и пилона примем расчетные схемы метода перемещений. Пусть  $\mathbf{R}_i$  – реакции распределенных вдоль узловых линий складки дополнительных связей и  $\mathbf{M}_i$  – приведенная матрица инерционности для  $i$ -й гармоники складки, а также  $\mathbf{R}_p$  и  $\mathbf{M}_p$  – матрицы реакций и масс пилона. Собственные формы и собственные числа складки  $\varphi_{ik}, \lambda_{ik}$  и пилона  $\varphi_{pk}, \lambda_{pk}$  определяются из однородных уравнений  $(\mathbf{R}_i - \lambda_{ik} \mathbf{M}_i) \varphi_{ik} = \mathbf{0}$  и  $(\mathbf{R}_p - \lambda_{pk} \mathbf{M}_p) \varphi_{pk} = \mathbf{0}$ . Для каждой гармоники количество собственных частот и собственных форм равно учетверенному числу узловых линий складки. Собственные формы складки и пилона нормированы:  $\varphi_{ik}^T \mathbf{M}_i \varphi_{ik} = 1$ ,  $\varphi_{pk}^T \mathbf{M}_p \varphi_{pk} = 1$ .

Для определения собственных частот и собственных форм вантового моста используем смешанный метод, включающий уравнения равновесия и уравнения совместности. Уравнения равновесия содержат неизвестные:  $\mathbf{z}_i$  – амплитуды узловых перемещений  $i$ -й гармоники складки,  $\mathbf{z}_p$  – пилона,  $\mathbf{x}$  – усилия в вантах,  $\mathbf{y}$  – усилия взаимодействия диафрагм и складки:

$$(\mathbf{R}_i - \lambda \mathbf{M}_i) \mathbf{z}_i + \mathbf{R}_{ix} \mathbf{x} + \mathbf{R}_{iy} \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad (i=1, n_s); \quad (1)$$

$$(\mathbf{R}_p - \lambda \mathbf{M}_p) \mathbf{z}_p + \mathbf{R}_{px} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (p=1, n_p), \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_{ix}, \mathbf{R}_{iy}, \mathbf{R}_{px}$  – реакции распределенных по  $i$ -й гармонике вдоль узловых линий складки дополнительных связей от усилий  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  и в дополнительных связях пилона. Усилия  $\mathbf{y}$  взаимодействия диафрагм и складки соответствуют уравнениям равновесия

$$\mathbf{Dy} = \mathbf{0}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{D}$  – прямоугольная матрица коэффициентов с числом блоков, равным числу диафрагм. Каждый блок этой матрицы содержит три строки и столько столбцов, сколько сил взаимодействия одной диафрагмы со складкой.

В дополнение к уравнениям равновесия (1), (2) и (3) составим уравнения совместности деформаций складки, пилона и вант и уравнения совместности складки и диафрагм

$$\sum \Delta_{xi} \mathbf{z}_i + \sum \Delta_{xp} \mathbf{z}_p + \Delta_{xx} \mathbf{x} = \mathbf{0}; \quad (4)$$

$$\sum \Delta_{yi} \mathbf{z}_i = \Delta_y, \quad (5)$$

где  $\Delta_y$  – перемещения складки в сечениях с абсолютно жесткими диафрагмами по направлению усилий  $\mathbf{y}$  определяются по вектору  $\mathbf{z}$  перемещений абсолютно жестких диафрагм, его размерность равна уточненному количеству диафрагм

$$\Delta_y = \mathbf{D}^T \mathbf{z}. \quad (6)$$

Уравнение (3) выражает равенство нулю равнодействующих сил взаимодействия каждой диафрагмы со складкой. Вектор  $\mathbf{y}$  преобразуем  $\mathbf{y} = \mathbf{By}_0$  через равнодействующие  $\mathbf{y}_0$ .

Амплитуды узловых перемещений  $i$ -й гармоники складки и пилона представим рядами по собственным формам  $\mathbf{z}_i = \sum \mathbf{a}_{ik} \varphi_{ik}$ ,  $\mathbf{z}_p = \sum \mathbf{a}_{pk} \psi_{pk}$  и подставим их в (1), (2). С учетом ортогональности собственных форм складки  $\varphi_{ik}$  и пилона  $\psi_{pk}$  получим коэффициенты этих рядов:

$$\begin{aligned}\mathbf{a}_{ik} &= -(\lambda_{ik} - \lambda)^{-1} \varphi_{ik}^T \mathbf{R}_{ix} \mathbf{x} - (\lambda_{ik} - \lambda)^{-1} \varphi_{ik}^T \mathbf{R}_{iy} \mathbf{B} \mathbf{y}_0; \\ \mathbf{a}_{pk} &= -(\lambda_{pk} - \lambda)^{-1} \psi_{pk}^T \mathbf{R}_{px} \mathbf{x}.\end{aligned}\quad (7)$$

Теперь уравнения совместности (4) и (5) после замены  $\mathbf{z}_i$  и  $\mathbf{z}_p$  рядами по собственным формам с коэффициентами (7) принимают вид:

$$\begin{aligned}\left[ \sum \sum \frac{\mathbf{H}_{ikx}^T \mathbf{H}_{ikx}}{\lambda_{ik} - \lambda} + \sum \sum \frac{\mathbf{H}_{ikx}^T \mathbf{H}_{pkx}}{\lambda_{pk} - \lambda} + \Delta_{xx} \right] \mathbf{x} + \left[ \sum \sum \frac{\mathbf{H}_{ikx}^T \mathbf{H}_{iky} \mathbf{B}}{\lambda_{ik} - \lambda} \right] \mathbf{y}_0 &= \mathbf{0}, \\ \left[ \sum \sum \frac{\mathbf{B}^T \mathbf{H}_{iky}^T \mathbf{H}_{ikx}}{\lambda_{ik} - \lambda} \right] \mathbf{x} + \left[ \sum \sum \frac{\mathbf{B}^T \mathbf{H}_{iky}^T \mathbf{H}_{iky} \mathbf{B}}{\lambda_{ik} - \lambda} \right] \mathbf{y}_0 &= \mathbf{0},\end{aligned}\quad (8)$$

где введены обозначения:  $\mathbf{H}_{ikx} = \varphi_{ik}^T \mathbf{R}_{ix}$ ,  $\mathbf{H}_{pkx} = \psi_{pk}^T \mathbf{R}_{px}$ .

Приравнивая определитель однородной системы (8) к нулю, находим собственные значения всей системы в целом. Особенность определителя здесь состоит в том, что его полюсы соответствуют собственным числам раздельных складки  $\lambda_{ik}$  и пилона  $\lambda_{pk}$ , а нули – собственным числам всей конструкции. Эта особенность позволяет между каждой парой соседних полюсов последовательно вычислить нули, например, методом деления отрезка пополам, или равномерными шагами и т.п. По каждому найденному собственному числу  $\lambda_j$  вычисляются  $\mathbf{x}^j$  и  $\mathbf{y}_0^j$ , а затем по формулам (7) – коэффициенты рядов  $\mathbf{a}_{ik}^j$  и  $\mathbf{a}_{pk}^j$ . Теперь можно составить для вантового моста в целом собственный вектор, часть которого содержит перемещения складки, другая – пилона:

$$\mathbf{z}^j = \left( \sum_k \mathbf{a}_{ik}^j \varphi_{ik}, \sum_k \mathbf{a}_{pk}^j \psi_{pk} \right). \quad (9)$$

Для дальнейшего каждый собственный вектор нормируется. После определения спектра собственных частот и собственных форм вантового моста в целом можно приступить к решению неоднородной системы уравнений, описывающей колебания вантового моста при движении регулярной колонны автомобилей. Активными будем считать автомобили, находящиеся в данный момент на пролетном строении. Каждый автомобиль имеет семь степеней свободы, включая кузов с тремя степенями свободы (вертикальное перемещение центра тяжести и два угловых относительно продольной и поперечной горизонтальных осей) и четыре колеса (с одной степенью свободы по вертикали каждый). Динамику системы «вантовый мост + колонна автомобилей» можно исследовать, составив сначала систему трех матричных дифференциальных уравнений динамического равновесия, используя принцип Даламбера. Первое соответствует колебаниям кузовов

активных автомобилей, второе – их колес, третье – вантового моста. К системе уравнений динамического равновесия добавлены уравнения совместности перемещений кузова, рессор и колес, а также колес, шин и проезжей части вантового моста. Перемещения рессор и шин представлены дифференциальными уравнениями как для вязкоупругого элемента. Все дифференциальные уравнения движения кузова и колес каждого активного автомобиля и вантового моста преобразованы к интегральным уравнениям Вольтерра первого рода [8], затем из уравнений совместности деформаций рессор и шин, исключив основные перемещения кузовов активных автомобилей и вантового моста, получены интегральные уравнения относительно усилий в рессорах и шинах активных автомобилей:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{K}_r^\alpha + \mathbf{\Pi}^T \mathbf{K}_a^\alpha \mathbf{\Pi} + \mathbf{K}_k^\alpha) \mathbf{x}_k^\alpha - \mathbf{K}_k^\alpha \mathbf{x}_s^\alpha = \mathbf{0} \quad (\alpha \in N_a); \\ & -\mathbf{K}_k^\alpha \mathbf{x}_r^\alpha + (\mathbf{K}_s^\alpha + \mathbf{K}_k^\alpha) \mathbf{x}_k^\alpha + \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=1}^N \mathbf{\Psi}_i^{\alpha\tau} \mathbf{K}_i \mathbf{\Psi}_i^\beta (\mathbf{x}_s^\beta + \mathbf{X}_{s0}^\beta) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\mathbf{x}_r^\alpha (\mathbf{x}_s^\alpha)$  – вектор отклонений от статических значений усилий в рессорах (шинах) автомобиля с порядковым номером  $\alpha$ ;

$\mathbf{X}_{s0}^\alpha$  – статические усилия в шинах, обусловленные весом кузова и колес;

$\mathbf{K}_a^\alpha, \mathbf{K}_k^\alpha, \mathbf{K}_r^\alpha, \mathbf{K}_s^\alpha$  – диагональные интегральные операторы типа Вольтерра первого рода, определяющие перемещения кузова, колеса, рессоры и шины соответственно;

$\mathbf{K}_i$  – скалярный интегральный оператор типа Дюамеля, соответствующий  $i$ -й собственной форме упругой системы с учетом затухания;

$\mathbf{\Pi}$  – матрица приведения усилий в рессорах к главным центральным осям кузова;

$\mathbf{\Psi}_i^\alpha$  – матрица-строка ординат  $i$ -й собственной формы вантового моста в точках контакта упругой системы с шинами экипажа с номером  $\alpha$ ;

$N_a$  – множество порядковых номеров активных экипажей;

$n$  – число учитываемых собственных форм;

$N$  – номер последнего активного на текущий момент экипажа. Буква «т» верхнего индекса указывает на операцию транспонирования. Количество скалярных уравнений и число неизвестных в системе (10) равно числу вязкоупругих элементов всех активных экипажей.

Интегральные уравнения (10) с применением кусочно-линейной интерполяции усилий в рессорах  $\mathbf{x}_r^\alpha$  и шинах  $\mathbf{x}_s^\alpha$  сводятся к рекуррентной системе алгебраических уравнений, в результате решения которой получаем для каждого фиксированного момента времени значения усилий в рессорах и шинах каждого активного автомобиля. Имея эти значения, получаем коэффициенты разложения узловых линий складки по собственным формам, что позволяет для каждого момента времени получить эпюру перемещений узловых линий пролетного строения или, например, график изменения во времени перемещений группы точек характерного поперечного сечения. При малой скорости движения колонны автомобилей наибольшие перемещения характерного сечения оказываются во время движения первых автомобилей в колонне, затем по мере продвижения колонны по пролетному

строению колебания происходят с меньшими амплитудами относительно статического состояния. Если колонна автомобилей длиннее пролетного строения моста и первый ее автомобиль уже достиг конца моста, то могут возникнуть резонансные колебания моста при так называемой критической скорости, при которой колонна проходит дистанцию между смежными автомобилями за время, равное периоду свободных колебаний вантового моста.

Следует отметить, что левая часть дифференциальных уравнений рассматриваемой задачи содержит периодические во времени коэффициенты, период которых равен отношению шага регулярности колонны к ее скорости движения. Поэтому общее решение неоднородной системы рассматривается как вынужденные параметрические колебания, т.е. как сумма параметрических [9] и вынужденных колебаний. Однако превалируют вынужденные колебания, в результате чего амплитуды в резонансном состоянии возрастают во времени по линейному закону, а не по экспоненте при параметрических колебаниях.

**Пример.** Расчетная схема вантового моста (рис. 1, *a*) с балкой жесткости представлена неразрезной стальной складкой с пролетами 96 и 48 м, шириной 12 м с шестью ребрами жесткости, ее узловые линии пронумерованы (рис. 1, *б*). Абсолютно жесткие поперечные диафрагмы расположены в местах прикрепления вант с шагом 24 м. Материал балки жесткости – сталь ( $E = 2,06 \cdot 10^8$  кПа,  $\rho = 7,85$  т/м<sup>3</sup>). Толщина листов 0,035 м. Пилон из железобетона ( $E = 3,07 \cdot 10^7$  кПа,  $A = 6,25$  м<sup>2</sup>,  $J_x = 5,875$  м<sup>4</sup>,  $J_y = 11,75$  м<sup>4</sup>,  $\rho = 2,45$  т/м<sup>3</sup>). Площадь сечения каждой ванты – 0,09 м<sup>2</sup>,  $E = 1,95 \cdot 10^8$  кПа.

В нечетных собственных формах узловые линии соответствуют изгибу балки жесткости в вертикальной плоскости симметрично относительно продольной оси моста, в четных – деформациям кручения. Все собственные формы в сечении с пилоном имеют вертикальные перемещения, равные нулю, и им соответствуют собственные частоты (рад/с):  $\omega_1 = 1,312$ ,  $\omega_2 = 1,588$ ,  $\omega_3 = 1,735$ ,  $\omega_4 = 1,825$ ,  $\omega_5 = 1,884$ ,  $\omega_6 = 1,933$ . Критической назовем скорость  $v^*$ , при которой один автомобиль успевает преодолеть за половину основного периода свободных колебаний вантового моста расстояние, равное длине пролетного строения. Колонна состоит из 21 одинакового грузового автомобиля и движется вдоль узловых линий 2 и 3. Параметры автомобиля в колонне приняты как в [5, с. 165]. База автомобиля 4,0 м. Расстояние между центрами следующих друг за другом автомобилей постоянно. Отметим, что при скорости  $v^{**} = 0,125v^*$  колонна продвигается на шаг регулярности за половину основного периода свободных колебаний.

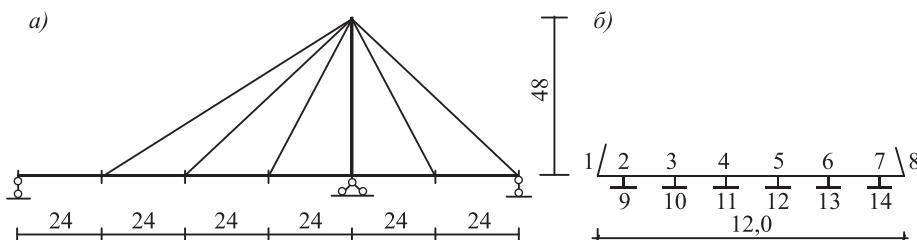


Рис. 1. Расчетная схема вантового моста: фасад (а) и поперечное сечение (б)

Ниже рассматриваются три варианта колонны автомобилей. В первом варианте расстояние (шаг) между центрами следующих друг за другом автомобилей постоянно и равно 18 м, во втором варианте 21, в третьем – 24 м.

Сначала рассматривается движение колонны с шагом, равным 18 м. Скорость колонны постоянна и равна  $v = 0,07910v^*$ . На первом этапе наибольшее перемещение вверх достигает 2,797 мм, на втором этапе наибольшее перемещение вниз равно 11,0 мм. При движении колонны со скоростью  $v = 0,08203v^*$  (рис. 2.) амплитуды колебаний на втором этапе линейно возрастают, при этом наибольшее положительное перемещение достигает 9,476 мм, а максимальное отрицательное равно 20,827 мм.

Это резонансное явление. При движении колонны еще с большей скоростью, постоянной, амплитуды уменьшаются, например, при скорости  $v = 0,08593v^*$  положительное перемещение достигает 2,6303 мм на первом этапе, а отрицательное – 10,92 мм на втором этапе.

Втором варианте шаг равен 21 м. Колебания в среднем сечении пролетного строения при постоянной скорости  $0,094v^*$  различаются в двух этапах. На первом этапе, когда первый в колонне автомобиль не достиг конца пролетного строения, наибольшие перемещения не превышают 1 см. На втором этапе, когда первый автомобиль сошел с пролетного строения, на пролетном строении периодически движутся семь автомобилей и колебания пролетного строения возрастают. Максимальные перемещения в середине пролетного строения достигают вверх 9,436 мм и вниз 18,981 мм.

При движении колонны со скоростью  $v = 0,096v^*$  на рис. 3 представлен резонанс с линейным увеличением амплитуд колебаний в середине пролетного строения. Наибольшие перемещения достигают вверх 13,412 мм, а вниз 23,278 мм. При движении колонны грузовиков с постоянной скоростью  $v = 0,098v^*$  максимальные перемещения достигают вверх 8,330 мм и вниз 17,948 мм.

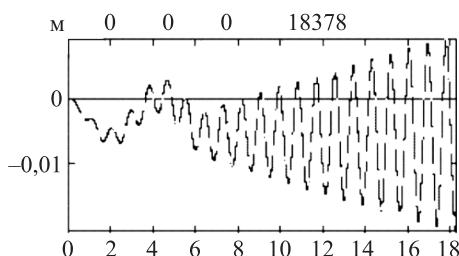


Рис. 2. Скорость  $v = 0,08203v^*$

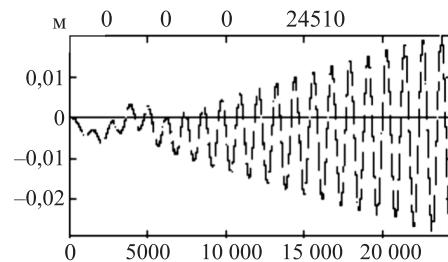
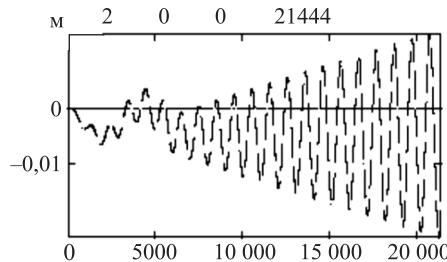


Рис. 3. Скорость  $v = 0,096v^*$

В третьем варианте расстояние между следующими друг за другом автомобилями равно 24 м. Колебания представлены в среднем сечении пролетного строения при движении колонны с постоянной скоростью, равной  $0,10625v^*$ . На первом этапе, когда на пролетном строении движутся меньше шести грузовиков, наибольшие перемещения не превышают 1 см. На втором этапе, когда на пролетном строении движутся последовательно шесть грузовиков, перемещения в середине длины моста

Рис. 4. Скорость  $v = 0,11014v^*$ 

достигают вверх 7,487 мм, а вниз 15,774 мм. На рис. 4 показаны резонансные колебания, соответствующие скорости движения колонны, равной  $v = 0, 11014v^*$ . Амплитуды колебаний возрастают, как видно, по линейному закону. Перемещения вверх достигают 20,347 мм, а вниз 29,156 мм. При большей скорости, равной  $0,11404v^*$ , перемещения

вверх достигают 6,774 мм, а вниз – 15,019 мм.

На рис. 5 показаны три резонансные кривые – графики наибольших положительных (вверх) и отрицательных (вниз) прогибов (мм) в зависимости от параметра  $(100v)$  скорости движения регулярной колонны при логарифмическом декременте, равном 0,01. Параметр скорости отсчитывается по горизонтальной оси как  $32v/v^{**}$ . Первый резонансный график соответствует движению колонны с шагом регулярности, равном 18 м, второй – 21, третий – 24 м.

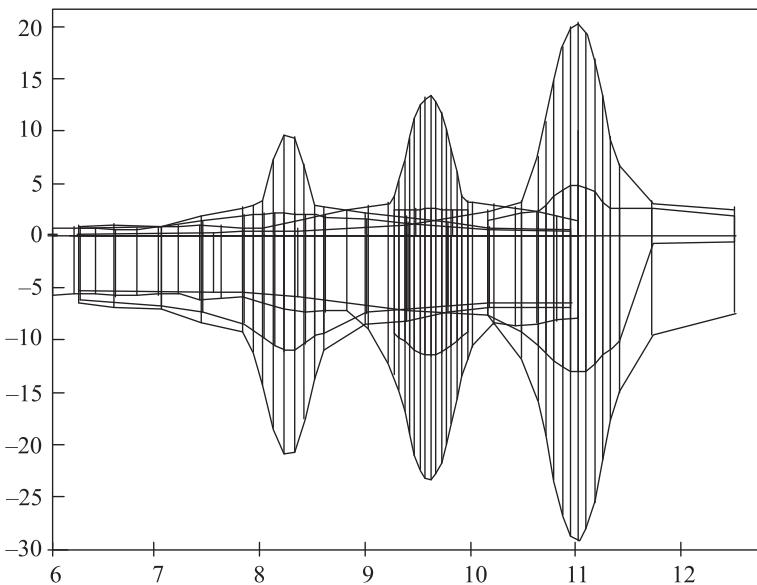


Рис. 5. Резонансные кривые при различных скоростях движения колонн автомобилей

**Заключение.** При определенной скорости движения длинной колонны грузовых автомобилей по вантовому мосту могут возникнуть значительные колебания. Для снижения значительных резонансных колебаний автодорожных вантовых мостов требуется устанавливать соответствующие демпфирующие устройства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем. М.: Наука, 1987. 352 с.

2. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. М.: Стройиздат, 1965. 280 с.
3. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Расчет сооружений с применением вычислительных машин. М.: Стройиздат, 1964. 380 с.
4. Сафонов В.С. Расчет висячих и вантовых мостов на подвижную нагрузку. Воронеж: ВГУ, 1983. 196 с.
5. Кадисов Г.М. Динамика и устойчивость сооружений: учеб. пособие. 2-е изд. М.: АСВ, 2007. 272 с.
6. Иванченко И.И. Динамика транспортных сооружений: высокоскоростные, подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. М.: Наука, 2011. 574 с.
7. Гулд С. Вариационные методы в задачах о собственных значениях. М.: Мир, 1970. 328 с.
8. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения. Методы, алгоритмы, программы: справ. пособие. Киев: Наук. думка, 1986. 544 с.
9. Вибрации в технике: справочник. Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с.
10. Кадисов Г.М. Динамика вантового автодорожного моста // Вестн. СибАДИ. 2015. № 6 (46). С. 58–64.

**Кадисов Григорий Михайлович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: kadisov@mail.ru

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),  
г. Омск

Получено после доработки 22.12.17

**Kadisov Grigory Mikhaylovich**, DSc, Professor; E-mail: dfsibadi@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

## **DINAMICS OF CABLE-STAYED BRIDGE DURING THE MOVEMENT OF A REGULAR COLUMN OF LORRY LOADS**

The problem of the vibrations of the cable-stayed bridge, which consists of a fold, reinforced by absolutely rigid transverse diaphragms, a pylon and cables, together with a regular column of freight identical cars moving at a constant speed, was investigated by a numerical solution of the system of Volterra integral equations of the first kind. If the column of cars is longer than the fold, resonance may occur if the speed of the column is equal to the ratio of the regularity step of the column to the period of the system.

**Keywords:** cable-stayed bridge, fold, pylon, guy, column of freight cars, resonance.

## **REFERENCES**

1. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебание упругих систем [Stability and oscillations of elastic systems]. Moscow, Nauka, 1987. 352 p. (in Russian)
2. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике [Statistical Methods in Building Mechanics]. Moscow, Stroyizdat, 1965. 280 p. (in Russian)
3. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Расчет сооружений с применением вычислительных машин [Calculation of structures using computers]. Moscow, Stroyizdat, 1964. 380 p. (in Russian)

4. Safronov V.S. Raschet visyachikh i vantovykh mostov na podvizhnuyu nagruzku [Calculation of hanging and cable-stayed bridges on a mobile load]. Voronezh, VSU, 1983. 196 p. (in Russian)
5. Kadisov G.M. Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy: uchebnoe posobie [Dynamics and stability of buildings: a manual]. 2 nd ed. Moscow, DIA Publishing house, 2007. 272 p. (in Russian)
6. Ivanchenko I.I. Dinamika transportnykh sooruzheniy: vysokoskorostnye, podvizhnye, seismicheskie i udarnye nagruzki [Dynamics of transport facilities: high-speed, mobile, seismic and shock loads]. Moscow, Science, 2011. 574 p. (in Russian)
7. Gould S. Variatsionnye metody v zadachakh o sobstvennykh znacheniyakh [Variational methods in problems on eigenvalues]. Moscow, Mir, 1970. 328 p. (in Russian)
8. Verlan' A.F., Sizikov V.S. Integral'nye uravneniya. Metody, algoritmy, programmy: spravochnoe posobie [Integral equations. Methods, algorithms, programs. reference Guide]. Kiev: Naukova Dumka, 1986. 544 p. (in Russian)
9. Vibratsii v tekhnike: spravochnik. T. 1. Kolebaniya lineynykh sistem [Vibrations in technology: handbook. Vol. 1. Oscillations of linear systems]. Ed. V.V. Bolotin. 1978. 352 p. (in Russian)
10. Kadisov G.M. Dinamika vantovogo avtodorozhnogo mosta [Dynamics of a cable-stayed road bridge]. Vestnik SibADI [Papers of the SibADI]. 2015. No. 6 (46). Pp. 58–64. (in Russian)

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.542 : 66.093.4

А.И. ГНЫРЯ, Ю.А. АБЗАЕВ, С.В. КОРОБКОВ, К.С. ГАУСС

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТАЦИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА БЕЗ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК\*

Представлены результаты исследования вариации содержания фаз в процессе гидратации портландцемента с помощью GEMs в рамках модели Parrot–Killox. В портландцементе доминировали фазы alite ( $C_3S$ ), belite ( $C_2S$ ), ferrite ( $C_4AF$ ), aluminate ( $C_3A$ ). Водоцементное отношение было выбрано равным 0,41. В комплексе GEMs вблизи равновесия цементной системы рассматривается баланс растворения клинкерных фаз, осаждения твердых растворов конечных продуктов на основе энергии Гиббса и базы термодинамических характеристик отдельных фаз на различных стадиях твердения. Было установлено, что на начальных стадиях водный раствор пересыщен относительно портландита, этtringита. В процессе гидратации формируются стабильные гидросиликаты сложного вида ( $CaO \cdot (SiO) \cdot (H_2O)$ ). В процессе гидратации существенно уменьшается электронейтральность до 12,94. Показано, что к основным компонентам твердеющего портландцемента относятся гидросиликат  $C-S-H$ , портландит и этtringит.

Ключевые слова: цементный камень, гидратация, аллит, белит, феррит.

**Введение.** В бетонах различного типа основным связующим является гидратированный цементный камень или портландцемент. Структурирование цементного камня на начальных стадиях твердения – это сложный многостадийный процесс. В соответствии с калориметрическими исследованиями [1, 2] выделяются следующие стадии: 1) гидролиз (15 мин); 2) индукционный период (до 4 ч); 3) период интенсивных химических реакций (4–8 ч); 4) период замедления (8–24 ч); 5) период твердения. К основным составляющим портландцемента относятся силикаты кальция  $C_3S$  и  $C_2S$ , алюминат  $C_3A$  и феррит  $C_4AF$ . Присутствуют также оксиды, Na- и K-сульфаты. В процессе гидратации вышеизложенные компоненты реагируют с водой с образованием различных продуктов:  $C-S-H$  (гидрат силиката кальция), портландит, этtringит, моносульфоалюминат кальция и монокарбобаламин кальция.

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения проекта № 18-08-01025.

Термодинамическое моделирование взаимодействия между твердой и жидкой фазами в портландцементах может быть основой понимания химии твердения цементного камня под влиянием внешних факторов: длительность твердения и температура испытания. В рамках термодинамических моделей возможна быстрая вариация исходных параметров (содержание фаз, водоцементное отношение, минеральные добавки и т.д.), что позволяет предсказывать состав гидратных комплексов в разное время в условиях длительных временных масштабов.

Несмотря на многочисленные эмпирические результаты использования портландцемента в качестве связующего неполным даже на качественном уровне является описание гидратационных механизмов в твердеющих бетонах как в системе в целом. Эмпирические результаты за длительный период (десятки лет исследований), как правило, устанавливались на конечном числе параметров: результатах термического анализа, доле фаз, установленных по соотношению пиков основных рефлексов решеток, водоцементном отношении, пределе текучести, диаграммах прочностных характеристик.

Представляется актуальным исследование количественного содержания фаз цементного камня в процессе твердения в программном комплексе GEMs [3–5], который адаптирован к гидратации цементных систем в работах B. Lothenbach, T. Matschei, F. Winnefeld, G. Möschner, F.P. Glasser и др. [6–22] в рамках модели Parrot, Killoh [23].

В данном программном комплексе реализован термодинамический подход, который позволяет вблизи химического равновесия, а также массовом балансе при разных температурах и внешнем давлении количественное описание массового содержания продуктов гидратации за длительный промежуток времени. Описание моделирования, приведенное в работах [6–22], имеет также хорошую согласованность результатов моделирования и эксперимента.

Целью настоящей работы является моделирование количественного содержания фаз портландцемента класса Цем I 42,5Б без минеральных добавок в процессе гидратации с учетом влияния температуры на механизмы твердения и сокращения периода твердения. В качестве объекта исследования была выбрана модель, аналогичная портландцементу, который изготавливается на Топкинском цементном заводе [24, 25].

**Материал и модельное приближение.** Массовое содержание модельного объекта определялось на основе портландцемента класса Цем I 42,5Б [24, 25], который используется для изготовления тяжелых бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками. Химический состав и массовая доля портландцемента приведены в табл. 1.

Данные химического состава позволяют рассчитать минералогическое содержание модельного портландцемента по формулам Bogue [26]. Было установлено, что содержание силикатов кальция в 100 г составляет примерно 61,06 и 13,62 г, феррита – 12,79 и алюмината – 6,50 г. В табл. 1 приведены также содержания воды 41,0, кислорода 0,34 г, которые использовались для моделирования гидратации. Водоцементное соотношение было выбрано равным 0,41. Данные табл. 1 являются входными пара-

Таблица 1. Состав портландцемента Цем I 42,5Б

№ п/п	Химический состав	Массовая доля, %	Масса, г	
1	SiO <sub>2</sub>	20,49	C <sub>3</sub> S	61,06
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,06	C <sub>2</sub> S	13,62
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,14	C <sub>4</sub> AF	12,79
4	CaO	62,83	C <sub>3</sub> A	6,50
5	MgO	1,75	Водный раствор	41
6	Na <sub>2</sub> O	0,34	O <sub>2</sub>	0,34
7	K <sub>2</sub> O	0,65	MgO	1,78
8	SO <sub>3</sub>	3,10	K <sub>2</sub> O	0,66
	—	—	Na <sub>2</sub> O	0,34
	—	—	SO <sub>3</sub>	3,15

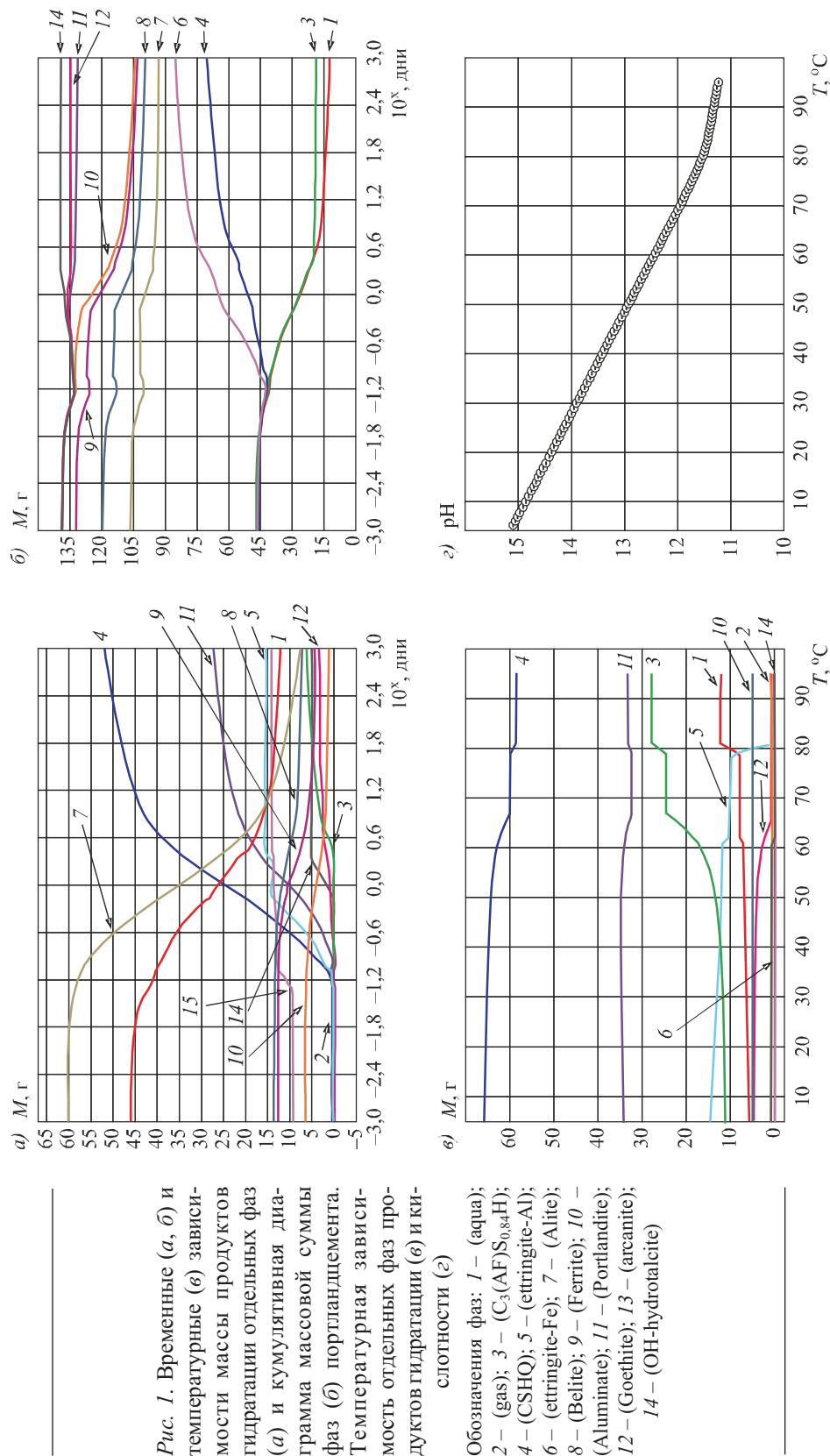
метрами моделирования твердения портландцемента в программном комплексе GEMs [3–5].

В программе GEMs для расчетов энергии Гиббса портландцемента вблизи равновесия цементной системы рассматривается баланс скорости растворения клинкерных фаз, осаждения твердых растворов отдельных фаз на основе базы термодинамических характеристик на различных стадиях твердения. В модели рассматриваются следующие стадии: 1) зарождение и рост зародышей; 2) диффузионные процессы, для каждой из клинкерных фаз которых установлены феноменологические зависимости скоростей реакций, параметры гидратации клинкерных фаз [3–6, 23] и степень гидратации. Может быть учтена также роль водоцементного отношения, влажности и удельной поверхности зародышей фаз.

При контакте с водой сульфаты щелочей растворяются, высвобождая K, Na, S в жидкую fazу. При медленной гидратации составляющих клинкера выделяются также силикаты Ca, Si, Al, Fe и гидроксиды. Причем выделение в раствор происходит после растворения соответствующей клинкерной структуры. Щелочи, высвобождаемые при растворении сульфатов щелочных металлов, распределяются между раствором и твердой fazой C–H–S. Элементы C–H–S являются основным твердым продуктом взаимодействия твердой и жидкой faz. Концентрация щелочей незначительна по сравнению с Ca, Si. Соединения Al, Fe реагируют с гидроксидами. Растворение клинкерных faz определяется содержанием Ca, Si, Al, Fe и гидроксидов и определяет скорость осаждения основных гидратированных faz, в частности – C–H–S и C–A–S.

**Обсуждение результатов исследований.** В работе моделировалась гидратация портландцемента во временном масштабе ~(0–1000) дней при комнатной температуре (рис. 1, а, б). Было исследовано также влияние температуры на массовое содержание продуктов гидратации, кислотность (рН) при 5–95 °C (рис. 1, в, г).

В результате моделирования в комплексе GEMs при комнатной температуре обнаружены следующие fazы, находящиеся в термодинамическом рав-



новесии: aqua, gas,  $C_3(AF)S_{0,84}H$ , CSHQ, ettringite, portlandite, goethite, arcanite, OH-hydrotalcite. Были выполнены расчеты содержания свободной влаги (aqua), газа (gas) и твердых выделений при гидратации вышеперечисленных фаз. Зависимость содержания клинкерных фаз alite, belite, ferrite, aluminate от времени гидратации была оценена в рамках модели Parrot, Killoh [23]. Предполагается, что свободная влага заполняет объем пор портландцемента. В табл. 2 приведены данные о содержании компонентов в водном растворе при разных сроках гидратирования.

Из табл. 2 видно, что в первые (1,6–2) ч в растворе доминируют ионы  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ , гидроксила ( $OH^-$ ). Высокая концентрация  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  обусловлена быстрым растворением сульфатно-щелочных фаз. С дальнейшим ростом времени гидратирования содержание  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $OH^-$ , а также ионная сила существенно возрастают. Основная масса натрия и калия в конечном итоге попадает в раствор, за исключением тех элементов, которые адсорбируются на зернах C–S–Н. Содержание  $Ca^{2+}$  в растворе остается примерно постоянным до 6–7 ч, а затем резко снижается. Концентрация гидроксила  $OH^-$  монотонно возрастает, а в интервале (1,6–6,5) ч слабо изменяется, а затем резко возрастает, даже независимо от роста концентрации портландита (рис. 1, а, б). Было установлено, что сульфаты щелочных металлов полностью растворяются в жидком растворе, ангидрит ( $SO_3^{2-}$ ) растворяется частично до достижения равновесия в растворе. Доля свободной влаги существенно снижается во временном масштабе (рис. 1). Как следствие, в результате реакций растворения частиц клинкерных минералов формируются новообразования или гидраты  $(CaO)_x \cdot (SiO)_y \cdot (H_2O)_z \cdot Ca(OH)_2$ . Продуктом взаимодействия

Таблица 2. Содержание элементов в водном растворе в зависимости от времени гидратации

Часы	$Ca^{2+}$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$O_2$	$OH^-$	$SiO_2$	$SiO_3^{2-}$	Ионная сила
	ммоль								
0,02	1,09	238,93	280,86	205,44	0,79	0,14	0,11	0	1,71
0,05	2,759	229,27	276,92	206,00	0,79	0,15	0,11	0	1,69
1,0	4,69	293,22	0	242,66	1,03	24,93	0	0,21	1,69
1,6	5,36	311,88	0	253,75	1,03	111,48	0	0,05	0,76
2,0	5,27	324,04	0	263,97	1,02	112,54	0	0,05	0,78
4,0	5,08	351,12	0	287,32	0,998	114,70	0	0,00	0,86
6,5	3,97	381,3	0	317,67	0,98	129,71	0	0,08	0,93
8,6	0,39	439,01	0	339,25	0,98	415,73	0	0,08	0,91
16,8	0,35	501,42	0	389,12	0,95	434,78	0	0	1,05
29,7	0,09	0617,43	0	447,85	0,92	835,30	0	0,38	1,05
93,3	0,050	775,71	0	545,85	0,86	1097,83	0	0,76	1,38
690	0,04	877,74	0	616,37	0,81	1173,67	0	0,96	1,59
1480	0,04	910,31	0	639,17	0,80	1193,22	0	1,03	1,65
14584	0,03	993,74	0	698,40	0,76	1232,66	0	1,20	1,82

действия является новая фаза C–S–H – гидросиликаты кальция. В составе жидкой фазы находятся также ионы алюминия, железа (низкая концентрация), которые стимулируют формирование гидроалюминатов, гидроферитов кальция. Сульфат в процессе гидратации осаждается в виде этtringита. Водный раствор пересыщен относительно портландита, этtringита на начальных стадиях гидратации. Фазы  $C_3S$ ,  $C_2S$  – метастабильны на начальных стадиях твердения, а на более поздних превращаются в стабильные гидросиликаты сложного типа  $(CaO) \cdot (SiO) \cdot (H_2O)$ . На поверхности зародышей продукты гидратации из-за слабой закристаллизованности и большого количества воды являются цементным гелем. Гидросиликаты C–S–H являются основным связующим звеном в увлажненном портландцементе.

В результате моделирования гидратированной системы были обнаружены следующие закономерности. В течение 36–40 мин в гидратированной системе содержание свободной влаги существенно сокращается (на 4,2 г, рис. 1, б), уменьшается содержание алита (~ на 2 г), белита (~ 0,14 г), алюмината (~ 0,2 г), феррита (~ 0,03 г). Обнаружено начальное выделение гидросиликата C–S–H. Выделение ангидрита начинается через ~ 1,0 ч, а портландита – 1,4 ч. Устойчивое выделение OH-hydrotalcite (свыше 0,33 г) наблюдается после 8,6 ч. Выделение фазы  $C_3(AF)S_{0,84}H$  начинается с 32,7 ч твердения, и затем ее масса монотонно возрастает до 6,32 г до конца периода исследования. Общая масса системы в конце исследуемого периода гидратации равна 153,87 г. Свыше 4,89 ч в системе происходит осаждение фазы  $C_3(AF)S_{0,84}H$ , содержание которой монотонно возрастает до 6,33 г. Общее содержание клинкерных фаз алита, белита, алюмината, феррита уменьшилось практически в 4 раза (от 92,55 и до 18,63 г). К продуктам гидратации относятся гидросиликат C–S–H, портландит, этtringит,  $C_3(AF)S_{0,84}H$ , OH-hydrotalcite, goethite, массы которых равны 51,97; 27,47; 15,02; 6,33; 4,9 и 3,27 г соответственно. Масса свободной воды, которая занимает свободное пористое пространство, равна 11,9 г. Нужно отметить, что в процессе гидратации заметно возрастает величина pH, которая достигает значений 12,94 (см. рис. 1). Выделение газа в системе незначительно (0,3044 и 0,3049 г). Представляют определенный интерес данные о массовом содержании продуктов гидратации через 28 дней (672 ч). Установлено, что масса гидросиликата C–S–H, портландита, этtringита,  $C_3(AF)S_{0,84}H$ , OH-hydrotalcite, goethite равна 46,51; 23,9; 15,39; 4,17; 4,90 и 2,74 г соответственно. Содержание клинкерных фаз и воды равно: алита, белита, алюмината, феррита 12,91; 8,01; 5,06; 1,5 и 14,39 г соответственно. Из полученных результатов следует, что к основным компонентам цемента относятся гидросиликат C–S–H, портландит и этtringит. Термодинамическое моделирование в сочетании с рассчитанными скоростями гидратации в GEMs [3–5] предсказывает обеднение ангидрита примерно через 6 ч твердения и снижение концентрации сульфатов в водных растворах, поскольку этtringит осаждается до момента, пока имеется сульфат в растворе и его содержание не будет исчерпано. После начального периода, когда поддерживается электронейтральность раствора, значение pH возрастает. Это приводит к уменьшению концентрации Ca из-за общего ионного эффекта, в то время как расчетные концентрации Al, Si, а также Fe возрастают со снижением содержания влаги.

На рис. 1, в приведены данные моделирования влияния температуры на гидратацию портландцемента в интервале  $T = 5\text{--}95^\circ\text{C}$ . Необходимо отметить, что в указанном интервале значение pH с ростом температуры существенно уменьшается (рис. 1, г). При температуре  $5^\circ\text{C}$  твердая фракция характеризуется следующим содержанием: C–S–H – 65,69 г, портландита – 39,95, этtringита – 14,47,  $\text{C}_3(\text{AF})\text{S}_{0,84}\text{H}$  – 11,09, OH-hydrotalcite – 4,90 и goethite – 4,67 г соответственно. Содержание водного раствора равно 5,42 г (в конце гидратационного периода). С ростом температуры содержание фаз в твердой фракции уменьшается: при  $T = 66^\circ\text{C}$  C–S–H – 60,40 г, портландита – 32,66, этtringита – 10,47 и goethite – 0 г соответственно. Не меняется OH-hydrotalcite – 4,90 г, и значительно возрастает содержание  $\text{C}_3(\text{AF})\text{S}_{0,84}\text{H}$  (до 23,17 при  $66^\circ\text{C}$  и 27,68 г –  $95^\circ\text{C}$ ). С дальнейшим повышением температуры содержание портландита несколько возрастает (до 33,36 г), а C–S–H снижается (до 58,33 г). Существенно возрастает доля газов (до 0,91 г начиная от температуры  $T \approx 66^\circ\text{C}$ ). Доля пористого пространства возросла практически в 2 раза.

**Выводы.** Время и температура твердения оказывают существенное влияние на количественное содержание гидросиликатов цементного камня. Показано, что к основным фазам твердеющего портландцемента относятся Tobermorite, портландит, этtringит и  $m\text{Ca}_n\text{H}_2\text{O}_{10}\text{Si}_2$ , где  $m = 5$  или 3, а  $n = 3$  или 1 соответственно.

Подобное моделирование в программном комплексе GEMs процессов гидратации цементов разного состава при вариации содержания компонентов в водном растворе, кислотности, водоцементного соотношения, разной доли и размеров фракций песчаного заполнителя позволит найти пути интенсификации процесса и сокращения периода твердения цементного камня вблизи термодинамического равновесия в широком температурном интервале.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Matschei T. Thermodynamics of Cement Hydratation / Thesis. Doctor of Philosophy. University of Aberdeen Department of Chemistry. December 2007. 222 p.
2. Zhuangzhuang Liu, Aimin Sha, Liqun Hu, Yongwei Lu, Wenxiu Jiao, Zheng Tong, Jie Gao. Kinetic and thermodynamic modeling of Portland cement hydration at low temperatures // Journal of Chemical Papers. 2017. Vol. 71. No. 4. P. 741–751.
3. GEM Software (GEMS) Open Database. URL: <http://gems.web.psi.ch/termsofuse.html> (дата обращения: 18.12.2017).
4. Kulik D.A., Wagner T., Dmytrieva S.V., Kosakowski G., Hingerl F.F., Chudnenko K.V., Berner U. GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes // Computational Geosciences. 2013. Vol. 17. No. 1. P. 1–24.
5. Wagner T., Kulik D.A., Hingerl F.F., Dmytrieva S.V. GEM-Selektor geochemical modeling package: TSolMod library and data interface for multicomponent phase models // Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50. P. 1173–1195.
6. Lothenbach B., Wimmerfeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement // Journal of Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. No. 2. P. 209–226.

7. Lothenbach B., Le Saout G., Ben Haha M., Figi R., Wieland E. Hydration of a low-alkali CEM III/B–SiO<sub>2</sub> cement (LAC) // Journal of Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. No. 2. P. 410–423.
8. Ben Haha M., De Weerdt K., Lothenbach B. Quantification of the degree of reaction of fly ash // Journal of Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. No. 11. P. 1620–1629.
9. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags // Journal of Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. No. 3. P. 301–310.
10. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Münch B., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U. Quantification of hydration phases in supersulfated cements: review and new approaches // Advances in Cement Research. 2011. Vol. 23. No. 6. P. 265–275.
11. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Müller C. J. Beneficial use of limestone filler with calcium sulfoaluminate cement // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 26. No. 1. P. 619–627.
12. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Le Saout G., Müller C.J., Famby C. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulfoaluminate clinker-calcium sulphate binders // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. No. 5. P. 551–561.
13. De Weerdt K., Ben Haha M., Le Saout G., Kjellsen K.O., Justnes H., Lothenbach B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash // Journal of Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. No. 3. P. 279–291.
14. Winnefeld F., Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements – Experimental findings and thermodynamic modelling // Journal of Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. No. 8. P. 1239–1247.
15. Winnefeld F., Leemann A., Lucuk M., Svoboda P., Neuroth M. Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. No. 6. P. 1086–1093.
16. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement // Journal of Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. No. 7. P. 983–992.
17. Lothenbach B., Le Saout G., Gallucci E., Scrivener K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements // Journal of Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. No. 6. P. 848–860.
18. Lothenbach B., Matschei T., Möschner G., Glasser F.P. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement // Journal of Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. No. 1. P. 1–18.
19. Lothenbach B., Winnefeld F., Alder C., Wieland E., Lunk P. Effects of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes // Journal of Cement and Concrete Research. 2007. Vol. 37. No. 4. P. 483–491.
20. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Holzer L., Figi R., Winnefeld F. Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement // Advances in Cement Research. 2006. Vol. 18. No. 3. P. 119–128.

21. Lothenbach B., Wieland E. A thermodynamic approach to the hydration of sulphate-resisting Portland cement // Waste Management. 2006. Vol. 26. No. 7. P. 706–719.
22. Lothenbach B., Winnefeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement // Journal of Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. No. 2. P. 209–226.
23. Parrot L.J., Killough D.C. Prediction of cement hydration // British Ceramic Society Proceedings. 1984. No. 35. P. 41–54.
24. URL: <http://www.sibcem.ru/index.php/production/beton> (дата обращения: 18.12.2017).
25. Gnyrya A., Abzaev Y., Korobkov S., Mokshin D., Gauss K., Boyarintsev A. High-Temperature Structure Formation in Cement Depending on Curing Time // Journal of AIP Conference Proceedings 1899. 040005-1–040005-8 (2017).
26. Taylor H.F.W. Modification of the Bogue calculation // Advances in Cement Research. 1989. Vol. 2. No. 6. P. 73–77.

**Гныря Алексей Игнатьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: tsp\_tgasu@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет  
**Абзаев Юрий Афанасьевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: abzaev@tsuab.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет  
**Коробков Сергей Викторович**, канд. техн. наук, доц.;  
E-mail: korobkov\_1973@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет  
**Гаусс Ксения Сергеевна**, ассист.; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 26.12.17

**Gnyrya Aleksey Ignat'evich**, DSc, Professor; E-mail: tsp\_tgasu@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia  
**Abzaev Yuriy Afanas'evich**, DSc, Professor; E-mail: abzaev@tsuab.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia  
**Korobkov Sergey Viktorovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: korobkov\_1973@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia  
**Gauss Kseniya Sergeevna**, Assistant; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

## **MODELING OF THE PORTLANDCENTATE HYDRATION WITHOUT MINERAL ADDITIVES**

The article presents the results of a study of the variation of the phase content during the hydration of portland cement with the help of GEMs within the Parrot-Killox model. Portland cement was dominated by the phases alite ( $C_3S$ ), belite ( $C_2S$ ), ferrite ( $C_4AF$ ), aluminate ( $C_3A$ ). The water-cement ratio was chosen equal to – 0,41. In the complex GEMs near the equilibrium of the cement system, the balance of the dissolution of clinker phases, the precipitation of solid solutions of final products based on Gibbs energy and the base of the thermodynamic characteristics of individual phases at different stages of hardening are considered. It was found that in the initial stages the aqueous solution is supersaturated with respect to portlandite, ettringite. During the hydration process, stable hydrosilicates of complex type  $(CaO) \cdot (SiO) \cdot (H_2O)$  are formed. In the process of hydration, the electrical energy decreases substantially to 12,94. It is shown that

the main components of the hardening Portland cement include hydrosilicate C–S–H, portlandite and ettringite.

**Keywords:** cement stone, hydration, alite, belite, ferrite.

## REFERENCES

1. Matschei T. Thermodynamics of Cement Hydratation. Thesis. Doctor of Philosophy. University of Aberdeen Department of Chemistry. December 2007. 222 p.
2. Huangzhuang Liu, Aimin Sha, Liqun Hu, Yongwei Lu, Wenxiu Jiao, Zheng Tong, Jie Gao. Kinetic and thermodynamic modeling of Portland cement hydration at low temperatures. *Journal of Chemical Papers*. 2017. Vol. 71. No. 4. Pp. 741–751.
3. GEM Software (GEMS) Open Database. URL: <http://gems.web.psi.ch/termsofuse.html> (date of access: 18.12.2017).
4. Kulik D.A., Wagner T., Dmytrieva S.V., Kosakowski G., Hingerl F.F., Chudnenko K.V., Berner U. GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes. *Computational Geosciences*. 2013. Vol. 17. No. 1. Pp. 1–24.
5. Wagner T., Kulik D.A., Hingerl F.F., Dmytrieva S.V. GEM-Selektor geochemical modeling package: TSolMod library and data interface for multi-component phase models. *Canadian Mineralogist*. 2012. Vol. 50. Pp. 1173–1195.
6. Lothenbach B., Winnefeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. No. 2. Pp. 209–226.
7. Lothenbach B., Le Saout G., Ben Haha M., Figi R., Wieland E. Hydration of a low-alkali CEM III/B–SiO<sub>2</sub> cement (LAC). *Journal of Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. No. 2. Pp. 410–423.
8. Ben Haha M., De Weerdt K., Lothenbach B. Quantification of the degree of reaction of fly ash. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40. No. 11. Pp. 1620–1629.
9. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. No. 3. Pp. 301–310.
10. Gruskovnja A., Lothenbach B., Winnefeld F., Münch B., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U. Quantification of hydration phases in supersulfated cements: review and new approaches. *Advances in Cement Research*. 2011. Vol. 23. No. 6. Pp. 265–275.
11. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Müller C. J. Beneficial use of limestone filler with calcium sulphaaluminate cement. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26. No. 1. Pp. 619–627.
12. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Le Saout G., Müller C.J., Famby C. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulphaaluminate clinker-calcium sulphate binders. *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. No. 5. Pp. 551–561.
13. De Weerdt K., Ben Haha M., Le Saout G., Kjellsen K.O., Justnes H., Lothenbach B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. No. 3. Pp. 279–291.

14. Winnefeld F., Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements – Experimental findings and thermodynamic modeling. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40. No. 8. Pp. 1239–1247.
  15. Winnefeld F., Leemann A., Lucuk M., Svoboda P., Neuroth M. Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. No. 6. Pp. 1086–1093.
  16. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. No. 7. Pp. 983–992.
  17. Lothenbach B., Le Saout G., Gallucci E., Scrivener K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. No. 6. Pp. 848–860.
  18. Lothenbach B., Matschei T., Möschner G., Glasser F.P. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. No. 1. Pp. 1–18.
  19. Lothenbach B., Winnefeld F., Alder C., Wieland E., Lunk P. Effects of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37. No. 4. Pp. 483–491.
  20. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Holzer L., Figi R., Winnefeld F. Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in Cement Research*. 2006. Vol. 18. No. 3. Pp. 119–128.
  21. Lothenbach B., Wieland E. A thermodynamic approach to the hydration of sulphate-resisting Portland cement. *Waste Management*. 2006. Vol. 26. No. 7. Pp. 706–719.
  22. Lothenbach B., Winnefeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. No. 2. Pp. 209–226.
  23. Parrot L.J., Killough D.C. Prediction of cement hydration. *British Ceramic Society Proceedings*. 1984. No. 35. Pp. 41–54.
  24. URL: <http://www.sibcem.ru/index.php/production/beton> (date of access: 18.12.2017).
  25. Gnyrya A., Abzaev Y., Korobkov S., Mokshin D., Gauss K., Boyarintsev A. High-Temperature Structure Formation in Cement Depending on Curing Time. *Journal of AIP Conference Proceedings* 1899. 040005-1–040005-8 (2017).
  26. Taylor H.F.W. Modification of the Bogue calculation. *Advances in Cement Research*. 1989. Vol. 2. No. 6. Pp. 73–77.
-

УДК 691.53 : 666.97

В.Ф. ПАНОВА, И.В. КАМБАЛИНА, С.А. ПАНОВ, А.А. КАРПАЧЕВА

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ИЗ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПОРОД ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Приведены результаты исследования получения модифицированных вяжущих на основе природных пород и вторичных минеральных ресурсов (ВМР) для получения сухих строительных смесей (ССС). Показаны составы, свойства. Доказана реальность получения ССС как на природных породах: опока, диатомит, известняк, так и на техногенных отходах Кузбасских предприятий: металлургический шлак, зола, горелые породы, пыль газоочистки. Приведены разработанные и запатентованные сотрудниками лаборатории «Строительные материалы» СибГИУ составы клинкерных и бесклинкерных цементов на основе ВМР. Приведенные составы смесей на основе ВМР являются трещиноустойчивыми, обладают пониженным водоотделением и достаточной прочностью, т.е. соответствуют требованиям к ССС.

**Ключевые слова:** вяжущее, сухая строительная смесь, свойства, состав, техногенные отходы, эксперимент, трещиностойкость, водоотделение, прочность.

Изменившаяся экономическая ситуация в нашей стране обусловила необходимость переоценки материально-сырьевой базы стройиндустрии с целью рационализации ее использования. Одним из путей достижения указанной цели является создание новых видов строительных материалов, более эффективных и дешевых по сравнению с традиционными. Можно с уверенностью сказать, что к этому направлению относится технология сухих строительных смесей на основе техногенных отходов. Целями технологий с применением сухих строительных смесей (ССС) являются: высокий уровень качества и его стабильность, легкая переработка продуктов при высокой производительности труда, оптимизация затрат на транспортировку и использование стройматериалов, достижение свойств продукции, согласованных с методами строительных работ и требованиями к готовым объектам [1].

Для получения кладочного раствора с заданной удобоукладываемостью объем цементного теста на 1 м<sup>3</sup> смеси должен составлять 400–500 дм<sup>3</sup>. При таком расходе цемента получают раствор марок до М300. Чаще от кладочных растворов требуется невысокая прочность – 1–5 МПа. Однако при низком расходе цемента снижается удобоукладываемость растворной смеси. Поэтому для кладочных растворов рекомендуется специальный цемент низких марок [2, 3].

Цель работы: исследовать композиционные вяжущие на основе природных и техногенных пород для получения ССС с применением их в качестве кладочного раствора.

Ниже рассмотрены состав и свойства композиционных модифицированных вяжущих на основе природных пород (известняка, диатомита, опоки) и

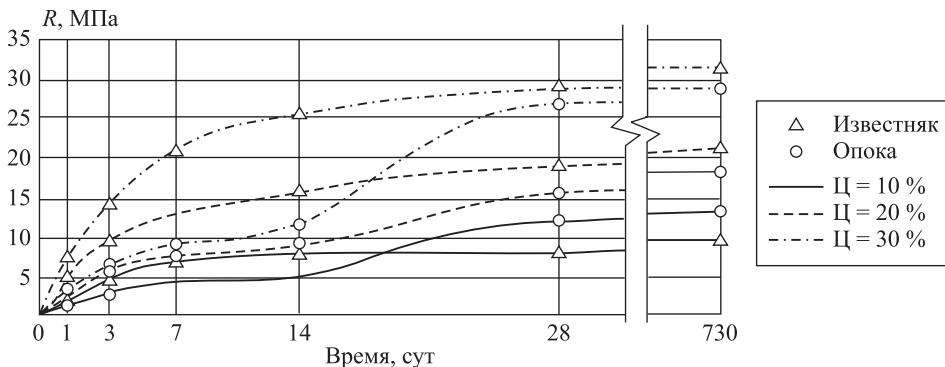


Рис. 1. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего из природных пород с добавкой цемента

техногенных пород (доменного гранулированного шлака, золы, горелых пород – перегоревших отходов углеобогащения) для получения ССС и применения их как кладочных растворов. Вопрос применения добавок в смесь не рассматривался. В экспериментах соотношение вяжущего в смеси и заполнителя принято 1:3. В качестве заполнителя в растворах использован песок из природных и техногенных пород.

**Модифицированные вяжущие на природных горных породах для получения ССС для кладочных растворов.** Разработаны малоклинкерные смешанные вяжущие М200 – М300 с тонкодисперсными природными наполнителями. Вяжущее состояло из извести-пушонки, дисперсного наполнителя на основе кремнеземистых и карбонатных пород и добавки цемента в количестве 40–50 % в диатомито-наполненном вяжущем; 27–39 % цемента в опоко-наполненном; 20–35 % цемента в карбонатно-наполненном. Соотношение извести-пушонки и минерального наполнителя в вяжущем составило 1 : 4. Водопотребность смешанного вяжущего, соответствующая тесту нормальной густоты, составляла 27–29 % для карбонатного и 38–93 % для кремнеземистого наполнителей при добавке во все составы цемента в количестве 10–50 %. На рис. 1 и 2 представлена кинетика набора прочности на смешанных вяжущих, наполненных известняком, опокой и диатомитом в зависимости от времени твердения и расхода добавочного цемента. Несомненно, что чем больше добавлено цемента, тем выше прочность вяжущего (рис. 2). Для кладочных растворов достаточной является активность вяжущего 250–300 кгс/см<sup>2</sup>, т.е. оптимальная добавка цемента составляет 30 %.

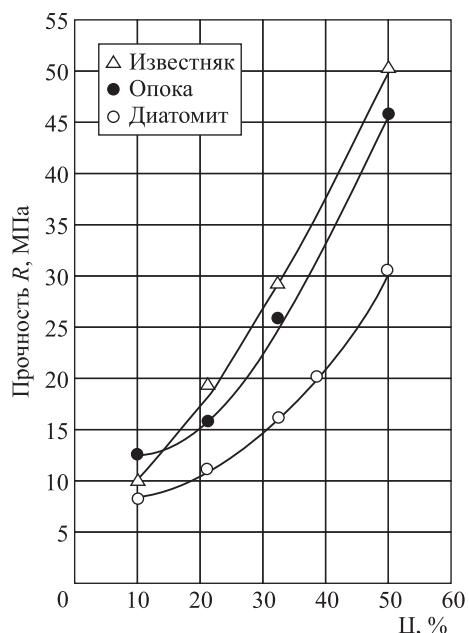


Рис. 2. Прочность смешанного вяжущего на природных наполнителях в зависимости от содержания цемента

Ниже приведены основные свойства оптимальных составов сухих смесей и физико-механические, реологические свойства кладочных растворов:

соотношение вяжущего к заполнителю (В:З) . . . . .	1–3
расход цемента Ц, % . . . . .	10–50
водовяжущее отношение (В/В) . . . . .	0,6–1,4
марка растворной смеси по подвижности . . . . .	ПК4–ПК14
расплыв конуса на встряхивающем столике, мм . . . . .	200–280
глубина погружения конуса, см . . . . .	1–14
водоудерживающая способность, % . . . . .	93–98
расслаиваемость, % . . . . .	1–10
марка (класс) раствора по прочности . . . . .	M50 (B3,5)–M150 (B12,5)
прочность в возрасте 28 сут, МПа . . . . .	3–15

Установлено, что исследованные составы ССС на основе природных пород содержат добавку цемента от 10 до 50 %, которая позволяет увеличить прочность раствора до 15 МПа. Ниже рассмотрена возможность исключения добавки цемента в ССС, сохранив прочность и основные свойства кладочного раствора, в которых природный песок заменен промышленными минеральными отходами.

Во многих регионах, например в Кузбассе, отсутствуют вышеупомянутые природные породы, зато в большом количестве образуются и накапливаются техногенные отходы, которые можно назвать вторичными минеральными ресурсами (ВМР). Среди них встречаются тонкодисперсные не требующие больших затрат при переработке, например, карбонатные пылевидные отходы газоочистки: производства извести (известковая пыль), энергетики (зола-унос от сжигания бурых углей); силикатные дисперсные отходы: пыль газоочистки ферросплавного производства; отходы энергетики Кузбасса (зола-унос от сжигания каменных углей); камневидные алюмосиликатные отходы угольной промышленности, так называемые горелые породы [4, 5].

**Модифицированные вяжущие с применением техногенных продуктов для получения ССС в виде кладочных растворов.** Лаборатория «Строительные материалы» СибГИУ приняла участие в разработке патента № 2077516 «Вяжущее из золы». Получено бесклинкерное вяжущее на основе высококальциевой золы (с содержанием CaO<sub>своб</sub> – 16–32 %) при следующем соотношении компонентов по массе: гипс – 2,5–3,5 %, хлорид кальция – 0,5–1,5 %, известковый алевролит – 25–33 %, высококальциевая зола-унос – остальное. Разработан способ получения вяжущего из золы (патент № 2101245), при котором высококальциевую золу-унос из фильтров с температурой около 700 °C подвергали быстрому охлаждению до 100 °C, а затем измельчали совместно с активной минеральной добавкой (полимиктовым песчаником) с добавлением двуводного гипсового камня (в количестве 1–3 % от массы вяжущего) и хлорида кальция (в количестве 1–3 %). Смесь измельчалась до тонкости помола 550–660 м<sup>2</sup>/кг. Полученное вяжущее имеет активность через 28 сут воздушно-влажностного твердения – 25,3 МПа, после тепловлажностной обработки по режиму (3+8+3) ч и дальнейшего твердения 28 сут прочность возрастает до 39,7 МПа.

Возможность использования горелых пород (самообожженные при длительном хранении отходы углеобогащения) в свое время доказана в работах профессора Г.И. Книгиной и ее учеников [6]. Гидравлическая активность данных пород обусловлена наличием в них двух активных компонентов: остатков обожженной глинистой составляющей в виде дегидратированных минералов и кремнеземистой части в виде активной кремнекислоты. Получению данных компонентов способствует самообожжение пород после обогащения угля при температуре 600–900 °C путем нарушения молекулярных связей водных алюмосиликатов группы каолинита при их дегидратации и активизации кварцевых зерен за счет деструкции поверхности и диспергации частиц при пиропроцессах. Для получения более активных вяжущих из горелых пород возможен их совместный помол с известью или другим щелочным и сульфатным активизаторами [1].

Установлена возможность получения клинкера и цемента на основе горелых пород (патент № 252184). Апробация прошла на Кузнецком цементном заводе, г. Новокузнецк. Преимуществом вышеупомянутых вяжущих является то, что при использовании их для получения сухих строительных смесей в качестве наполнителя можно использовать не природные алюмо-кремнеземистые (кислые) породы, а техногенные отходы (шлак, зола, горелая порода и т.д.). Это дает возможность получать недорогие с достаточной прочностью сухие строительные смеси для кладочных растворов.

Разработан состав цемента с использованием отходов промышленного производства (патент № 252184), где в качестве основного компонента применена горелая порода. Соотношение компонентов цемента: горелая порода – 5–80 %; продукт коксохимического производства (сульфатный компонент) – 4–6 %; клинкер – остальное. Клинкер в этом цементе получен из шихты: горелая порода – 22–24 %; отход метизного производства (оксиды железа) – 3–5 %; известняк – остальное. Активность цемента изменяется от 200 до 400 кгс/см<sup>2</sup>. Прочность 200 кгс/см<sup>2</sup> получена при минимальном количестве клинкера 5–15 %.

Разработан состав ДШЦ – декоративного шлакового цемента (патент № 2232139), содержащий отбеленный доменный гранулированный шлак со степенью белизны около 65 %, полученный выставлением шлакового расплава в ковшах до грануляции в течение 40–45 мин. В качестве щелочного компонента принята тонкодисперсная газоочистная пыль известкового хозяйства и дополнительно ускоритель помола – отработанная формовочная смесь – отход литейного производства при следующем соотношении компонентов, мас. %: указанная пыль 15–20, отработанная формовочная смесь 3–6, сульфатный компонент 3–5, указанный шлак – остальное. Смесь дополнительно может содержать пигмент в количестве 2–5 мас. % сверх 100 %. В качестве пигmenta предложен отход метизного производства – порошок насыщенного кирпичного цвета (удельная поверхность около 700 м<sup>2</sup>/кг), а в качестве сульфатного компонента использован сульфат аммония – отход коксохимического производства [7].

Известно, что сухая строительная смесь для кладочных растворов должна иметь повышенную водоудерживающую способность, не расслаиваться. Этого можно достичь, применяя тонкомолотый дисперсный наполнитель,

например, золу или горелую породу. Вызывает сомнение наличие вышеуказанных свойств у стекловидного шлакового наполнителя.

Ниже приведены исследования на трещиностойкость и водоотделение шлакового цемента и сухих строительных смесей на его основе.

**Влияние составляющих шлакового вяжущего на равномерность изменения объема.** Трещинообразование в шлаковых смесях может быть вызвано наличием в его химическом составе CaO (колеблется от 34 до 42 % для доменного шлака), что может привести к силикатному распаду, а также примеси MgO. Исследование на силикатный распад проводилось по ГОСТ 310–85 и показало его отсутствие в вяжущем на граншлаке (состав цемента – ДШЦ по патенту № 2232139). Установлено также, что повышенное содержание оксида магния (MgO) в шлаке до 10,5 % не вызывает изменения объема при испытании образцов вяжущего в автоклаве. Объяснить это можно тем, что в шлаковом вяжущем содержатся алюминаты и алюмоферриты кальция, в состав которых входит оксид магния в виде твердого раствора, что снижает количество остающегося свободного оксида магния в виде периклаза. При грануляции шлака, т.е. при быстром охлаждении, оксид магния связывается в устойчивое соединение – окерманит, при этом обеспечивается мелкая кристаллизация периклаза и насыщение стекловидной фазы оксидом магния, это доказано рентгеноструктурным анализом. В связи с этим гидратация шлакового вяжущего не вызывает больших локальных напряжений. Установлено, что использование в шлаковом цементе в качестве щелочного компонента молотой извести, а не газоочистной известковой пыли приводит к появлению в отдельных образцах неравномерности изменения объема. Все образцы с добавкой газоочистной известковой пыли (удельная поверхность около 600 м<sup>2</sup>/кг) выдержали соответствующие испытания. Эффективное действие дисперсных составляющих в ССС подтверждают и другие авторы [8, 9].

**Влияние шлакового наполнителя на водоотделение смеси.** Исследование проводилось по методике, регламентируемой ГОСТ 310.6–85. Методика состоит в фиксировании скорости осаждения в мерном цилиндре смеси из воды и цемента (В : Ц = 1 : 1) и подсчете коэффициента водоотделения по формуле, %:

$$K_{\text{вод}} = \frac{(a - \sigma)}{a} \times 100,$$

где  $a$  – первоначальный объем цементного теста, мл;  $\sigma$  – объем осевшего цементного теста, мл.

Были исследованы следующие дисперсные материалы: шлакопортландцемент (ШПЦ), молотый граншлак, известково-шлаковое вяжущее и декоративный шлаковый цемент (ДШЦ).

Установлено (рис. 3, 4), что композиционные вяжущие обладают большей водоудерживающей способностью, чем молотый граншлак без добавок. Молотый граншлак без добавок начинает сразу отдавать воду и этот процесс продолжается в течение 50 мин ( $K_{\text{вод}} = 39\%$ ). Введение пылевидной добавки (газоочистной пыли известкового производства) замедляет процесс водоотделения более чем в три раза ( $K_{\text{вод}} = 10,6$ ). Таким образом, доказано, что пылевидные добавки позволяют значительно повысить водоудерживающую

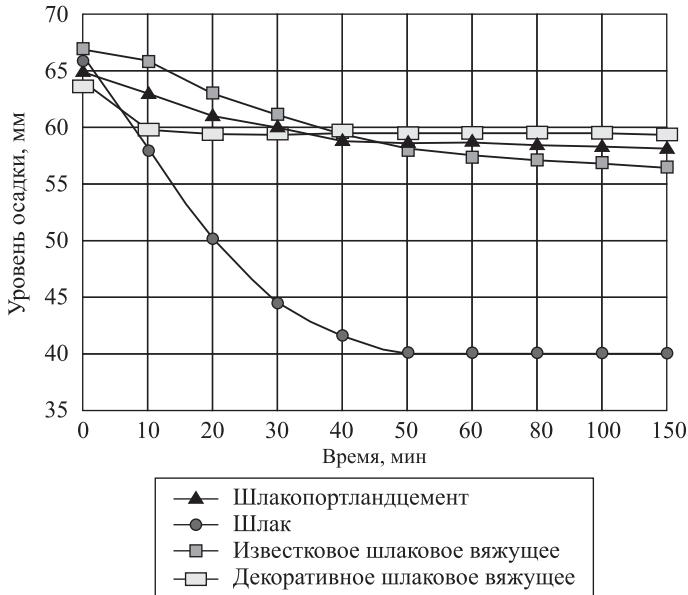


Рис. 3. Зависимость водоотделения от вида вяжущего

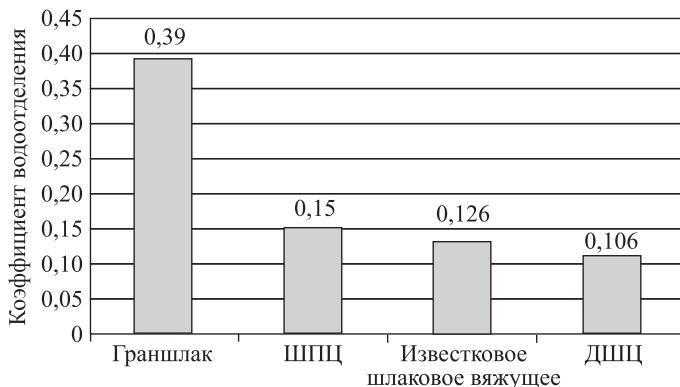


Рис. 4. Показатели коэффициентов водоотделения композиций на основе гранулированного шлака

способность молотого граншлака и, соответственно, растворов на модифицированных вяжущих.

**Определение основных характеристик смеси на основе гранулированного шлака.** Для определения свойств смеси были изготовлены балочки ( $4 \times 4 \times 16$ ) см из ДШЦ и граншлака (1 : 3). Одна часть образцов была испытана через 28 сут нормального твердения, а другая после ТВО по режиму (3 + 10 + 3) ч (табл. 1).

Рентгеновские исследования шлакового цемента (ДШЦ) подтверждают наличие гидроминералов, в частности  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , что доказывает участие кальцита, входящего в состав газоочистной пыли известкового производства, в формировании новообразований (рис. 5, табл. 2). Наблюдается присутствие этtringита, который, по данным некоторых ученых, со временем может преобразовываться в тобермарит. Примесь кальцита обу-

Таблица 1. Свойства смеси на основе граншлака

Характеристики	Ед. изм.	Свойства
Прочность при сжатии (марка)	МПа	25
Состав сухой строительной смеси:		
граншлак	%	71–79
известковая пыль	%	15–20
ОФС	%	3–6
гипс	%	3
Тонкость помола: остаток на сите № 008	%	Не более 3
Удельная поверхность	м <sup>2</sup> /кг	400–450
Водопотребность	%	28–30
Истинная плотность	г/см <sup>3</sup>	2,6–2,8
Насыпная плотность в рыхлом состоянии	кг/м <sup>3</sup>	980–1000
Начало схватывания	мин	20–25
Конец схватывания	ч	1–40
Прочность при естественном твердении 7 сут:		
при изгибе	МПа	1,72
при сжатии	МПа	10,1
Прочность при естественном твердении 28 сут:		
при изгибе	МПа	2,26
при сжатии	МПа	22
Прочность после ТВО $t = 90\text{--}95^\circ\text{C}$ , режим (3+8+3) ч:		
при изгибе	МПа	2,48
при сжатии	МПа	27,4

словлена наличием его в известковой газоочистной пыли и частично формируемой при выдерживании образцов на воздухе. Неизменным остается гематит (основа отхода метизного производства), который подтверждает существенность пигмента, равномерно распределенного в системе, не вступающего в химическую реакцию и дающего цвет изделию. Основные образующие шлаковый конгломерат новообразования – геленит, окерманит, тобермарит, бредигит, портландит, сульфатные соединения (табл. 2). Поверхности шлакового заполнителя и наполнителя обладают гидравлической активностью,

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа

№ пробы	Характеристика пробы	Заключение
1	Декоративный шлаковый цемент (ДШЦ), срок твердения 1 мес	Присутствует: рентгеноаморфное вещество, кальцит – 11,5 % (по ДТА), кварц, тобермарит, $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , гематит, этtringит
2	Декоративный шлаковый раствор (1:3), вяжущее – ДШЦ, заполнитель – граншлак, срок твердения – 6 мес	Присутствует: рентгеноаморфное вещество, $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , тобермарит, вероятно бредигит, кальцит – 4,4 % (по ДТА), кварц, примеси

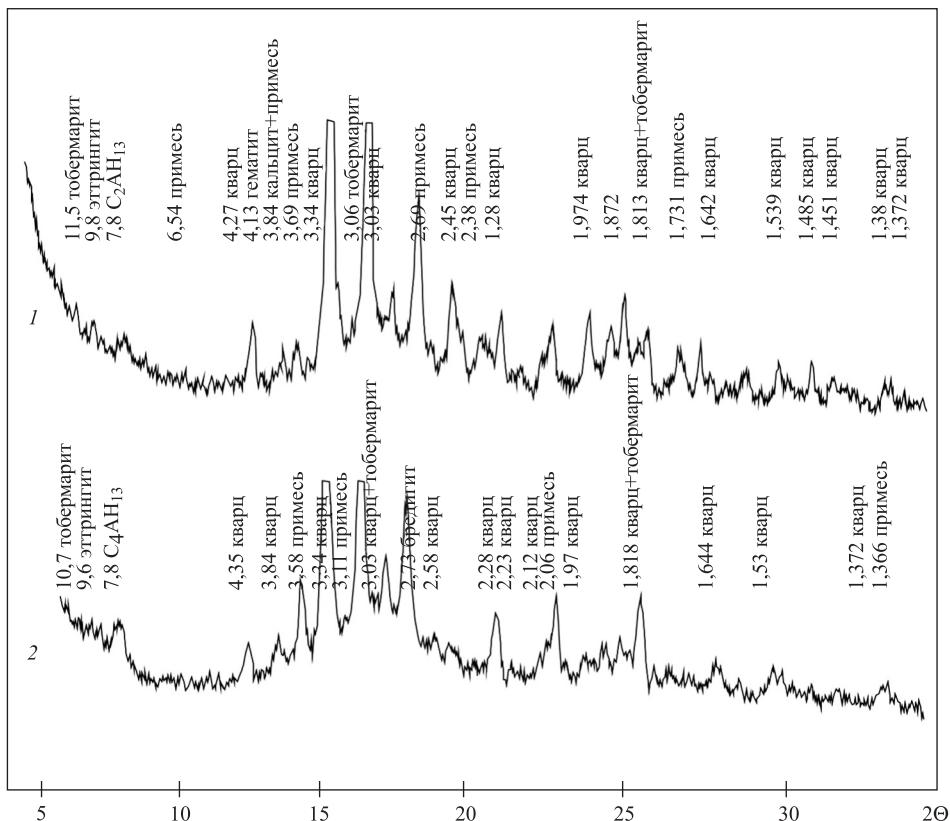


Рис. 5. Дифрактограммы

1 – декоративного шлакового цемента (ДШЦ); 2 – декоративного шлакового раствора (1 : 3); вяжущее – ДШЦ; заполнитель – граншлак

что обеспечивает их срастание друг с другом, т.е. наблюдается химическое сцепление между зернами с образованием однородно-монолитной шлаковой структуры, которая обеспечивает прочность в бесклинерных и малоклинерных шлаковых системах [7, 10].

**Выводы.** Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что, изменяя соотношение компонентов сухой смеси как на природных породах, так и на техногенных минеральных отходах, можно обеспечить необходимую кинетику нарастания прочности и конечную прочность строительных растворов (сухих строительных смесей) для кладочных работ, соответствующую классам В3,5–В12,5; подвижность растворов при этом можно менять от 1 до 14 см, что охватывает весь диапазон используемых марок строительных растворов ПК4–ПК14 по ГОСТ 28013–89.

Доказано, что компонентами сухих строительных смесей могут быть техногенные отходы, которые входят в состав вяжущего достаточной активности (15–20 МПа) и наполнителя. Соотношение вяжущее : наполнитель – 1 : 3.

Установлено, что дисперсность составляющих сухих строительных смесей из ВМР обеспечивает их трещиностойкость, водоудерживающую способность, нерасслаиваемость и достаточную активность, адгезию и прочность, что проверено на наполнителе в ССС в виде стекловидного металлургического шлака. Тонкодисперсные пылевидные составляющие

модифицированных вяжущих улучшают свойства сухих строительных смесей.

Кремнеземистые, алюмокремнеземистые вторичные минеральные ресурсы в составе сухих строительных смесей играют роль как компонента вяжущего, так и заполнителя растворной смеси. Количество добавочного цемента в композиционном вяжущем можно снизить от 5–15 до 0 % в зависимости от марки раствора – М50–М150.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Белан И.В., Фишер Х.В. Эффективные сухие строительные смеси для монтажных и кладочных работ // Междунар. сб. тр. «Ресурсы и ресурсосберегающие технологии в строительном материаловедении». Новосибирск, 2016. С. 189–194.
2. Демьянова В.С., Калашников В.И., Дубощина Н.М. Эффективные сухие строительные смеси на основе местных материалов. М.: АСВ, Пенза: ПГАСА, 1999. 181 с.
3. Безбородов В.А., Белан В.И., Мешков П.И. и др. Сухие смеси в современном строительстве / под ред. В.И. Белана. Новосибирск, 1998. 94 с.
4. Панова В.Ф. Техногенные продукты как сырье для стройиндустрии: монография. Новокузнецк: СибГИУ, 2009. 289 с.
5. Панова В.Ф., Панов С.А. Разработка технологических регламентов на производство материалов и изделий из вторичных минеральных ресурсов (BMP). Новокузнецк: СибГИУ, 2015. 201 с.
6. Книгина Г.И. Строительные материалы из горелых пород. М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. 206 с.
7. Панов С.А., Панова В.Ф. Декоративные строительные материалы из отбеленного и активированного шлака: монография. Новокузнецк: СибГИУ, 2010. 216 с.
8. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1986. 464 с.
9. Бердов Г.И., Ильина Л.В. Влияние количества и дисперсности минеральных добавок на свойства цементных материалов // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 11–12. С. 11–16.
10. Pavlenko S.I., Aksenov A.A., Kuvshinov P.G., Eremkin K.V., Kozhemyako S.I., Dobretsov N.L., Lyakhov N.Z., Avvakumov E.G. New Cementless Composite Binder from Mechanical Activated Industrial Wastes // Proceeding of the 6<sup>nd</sup> International Symposium on Utilization of «High Strength / High Performance Concrete», June, 2002, Leipzig. Ed. by: G. Konig, F. Dehn, N. Faust // Leipzig: Verein der Freunde des Bauingenieur und Wirtschaftsingenieurwesens an der Universitat Leipzig. 2002. Vol. 2. 1265 p.

**Панова Валентина Феодосьевна**, канд. техн. наук, проф.;

E-mail: panova\_vf@rambler.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

**Камбалина Ирина Владимировна**, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: iv-kambalina@yandex.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

**Панов Сергей Александрович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: panov\_sa@rambler.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

**Карпачева Анна Анатольевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: Ann4428@rambler.ru  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Получено после доработки 18.12.17

**Panova Valentina Feodos'evna**, PhD, Professor; E-mail: panova\_vf@rambler.ru  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
**Kambalina Irina Vladimirovna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: iv-kambalina@yandex.ru  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
**Panov Sergey Alexandrovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: panov\_sa@rambler.ru  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
**Karpacheva Anna Anatol'evna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: Ann4428@rambler.ru  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

## **MODIFIED ASTIDENT FROM NATURAL AND TECHNOGENIC ROCKS TO OBTAIN DRY CONSTRUCTION MIXTURES**

The results of investigations of modified binder based on natural rocks and secondary mineral resources (SMR) to produce dry construction mixtures (DCM) are given. Compounds, properties are displayed. Reality of getting DCM on natural rocks: silica clay, diatomite, limestone and man-made waste of Kuzbass enterprises: metallurgical slag, ash, burnt rock, dust gas cleaning is proved. Developed and patented by employees of the laboratory «Building materials» SibGIU compositions of clinker and clinkerless cements based on SMR are shown. The given compositions of mixtures on the basis of SMR are treaminoptrimidine and have low water separation and a sufficient strength, i.e. they meet the requirements for DCM.

**К e y w o r d s:** astringent, dry mortar, properties, composition, industrial waste, experiment, crack resistance, water separation, durability.

### **REFERENCES**

1. Pichugin A.P., Khritankov V.F., Belan I.V., Fisher H.V. Effektivnye sukhie stroitel'nye smesi dlya montazhnykh i kladochnykh rabot [Effective dry construction mixtures for installation and masonry work]. Mezhdunarodnyy sbornik trudov «Resursy i resursosberegayushchie tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii» [International collection of articles «Resources and resource-saving technologies in building materials science»]. Novosibirsk, 2016. Pp. 189–194. (in Russian)
2. Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I., Duboshina N.M. Effektivnye sukhie stroitel'nye smesi na osnove mestnykh materialov [Effective dry building mixes based on local materials]. Moscow, Building University Association; Penza: PSABA, 1999. 181 p. (in Russian)
3. Bezborodov V.A., Belan V.I., Meshkov P.I. and other. Sukhie smesi v sovremennom stroitel'stve [Dry mixtures in modern construction]. Ed. by V.I. Belan. Novosibirsk, 1998. 94 p. (in Russian)
4. Panova V.F. Tekhnogenennye produkty kak syr'e dlya stroyindustrii: monografiya [Technogenic products as raw materials for the construction industry: monograph]. Novokuznetsk, SibSIU, 2009. 289 p. (in Russian)
5. Panova V.F., Panov S.A. Razrabotka tekhnologicheskikh reglamentov na proizvodstvo materialov i izdeliy iz vtorichnykh mineral'nykh resursov (VMR) [Development of technological regulations for the production of materials and products from secondary mineral resources (SMR)]. Novokuznetsk, SibSIU, 2015. 201 p. (in Russian)

6. K n i g i n a G.I. Stroitel'nye materialy iz gorelykh porod [Building materials from burnt rocks]. Moscow, Publishing house of literature on construction, 1966. 206 p. (in Russian)
  7. P a n o v S.A., P a n o v a V.F. Dekorativnye stroitel'nye materialy iz otbelennogo i aktivirovannogo shlaka: monografiya [Decorative building materials from bleached and activated slag: monograph]. Novokuznetsk, SibSIU, 2010. 216 p. (in Russian)
  8. V o l z h e n s k i y A.V. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva: uchebnik dlya vuzov [Mineral binders: textbook for high schools]. 4-th edition, revised and enlarged. Moscow, Stroyizdat, 1986. 464 p. (in Russian)
  9. B e r d o v G.I., I l ' i n a L.V. Vliyanie kolichestva i dispersnosti mineral'nykh dobavok na svoystva tsementnykh materialov [Effect of the amount and dispersion of mineral additives on the properties of cement materials]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 11-12. Pp. 11–16. (in Russian)
  10. P a v l e n k o S.I., A k s e n o v A.A., K u v s h i n o v P.G., E r e m k i n K.V., K o z h e m y a k o S.I., D o b r e t s o v N.L., L y a k h o v N.Z., A v v a k u m o v E.G. New Cementless Composite Binder from Mechanical Activated Industrial Wastes. Proceeding of the 6nd International Symposium on Utilization of «High Strength / High Performance Concrete», June, 2002, Leipzig. Ed. by: G. Konig, F. Dehn, N. Faust. Leipzig: Verein der Freunde des Bauingenieur und Wirtschaftsingenieurwesens an der Universitat Leipzig. 2002. Vol. 2. 1265 p.
-

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 628.339

А.А. ЕСЬКИН, Н.С. ТКАЧ, М.С. ЛЯГУША

## ОЧИСТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИЕЙ С РАСПЫЛИВАНИЕМ ЖИДКОСТИ

Проведено исследование эффективности очистки нефтеводяной эмульсии методом напорной флотации с распыливающим напорным резервуаром в сравнении с напорным резервуаром барботажного типа. Разработана установка гидродинамического диспергирования нефтепродуктов в воде. Получены зависимости изменения концентрации нефтепродуктов в модельной среде от способа насыщения жидкости воздухом, давления в напорном резервуаре и времени очистки. Показано, что при насыщении жидкости в напорном резервуаре распыливающего типа остаточное содержание нефтепродуктов в среднем на 17 % ниже, чем при традиционном способе насыщения барботированием.

Ключевые слова: сточные воды, нефтепродукты, эмульгирование, распыл, сатуратор.

**Введение.** Нефтепродукты общепризнанно являются одними из основных загрязнителей всех компонентов экосферы. Они отличаются от большинства известных поллютантов тем, что это не индивидуальное вещество с четко определенными и зачастую хорошо изученными физико-химическими свойствами, а сложная смесь веществ. Нефтяные углеводороды поступают в компоненты окружающей среды в результате их разливов при нефтедобыче, транспортировке, хранении топлива и т.п., а также вследствие выброса в воздух несгоревших компонентов топлива в выхлопных газах.

Технология очистки нефтесодержащих вод определяется фазово-дисперсным состоянием образованной системы нефтепродукт – вода. Поведение нефтепродуктов в воде обусловлено их низкой полярностью и как следствие – малой растворимостью в воде. Необходимо также отметить, что нефтепродукты по своей плотности значительно отличаются от воды как в большую, так и в меньшую сторону (асфальтены имеют плотность 1,1 г/см<sup>3</sup>, а летучие углеводороды – 0,6–0,7 г/см<sup>3</sup>). В связи с этим наиболее часто применяемыми методами очистки воды от нефтепродуктов являются те, которые основаны на использовании разности их физико-химических свойств с водой

(механические и физико-химические методы). Из механических методов распространение получило отстаивание, из физико-химических – флотация. Флотационная очистка сточных вод технологически и экономически эффективна при извлечении примесей, обладающих природной гидрофобностью (нефть, нефтепродукты, жиры, органические кислоты, эфиры и др.) [1, 2].

Среди существующих способов флотационной очистки наибольшей эффективностью обладает напорная флотация, при которой пузырьки в объеме очищаемой жидкости образуются за счет изменения условий растворимости воздуха. Высокая эффективность напорной флотации обеспечивается наименьшим размером образующихся пузырьков, что позволяет извлекать из жидкости большинство фракций нефтепродуктов.

В настоящий момент применяют различные способы насыщения жидкости воздухом. Традиционно в напорной флотации используют барботирование – перед насосом, перекачивающим очищаемую жидкость, подается воздух, водовоздушная смесь поступает в напорный резервуар, находящийся под заданным давлением, при этом часть воздуха растворяется в жидкости, а нерастворившаяся часть отводится из напорного резервуара. Недостатком данного метода является малое количество растворяемого воздуха, а следовательно, и меньшее количество флотационных пузырьков.

Для интенсификации растворения воздуха коллективом кафедры инженерных систем зданий и сооружений ДВФУ разработан способ напорной флотации с распыливанием жидкости [3]. Очищаемая жидкость распыливается в объеме напорного резервуара через ударно-струйную форсунку, возникающая при этом большая поверхность соприкосновения фаз обеспечивает интенсивное насыщение жидкости воздухом. Насыщенная жидкость поступает во флотационную камеру, где происходит выделение пузырьков воздуха и извлечение частиц нефтепродуктов. В работе [3] показано, что при насыщении жидкости распыливанием скорость барботажа, а следовательно, и количество растворенного воздуха в среднем на 30 % выше, чем при барботировании.

Целью данной работы является экспериментальное сравнение эффективности очистки модели нефтесодержащих вод напорной флотацией распыливающего типа с напорной флотацией барботажного типа.

**Приготовление модельной эмульсии.** В ходе эксперимента проводили очистку нефтесодержащих сточных вод, в качестве которых использовали модельную эмульсию мазута марки М100 в водопроводной воде. Отдельной задачей является приготовление модельной эмульсии. Мазут практически не растворим в воде, и при его вливании на поверхности жидкости образуются отдельные капли, а при большой концентрации пленка. В химической технологии для создания эмульсии «масло в воде» используют различные методы диспергирования, при которых происходит дробление больших капель дисперсной фазы на мелкие. Можно выделить следующие основные методы диспергирования: в турбулентном течении, создаваемом мешалками [4], или в статическом смесителе [5]; мембранные диспергирование, при котором дисперсная фаза разделяется на отдельные капли при ее прохождении через пористый материал [6], и диспергирование за счет ультразвуковой кавитации [7].

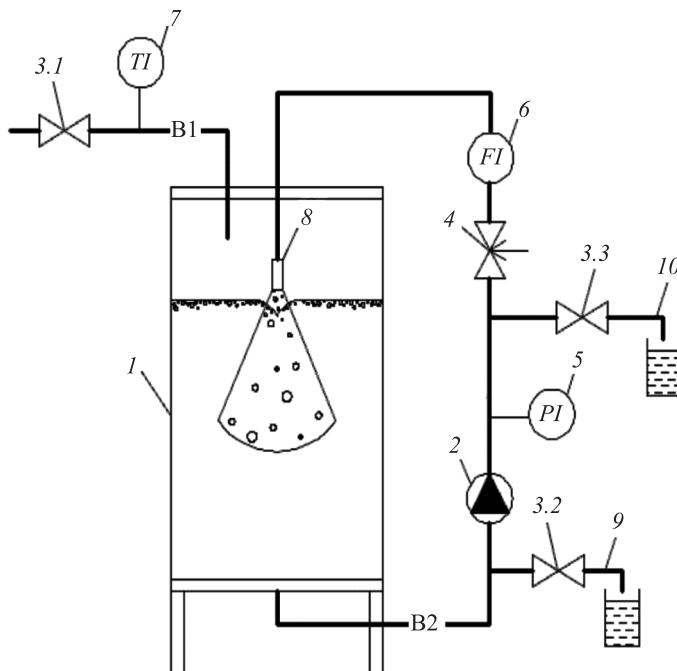


Рис. 1. Установка приготовления эмульсии:

1 – емкость; 2 – насос; 3 – шаровой кран; 4 – вентиль; 5 – манометр;  
6 – водосчетчик; 7 – термометр; 8 – форсунка; 9, 10 – патрубки  
отбора воды

Для создания эмульсии нами разработана установка гидродинамического диспергирования, схема которой представлена на рис. 1. Жидкость забирается из нижней части емкости и подается центробежным насосом на центробежно-струйную форсунку, установленную непосредственно над поверхностью жидкости. В результате распыливания на поверхности жидкости создается воронка, в которую тонкой струйкой вливается мазут (расчетная концентрация 160 мг/л). При этом диспергирование мазута происходит в трех точках: в турбулентном течении газожидкостного факела, создаваемом в объеме жидкости, в центробежном насосе и в поле центробежных сил центробежно-струйной форсунки. Жидкость диспергировали в течение 30 мин, затем отстаивали в течение 1 ч для отделения грубоэмульгированных нефтепродуктов. После этого отбирали пробы, которые исследовали на содержание нефтепродуктов и размер частиц эмульсии. Концентрация нефтепродуктов в эмульсии составляла в среднем 128 мг/л. Размер частиц эмульсии определяли лазерным дифракционным анализатором Fritsch Analysette 22 NanoTec. По результатам серии экспериментов установили, что средний объемно-поверхностный диаметр частиц эмульсии лежит в диапазоне 8–12 мкм. Это соответствует существующим экспериментальным и теоретическим данным [1].

**Методика эксперимента.** Исследование эффективности очистки проводили с помощью экспериментальной установки, представленной на рис. 2 [8]. Во флотационную емкость (2), разделенную перегородкой на флотационное отделение (11) и отделение отстоя воды (1), перекачивали нефтеvodянную

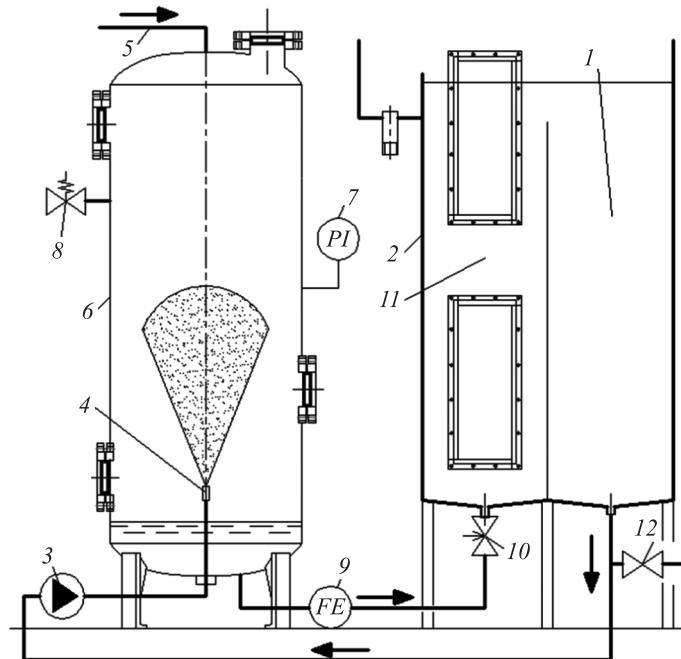


Рис. 2. Установка напорной флотации [8]

эмulsionю. В ходе эксперимента выполняли две независимые серии опытов: в одной эмульсию очищали напорной флотацией с насыщением жидкости распыливанием, в другой – с насыщением жидкости барботированием. При насыщении жидкости распыливанием в напорный резервуар (6) по линии (5) от компрессора подавали сжатый воздух до создания заданного давления, величину которого контролировали по показаниям манометра (7), после чего насосом (3) жидкость подавали на ударно-струйную форсунку ВЕТЕ TF8-60 (4) и распыливали в объеме резервуара (6). При насыщении жидкости барботированием перед насосом (3) подавался воздух, расход воздуха составлял 10 л/мин (контролировали по ротаметру). Водовоздушная смесь поступала в напорный резервуар (6), давление в котором поддерживали на заданном уровне предохранительным сбросным клапаном (8). Насыщенная тем или иным способом нефтесодержащая жидкость, проходя через вентиль (10), поступала во флотационное отделение (11), где происходил процесс извлечения нефтепродуктов. Из флотационного отделения (11) вода поступала в отделение отстоя воды (1), откуда подавалась на повторное насыщение в напорный резервуар (6). Таким образом, очистка проходила по схеме со 100%-й рециркуляцией. Сфлотированные нефтепродукты удаляли с поверхности жидкости специальным сборным устройством из полипропилена. Вентилем (10) в емкости (2) поддерживали постоянный уровень воды. Так как в качестве насоса использовали роторно-пластинчатый насос с практически вертикальной напорно-расходной характеристикой, то независимо от давления воздуха в напорном резервуаре в системе обеспечивался постоянный расход 1 м<sup>3</sup>/ч, что контролировалось счетчиком воды с импульсным выходом (9).

По завершению процесса флотационной очистки на поверхность жидкости вливали 150 мл бензина-растворителя НЕФРАС С2-80/120, в котором

растворялись нефтепродукты, оставшиеся на поверхности жидкости и стенах емкости. После экстракции растворитель удаляли с поверхности жидкости поршневым насосом. Затем емкость опорожняли, промывали водопроводной водой, подаваемой через форсунку, и заново заполняли нефтеvodяной эмульсией.

В качестве отклика использовали концентрацию нефтепродуктов в пробе  $C$  (мг/л), при этом наиболее значимыми факторами признаны давление воздуха в напорном резервуаре  $P_g$  и время очистки  $t$ . Условия проведения эксперимента представлены в табл. 1. В каждой точке эксперимента проводилось по три параллельных опыта.

**Методика пробоотбора и химического анализа проб.** Пробоотбор осуществлялся в соответствии с ГОСТ 31861–2012 и рекомендациями, изложенными в [9]. Пробы воды отбирали через трубку, оснащенную шаровым краном (12), подключенную к вертикальному участку трубопровода. Все пробы отбирали в бутыль из темного стекла, что исключает сорбцию нефтепродуктов на стенах бутылок и защищает пробу от воздействия светового излучения. Объем пробы составлял 1,0 дм<sup>3</sup>. Для промывки пробоотборного устройства от возможного загрязнения нефтепродуктами за период работы установки между отдельными замерами перед отбором каждой пробы сливали воду в количестве не менее пятикратного объема отбираемой пробы. Собранные пробы консервировали 1 см<sup>3</sup> концентрированной серной кислоты и помещали на хранение в холодильную камеру при температуре не выше 4 °С.

Определение нефтепродуктов, содержащихся в пробе, производили гравиметрическим методом в соответствии с основными положениями, изложенными в ПНД Ф 14.1 : 2.116–97 и [10]. В бутылку, содержащую пробу, прибавляли 50 см<sup>3</sup> экстрагента, в качестве которого использовали хлористый метилен (х.ч.). Выбор экстрагента обусловлен его низкой полярностью и соответственно высоким сродством к определяемым соединениям. Кроме того, его температура кипения в условиях создаваемого вакуума не превышает 35 °С, что позволяет сохранить большинство исследуемых соединений. Пробу с экстрагентом тщательно перемешивали в течение 2–3 мин, количественно переносили в делительную воронку и собирали органическую fazу. Экстракцию нефтепродуктов хлористым метиленом повторяли дважды, объединяя органические экстракты. Полученные экстракты упаривали досуха, с использованием роторного испарителя, под вакуумом на водяной бане ( $t = 50$  °С). Сухой остаток растворяли в 1 см<sup>3</sup> тетрахлорметана (ОСЧ), переносили в стеклянную виалу и отдували азотом досуха. Виалы с сухим остатком нефтепродуктов взвешивали на аналитических весах Shimadzu AW-220 с точностью до 0,1 мг. Содержание нефтепродуктов определяли как разницу между весом виалы с сухим остатком и весом чистой виалы, отнесенную к объему взятой пробы воды.

Таблица 1. Условия проведения опытов

Распыливание		Барботирование	
$P_g$ , бар	$t$ , мин	$P_g$ , бар	$t$ , мин
1,5	0	1,5	0
	10		15
	20		25
	40		40
2,5	0	2,5	0
	15		15
	30		30
	60		40

**Результаты эксперимента.** Для описания зависимости концентрации нефтепродуктов от времени очистки принят полином второй степени:

$$C = b_0 + b_1 t + b_2 t^2,$$

где  $C$  – концентрация нефтепродуктов в пробе, мг/л;

$t$  – время очистки, мин.

Уравнения регрессии были получены методом наименьших квадратов с использованием пакета «Анализ данных» программы MS Excel. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Уравнения регрессии для разных способов напорной флотации

Способ насыщения	$P$	Уравнение	$G$	$G_{\text{таб}}$	$F$	$F_{\text{таб}}$
Распыл	1,5	$C = 126,2 - 2,62 \cdot t + 0,02 \cdot t^2$	0,41	0,77	1,13	2,4
Распыл	2,5	$C = 133,9 - 5,1 \cdot t + 0,053 \cdot t^2$	0,44	0,77	0,95	2,48
Барботаж	1,5	$C = 116,4 - 1,57 \cdot t + 0,0014 \cdot t^2$	0,68	0,77	1,02	2,57
Барботаж	2,5	$C = 116,3 - 3,3 \cdot t + 0,0336 \cdot t^2$	0,49	0,77	1,23	2,48

Воспроизводимость эксперимента оценивали по  $G$  критерию Кохрена [11], для всех опытов фактические значения  $G$  получились меньше табличных, что свидетельствует о воспроизводимости эксперимента. Адекватность моделей проверялась с использованием  $F$  критерия Фишера [11], все модели признаны адекватными.

Графики, полученные по зависимостям, представленным в табл. 2, и результаты эксперимента отображены на рис. 3–5.

Эффективность очистки модельной эмульсии напорной флотацией с насыщением жидкости барботированием возрастает с увеличением времени очистки и достигает максимального значения при  $t = 40$  мин. Дальнейшее продолжение очистки не приводит к увеличению эффективности. Эффективность очистки возрастает с повышением давления в напорном резервуаре

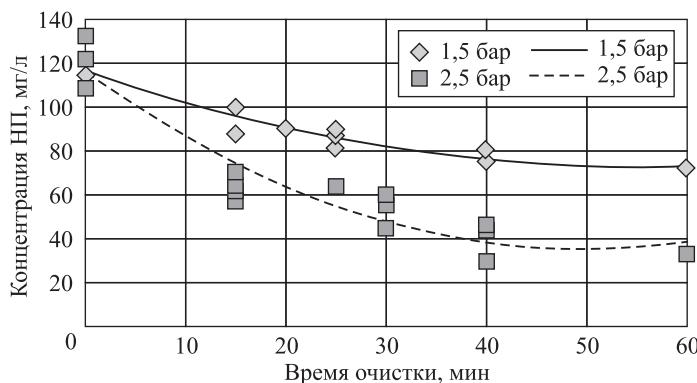


Рис. 3. Зависимости концентрации нефтепродуктов от времени очистки жидкости напорной флотацией и давления в напорном резервуаре при насыщении жидкости барботированием

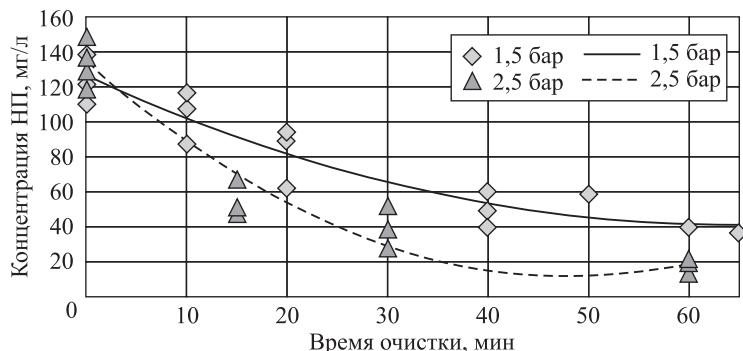


Рис. 4. Зависимости концентрации нефтепродуктов от времени очистки жидкости напорной флотацией и давления в напорном резервуаре при насыщении жидкости распыливанием

с 1,5 до 2,5 бар. Если при давлении 1,5 бар степень извлечения частиц по истечении 40 мин очистки составляет в среднем 30 %, то при повышении давления до 2,5 бар степень извлечения возрастает до 65 %. Это можно объяснить ростом количества пузырьков вследствие увеличения количества растворенного воздуха.

Эффективность напорной флотации при насыщении жидкости в напорном резервуаре распыливающего типа также возрастает с увеличением времени очистки, однако характер распределения экспериментальных точек говорит о том, что в отличие от насыщения барботированием после 40 мин эффективность очистки продолжает увеличиваться и достигает максимальных значений в диапазоне 60–70 мин. Это можно объяснить тем, что в случае насыщения распыливанием увеличивается количество пузырьков, при этом увеличивается и число пузырьков малого диаметра, которые способны извлекать частицы нефтепродуктов меньшего размера.

Так же, как и в случае насыщения жидкости барботированием, эффективность очистки возрастает при увеличении давления в напорном резервуаре с 1,5 до 2,5 бар. При 60 мин очистки степень извлечения частиц нефтепродуктов составляет в среднем 70 % при давлении 1,5 бар и 88 % при давлении 2,5 бар.

Сравнивая модели, полученные в результате обработки экспериментальных данных (рис. 5), видно, что при одинаковых условиях проведения эксперимента (давление в напорном резервуаре 2,5 бар, температура жидкости 22–24 °С, время обработки 50 мин, начальная концентрация нефтепродуктов 120 мг/л, расход жидкости 1 м<sup>3</sup>/ч) степень извлечения частиц нефтепродуктов напорной флотацией с распыливанием жидкости выше на 17,9 %, чем напорной фло-

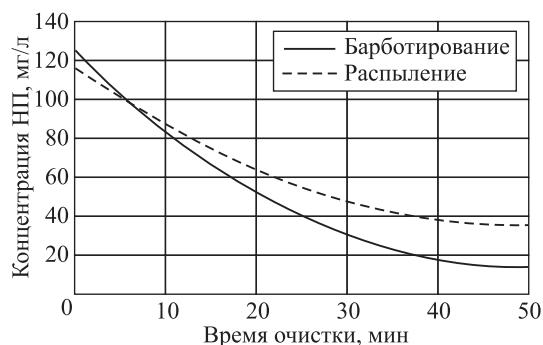


Рис. 5. Зависимости концентрации нефтепродуктов от времени очистки жидкости напорной флотацией при насыщении жидкости распылением и барботированием; давление насыщения 2,5 бар

тацией с барботированием жидкости (остаточная концентрация нефтепродуктов 35,3 мг/л при насыщении барботированием и 13,79 мг/л при насыщении распыливанием). Таким образом, нами сделан вывод, что распыливание жидкости позволяет интенсифицировать процесс напорной флотации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С т а х о в Е.А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов. Л.: Недра, 1983. 263 с.
2. К с е н о ф о н т о в Б.С., К о з о д а е в А.С., Т а р а н о в Р.А., В и н о г р а - д о в М.С., С е н и к Е.В., В о р о п а е в а А.А., С а з о н о в Д.В. Опыт внедрения локальных очистных сооружений на автомобильных мойках // Экология и пром-сть России. 2015. Т. 19. № 6. С. 29–31.
3. Е с ъ к и н А.А., Т к а ч Н.С., З а х а р о в Г.А. Определение эффективности распыливающего абсорбера в условиях напорной флотации // Вестн. Инж. школы Дальневост. федер. ун-та. 2017. № 3 (32). С. 127–137.
4. Б р а г и н с к и й Л.Н., Б е г а ч е в В.И., Б а р а б а ш В.М. Перемешивание в жидких средах. Л.: Химия, 1984. 336 с.
5. Т и ш и н О.А., В и н о г р а д о в а Н.В., Х а р и т о н о в В.Н. Эмульгирование взаимно нерастворимых жидкостей // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2009. Т. 2. № 1 (49). С. 18–21.
6. Piacentini E. Membrane emulsification technology: Twenty-five years of inventions and research through patent survey // Journal of Membrane Science. 2010. No. 468. P. 410–422.
7. Х м е л е в В.Н., С л и в и н А.Н., Б а р с у к о в Р.В., Ц ы г а н о к С.Н., Ш а л у - н о в А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.
8. Пат. № 155705. Российская Федерация, МПК C02F 1/00. Устройство для очистки нефтесодержащих и сточных вод / А.А. Еськин, Г.А. Захаров, К.В. Цыганкова, Н.С. Ткач; заявитель и патентообладатель ДВФУ (RU); № 2014150107/05; заявл. 10.12.2014; опубл. 20.10.2015; Бюл. № 9.
9. Т у в И.А. Судовые технические средства предотвращения загрязнения водоемов нефтепродуктами. М.: Транспорт, 1976. 128 с.
10. Л у рь е Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 302 с.
11. С е м е н о в Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 400 с.

**Еськин Антон Андреевич**, ст. препод.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

**Ткач Надежда Сергеевна**, асп.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

**Лягуша Марина Сергеевна**, студ.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Получено 14.12.17

**Es'kin Anton Andreevich**, Senior Lecturer

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Tkach Nadezhda Sergeevna**, Post-graduate Student

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Lyagusha Marina Sergeevna**, Student  
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

## **PURIFICATION OF OILY WATER BY DISSOLVED AIR FLOTATION WITH SPRAYING OF LIQUID**

The study of the efficiency of purification of oil-water emulsion by the method of dissolved air flotation with a spraying pressure tank in comparison with a pressure reservoir of bubbling type was carried out. The plant of hydrodynamic dispersion of oil products in water was developed. The dependence of the change of the oil products' concentration in the model medium on the way of saturation of liquid of air, the pressure in the saturator, and the cleaning time are obtained. It is shown the residual oil content at saturation of liquid of air in a head reservoir of the spraying type is on average 17% lower than at the traditional method saturation by bubbling.

**K e y w o r d s:** waste water, oil products, emulsification, spray, saturator.

### **REFERENCES**

1. S t a k h o v E.A. Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod predpriyatiy khraneniya i transporta nefteproduktov [Purification of oily waste water from storage and transport of petroleum products organizations]. Leningrad, Nedra, 1983. 263 p. (in Russian)
2. K s e n o f o n t o v B.S., K o z o d a e v A.S., T a r a n o v R.A., V i n o g r a d o v M.S., S e n i k E.V., V o r o p a e v a A.A., S a z o n o v D.V. Opyt vnedreniya lokal'nykh ochistnykh sooruzheniy na avtomobil'nykh moykakh [Experience of introduction of local treatment facilities at car washes]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]. 2015. Vol. 19. No. 6. Pp. 29–31. (in Russian)
3. E s ' k i n A.A., T k a c h N.S., Z a k h a r o v G.A. Opredelenie effektivnosti raspylivayushchego absorbera v usloviyakh napornoy flotatsii [Determination of the efficiency of a spray absorber under dissolved-air flotation conditions]. Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta [FEFU: school of engineering bulletin]. 2017. No. 3/32. Pp. 127–137. (in Russian)
4. B r a g i n s k i y L.N., B e g a c h e v V.I., B a r a b a s h V.M. Peremeshivanie v zhidkikh sredakh [Stirring in liquid]. Leningrad, Chemistry, 1984. 336 p. (in Russian)
5. T i s h i n O.A., V i n o g r a d o v a N.V., K h a r i t o n o v V.N. Emul'girovaniye vzaimno nerastvorimykh zhidkostey [Emulsification of mutually insoluble liquids]. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Izvestia VSTU]. 2009. Vol. 2. No. 1 (49). Pp. 18–21. (in Russian)
6. P i a c e n t i n i E. Membrane emulsification technology: Twenty-five years of inventions and research through patent survey. Journal of Membrane Science. 2010. No. 468. Pp. 410–422.
7. K h m e l e v V.N., S l i v i n A.N., B a r s u k o v R.V., T s y g a n o k S.N., S h a l u - n o v A.V. Primenenie ul'trazvuka vysokoy intensivnosti v promyshlennosti [Application of high intensity ultrasound in industry]. Biysk, ASTU, 2010. 203 p. (in Russian)
8. Pat. No. 155705 RU. Ustroystvo dlya ochistki neftesoderzhashchikh i stochnykh vod [Device for cleaning oily and sewage water]. A.A. Es'kin, G.A. Zakharov, K.V. Tsygankova, N.S. Tkach; applicant and patentee of FEFU. NO. 2014150107/05; appl. 10.12.2014; publ. 20.10.15; Bull. No. 9. (in Russian)
9. T u v I.A. Sudovye tekhnicheskie sredstva predotvrascheniya zagryazneniya vodoemov nefteproduktami [Ship's technical means to prevent oil pollution of water bodies]. Moscow, Transport, 1976. 128 p. (in Russian)

10. Lur'e Yu.Yu. Analiticheskaya khimiya promyshlennyykh stochnykh vod [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Chemistry, 1984. 302 p. (in Russian)
  11. Semenov B.A. Inzhenernyy eksperiment v promyshlennoy teplotekhnike, teploenergetike i teplotekhnologiyakh [Engineering experiment in industrial heat engineering, heat power and heat technologies]. St. Petersburg, Publishing house «Lan», 2013. 400 p. (in Russian)
-

УДК 628.34

О.Г. ГИРИКОВ

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Недавно предложен новый способ реагентной доочистки сточных вод гальванических цехов от ионов тяжелых металлов 2-ступенчатым фильтрованием. На первой ступени задерживаются остатки гидроксидов различных металлов, выносимых с осветленной водой после ее нейтрализации и отстаивания, а на второй – оставшиеся после первой ступени металлы, переведенные предварительно в сульфидную форму, а также удаляются остатки непрореагировавших сульфидов. Поскольку растворимость сульфидов тяжелых металлов в сотни тысяч и даже миллионы раз меньше растворимости их гидроксидов, достигается высокий эффект доочистки сточных вод. С целью снижения стоимости очистки и упрощения технологии было предложено отказаться от первой ступени фильтрования. Как показали сравнительные опыты, проведенные на сточной воде действующего гальванического цеха, эффект очистки 1-ступенчатым фильтрованием практически такой же, как и 2-ступенчатым. Однако за счет отказа от первой ступени количество фильтров сокращается примерно в 2 раза, соответственно снижается расход арматуры, фасонных частей, протяженность трубопроводов и площадь фильтровального зала. Также сокращаются расходы чистой воды и электроэнергии на промывку фильтров, затраты на перекачку и обработку грязных промывных вод, что еще в большей степени повышает экономичность предлагаемой технологии, так как требуется меньше затрат и времени на ее внедрение.

**Ключевые слова:** гальванические цеха, сточные воды, образование сульфидов, совершенствование доочистки, одноступенчатое фильтрование, высокая экономичность.

Гальванические цеха имеются на тысячах предприятий машино- и станкостроения, авиационных, автомобильных, инструментальных и металлургических заводах, предприятиях по производству электродвигателей и электротехнического оборудования, приборостроительных заводах и т. д. Основным и наиболее токсичным видом загрязнений сточных вод цехов гальванопокрытий являются ионы тяжелых металлов, которые наносят огромный вред окружающей среде, поступая в городскую канализацию и водоемы с недостаточно очищенными производственными сточными водами. Но даже на городских канализационных очистных сооружениях они загрязняют окружающую среду, так как при совместной очистке с бытовыми стоками населенного пункта тяжелые металлы накапливаются в осадках канализационных очистных сооружений, что исключает возможность использования последних в качестве удобрений. Эти осадки, накапливаясь в местах для их складирования, занимают большие площади и загрязняют окружающую среду тяжелыми металлами (почву, подземные и поверхностные воды и т.д.). Кроме того, тяжелые металлы содержатся в сточных водах рудников, обогатительных фабрик, предприятий цветной металлургии и т.д.

Большинство современных технологий очистки производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов не обеспечивают необходимой степени очистки либо имеют дорогостоящее аппаратурное оформление, сложны в эксплуатации и требуют значительных затрат на очистку сточных вод и обработку образующихся осадков. Наиболее простым и экономичным является реагентный метод очистки, который применяется для очистки сточных вод цехов гальванопокрытий примерно на 90 % предприятий России [1]. Даже другие методы очистки часто используются в комбинации с реагентным.

Так, при очистке сточных вод от ионов тяжелых металлов сорбцией их на зернистой загрузке из природного брусита данный способ применяется на стадии доочистки после реагентной очистки сточных вод. Для регенерации бруситовой зернистой загрузки фильтров требуется 3%-й раствор соляной кислоты или 5%-й раствор аммиака, т.е. необходимо реагентное хозяйство для регенерации сорбционной загрузки фильтров и реагенты для последующей нейтрализации отработанных растворов [2]. Основной недостаток реагентного метода – невысокий эффект очистки. Поэтому устранение этого недостатка с минимальными затратами является важным и актуальным, чему и посвящена предлагаемая статья.

В НГАСУ (Сибстрин) разработана новая экономичная и высокоэффективная технология реагентной доочистки сточных вод от оставшихся ионов тяжелых металлов после реагентного, электрохимического, гальванокоагуляционного и других способов, не обеспечивающих требуемую степень очистки.

Суть предлагаемого способа заключается в задержании гидроксидов тяжелых металлов, оставшихся в осветленной сточной воде после обезвреживания токсичных загрязнений, ее нейтрализации и отстаивания, на осветлительных фильтрах первой ступени, а затем переводе ионов тяжелых металлов в фильтрате в их сульфидную форму с последующим задержанием на фильтрах второй ступени. За счет того что растворимость сульфидов тяжелых металлов в сотни тысяч и даже миллионы раз ниже растворимости их гидроксидов, достигается высокий эффект доочистки сточной воды [3]. Например, при оптимальной pH растворимость  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  составляет  $0,015 \text{ мг/л}$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_2 - 0,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2 - 0,28$ ,  $\text{Ni}(\text{OH})_2 - 0,035 \text{ мг/л}$  (в пересчете на металл), а растворимость их сульфидов соответственно  $\text{CuS} - 5,9 \cdot 10^{-18} \text{ мг/л}$ ,  $\text{ZnS} - 1,82 \cdot 10^{-8}$ ,  $\text{FeS} - 3,36 \cdot 10^{-5}$  и  $\text{NiS} - 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ мг/л}$  (при температуре 18–20 °C) [4].

Следует отметить, что принцип очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов переводом их в сульфидную форму пытались применить еще в СССР (очистка от ртути, мышьяка и цинка) [4]. В последнее время также предпринимались попытки использования данного метода. Так, для повышения эффекта очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов А.С. Кочергин предлагает переводить их в сульфидную форму, т.е. вводить сульфид натрия вместе с полиакриламидом и известковым молоком в очищенную сточную воду после гальванокоагулятора перед отстойником [5]. При этом рекомендуется pH очищенной сточной воды поддерживать в пределах 9,5–10,0. Это условие связано с тем, что оставшиеся в очищенной воде сульфиды могут

Таблица 1. Содержание в воде  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HS}^-$  и  $\text{S}^{2-}$ , % от их общего количества в зависимости от величины рН (при 25 °C)

Соединение	Величина рН								
	4	5	6	7	7,5	8	8,5	9	10
$\text{H}_2\text{S}$	99,9	98,9	91,8	52,9	26,0	10,1	3,4	1,1	0,1
$\text{HS}^-$	0,1	1,1	8,2	47,1	74,0	89,9	96,6	98,89	99,9
$\text{S}^{2-}$	—	—	—	—	—	—	—	0,01	0,1

находиться в виде  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HS}^-$  и  $\text{S}^{2-}$  в зависимости от рН воды [6] (табл. 1) и только при  $\text{pH} \geq 10$  сероводород в сточной воде отсутствует.

Однако при выпуске очищенных сточных вод в городскую канализацию или в водоемы их рН должна находиться в пределах 6,5–8,5, а сульфиды должны вообще отсутствовать. Но, как видно из табл. 1, даже при  $\text{pH} = 8,5$  в воде, содержащей сульфиды, будет присутствовать около 3,4 % сероводорода, а при  $\text{pH} = 7,5$ –8 его концентрация составит уже 10–26 %. При этом выделяющийся токсичный сероводород может отравить обслуживающий персонал очистных сооружений, канализационных сетей и насосных станций, а также работников данного предприятия. Поэтому предлагаемую технологию использовать недопустимо. К ее недостаткам также относится низкий эффект очистки по некоторым металлам, остаточная концентрация которых превышает предельно допустимую (ПДК), даже для выпуска сточных вод в городскую канализацию и тем более в водоемы.

Таким образом, предложенные ранее технологии не предусматривают доочистку очищенных от тяжелых металлов сточных вод от остатков сульфидов, что является их основным недостатком и делает небезопасным и недопустимым их применение. Для устранения этого недостатка в НГАСУ (Сибстрин) предложен способ доочистки очищенной сточной воды от остатков, не прореагировавших с металлами, сульфидов на тех же фильтрах второй ступени.

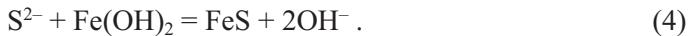
Суть способа заключается в том, что перед окончанием водяной промывки фильтрующей загрузки в промывную воду подается суспензия гидроксида железа, которая заполняет нижние расширенные слои зернистой загрузки. При этом суспензия гидроксида железа может подаваться вместе с промывной водой во всасывающую линию промывного насоса и вместе с ней заполнять нижние расширенные слои зернистой загрузки. Когда промывка заканчивается, загрузка оседает, а ее нижние слои оказываются частично зашламленными хлопьями гидроксида железа [3, 7, 8]. При фильтровании сточной воды через зернистую загрузку в верхних ее слоях задерживаются судьфиды тяжелых металлов, а в нижних зашламленных слоях связываются в нерастворимые соединения оставшиеся в растворе сульфиды. При этом они взаимодействуют с гидроксидом железа по реакциям:

– в щелочной среде



– в нейтральной среде





Таким образом, в предлагаемой технологии решается вопрос глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов и одновременного удаления остатков сульфидов из очищенной сточной воды в нижних слоях загрузки фильтров второй ступени.

Для проверки эффективности предлагаемого способа очистки была изготовлена и смонтирована фильтровальная установка в лаборатории кафедры «Водоснабжения и водоотведения» НГАСУ (Сибстрин), принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, фильтровальная установка состоит из четырех последовательно соединенных колонок диаметром 110 мм, загруженных альбитофирам, с высотой слоя загрузки в каждой колонке 600 мм и поддерживающим слоем гравия крупностью 3–5 мм и толщиной 100 мм. Данная экспери-

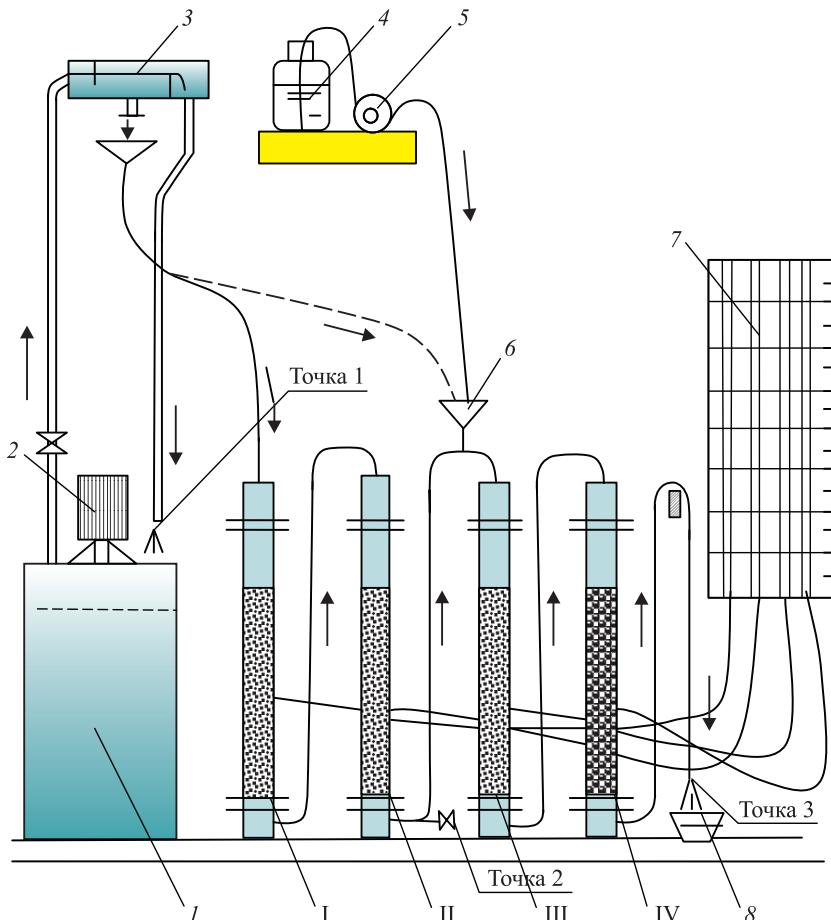


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

I, II, III, IV – фильтровальные колонки; 1 – емкость исходной сточной воды; 2 – насос с электродвигателем; 3 – бачок-дозатор постоянного уровня; 4 – расходный бачок щелочного раствора сульфида натрия; 5 – насос-дозатор; 6 – приемная воронка; 7 – пьезометрический щит; 8 – сборный отводной лоток очищенной сточной воды (фильтрата)

ментальная установка моделирует 2-ступенчатую очистку сточных вод на напорных фильтрах в соответствии с предлагаемым способом. Колонки I и II представляют верхний и нижний слои загрузки фильтра первой ступени, а колонки III и IV аналогично – фильтра второй ступени. Установка была за-проектирована в соответствии с теорией технологического моделирования работы зернистых осветлительных фильтров [9].

В качестве фильтрующей загрузки использовался альбитафир (отсев от дробления щебня пос. Горный, Новосибирская область), который является более эффективным и дешевым фильтрующим материалом, чем песок. Поскольку, в соответствии со СНиП 2.04.03–85. Канализация. Наружные сети и сооружения (М.: ОАО «ЦПП», 2007), рекомендуемая скорость фильтрования для однослоиных мелкозернистых фильтров с диаметром загрузки 1,2–2,0 мм и высотой слоя 1,0–1,2 м составляет 6–7 м/ч (фильтр первой ступени с общей высотой загрузки 1200 мм), в опытах она поддерживалась в пределах  $V_\phi = 6\text{--}6,7 \text{ м}/\text{ч}$ . Крупность зернистой загрузки в колонке I по ходу движения сточной воды составляла 1–1,25, во II и III – 1,25–2 и в IV – 2–2,5 мм.

Таким образом, первые две фильтровальные колонки моделировали работу фильтра первой, а III и IV – фильтра второй ступени. Перед началом опытов колонка IV зашламмировалась суспензией  $\text{Fe(OH)}_2$  в конце промывки ее загрузки. Гидроксид железа получался после нейтрализации 5%-м раствором  $\text{NaOH}$  железного купороса  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , растворенного в 1  $\text{дм}^3$  воды в количестве 150 г. Суспензия гидроксида железа вводилась во всасывающую линию промывного насоса перед окончанием промывки водопроводной водой зернистой загрузки колонки IV и вместе с ней снизу вверх заполняла ее. Заполнение зернистой загрузки суспензией гидроксида железа контролировалось визуально, так как последняя колонка была изготовлена из оргстекла, после чего подача промывной воды заканчивалась. Интенсивность подачи промывной воды составляла 15–16  $\text{l}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , а продолжительность – примерно 10 мин.

После колонки II в очищаемую сточную воду дозировался щелочной раствор девятиводного сульфида натрия (в воронку 6 перед колонкой III), дозы которого изменялись в пределах 14,6–82,8  $\text{мг}/\text{дм}^3$  (см. рис. 1). Щелочной раствор сульфида натрия  $\text{pH} \geq 11$  из полиэтиленовой канистры 4 объемом 25  $\text{дм}^3$  дозировался с постоянным расходом насосом-дозатором 5. Для создания достаточного запаса сточной воды вместо одной емкости 1 использовались три общую емкостью 600 л, соединенные между собой снизу шлангами.

Как показали лабораторные опыты, проведенные на искусственно загрязненной сточной воде солями меди, никеля, цинка и кадмия (при исходной концентрации каждого металла 5  $\text{мг}/\text{дм}^3$ ), их остаточное содержание в очищенной воде после последней колонки составляло,  $\text{мг}/\text{дм}^3$ , соответственно 0,0005–0,0125, 0,0049–0,0336, 0,00045–0,0027 и 0,0001–0,0016. При этом эффект очистки, %: по меди 99,749–99,990, никелю 99,328–99,902, цинку 99,972–99,991 и по кадмию 99,968–99,998 [3], т.е. был достаточно высоким.

Для подтверждения результатов лабораторных исследований были проведены дополнительные опыты на сточной воде действующего гальваниче-

ского цеха ОАО «Завод «Электросигнал». Экспериментальная фильтровальная установка (см. рис. 1) была перевезена и смонтирована на сооружениях для очистки сточных вод гальванического цеха данного завода. Сточная вода забиралась на выходе горизонтальных отстойников, т.е. действующих очистных сооружений, и закачивалась насосом в емкости, располагаемые в здании станции нейтрализации, по шлангам длиной около 30 м. Соотношение кисло-щелочных с хромсодержащими сточными водами, поступающих на станцию нейтрализации по общей канализационной трубе, и циансодержащими составляло примерно 5:1, что соответствует данным по гальваническому цеху. Поскольку в холодное время года условия для очистки сточных вод хуже (скорости реакции окисления и восстановления ниже, вязкость очищающей воды выше и т.д.), отбор сточной воды после горизонтальных отстойников действующих очистных сооружений и опыты по ее доочистке проводились в разные дни недели в холодный период года (конец ноября, декабрь, март). Температура очищаемой сточной воды в течение всех опытов составляла примерно 12–13 °С.

В каждой серии опытов в первую пробу отбиралась исходная сточная вода после отстойников из трех емкостей, которая подавалась на фильтровальную колонку I (точка 1), а во вторую пробу – после колонки II (точка 2), т.е. после фильтра первой ступени. Остальные пробы отбирались на выходе установки (точка 3) после установления стабильного режима работы фильтровальной установки, т.е. не менее чем через 2,5–3 ч после начала работы. Дозы девятиводного сульфида натрия в опытах менялись в пределах 25,9–76,2 мг/дм<sup>3</sup>. Все анализы на содержание металлов в сточных водах проводились в Аналитическом центре ФГБОУ ВПО «НГПУ» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.1518263) на современном спектрометре с индуктивно связанный плазмой по стандартной утвержденной методике (Количественный химический анализ вод: ПНД Ф 14.1:2:4.143–98; утв. 25.06.1998).

При концентрации в поступающей после горизонтальных отстойников сточной воде, мг/дм<sup>3</sup>, цинка 0,39–0,92, меди 0,19–0,58, никеля 0,11–0,71, кадмия 0,035–0,16 и хрома 0,34–1,10, их остаточные концентрации после доочистки на фильтровальной установке составляли, мг/дм<sup>3</sup>: цинка 0,002–0,082; меди 0,001–0,015; никеля 0,008–0,082; хрома 0,005–0,009 и т.д. [3], т.е. были значительно ниже ПДК для выпуска производственных сточных вод в городскую канализацию г. Новосибирска по всем металлам. А именно цинка меньше в 1,5–50 раз, никеля – в 1,75–6,67, меди в 12,5–100, кадмия в 8,33–30,38, хрома в 2,5–4 и железа в 50–200 раз [3]. После доочистки сточных вод гальванических цехов предлагаемым способом их беспрепятственно можно выпускать в водоемы не только хозяйственно-питьевого, но и рыбохозяйственного назначения.

ПДК тяжелых металлов в водопроводной воде составляют, мг/дм<sup>3</sup>: цинка 5, меди 1,0, никеля 0,1, хрома 0,05 в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074–01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества», а после доочистки предлагаемым способом остаточное содержание цинка в очищенной сточной воде ниже в 61–2500 раз, меди в 66,7–1000, никеля в 1,22–12,5 и хрома в 5,6–10 раз. Поэтому не вызывает сомнения возможность частичного ис-

пользования очищенных сточных вод в оборотном водоснабжении этих же гальванических цехов, где для промывки деталей и изделий используется водопроводная вода или техническая вода более низкого качества.

Как показывают предварительные расчеты, себестоимость очистки сточных вод гальванических цехов реагентным способом с предлагаемой доочисткой при той же или более высокой степени очистки примерно в 2–5 раз меньше, чем электрохимическим, гальванокоагуляционным, реагентным с доочисткой на фильтрах, загруженных бруситом, цеолитами, ионообменной смолой и др.

С целью дальнейшего повышения экономичности, упрощения предлагаемой технологии глубокой очистки, снижения сроков и затрат при ее внедрении предложено заменить 2-ступенчатое фильтрование 1-ступенчатым, т.е. отказаться от фильтров первой ступени. Для подтверждения возможности замены 2-ступенчатого фильтрования 1-ступенчатым были проведены сравнительные опыты на одной и той же исходной сточной воде, отобранный после горизонтальных отстойников действующих очистных сооружений. Сравнительные опыты проводились на той же экспериментальной установке, что и опыты по исследованию эффективности 2-ступенчатого фильтрования (см. рис. 1).

Отличие состояло в том, что при моделировании процесса очистки сточных вод 1-ступенчатым фильтрованием очищаемая сточная вода сразу подавалась в приемную воронку между II и III фильтровальной колонкой, т.е. из работы выключались колонки I и II, которые моделировали работу фильтра первой ступени. В воронку по-прежнему подавался щелочной раствор сульфида натрия, доза которого в сравнительных опытах составляла 25,9 мг/дм<sup>3</sup>. Методика проведения опытов была аналогичной предыдущим с 2-ступенчатым фильтрованием и скорость фильтрования в них составляла 6,4–6,7 м/ч. Концентрации тяжелых металлов в исходной и очищенной сточной воде также определялись в Аналитическом центре ФГБОУ ВПО «НГПУ» по стандартной утвержденной методике (см. выше). В течение всех опытов в очищенной сточной воде на выходе установки (см. рис. 1, точка 3) сульфидов обнаружено не было, что подтверждает принцип действия зашламленного фильтра и безопасность предлагаемой технологии.

Результаты сравнительных экспериментов эффективности очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов 2- и 1-ступенчатым фильтрованием представлены в табл. 2, где приведены концентрации различных металлов

**Таблица 2. Результаты сравнительных опытов по очистке сточных вод после отстойника станции нейтрализации гальванического цеха 2-ступенчатым и 1-ступенчатым фильтрованием, мг/дм<sup>3</sup>**

Проба	Железо	Цинк	Никель	Медь	Кадмий	Хром	pH
Исходная сточная вода	11,14	0,39	0,71	0,19	0,069	0,34	7,53
После первого фильтра 2-ступенчатого фильтрования	0,490	0,030	0,460	0,015	0,035	0,016	7,66
После второго фильтра 2-ступенчатого фильтрования	0,060	0,003	0,082	0,002	0,0033	0,004	7,13
После 1-ступенчатого фильтрования	0,072	0,003	0,049	0,001	0,0008	0,009	6,92

Таблица 3. Сравнение эффективности очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов 2- и 1-ступенчатым фильтрованием, %

Проба	Железо	Цинк	Никель	Медь	Кадмий	Хром
После первого фильтра 2-ступенчатого фильтрования	95,60	92,31	35,21	92,10	49,28	95,29
После второго фильтра 2-ступенчатого фильтрования	99,46	99,23	88,45	98,95	95,22	98,82
После 1-ступенчатого фильтрования	99,35	99,23	93,10	99,47	98,84	97,35

(валовые значения) в исходной и очищенной сточной воде, причем в ней дополнительно представлены значения остаточных концентраций металлов после первой ступени фильтров (после колонки II) при 2-ступенчатой очистке фильтрованием. В табл. 3 представлены соответствующие значения эффективности очистки сточных вод 2- и 1-ступенчатым фильтрованием. Для наглядности данные табл. 2 графически представлены на рис. 2.

Как следует из данных табл. 2 и 3 и видно из диаграмм (см. рис. 2), остаточные концентрации по железу и хруму при 1-ступенчатом фильтровании выше, а эффект очистки несколько хуже, чем при 2-ступенчатом, а по цинку одинаков. Однако по никелю, меди и кадмию, наоборот, остаточные концентрации этих металлов при 1-ступенчатой меньше, а эффекты очистки выше,

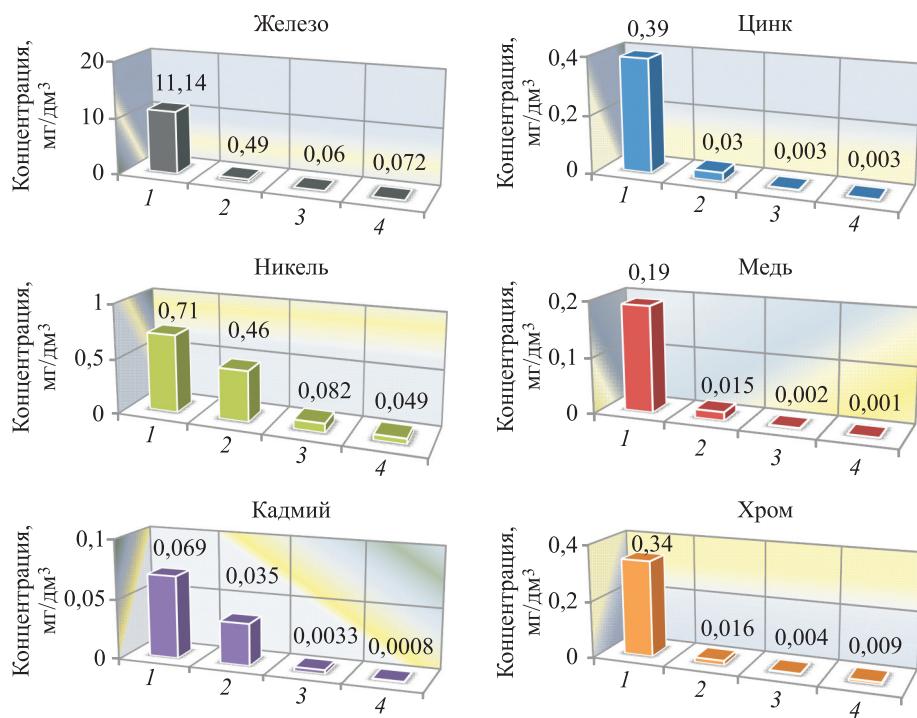


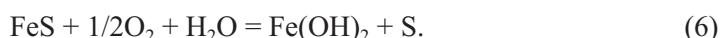
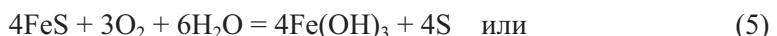
Рис. 2. Результаты сравнительных опытов 1- и 2-ступенчатого фильтрования сточных вод

1 – концентрация загрязнений в поступающей на колонки сточной воде; 2 – после первой ступени 2-ступенчатого фильтрования; 3 – после второй ступени 2-ступенчатого фильтрования; 4 – после 1-ступенчатого фильтрования

чем при 2-ступенчатой схеме доочистки. Таким образом, при 1-ступенчатом фильтровании практически достигается такой же эффект очистки, что и при 2-ступенчатом. Хотя по железу и хрому он получился несколько ниже 2-ступенчатого, но при этом он остается достаточно высоким, т.е. их остаточные концентрации значительно ниже ПДК для выпуска сточных вод в городскую канализацию и в водоемы централизованного хозяйствственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения.

Следовательно, сравнительные опыты подтвердили возможность замены 2-ступенчатого фильтрования 1-ступенчатым при сохранении высокого эффекта очистки. Однако при 1-ступенчатой технологии глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов требуется практически в 2 раза меньше напорных фильтров, соответственно снижается количество арматуры, фасонных частей и протяженность большей части трубопроводов, а также сокращается площадь помещения для размещения фильтров. Соответственно требуется меньше воды на промывку фильтров и электроэнергии на ее подачу, сокращаются объемы грязных промывных вод, расходы на их отвод, перекачку и очистку. Поэтому себестоимость усовершенствованной 1-ступенчатой технологии глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов будет почти в 2 раза ниже 2-ступенчатой при той же высокой степени очистки. Кроме того, применение предлагаемой усовершенствованной технологии позволит значительно снизить затраты при ее внедрении на действующих и проектируемых сооружениях для очистки сточных вод гальванических цехов и сократить сроки строительства и монтажа оборудования. Следует также отметить, что к достоинствам предлагаемой технологии относится использование в ней недорогого типового оборудования (напорных осветлительных фильтров, типовых резервуаров, насосов и насосов-дозаторов, расходных бачков и т.д.).

Для большей экономичности предлагаемой технологии можно сократить расход железного купороса. При промывке осветлительных фильтров следует направлять первые порции грязной промывной воды из верхних слоев зернистой загрузки, содержащие в основном сульфиды тяжелых металлов, в одну сборную емкость грязной промывной воды, а последующие, содержащие в основном сульфиды железа и остатки гидроксида железа, из нижних слоев загрузки – в другую сборную емкость. Собранные в ней сточные воды, содержащие в основном гидроксид и сульфид железа, после непродолжительной аэрации будут содержать только гидроксид железа, так как в процессе аэрации в течение нескольких минут сульфиды окисляются в гидроксиды по реакциям:



Регенерированный гидроксид железа хорошо осаждается отстаиванием в этой же емкости, отделяется от коллоидной и мелкодисперсной серы, и его суспензия перекачивается в расходный бачок, после чего может использоваться для зашламления нижних слоев зернистой загрузки при следующей промывке фильтров. Это позволит во много раз сократить расход свежего железного купороса за счет многократного использования остатков и вновь

полученного гидроксида из сульфида железа, т.е. возможно осуществление практически замкнутого процесса очистки сточных вод, содержащих сульфиды, гидроксидом железа переводом в сульфид железа в нижних слоях фильтра (см. реакции (1)–(4)) и последующей его регенерации кислородом воздуха в гидроксид (реакции (5) и (6)) при аэрации в сборном резервуаре грязной промывной воды.

Следует отметить, что при очистке сточных вод с небольшими концентрациями тяжелых металлов (примерно до 50–100 мг/дм<sup>3</sup>), которые, например, могут образовываться на подземных рудниках, предлагаемый способ глубокой очистки может применяться самостоятельно, а не в качестве ступени доочистки.

Однако, несмотря на полученные экспериментальные данные, подтверждающие принципиальную возможность замены 2-ступенчатого фильтрования 1-ступенчатым при сохранении высокой степени очистки, требуется проведение дополнительных исследований для нахождения оптимальных конструктивных и технологических параметров работы и промывки фильтров, удельных расходов реагентов, места и режима их ввода и т.д. в зависимости от конкретных условий.

**Выводы.** 1. Предложено усовершенствовать новую технологию глубокой очистки сточных вод НГАСУ от ионов тяжелых металлов 2-ступенчатым фильтрованием, заменив ее на 1-ступенчатую.

2. Как показали сравнительные опыты, проведенные на сточной воде гальванического цеха одного из предприятий г. Новосибирска, усовершенствованная 1-ступенчатая технология обеспечивает примерно такую же степень очистки практически по всем металлам, что и 2-ступенчатая при прочих равных условиях. При этом очищенная сточная вода может беспрепятственно выпускаться в водоемы централизованного хозяйственно-питьевого и культурно-бытового, а также рыбохозяйственного назначения. Учитывая, что остаточные концентрации практически всех тяжелых металлов во много раз ниже допустимых в питьевой воде (по меди и цинку даже в 1000–2500 раз), очищенную сточную воду можно частично использовать в обороте для технологического водоснабжения этих же гальванических цехов.

3. Отказ от первой ступени фильтрования позволит практически в 2 раза снизить количество напорных осветительных фильтров, арматуры, фасонных частей и протяженность трубопроводов, а также площадь помещения для размещения фильтров при той же степени доочистки, сократить расход чистой промывной воды и электроэнергии на работу промывных насосов, а также затраты на сбор, перекачку и очистку грязных промывных вод. Это дает возможность в большей степени снизить себестоимость доочистки сточных вод предлагаемой технологией, сократить расходы и сроки ее внедрения на проектируемых и действующих сооружениях для очистки сточных вод гальванических цехов после реагентного, электрохимического, гальванокоагуляционного или других способов. К достоинствам предлагаемого способа доочистки также относится использование недорогого в основном типового оборудования (напорных фильтров, насосов, реагентного хозяйства и т.д.).

4. Предлагаются дополнительные мероприятия по организации практически замкнутого процесса перевода остатков сульфидов в очищенной сточной воде в сульфид железа и многократного его перевода при аэрации грязной промывной воды в его гидроксид, с последующим использованием последнего вновь для зашламления нижних слоев загрузки при промывке фильтров. Это до минимума сократит расход свежего железного купороса, переводимого в гидроксид, и в еще большей степени повысит экономичность предлагаемой технологии.

5. При небольших концентрациях ионов тяжелых металлов в сточной воде (до 50–100 мг/дм<sup>3</sup>), например, при очистке сточных вод подземных рудников, предлагаемая технология глубокой очистки сточных вод может применяться самостоятельно, а не в качестве ступени доочистки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Найденко В.В., Губанов Л.Н. Очистка и утилизация промстоков гальванического производства. Н. Новгород: Деком, 1999. 368 с.
2. Бобyleva S.A. Сорбционная очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с применением бруссита: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2005. 24 с.
3. Гириков О.Г., Шароватова А.Ф., Косачева А.С. Исследование эффективности нового способа доочистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Труды НГАСУ. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2013. Т. 16. № 2. С. 115–127.
4. Смирнов Д.Н., Генин В.Е. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов. М.: Металлургия, 1989. 224 с.
5. Кочергин А.С. Интенсификация работы локальных очистных сооружений гальваностоков с использованием реагентов-осадителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2010. 24 с.
6. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. М.: Стройиздат, 1971. 579 с.
7. Пат. РФ № 2241681. Способ очистки жидкости фильтрованием / О.Г. Гириков, М.Ю. Петров; заявл. 30.12.2002; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 34.
8. Пат. РФ № 2285670. Способ очистки природных и сточных вод от сульфидов и сероводорода / О.Г. Гириков; заявл. 21.04.2004; опубл. 20.10.2006, Бюл. № 29.
9. Фомины А.М. Методика технологического моделирования и расчета скорых фильтров и контактных осветлителей // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1982. № 11. С. 109–116.

**Гириков Олег Георгиевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: og.gir@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 23.10.17

**Girikov Oleg Georgievich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: og.gir@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### **THE IMPROVEMENT OF NEW TECHNOLOGY FOR DEEP CLEANING OF WASTEWATER FROM HEAVY METAL IONS**

Previously proposed a new method reagent wastewater treatment galvanizing plants from ions of heavy metals by two-stage filtration. On the I stage removed the remnants of hydroxides of various metals submitted with clarified water after neutralization and

settling, and II stage removed the remaining after the I stage pre-translated the metals in sulfide form, and remains non-reacted sulphides. Because the solubility of heavy metal sulfides in the hundreds of thousands and even millions of times less than solubility of there hydroxides and achieved high effect of purification of waste water. With the aim of reducing the cost of cleazing and simplification of technology it was proposed to abandon the I stage of filtration. As shown by comparative experiments with real waste water the galvanizing plant, the effect of cleaning step I filtration almost the same as II step. However, due to the failure from the first stage the number of filters is reduced about 2 times, respectively, reduces the number of valves, fittings, pipelines and are a filter room. Also reduced the costs of clean water and electricity to the washing of the filters, the cost of pumping and handling of dirty wash water, what even more will increases the economical efficiency of the proposed technology that requires less cost and time for its implementation.

**Key words:** galvanizing plants, waste waters, the formation of sulphides, improving post-treatment, single-stage filtration, high economy.

#### REFERENCES

1. Naydenko V.V., Gubanov L.N. Ochistka i utilizatsiya promstokov gal'vanicheskogo proizvodstva [Purification and utilization industrial wastewater of galvanic production]. N. Novgorod, Decom, 1999. 368 p. (in Russian)
2. Bobyleva S.A. Sorbtsyonnaya ochistka stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov s primenaniem brusita: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Sorption purification of waste water from heavy metal ions with using of brusite: PhD abstract]. Novosibirsk, 2005. 24 p. (in Russian)
3. Girikov O.G., Sharovatova A.F., Kosacheva A.S. Issledovanie effektivnosti novogo sposoba doochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov [Research of the effectiveness of a new method of post-purification of wastewater from heavy metal ions]. Trudy NGASU [The works of NSUACE]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2013. Vol. 16. No. 2. Pp. 115–127. (in Russian)
4. Smirnov D.N., Genkin V.E. Ochistka stochnykh vod v protsessakh obrabotki metallov [Wastewater treatment in the processing of metals]. Moscow, Metallurgia, 1989. 224 p. (in Russian)
5. Kochergin A.S. Intensifikatsiya raboty lokal'nykh ochistnykh sooruzheniy gal'vanostokov s ispol'zovaniem reagentov-osaditeley: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Intensification of the work local galvanic wastes treatment facilities with the use of reagents-precipitators: PhD abstract]. Penza, 2010. 24 p. (in Russian)
6. Klyachko V.A., Apel'tsin I.E. Ochistka prirodnykh vod [Purification of natural waters]. Moscow, Stroyizdat, 1971. 579 p. (in Russian)
7. Pat. № 2241681 (RU) Sposob ochistki zhidkosti fil'trovaniem [Metod of purification of liquids by filtration]. O.G. Girikov, M.Yu. Petrov; publ. 10.12.2004, Bull. No. 34. (in Russian)
8. Pat. 2285670 (RU) Sposob ochistki prirodnykh i stochnykh vod ot sul'fidov i serovodoroda [Metod of purification of natural and waster waters from sulfides and hydrogren sulfide]. O.G. Girikov; publ. 20.10.2006, Bull. No. 29. (in Russian)
9. Fominikh A.M. Metodika tekhnologicheskogo modelirovaniya i rascheta skorykh fil'trov i kontaktnykh osvetliteley [The methodology of technological's process modeling of high-rate filters and contact clarifiers]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1982. No. 11. Pp. 109–116. (in Russian)

УДК 697.94.001

О.Д. САМАРИН

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ПОДОГРЕВА ПРИТОКА В ПРЯМОТОЧНЫХ СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Рассмотрены условия осуществления процесса охлаждения приточного воздуха с его осушкой в прямоточных системах кондиционирования воздуха в теплый период года. Дано аналитическое описание изменения состояния воздуха в охладителе или форсуночной камере и обслуживаемом помещении на основе построения соответствующих процессов в *I-d*-диаграмме с использованием известных соотношений между параметрами состояния влажного воздуха. Получена теоретическая оценка минимального значения тепловлажностного соотношения в помещении, позволяющего исключить процесс вторичного подогрева притока в установке кондиционирования воздуха, при известных параметрах внутреннего воздуха и наружного климата в рассматриваемом районе строительства.

**Ключевые слова:** кондиционирование воздуха, охлаждение с осушкой, вторичный подогрев, тепловлажностное соотношение, критическая прямая.

Вопросы энергосбережения в зданиях в настоящее время являются весьма актуальными и рассматриваются в работах ряда авторов как отечественных, так и зарубежных, например, [1–5]. При этом одним из главных потребителей энергии, особенно в объектах общественного назначения, являются системы кондиционирования воздуха. Обработка притока в таких системах в теплый период года в основном сводится к охлаждению, поскольку, как правило, температура наружного воздуха по параметрам «Б»  $t_{нБ}$  в большинстве районов строительства по данным СП 131.13330.2012 «Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* “Строительная климатология”» (далее – СП 131) оказывается выше, чем комфортные значения температуры внутреннего воздуха  $t_b$ . Для последней в ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» (далее – ГОСТ 30494) в преобладающем числе помещений общественных зданий установлен оптимальный диапазон  $+23\dots+25^{\circ}\text{C}$ , из которого чаще всего выбирается среднее значение  $+24^{\circ}$ . К тому же требуемая температура притока  $t_p$ , исходя из необходимости ассимиляции тепlopоступлений, должна быть еще ниже. В то же время, например, в Москве величина  $t_{нБ}$  по СП 131 равна  $+26^{\circ}$ . Одновременно с охлаждением часто требуется и осушка наружного воздуха, поскольку его энталпия по параметрам «Б»  $I_{нБ}$ , кДж/кг, обычно бывает такова, что соответствующее влагосодержание  $d_n$ , г/кг, заметно превышает уровень, необходимый для притока  $d_p$  с учетом нормируемой относительной влажности внутреннего воздуха  $\phi_b$  и влагопоступлений в помещение. Это оказывается справедливым, даже если принимать максимальное из оптимальных значений  $\phi_b$  в теплый период по ГОСТ 30494, т.е. 60 %.

Однако в некоторых случаях одного охлаждения с осушкой оказывается недостаточно, и после этого требуется еще вторичный подогрев притока для обеспечения требуемых параметров  $t_{\text{п}}$  и  $d_{\text{п}}$ . Подобную схему нельзя назвать энергоэффективной, поэтому, если взаимное расположение основных точек на  $I-d$ -диаграмме позволяет, процесс вторичного подогрева необходимо исключать. Таким образом, объектом исследования является совокупность процессов обработки воздуха в системах его кондиционирования в теплый период года, а предметом – выявление аналитической зависимости, связывающей параметры наружного и внутреннего климата и тепло-влажностное соотношение в помещении при отсутствии вторичного подогрева.

Построение на  $I-d$ -диаграмме показывает, когда возможно не применять такой подогрев – для этого требуется, чтобы продолжение отрезка, проведенного из точки  $H$ , выражающей состояние наружного воздуха, через точку  $\Pi'$ , отвечающую обработанному воздуху перед поступлением его в вентилятор, пересекало кривую  $\varphi = 100 \%$  в точке  $W$  при температуре  $t_w$  не ниже  $+7^{\circ}\text{C}$  (рис. 1) [6].

Данное условие отражает тот факт, что процесс охлаждения с осушкой в контактных или поверхностных аппаратах стремится к точке на кривой  $\varphi = 100 \%$  при температуре подаваемой в аппарат холодной воды, которая для стандартных холодильных машин составляет именно  $+7^{\circ}\text{C}$ . Реальная относительная влажность после такого процесса несколько меньше и составляет обычно около 90–95 % (точка  $O$ ), а если, как показано на рис. 1, для  $\Pi'$  требуется значение  $\varphi$  еще ниже, этого можно добиться, например, устройством обводного канала (байпаса) у охладителя. При этом точка  $Y$  обозначает

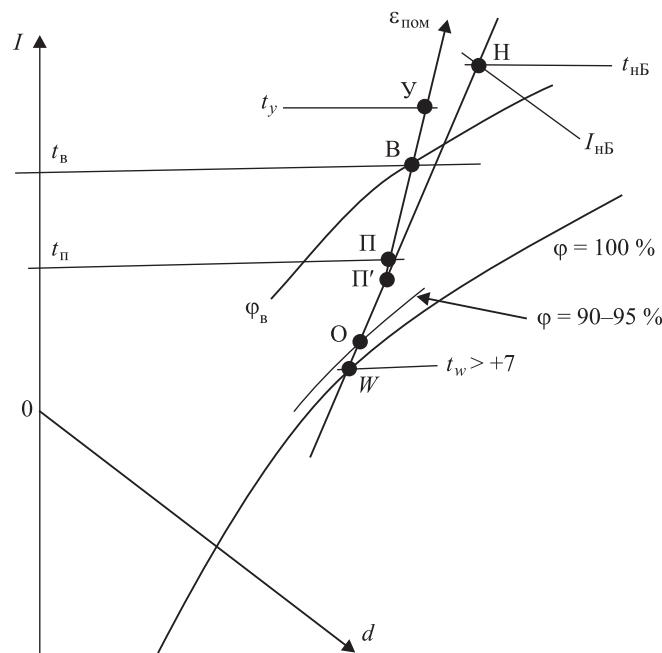


Рис. 1. Схема процесса обработки притока в теплый период года с охлаждением и осушкой

параметры воздуха, удаляемого из помещения. Нецелесообразность вторичного подогрева доказывается в ряде работ, опубликованных в последнее время [7–11], причем этот вопрос рассматривается как с энергетической, так и с технико-экономической точки зрения. В качестве возможных альтернатив при этом предлагается в первую очередь именно охлаждение притока с его осушкой и байпасом или управляемым процессом в охладителе, а также методы, не использующие искусственные источники холода, например, прямое и косвенное испарительное охлаждение.

Поскольку при положении точки внутреннего воздуха В, фиксированном, исходя из заданных  $t_B$  и  $\varphi_B$ , размещение точки П' зависит от выбранной величины  $t_n$  и соотношения тепло- и влагоизбытоков в помещении, выражаемого угловым коэффициентом  $\varepsilon_{\text{ном}}$ , кДж/кг, целесообразно определить критическое (наименьшее) значение  $\varepsilon_{\text{ном}}^{\text{кр}}$ , при котором еще можно обойтись без вторичного подогрева притока.

Осуществить это можно следующим образом. Вначале сделаем некоторое упрощение, а именно пренебрежем нагревом воздуха при его сжатии в вентиляторе, которое обычно незначительно и составляет примерно 0,5...1 °C. На  $I$ - $d$ -диаграмме это будет выглядеть слиянием точки П, изображающей требуемые параметры притока, подаваемого непосредственно в помещение, и П'. В дальнейшем будет видно, что подобное допущение позволяет иметь даже небольшой запас в отношении предельного уровня  $\varepsilon_{\text{ном}}^{\text{кр}}$ , поскольку с учетом фактического несовпадения П и П' вторичный подогрев притока может быть исключен и при значениях  $\varepsilon_{\text{ном}}$ , несколько меньших критического. Далее замечаем, что точка W полностью определяется условиями  $t_w = +7$  °C и  $\varphi_w = 100$  %, и тогда нетрудно найти, что  $d_w = 6,3$  г/кг и  $I_w = 22,7$  кДж/кг. А поскольку положение точки Н также известно для каждого района строительства, можно получить уравнение критической прямой, проходящей через Н и W, которое в координатах  $I$ - $d$  будет выглядеть так:

$$I_{\text{кр}} = ad_{\text{кр}} + b, \quad (1)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  вычисляются по выражениям:

$$a = \frac{2,49I_{\text{нБ}} - 56,52}{I_{\text{нБ}} - 1,005t_{\text{нБ}} - 15,69}; \quad b = \frac{7,01I_{\text{нБ}} - 22,8t_{\text{нБ}}}{I_{\text{нБ}} - 1,005t_{\text{нБ}} - 15,69}. \quad (2)$$

Здесь  $15,69 = rd_w$ ;  $56,52 = r \cdot I_w$ , где  $r = 2,49$  кДж/г – удельная теплота парообразования воды;  $22,8 = 1,005 \cdot I_w$ , где  $1,005$  кДж/(кг · K) =  $c_v$  – удельная теплоемкость сухого воздуха. Коэффициент  $7,01 = I_w - rd_w = 22,7 - 15,69$  [6].

Теперь для выполнения основного условия, при котором возможно построение, показанное на рис. 1, точка П должна также лежать на прямой Н – W при температуре  $t_n$ , но одновременно она находится и на отрезке, изображающем процесс изменения состояния воздуха в обслуживаемом помещении. Причем этот отрезок проходит также через точку В и имеет угловой коэффициент  $\varepsilon_{\text{ном}}^{\text{кр}}$  (рис. 2). Тогда можно записать выражение для  $\varepsilon_{\text{ном}}^{\text{кр}}$  через разность параметров точек В и П, которое с учетом уравнения

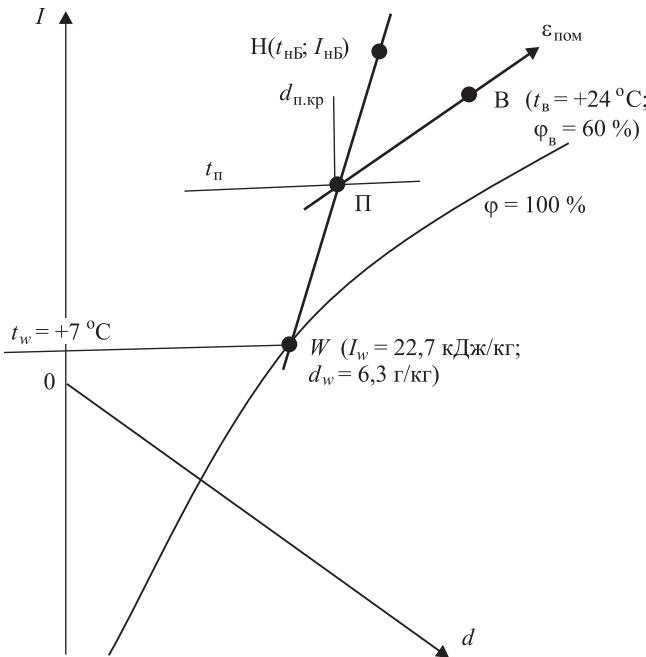


Рис. 2. Расчетная схема процессов на  $I$ - $d$ -диаграмме для вывода уравнений (1)–(4)

для критической энталпии (1) в точке  $\Pi$  после некоторых преобразований будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_{\text{пом}}^{\text{кр}} = 10^3 \frac{I_{\text{в}} - I_{\text{п.кр}}}{d_{\text{в}} - d_{\text{п.кр}}} = 10^3 \frac{I_{\text{в}} - a(ct_{\Pi} + e) - b}{d_{\text{в}} - ct_{\Pi} - e}. \quad (3)$$

Здесь  $c$  и  $e$  – числовые коэффициенты в соотношении для критического влагосодержания в точке  $\Pi$ , которое получается также из (1) при сопоставлении с определением величины  $I$  через  $t$  и  $d$ . Их можно вычислить по формулам:

$$c = \frac{I_{\text{нБ}} - 1,005t_{\text{нБ}} - 15,69}{2,49t_{\text{нБ}} - 17,37}; \quad e = \frac{22,8t_{\text{нБ}} - 7,01I_{\text{нБ}}}{2,53t_{\text{нБ}} - 17,45}. \quad (4)$$

Здесь  $2,53 = 1,005 \cdot r$ ;  $17,37 = r \cdot I_w - r^2 d_w = 56,52 - 15,69 \cdot 2,49$ ;  $17,45 = 17,37 \cdot 1,005$ .

Заметим, что для точки В с параметрами  $t_{\text{в}} = +24^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi_{\text{в}} = 60\%$  (оптимальными по ГОСТ 30494–2011 для теплого периода года)  $I_{\text{в}} = 52,43 \text{ кДж/кг}$ ;  $d_{\text{в}} = 11,37 \text{ г/кг}$ . Кроме того, для Москвы  $I_{\text{нБ}} = 54,4 \text{ кДж/кг}$ ;  $t_{\text{нБ}} = +26^{\circ}\text{C}$  по данным СП 131, тогда в этом частном случае оказывается:

$$\varepsilon_{\text{пом}}^{\text{кр}} = 10^3 \frac{41,8 - 1,62t_{\Pi}}{6,97 - 0,262t_{\Pi}} = 6260 \frac{25,48 - t_{\Pi}}{26,6 - t_{\Pi}}. \quad (5)$$

Если теперь принять  $t_{\Pi} = +17^{\circ}\text{C}$ , или на  $7^{\circ}$  ниже  $t_{\text{в}}$ , то  $\varepsilon_{\text{пом}}^{\text{кр}} = 5512 \text{ кДж/кг}$ .

Анализ выражений (3)–(5) показывает, что величина  $\varepsilon_{\text{пом}}^{\text{кр}}$  довольно слабо зависит от  $t_{\Pi}$  и значительно сильнее от сочетания параметров наружного и внутреннего климата. Чем они ближе друг к другу, тем минимально

возможное значение  $\varepsilon_{\text{пом}}^{\text{kp}}$  выше. В целом этот результат соответствует качественному выводу, который можно получить, исходя из построения на рис. 2, но соотношения (3)–(5) дают и количественную оценку.

**Заключение.** Получено аналитическое выражение для минимального значения тепловлажностного соотношения в обслуживаемом помещении, позволяющее исключить процесс вторичного подогрева притока при его обработке в теплый период года. Данное выражение имеет достаточно простой и инженерный вид и пригодно для использования в практике проектирования систем кондиционирования воздуха общественных зданий, обеспечивающая реализацию энерго- и ресурсосберегающих схем их климатизации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарапов В.И. О некоторых аспектах технической политики в теплоснабжении // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 5 (85). С. 9–12.
2. Рымаров А.Г., Савицев В.В. Особенности работы регенеративной системы вентиляции административного здания // Вестн. МГСУ. 2013. № 3. С. 174–177.
3. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district // Sustainable Cities and Society. 2015. Vol. 14. No. 1. P. 5–15.
4. Hani A., Koiv T.-A. Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential, Educational and Public Buildings // Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. No 3. P. 231–238.
5. Jedinák R. Energy Efficiency of Building Envelopes // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 855. P. 39–42.
6. Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий. М.: АСВ, 2014. 208 с.
7. Маявина Е.Г., Крючкова О.Ю. Оценка энергопотребления различными центральными системами кондиционирования воздуха // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2014. № 4. С. 149–152.
8. Маявина Е.Г., Крючкова О.Ю. Экономическая оценка центральных систем кондиционирования воздуха с различными схемами его обработки // Пром. и гражд. стр-во. 2014. № 7. С. 30–34.
9. Королева Н.А., Фокин В.М., Трабанов М.Г. Разработка рекомендаций по устройству энергоэффективных схем систем вентиляции и кондиционирования // Вестн. ВолГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура. 2015. Вып. 41 (60). С. 53–62.
10. Королева Н.А., Фокин В.М. Применение систем кондиционирования воздуха с испарительным охлаждением в современных зданиях // Вестн. ВолГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура. 2015. Вып. 39 (58). С. 173–182.
11. Кокорин О.Я., Балмазов М.В. Энергосберегающие системы кондиционирования воздуха // СОК. 2012. № 11. С. 68–71.

**Самарин Олег Дмитриевич**, канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 20.12.17

**Samarin Oleg Dmitrievich**, PhD, Ass. Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## **THE ANALYTIC ESTIMATION OF POSSIBILITY OF ELIMINATION OF SECONDARY HEATING OF SUPPLY AIR IN DIRECT-FLOW AIR CONDITIONING SYSTEMS**

The conditions of the process of cooling of the supply air with its dehydration in the coil of the direct-flow air conditioning systems during the warm period of the year are considered. The analytical description of the state change of the air in the cooler or nozzle chamber and service area based on the construction of the corresponding processes in the  $I-d$  diagram using the known relationships between the state parameters of moist air is given. The theoretical estimation of the minimum values of heat-humidity ratio in a room which can eliminate the process of secondary heating of supply air in the installation of air conditioning with known parameters of internal air and external climate in the construction area is obtained. A special case of the found dependence for the climatic conditions of Moscow and the optimal values of the internal meteorological parameters in accordance with the applicable regulatory documents of the Russian Federation is presented.

**K e y w o r d s:** air conditioning, cooling with dehydration, secondary heating, heat-humidity ratio, critical straight line.

### **REFERENCES**

1. Sharapov V.I. O nekotorykh aspektakh tekhnicheskoy politiki v teplosnabzhenii [On some aspects of the technical policy in the heat supply]. Energosberezenie i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]. 2013. No. 5 (85). Pp. 9–12. (in Russian)
2. Rymarov A.G., Savichev V.V. Osobennosti raboty regenerativnoy sistemy ventilyatsii administrativnogo zdaniya [Features of operation of the regenerative ventilating system of the administrative building]. Vestnik MGSU [Papers of the MSUCE]. 2013. No. 3. Pp. 174–177. (in Russian)
3. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. Sustainable Cities and Society. 2015. Vol. 14. No. 1. Pp. 5–15.
4. Hani A., Koiv T.-A. Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential, Educational and Public Buildings. Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. No. 3. Pp. 231–238.
5. Jedinák R. Energy Efficiency of Building Envelopes. Advanced Materials Research. 2013. Vol. 855. Pp. 39–42.
6. Samarin O.D. Osnovy obespecheniya mikroklimata zdaniy [The basics of microclimate of buildings]. Moscow, ASV, 2014. 208 p. (in Russian)
7. Malyavina E.G., Kryuchkova O.Yu. Otsenka energopotrebleniya razlichnymi tsentral'nymi sistemami konditsionirovaniya vozdukh [Estimation of the energy consumption of the different central air condition systems]. Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya [Science and Technical News of the Volga Region]. 2014. No. 4. Pp. 149–152. (in Russian)
8. Malyavina E.G., Kryuchkova O.Yu. Ekonomicheskaya otsenka tsentral'nykh sistem konditsionirovaniya vozdukh s razlichnymi skhemami ego obrabotki [Economic estimation of central air conditioning systems with different air treatment schemes]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. 2014. No. 7. Pp. 30–34. (in Russian)

9. Koroleva N.A., Fokin V.M., Tarabanova M.G. Razrabotka rekomendatsiy po ustroystvu energoeffektivnykh skhem sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya [Development of recommendations on the design of energy efficient schemes of ventilating and air conditioning]. Vestnik VolGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2015. Vol. 41 (60). Pp. 53–62. (in Russian)
10. Koroleva N.A., Fokin V.M. Primenenie sistem konditsionirovaniya vozdukha s isparitel'nym okhlazhdeniem v sovremennykh zdaniyakh [Application of air conditioning evaporative cooling in modern buildings]. Vestnik VolGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2015. Vol. 39 (58). Pp. 173–182. (in Russian)
11. Kokorin O.Ya., Bal'mazov M.V. Energosberегayushchie sistemy konditsionirovaniya vozdukha [Energy saving air conditioning systems]. SOK [Sanitary engineering, Heating, Conditioning]. 2012. No. 11. Pp. 68–71. (in Russian)

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ



УДК 627.514:624.139

Г.И. КУЗНЕЦОВ, Н.В. КРУК

### МЕРЗЛОТНЫЕ ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Рассмотрен способ береговой защиты в криолитозоне, основанный на устройстве мерзлотной завесы, выполненной в виде подпорной стены внутри сооружения мерзлого типа. Эксплуатация предлагаемого сооружения осуществляется после завершения строительства дамбы, промораживания ее и создания мерзлотной завесы. Работа замораживающей системы включает охлаждающую полость, замораживающие колонки, вентиляционный короб и предусматривается в зимний период при отрицательных температурах воздуха. Температурная устойчивость сооружения обеспечивается ежегодным повторением цикла промораживания грунтов тела дамбы и основания, особенно на участках глубокого оттаивания берегового склона под водоемом. В итоге достигается общая устойчивость сооружения.

Ключевые слова: мерзлотные подпорные стены, термоабразия, мерзлотная завеса, глубина оттаивания.

Термоабразия льдистых берегов является одним из наиболее распространенных и опасных криогенных процессов на территории вечной мерзлоты. Характерные примеры термоабразионного разрушения берегов приведены на рис. 1.

Методы прогнозирования и стабилизации льдонасыщенных берегов озер и водохранилищ, основанные на регулировании естественных процессов термоабразии, ранее рассмотрены в работах С.В. Томирдиаро [1], Ф.Э. Арэ [2]. Эти методы до настоящего времени не нашли широкого распространения на обширных территориях вечной мерзлоты, в частности, на континентальном шельфе (например, при добыче нефти и газа, строительстве портов и др.).

При строительстве водохранилищ в речных долинах, сложенных рыхлыми льдонасыщенными породами с включениями подземных льдов и в других случаях, когда требуется укрепление льдистых берегов, необходимо выполнение комплекса мероприятий, предотвращающих дальнейшее вытаивание и разрушение берегов в зонах врезки плотины в борта долины и вблизи существующих сооружений.

Интенсивность оттаивания обнаженных клиновидных и других подземных ледяных тел превосходит интенсивность оттаивания вмещающего их грунта. В отличие от грунта тающее под водой ледяное тело не создает тепло-

изоляционного и светового экрана над мерзлыми грунтами ложа. Небольшие водоемы в суровых условиях арктической тундры накапливают за лето больше тепла, чем теряют за зиму; начиная с глубины 1,4–1,6 м, летнее оттаивание дна превышает его зимнее промерзание, усиливается общий прогрев мерзлоты и начинается прогрессирующее развитие талика в сочетании с оттаиванием и размывом льдистых берегов.

С увеличением зеркала водохранилища переработка его берегов резко ускоряется за счет усиления волнового действия. Волны постоянно смывают оттаявший грунт, обнажаются льды в береговом обрыве, берег подтаивает и на уровне воды подрезается глубокими (до 7–10 м) нишами. Обрушенные блоки мерзлого грунта, достигающие 0,5–0,7 км в длину, через один–два месяца полностью размываются. Высокий и наиболее подверженный термообразии льдонасыщенный берег непрерывно отступает со скоростью до 10 м/год (в отдельных случаях эта величина может достигать 15–20 м/год по всему периметру водоема).

Теплозащитный слой, приостанавливающий процесс переработки берегов и сквозное протаивание крупных ледяных включений в береговых примыканиях плотин, может быть создан двумя способами:

а) путем отсыпки, уплотнения и защиты от размыва слабофильтрующего грунта, являющегося одновременно противофильтрационным экраном;

б) путем временной (1–2 года) эксплуатации водохранилища с повышенными отметками уровня по сравнению с нормальным подпорным уровнем. В этом случае после оттаивания льдов, переработки начальной береговой линии и уплотнения грунтов по периметру водохранилища образуется шлейф талых грунтов, устойчивых к действию воды и защищающих льдистый берег от дальнейшего протаивания и разрушения.

Отсыпанный или образованный путем естественного оттаивания теплозащитный слой может быть защищен от волнового разрушения отсыпкой скелетного грунта и каменной пригрузкой. При этом следует учитывать и разрушающее воздействие ледяных полей.

Укрепление льдонасыщенных берегов плитами или каменной наброской без устройства теплоизолирующего грунтового слоя или иного способа регулирования температурного режима укрепляемого участка берега неэффективно. Для устройства такой теплоизоляции могут быть использованы маловлажные талые грунты, залегающие в ложе мелководных молодых термокарстовых озер, предварительно осущененных с помощью простейших отводных каналов, и другие грунты, содержащие достаточно (не менее 20 %) количество мелкозема (частиц  $d < 2$  мм).

Отступание подводного льдонасыщенного уступа берегового склона при условии, что оттаявший грунт достаточно быстро оплывает и слабо влияет на теплообмен между стенкой мерзлого грунта и водой, можно определить по формуле

$$L = \frac{at_1\tau}{\rho W^{0,9}}, \quad (1)$$



Рис. 1. Характерные примеры опасного термоабразивного разрушения северных берегов

а – Большой Ляховский остров, обрыв ледового комплекса (фото В.В. Куницкого); б – ледяные берега термокарстовых озер (фото С.В. Томирдиаро); в – термоабразия в сочетании с техногенной эрозией в долине р. Казачки (Чукотка. Фото Г.И. Кузнецова)

где  $L$  – величина отступания берега в процессе оттаивания и термоабразии, начиная с момента завершения тепловой осадки ложа водохранилища, при полном вытаивании подземных льдов под ним, м;

$\rho$  – скрытая теплота фазового перехода влажного грунта (80 тыс. ккал/м<sup>3</sup>);  $W$  – объемная льдистость мерзлых пород берегового склона, включающих и погребенные льды, доли единиц;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции воды у вертикальной изолированной сверху льдогрунтовой стенки, ккал/(м<sup>2</sup> · ч · °C);

$\tau$  – время, ч;

$t_1$  – средняя температура воды, °C.

Механическое (волновое) разрушение оттаивающего берега формулой (1) не учитывается.

Возможность неограниченного термоабразионного отступания льдонасыщенного берега определяется по формуле

$$H_{\text{разр}} < h - \eta h, \quad (2)$$

где  $H_{\text{разр}}$  – высота льдистого берега над уровнем воды;

$h$  – мощность слоя грунта, вмещающего льды;

$\eta$  – относительная высота этого слоя после вытаивания льда.

Известные способы замораживания грунтов [3–5], применяемые при возведении зданий, плотин и защитных дамб, далеко не всегда могут найти применение для защиты от разрушения криогенных берегов и конструкций на арктическом шельфе. Здесь в качестве берегозащитных сооружений целесообразно рассмотреть более эффективные и относительно недорогие мерзлотные подпорные стены (МПС).

Они могут применяться в качестве сопрягающих сооружений в береговых примыканиях при возведении плотин и дамб, при устройстве в них противофiltрационных завес, в качестве самостоятельных сооружений при строительстве систем защиты территорий от затопления, оборудования портов, мостовых переходов и в других случаях опасных контактов водных объектов, сооружений, мерзлых грунтов и подземных льдов.

Предложенный нами способ береговой защиты в криолитозоне основан на устройстве мерзлотной завесы, выполненной в виде подпорной стены внутри дамбы мерзлого типа. Решение задачи заключается в том, что в дамбе устраивается двухъярусная мерзлотная завеса, включающая замораживающие колонки, расположенные под охлаждающей вентилируемой полостью [4]. Стенки полости выполнены из сборных железобетонных элементов углового профиля, в совокупности образующих внутреннюю подпорную стену. На гребне насыпи выполнено съемное перекрытие охлаждающей полости в виде короба, в торцах которого смонтированы задвижки. При необходимости принудительного вентилирования полости короб может быть оснащен вентиляторами.

На рис. 2 представлена принципиальная схема грунтовой дамбы с двухъярусной мерзлотной завесой в теле и основании, выполняемая на локальном участке укрепляемого берега.

На малольдистое основание 1 поярусно отсыпается грунтовая насыпь дамбы; при этом в каждом ярусе установлены сборные железобетонные

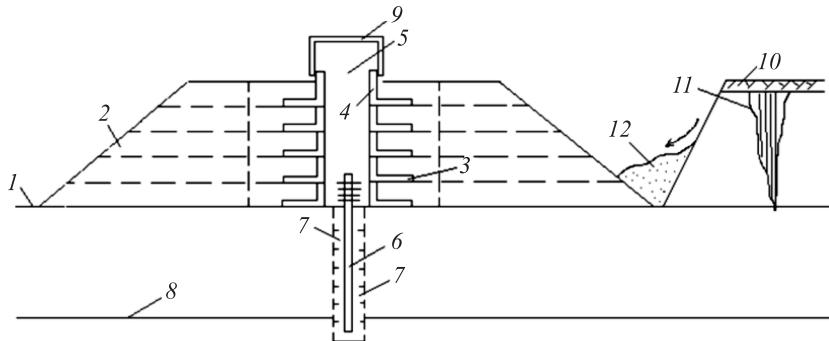


Рис. 2. Защитная дамба с мерзлой подпорной стеной и мерзлотной завесой в теле и основании

элементы 3 уголкового профиля, которые образуют внутреннюю подпорную стену 4 и создают охлаждающую полость 5. Под ней установлена система замораживающих колонок 6 (например, термосифонов), образующих нижний ярус мерзлотной завесы 7. На гребне дамбы над охлаждающей полостью 5 размещено съемное перекрытие в виде вентиляционного короба 9, в торцах которого установлены задвижки, позволяющие закрывать систему в теплый период года, а также зимой при оттепелях и метелях, дабы исключить прогрев, оттаивание и засорение снегом и льдом ограждающей полости; в коробе 9 могут быть смонтированы вентиляторы для принудительного вентилирования системы. На рис. 2 позицией 10 обозначены мохоторфяной покров, 11 – льдонасыщенный массив, 12 – оплывающий и обрушающийся грунт берега.

Эксплуатация сооружения начинается после полного промораживания тела насыпи 2 и основания 1 в пределах мерзлотной завесы, что достигается за один-два зимних периода. Затем начинается эксплуатационный период, на протяжении которого ежегодно выполняется цикл зимнего поддержания отрицательных температур как в мерзлотной завесе, так и в постоянно мерзлом основании. Тем самым обеспечивается температурная устойчивость и надежность всего сооружения. Таким образом, при увеличении высоты защитного сооружения до 30–40 м и более необходимость и вероятность применения предлагаемого двухъярусного устройства будут возрастать.

Работа апробированных конструкций термосифонов [6], в частности жидкостных, известна и здесь не рассматривается. Охлаждение внешних теплообменников термосифонов осуществляется при движении наружного воздуха в охлаждающей полости 5. Остановка термосифонов на теплые периоды происходит автоматически.

Из вентиляционного короба 9 осуществляются техническое обслуживание, ремонтные работы и натурные наблюдения за работой замораживающей системы и состоянием всех ее элементов.

Температурная устойчивость сооружения обеспечивается ежегодным повторением цикла промораживания грунтов тела дамбы и основания, особенно на участках глубокого оттаивания под водоемом. В итоге достигается общая устойчивость сооружения.

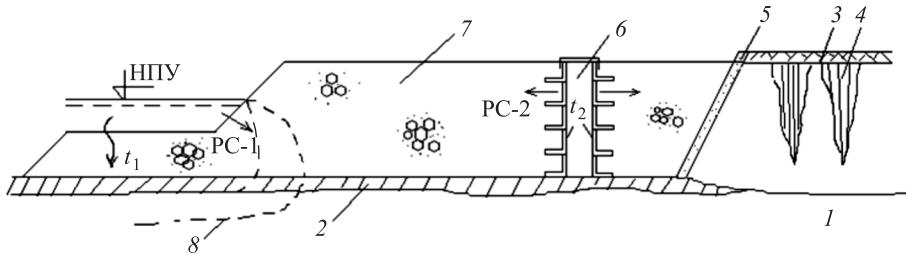


Рис. 3. Мерзлотная подпорная стена для борьбы с разрушением льдистых берегов на протяженном участке

1 – льдистые вечномерзлые грунты, 2 – оттаявшие грунты, 3 – поверхностный мохоторфяной слой, 4 – льдистые мерзлые грунты с включениями чистого льда (например, клиновидного), образующие основной термоабразионный массив, 5 – переходной слой (обратный фильтр), 6 – охлаждающая полость (см. рис. 2 и описание к нему), 7 – насыпной массив подпорной стены (каменная наброска, крупнообломочный грунт), 8 – контур чаши оттаивания (ниши размыва).

PC-1 – расчетное сечение в одномерной задаче оттаивания основания под водонасыщенной зоной насыпного массива подпорной стены.

PC-2 – расчетное сечение при оценке толщины мерзлотной стенки

Свободное и доступное пространство охлаждающей полости 5 обеспечивает эффективное вентилирование ее, а вентиляционный короб 9, завершающий конструкцию на гребне, существенно ограничивает возможность засорения полости 5 снегом и ледяными пробками и тем самым способствует повышению надежности конструкции в целом.

Другая схема укрепляющего сооружения приведена на рис. 3.

Для этого варианта существенно важным является возможность применения более экономичной одноярусной конструкции, так как здесь устройство глубокого нижнего яруса мерзлотной завесы в виде ряда термосифонов, заглубленных в основание МПС, может потребоваться редко.

Глубина оттаивания основания по направлению PC-1 может быть определена с ориентировочной погрешностью до 20 % по формуле Стефана [7]

$$h_1 = \sqrt{\frac{2\lambda_t(t_1 - t_m)\tau}{\rho W \gamma_c}}, \quad (3)$$

где  $\gamma_c$ ,  $W$  – объемный вес скелета грунта и его весовая влажность,  $\text{t/m}^3$ ;  
 $\rho = 80$  – скрытая теплота фазового перехода влаги грунта,  $\text{мккал/т}$ ;  
 $t_m$  – отрицательная температура основания в начальный момент времени;  
 $t_1$  – температура воды в оттаявшей, частично размытой и водонасыщенной зоне насыпного массива (можно принять ее равной температуре воды на дне водоема);

$\lambda_t$  – коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии,  $\text{ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot {^\circ}\text{C)}$ ;  
 $\tau$  – время, ч.

Глубина промерзания насыпи по направлению PC-2 может быть определена по аналогичной формуле

$$h_{mc} = \sqrt{\frac{2\lambda_m(-t_2)\tau}{\rho W \gamma_c}}, \quad (4)$$

где  $-t_2$  – температура охлаждаемой внутренней поверхности вентилируемой полости;

$\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии, ккал/(м · ч · °C); остальные обозначения те же.

Соответственно толщина мерзлой стенки равна  $2h_{mc}$ . Температуру  $t_2$  назначаем в зависимости от температуры наружного воздуха, поступающего в охлаждающую полость в период зимнего вентилирования; ближайшими аналогами являются существующие воздушные замораживающие системы (колонки, холодные подполья, воздушные охлаждающие каналы и т.п.); в дальнейшем более полные и точные материалы наблюдений могут быть получены на опытных участках МПС.

**Заключение.** Для защиты от термоабразионного разрушения льдистых берегов моря на континентальном шельфе, берегов водохранилищ и других объектов в зоне контакта водоема и льдонасыщенных вечномерзлых грунтов предлагается использование грунтовых насыпей по схеме подпорной стены с одно- или двухъярусной мерзлотной завесой при строительстве сооружений по принципу I с сохранением защищаемого берегового массива в мерзлом состоянии. Данное техническое решение может найти применение в первую очередь на объектах, расположенных на арктическом шельфе России.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Томирдиаро С.В. Природные процессы и освоение территорий зоны вечной мерзлоты. М.: Недра, 1978. 144 с.
2. Апрэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск: Наука, 1985. 170 с.
3. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985.
4. Гончаров Ю.М. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: учеб. пособие. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2016. 406 с.
5. Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005. 537 с.
6. Словарь-справочник. Инженерное мерзлотоведение в гидротехнике / под ред. А.А. Когана и Н.Ф. Кривоноговой. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2001. 254 с.
7. Цытович Н.А., Ухова Н.В., Ухов С.Б. Прогноз температурной устойчивости плотин из местных материалов на вечномерзлых основаниях. Л.: Изд-во литературы по строительству, 1972. С. 71, 79.

**Кузнецов Георгий Иванович**, д-р техн. наук, проф.  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
**Крук Наталья Владимировна**, канд. техн. наук, доц.  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 19.12.17

**Kuznetsov Georgiy Ivanovich**, DSc, Professor  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia  
**Kruk Natal'ya Vladimirovna**, PhD, Ass. Professor  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## RFOZEN RETAINING WALLS IN HYDRAULIC ENGINEERING

A method of coastal protection in the permafrost zone based on the device of a cryogenic veil made in the form of a retaining wall inside a frozen-type structure is considered. Operation of the proposed structure is carried out after the construction of the dam, its freezing and the creation of a cryogenic veil. The operation of the freezing system includes a cooling cavity, freezing columns, a vent box and is provided in the winter period at negative air temperatures. The thermal stability of the structure is ensured by an annual repetition of the cycle of the soaking of the soil of the dam body and the base, especially in the areas of deep thawing under the reservoir. As a result, the overall stability of the structure is achieved.

**K e y w o r d s:** permafrost retaining walls, thermoabrasion, cryogenic screen, depth of thawing.

### REFERENCES

1. Tomirdiaro S.V. Prirodnye protsessy i osvoenie territoriy zony vechnoy merzloty [Natural processes and development of the permafrost zone]. Moscow, Nedra, 1978. 144 p. (in Russian)
2. Are F.E. Osnovy prognoza termoabrazii beregov [Basics of forecasting thermal abrasion of shores]. Novosibirsk, Science, 1985. 170 p. (in Russian)
3. Makarov V.I. Termosifony v severnom stroitel'stve [Thermosiphons in northern construction]. Novosibirsk, Science, 1985. (in Russian)
4. Goncharov Yu.M. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh: uchebnoe posobie [Foundations and foundations on permafrost soils: a manual]. Yakutsk, Publishing house of the IMZ of the SB RAS, 2016. 406 p. (in Russian)
5. Khrustalev L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone: uchebnik [Fundamentals of geotechnics in cryolithozone: a textbook]. Moscow, Publishing house MGU, 2005. 537 p. (in Russian)
6. Slovar'-spravochnik. Inzhenernoe merzlotovedenie v gidrotekhnike [Dictionary-reference book. Engineering permafrost in hydraulic engineering]. Under ed. A.A. Kogan and N.F. Krivonogova. Saint-Petersburg, Publishing house JSC «VNIIG name B.E. Vedeneev», 2001. 254 p. (in Russian)
7. Tsytovich N.A., Ukhova N.V., Ukhov S.B. Prognoz temperaturnoy ustoychivosti plotin iz mestnykh materialov na vechnomerzlykh osnovaniyakh [Forecast of the temperature stability of dams from local materials on permafrost grounds]. Leningrad, Publishing house of the literature on construction, 1972. Pp. 71, 79. (in Russian)

УДК 626.862.3 : 624.139

Л.Ф. ДЗЮБЕНКО, Ю.А. КУЗНЕЦОВА, В.Л. ЛАВРЕНТЬЕВ,  
В.А. СОКОЛОВА

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТОГО ДРЕНАЖА В КРИОЛИТОЗОНЕ

Рассматриваются вопросы проектирования трубчатого дренажа для хвостохранилища, расположенного в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов. Для определения фильтрационного расхода, поступающего в дренаж из хвостохранилища, потребовалось проанализировать формирование его фильтрационного режима с учетом ряда особенностей: наличие в теле хвостохранилища чередующихся прослоек водопроницаемых и маловодопроницаемых грунтов, свойств намываемых хвостов и параметров пульпы, а также технологии намыва. На основе исследования формирования фильтрационного режима хвостохранилища определены расходы воды, поступающей в левую и правую ветви дренажа. В ходе гидравлических расчетов уточнены диаметр дренажной трубы и ее пропускная способность, глубина наполнения, требуемое заглубление дренажной трубы и установлены условия безаварийной работы дренажа.

Ключевые слова: мерзлые грунты, хвостохранилище, фильтрация, трубчатый дренаж типа «Перфокор», эффективность работы дренажа.

Наиболее ответственным элементом в талых плотинах, ограждающих и оградительных дамбах, построенных и проектируемых в условиях северной строительно-климатической зоны, является дренаж [1–6]. Проблемы при эксплуатации трубчатых дренажей [7–9] и недостаточная изученность применения дренажных труб «Перфокор»<sup>1, 2</sup> в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов и глубокого сезонного промерзания требуют тщательного их проектирования и изучения условий работы, что определяет актуальность темы исследования.

Целью настоящей работы является оценка эффективности проектного решения по применению трубчатого дренажа типа «Перфокор», обеспечивающего безаварийную эксплуатацию ограждающей дамбы для создания дополнительной емкости хвостохранилища (рис. 1). Для реализации поставленной цели необходимо определить, прежде всего, величину фильтрационного расхода, поступающего в дренажную систему. Это потребовало решения ряда задач, в которых отражается специфика сооружения: способ заполнения и технология намыва, свойства хвостов, геологическое строение тела сооружения и его ограждающей дамбы, тип и свойства грунтов основания, что в ко-

<sup>1</sup> СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения / Актуализир. ред. СНиП 33-01-2003. М., 2012.

<sup>2</sup> СТО 73011750-006-2010. Рекомендации по проектированию и строительству дренажных систем из полиэтиленовых труб «Перфокор» с двухслойной профицированной стенкой // перфокор.рф.

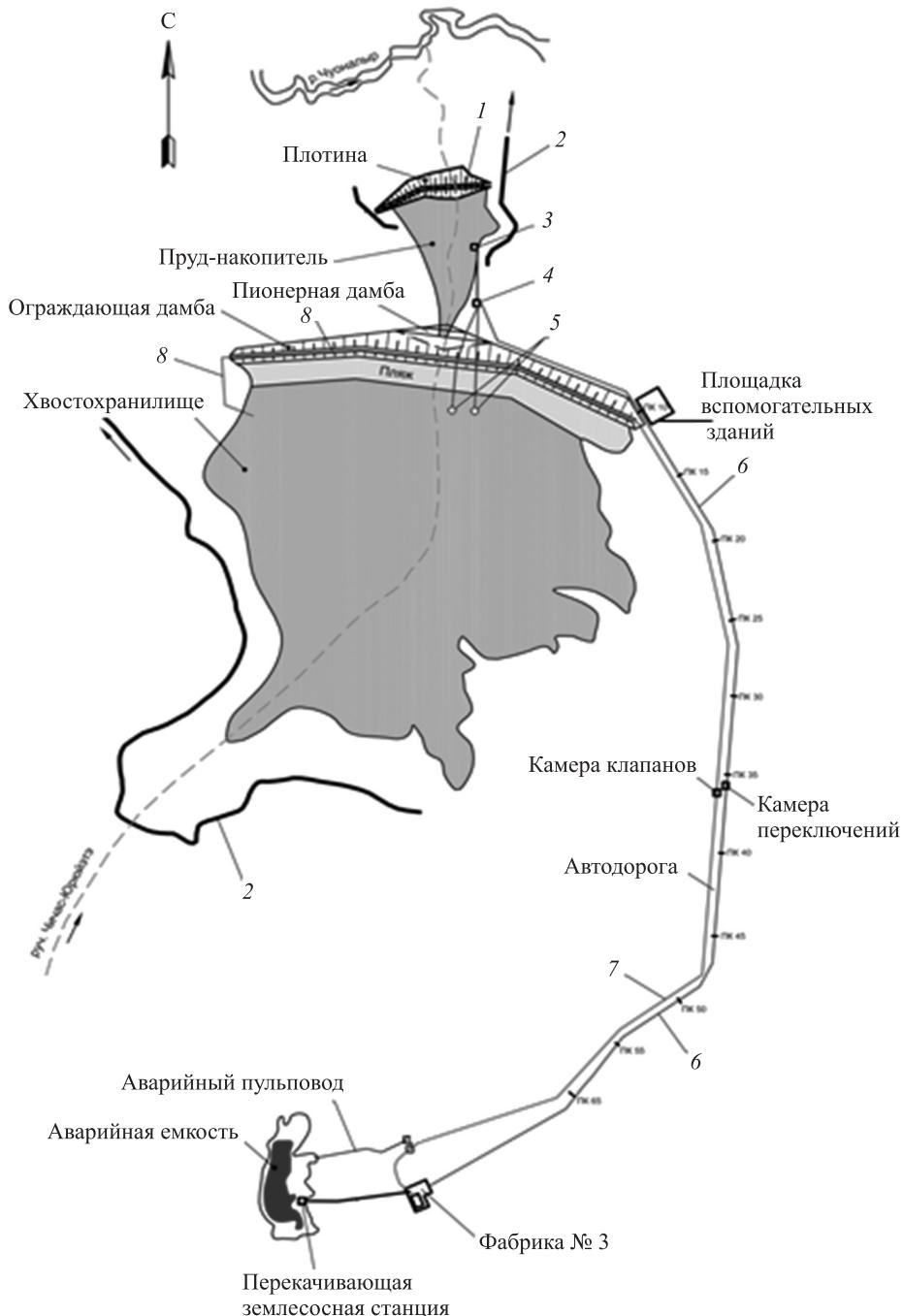


Рис. 1. Схема расположения хвостового хозяйства

1 – система СОУ; 2 – нагорная канава; 3 – дренажная насосная станция; 4 – насосная станция оборотной воды; 5 – сифонный водозабор; 6 – водовод оборотной воды; 7 – магистральный пульпопровод; 8 – распределительный пульпопровод

нечном итоге формирует фильтрационный режим хвостохранилища. Чтобы иметь представление о пространственной картине фильтрации из хвостохранилища, рассмотрено несколько поперечных сечений по ограждающей дамбе, расположенных в левом и правом плечах дамбы и в русловой части.

На первом этапе исследований уточнены технологические параметры намыва по фактическим данным: гранулометрический состав хвостов, их средневзвешенный диаметр  $d_{cp}$ , водная составляющая пульпы  $Q_b$ , расход твердого  $Q_t$ , плотность пульпы  $\rho_p$ , интенсивность намыва И, м/сут (при существующем способе подачи пульпы на пляж из двух пульповыпусков и режиме их переключения), достаточность длины пляжа намыва, обеспечивающей нормальное положение кривой депрессии (отсутствие выхода на откос ограждающей дамбы). Получены следующие данные: при норме отмыва<sup>3</sup> – 43,9 % кривая гранулометрического состава исходных хвостов перестроена способом Маслова [1, 10] в кривые для пляжной и прудковой зон, по которым определены [10] средневзвешенные диаметры частиц: пляжная зона –  $d_{\phi} = 0,359$  мм; прудковая зона –  $d_{\phi} = 0,124$  мм.

Для фактических данных по расходу пульпы  $Q_p = 3800$  м<sup>3</sup>/ч и консистенции пульпы Т:Ж = 20:80 рассчитаны<sup>4, 5</sup> водная и твердая составляющие пульпы  $Q_b = 3040$  м<sup>3</sup>/ч,  $Q_t = 760$  м<sup>3</sup>/ч. При производительности одного выпуска пульпы  $Q_p = 230$  м<sup>3</sup>/ч и его длине  $L_{вып} = 1,5$ –2,0 м определена интенсивность намыва И = 0,359 м/сут (при орошении пляжа в течение  $t = 12$  ч по проекту) и при фактических данных – И = 0,719 м/сут ( $t = 24$  ч).

По рекомендациям ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева<sup>4</sup> минимальная длина пляжа намыва определяется:  $L_{min} = h(m_3 - m)$ , где  $h$  – высота от поверхности отложений до основания накопителя;  $m_3$  – отношение горизонтальной проекции кривой депрессии к превышению уровня воды в пруде над основанием (величина, обратная критическому градиенту фильтрационного потока), рекомендуется принимать  $m_3 = 7$ –10;  $m$  – среднее заложение наружного откоса ограждающей дамбы. Для центрального сечения дамбы (3-3)  $L_{min}$  может достигать от 47,5 м (при фактическом значении  $m_3 = 6,05$ ) до 125,5 м (среднее рекомендуемое  $m_3 = 8,5$ ), т.е. проектное значение длины пляжа  $L = 50,0$  м – достаточно.

Следующий этап работы связан с выбором схем к расчету фильтрации, в соответствии с которыми могут быть определены положение кривой депрессии и суммарный фильтрационный расход в расчетных сечениях, расположенных в центральной части дамбы, ее правом и левом плечах.

В настоящее время нет достаточно надежных методов расчета фильтрационного режима хвостохранилищ, которые бы позволяли учитывать одновременно влияние природно-климатических и технологических факторов, неоднородность структуры тела сооружения и его основания, анизотропность свойств хвостовых отложений. Попытки адаптации существующих методов расчета положения кривой депрессии в намывных плотинах [4, 5 и др.] к хвостохранилищам при реализации различных расчетных схем (наличии сплошных и несплошных водоупорных прослоек) оказались неоднозначными (в большинстве своем неудачными [4] или, наоборот, успешными [5]). По

<sup>3</sup> СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов / Актуализир. ред. СНиП 2.06.05.–84\*. М., 2012.

<sup>4</sup> Рекомендации по проектированию намывных плотин (на стадии строительства) / П 31–86/ВНИИГ. Л., 1987. 52 с.

<sup>5</sup> Рекомендации по проектированию сооружений хвостохранилищ в суровых климатических условиях. М.: Стройиздат, 1977. 152 с.

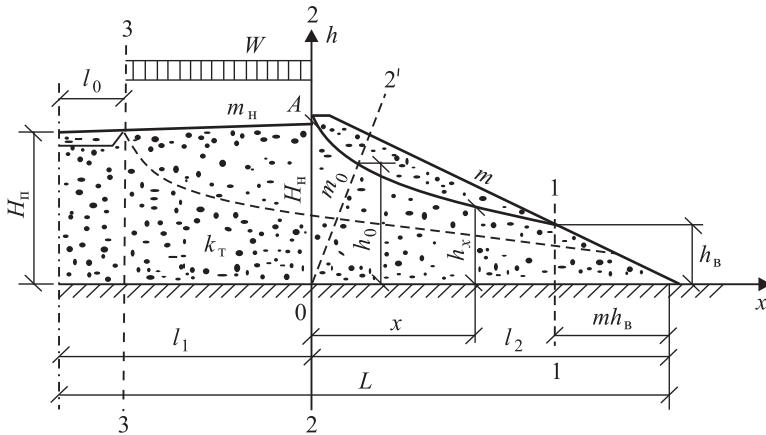


Рис. 2. Схема к расчету фильтрации

условиям формирования фильтрационного режима в теле сооружения выделяются характерные зоны [10, 11]: прудковая (граничное сечение 3-3), пляжная (между сечениями 3-3 и 2-2) и боковая (между сечениями 2-2 и 1-1) (рис. 2). На рис. 2 показана типовая схема к расчету фильтрации – «однородная плотина на водонепроницаемом основании» [1, 2, 10, 11], которая для каждого конкретного поперечного сечения уточняется в зависимости от геологических условий основания.

Суммарный удельный фильтрационный расход в сооружении (на 1 пог. м длины дамбы) складывается из [10, 11 и др.]:

$$q = q_i + q_v + q_n, \quad \text{м}^2/\text{сут}, \quad (1)$$

где  $q_i$ ,  $q_v$ ,  $q_n$  – удельные фильтрационные расходы инфильтрации, водоотдачи намытого грунта, прудка-отстойника соответственно.

Отдельные составляющие фильтрационного расхода определяются следующим образом.

1. Часть максимального среднесуточного удельного расхода, приходящаяся на участок инфильтрации, включая водоотдачу в пределах пляжа намыва [11]:

$$q_i + q_v = \left( \mu_t k_t \frac{t}{24} + I \right) \cdot L_n, \quad \text{м}^2/\text{сут}, \quad (2)$$

где  $\mu_t$  – коэффициент водоотдачи, равный 0,259 [10, 11];

$k_t$  – коэффициент фильтрации намытых хвостов (по данным изысканий), м/сут;  $t$  – время смачивания пляжа водой в сутки, ч;

$I$  – интенсивность намыва, м/сут;

$L_n$  – полуширина прудка в расчетном сечении, м.

2. Удельный расход фильтрации из прудковой зоны [11]

$$q_n = k_n \cdot I \cdot L_n, \quad \text{м}^2/\text{сут}, \quad (3)$$

где  $k_n$  – коэффициент фильтрации отложений прудковой зоны, м/сут, по данным изысканий  $k_n = 6 \cdot 10^{-4}$  м/сут;  $I = 1,0$  – уклон потока при инфильтрации [10, 11],  $L_n = 587,5$  м (см. рис. 1). Расход из прудка при условии отрыва кривой депрессии от уровня воды в прудке [11] –  $q_n = 0,353$  м<sup>2</sup>/сут.

3. Средний удельный расход фильтрации при односторонней схеме намыва может быть вычислен по формуле [11]

$$q_{cp} = (Q_b - Q_{cb}) / L_\phi, \quad \text{м}^2/\text{сут}, \quad (4)$$

где  $Q_b$  – объем воды, подаваемый на откос в течение суток (в данном случае через два пульповыпуска и концевой сброс, рис. 1),  $Q_b = 3040 \text{ м}^3/\text{ч}$  или  $3040 \cdot 24 = 72,96$  тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$Q_{cb}$  – расход, сбрасываемый через сбросные сооружения (в данном случае через один сифон, второй всегда находится в резерве),  $Q_{cb} = 1570 \text{ м}^3/\text{ч}$  или  $1570 \cdot 24 = 37,68$  тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$L_\phi$  – длина прудка в пределах фронта намыва (в данном случае при работе двух пульповыпусков и одного концевого сброса при условии, что ширина растекания примерно равна длине растекания  $B \approx L$  [11]) составляет  $48 \cdot 3 = 144 \text{ м}$ .  $q_{cp} = (72960 - 37680) / 144 = 245 \text{ м}^3/\text{сут} = 10,21 \text{ м}^2/\text{ч}$  на 1 пог. м длины фронта намыва.

Максимальный удельный расход по формулам (1)–(3) не должен превышать величину, вычисленную по формуле (4) [11], с тем, чтобы обеспечить условия обезвоживания тела сооружения при намыве с заданной интенсивностью. При превышении  $q > q_{cp}$  необходимо либо уменьшить время намыва в течение суток, либо увеличить фронт намыва (в данном случае – добавить третий работающий выпуск). Суммарный фильтрационный расход в сооружении равен  $Q = q \cdot L_{cp}$ ,  $\text{м}^3/\text{сут}$ , где  $L_{cp}$  – средняя длина дамбы, м.

4. В отличие от формулы (2), в которой определяется удельный расход инфильтрации (на 1 пог. м длины пляжа), составляющие инфильтрации могут быть определены в соответствии с рекомендациями [10] на ед. площади. В предположении, что величина инфильтрации с поверхности намыва остается постоянной в течение расчетного периода и равна средней инфильтрации, определяется количество воды  $W$ , просачивающейся в тело сооружения через единицу площади в единицу времени [10]:

$$W = k_t \cdot t / 24 + \mu_t \Delta H, \quad (5)$$

где  $\Delta H$  – высота намываемого слоя грунта за сутки, т.е. интенсивность намыва ( $\Delta H = И$ ).

$W = 7,5 \cdot 12 / 24 + 0,259 \cdot 0,359 = 3,843 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^2$  площади пляжа намыва при проектном времени намыва в течение суток – 12 ч.

$W = 7,5 \cdot 24 / 24 + 0,259 \cdot 0,719 = 7,686 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^2$  площади пляжа намыва при круглосуточном намыве и фактической интенсивности намыва.

При проектной длине пляжа  $L_{пл} = 50 \text{ м}$  это составит:

$W = 3,843 \cdot 50 = 192,15 \text{ м}^3/\text{сут}$  при проектных параметрах или

$W = 7,686 \cdot 50 = 384,31 \text{ м}^3/\text{сут}$  при фактических параметрах.

Определим расход инфильтрации с учетом водоотдачи по формуле (2), преобразовав ее на  $1 \text{ м}^2$  площади :

$q_i = \mu_t (k_t \cdot t / 24 + И) = 0,259 (7,5 \cdot 12 / 24 + 3,843) = 1,967 \text{ м}^3/\text{сут}$  на  $1 \text{ м}^2$  пляжа при проектном времени орошения пляжа  $t = 12 \text{ ч}$  (на 1 м длины дамбы);

при фактических данных о технологии намыва  $q_i = 0,259 (7,5 \cdot 24 / 24 + 7,686) = 3,933 \text{ м}^3/\text{сут}$  (на 1 м длины дамбы).

При проектной длине пляжа 50 м фильтрационный расход с пляжа намыва составит (на 1 пог. м длины дамбы):

$$q_i = 1,967 \cdot 50 = \mathbf{98,329} \text{ м}^3/\text{сут при } t = 12 \text{ ч;}$$

$$\text{для фактических данных } q_i = 3,933 \cdot 50 = \mathbf{196,65} \text{ м}^3/\text{сут.}$$

5. Для определения расхода фильтрации через дамбу в качестве расчетных были выбраны наиболее характерные сечения 3-3, 4-4, 2-2, 1-1 (данные представлены заказчиком), которые различаются геометрическими параметрами, геологическим строением основания, наличием (отсутствием) линз суглинка и мерзлоты в основании, что приводит к необходимости применения различных расчетных схем и осложняет расчет фильтрационного расхода.

Для примера приведем подробный расчет фильтрации в сечении 3-3 (рис. 3) при следующих данных (обозначения приведены на рис. 2):  $H_{\text{п}} = 29,16 \text{ м}$ ,  $H_{\text{н}} = 31,36 \text{ м}$ ,  $L_{\text{п}} = 587,5 \text{ м}$ ,  $l_1 = 637,5 \text{ м}$ ,  $l_2 = 143 \text{ м}$ ,  $\Delta H/H_{\text{н}} = 0,0114$  (при  $t = 12 \text{ ч}$ ) и  $\Delta H/H_{\text{н}} = 0,0229$  ( $t = 24 \text{ ч}$ ). Расчет фильтрации проводится путем построения двух пересекающихся кривых  $q = f(h_p)$  [10]. Одну из них  $q_1 = f(h_p)$  строят при помощи расчетного графика 4,46 [10] при заданных значениях  $h_p$ , а вторую – по формуле (6) [10] при тех же значениях  $h_p$ .

$$\frac{q}{k_t} = \frac{1}{m^2 - 0,25} \left\{ A - \sqrt{[A^2 - (m^2 - 0,25)h_p^2]} \right\}, \quad (6)$$

где  $A = l_2 - 2m_0^2 \cdot h_p / (1 + 2m_0)$ ,  $m_0$  – вычисляется для расчетного сечения (обозначение дано на рис. 2);

$m$  – осредненное заложение наружного откоса ограждающей дамбы,  $m = 4,56$ .

С использованием табл. 1 [10] строятся графики функций  $q_1$  и  $q_2$ , с которых на пересечении снимаются значения удельного фильтрационного расхода через дамбу  $q$  и  $h_p$ :

$$q_d = \mathbf{20,2} \text{ м}^3/\text{сут на 1 пог. м дамбы};$$

$$h_p = 28,4 \text{ м.}$$

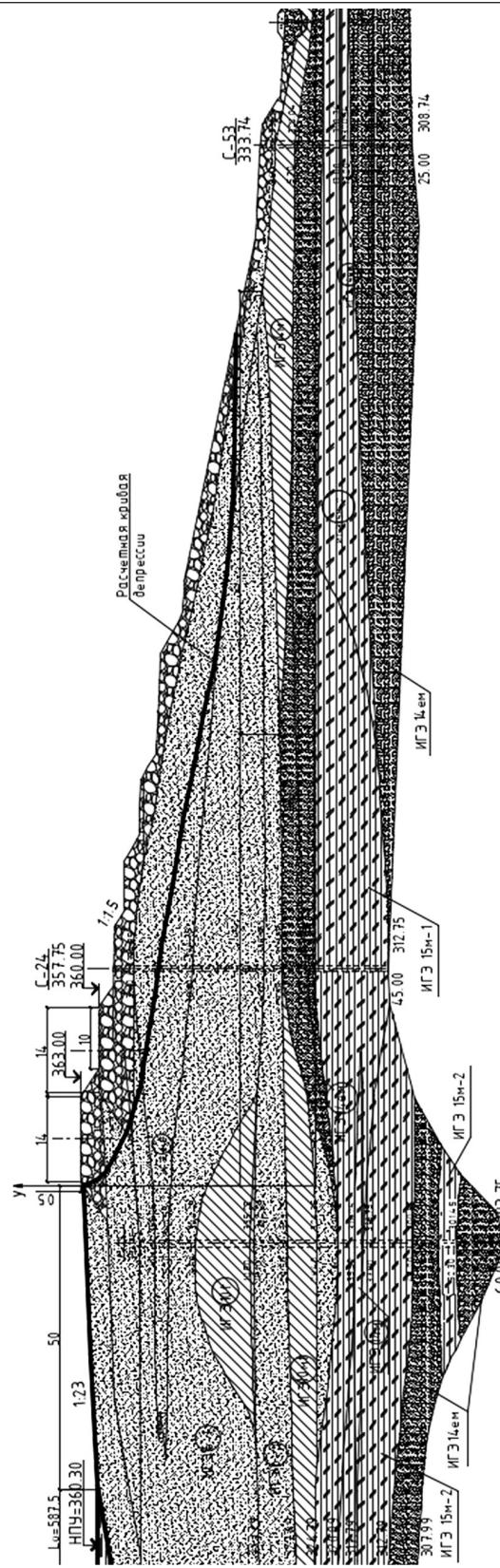
Глубина высасывания фильтрационного потока на откос над линзой суглинка, расположенной в теле сооружения в расчетном сечении (рис. 3), определяется по формуле [10]:

$$h_B = (m + 0,5) \frac{q}{k_t}, \quad (7)$$

$$\text{где } h_B = (4,56 + 0,5) \frac{20,2}{5,035} = 4,88 \text{ м.}$$

Таблица 1. Данные для построения зависимости  $q = f(h_p)$  в сечении 3-3

$h_p, \text{м}$	$h_p/H_{\text{н}}$	$q/(k \cdot H_{\text{н}})$	$q_1, \text{м}^3/\text{сут}$	$m_0$	$A$	$q_2/k_t$	$q_2, \text{м}^3/\text{сут, на пог. м}$
23	0,733	0,320	50,53	0,37	139,2	2,290	11,51
24	0,765	0,275	43,42	0,36	139,4	2,546	12,82
26	0,829	0,210	32,53	0,33	139,6	3,150	15,87
28	0,893	0,130	20,53	0,28	139,8	3,957	19,89
30	0,957	0,075	11,84	0,29	140,2	5,162	25,99
31	0,989	0,039	6,16	0,23	140,75	6,541	32,48



*Рис. 3.* Поперечный разрез по ограждающей дамбе в сечении 3-3

Кривая депрессии во время намыва на пляж в расчетном сечении (рис. 3) строится по уравнению [10]:

$$h_x = \sqrt{\frac{2(l_2 - mh_{\text{в}} - x)q}{k_{\text{т}}} + h_{\text{в}}^2}, \quad (8)$$

где  $m_0 h_{\text{п}} \leq x < mh_{\text{в}}$ .

6. Определяется расход через основание  $q_0$  под ограждающей дамбой в случае его растепления (по данным мониторинга) при активной глубине фильтрации по напорной фильтрации [1]  $T_{\text{ак}} = 17,26$  м и средневзвешенном коэффициенте фильтрации грунтов основания  $k_o = 4,132$  м/сут:  $q_0 = k_o \cdot H \cdot T/l_0$ , где напор  $H = 26,48$  м;  $q_0 = 27,39$  м<sup>2</sup>/сут на 1 пог. м дамбы.

7. Общий удельный фильтрационный расход (на 1 пог. м длины дамбы) с учетом расхода через основание для сечения 3-3 составит при  $t = 12$  ч в сутки

$$q = 20,2 + 98,32 + 0,353 + 27,39 = 146,263 \text{ м}^3/\text{сут}, \text{ а при } t = 24 \text{ ч}$$

$$q = 20,2 + 196,65 + 0,353 + 27,37 = 244,573 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Сводная таблица расчетов фильтрационного расхода (на 1 пог. м длины дамбы) для сечений 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 представлена в табл. 2.

**Таблица 2. Сводный расчет составляющих фильтрационного потока**

№ расчетного сечения	$q_n$ , м <sup>2</sup> /сут, на 1 м длины дамбы	$q_u$ , м <sup>2</sup> /сут, на 1 м длины дамбы*	$q_d$ , м <sup>3</sup> /сут, на 1 м длины дамбы	$q_0$ , м <sup>3</sup> /сут, на 1 пог. м длины дамбы	Общий расход $Q$ , м <sup>3</sup> /сут*
1-1	0,353	98,329/196,65	12,47	—	111,152/209,473
2-2	0,353	98,329/196,650	5,91	—	103,873/202,194
3-3	0,353	98,329/196,650	20,200	27,390	146,272/244,263
4-4	0,353	98,329/206,34	9,3	0,037	108,02/206,34

\* В числителе при  $I = 0,239$  м/сут, в знаменателе при  $I = 0,749$  м/сут.

Кривая депрессии в сечении 3-3 показана на рис. 3, высота высачивания  $h_{\text{в}} = 4,88$  м. В других сечениях также наблюдается выход фильтрационных вод на откос:  $h_{\text{в}} = 5,4$  м (сечение 4-4); в сечении 2-2, в котором наблюдаются две линзы из суглинка, фильтрационный поток разгружается в двух местах (на гребне дамбы наращивания № 2 и первичной дамбе); в сечении 1-1 –  $h_{\text{в}} = 1,05$  м.

Таким образом, расчеты показали, что в процессе намыва в хвостохранилище формируется сложная депрессионная поверхность, наиболее высокое положение которой приурочено к центральной части дамбы, понижаясь к бортам хвостохранилища. Последнее позволяет предполагать, что в береговых примыканиях может происходить разгрузка потока.

Определение суммарного притока к дренажной системе дает возможность уточнить ее гидравлические параметры. Оценка эффективности применения в проекте дренажной трубы типа «Перфокор» диаметром 250 мм выполнена с использованием критериев достаточности пропускной способности и заглубления трубы, отсутствия криогенных проявлений (наледей) при

ее эксплуатации для наибольшего фильтрационного расхода (сечение 3-3). Длина дренажной трубы на правом участке – 1106 м, уклон 0,08; на левом участке – 1385 м, уклон 0,08. Выполненные расчеты показали, что расчетные значения фильтрационного расхода  $Q_p = 0,512 \text{ м}^3/\text{с}$  (приток слева) и  $Q_p = 0,436 \text{ м}^3/\text{с}$  (приток справа) не пропускаются через трубу диаметром 250 мм, обладающей пропускной способностью в данных условиях  $Q_{tp} = 0,067 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для обеспечения пропускной способности требуемый диаметр  $d_{tp}$  должен составлять 0,492 и 0,463 мм при степени наполнения трубы 0,5d соответственно.

Оценка достаточности глубины заложения трубчатого дренажа производится по формуле<sup>2</sup>

$$H = h_{np} + J + K + d + h_0 - b , \quad (9)$$

где  $h_{np}$  – глубина промерзания для грунтов засыпки с добавлением 0,5 м;  $h_{np}$  для данных грунтов в рассматриваемом регионе составляет 3,95 м;

$J$  – расстояние от нижней границы промерзания до верхней границы капиллярного поднятия, рекомендуется<sup>2</sup>  $J = 0,2 - 0,25 \text{ м}$ ;

$K$  – высота капиллярного поднятия для песка,  $K = 0,2 \text{ м}$ ;

$d$  – наибольшее поднятие кривой депрессии (в данном случае для левого борта);

$b$  – глубина траншеи до низа трубы;

$h_0$  – глубина воды в дренаже при наполнении на 0,5d,  $h_0 = 0,108 \text{ м}$ .

Расчетами установлено, что при коэффициенте фильтрации щебенистого грунта (по инженерным изысканиям) – 0,00116 м/с, уклоне кривой депрессии 0,11–0,25 требуемая площадь дренажа (для левого борта) – 1765,5 м<sup>2</sup>, средняя глубина потока перед дренажем составляет 1,275 м. Глубина заложения трубчатого дренажа без учета глубины траншеи  $b$  составляет  $H = 6,125 \text{ м}$ , а высота насыпи над щебенистым грунтом должна быть 4,145 м. Анализ проектных данных показал, что ни в одном сечении не выдержанна глубина заложения 6,125 м, что приведет к образованию наледи в трубах.

**Выводы.** 1. В соответствии с принятой технологией установлена для исследуемого объекта предельная интенсивность намыва хвостохранилища И = 0,719 м/сут.

2. Увеличение пляжа намыва свыше 50 м признано нецелесообразным из-за невозможности «вытянуть» пляж длиной свыше 50 м по всему фронту намыва в течение одного сезона.

3. Формирование фильтрационного режима хвостохранилища в процессе его наращивания в условиях горизонтальной и вертикальной неоднородности грунтов и наличия линз и прослоек маловодопроницаемого грунта в теле сооружения осложняется выходом фильтрационных вод на низовой откос ограждающей дамбы в расчетных сечениях 3-3, 4-4, 2-2, 1-1, что подтверждается геофизическими исследованиями (2014–2015 гг.), в ходе которых установлена также разгрузка фильтрационного потока в левобережном примыкании.

4. Применение трубчатого дренажа для исследуемого объекта при сплошном распространении многолетнемерзлых грунтов нецелесообразно по следующим причинам: недостаточной пропускной способности дренажных труб типа «Перфокор» диаметром 250 мм; недостаточном заглублении

и возможности промерзания и образования наледей вдоль трубчатого дренажа, его неремонтопригодности. Альтернативой трубчатому дренажу может служить наслонный дренаж, который должен быть устроен выше отметки высасывания на 0,5 м и до подошвы с устройством водосборной траншеи или с устройством банкета из камня высотой не менее 5 м, соединенного с каменной призмой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Правдивец Ю.П., Воробьев Г.А. и др. Гидротехнические сооружения: учеб. пособие. М.: Стройиздат, 2011. Ч. 1. 581 с.
2. Ляпичев Ю.П. Гидротехнические сооружения: учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. 302 с.
3. Лопаев А.Б., Бутюгин В.В. Проблемы промышленной гидротехники в криолитозоне. М.: Недра-Бизнесцентр, 2005. 239 с.
4. Дзюбенко Л.Ф., Кожевников А.А. Оценка фильтрационного режима хвостохранилища в процессе его заполнения // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 7. С. 50–59.
5. Дзюбенко Л.Ф., Сухно А.М. Особенности формирования фильтрационного режима хвостохранилища на мерзлом трещиноватом основании // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 7. С. 52–58.
6. Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Сухно А.М., Яненко А.П. Расчет устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 3. С. 28–38.
7. Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В. Оценка эффективности дренажных и противофильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС) // Инж.-строит. журн. 2014. № 4. С. 28–38.
8. Осипова М.А., Корягина С.И. Оценка эффективности дренажной системы террасированного склона нагорного парка в г. Барнауле // Ползуновский альманах. 2017. Т. 2. № 4. С. 180–183.
9. Митрахович А.И., Климков В.Т., Казмирук И.Ч., Лебедев В.В. Оценка водопропускной способности дренажных труб при использовании современных защитных фильтрационных материалов // Мелиорация. 2013. № 1(69). С. 57–65.
10. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов и др.; под общ. ред. В.П. Недриги. М.: Стройиздат, 1984. 543 с.
11. Мелентьев В.А., Колпашников Н.П., Волинин Б.А. Намывные гидротехнические сооружения (Основы расчета и проектирования). М.: Энергия, 1973. 247 с.

**Дзюбенко Любовь Федоровна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ludzju@yandex.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Кузнецова Юлия Анатольевна**, канд. техн. наук, доц.;  
E-mail: kuznecovaj.2010@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Лаврентьев Вадим Леонидович**, канд. техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Соколова Валентина Андреевна**, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Dzyubenko Lubov' Fedorovna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: ludzju@yandex.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Kuznetsova Yuliya Anatol'evna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: kuznecovaj.2010@yandex.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Lavrent'ev Vadim Leonidovich**, PhD, Professor  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Sokolova Valentina Andreevna**, Ass. Professor  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **EFFICIENCY EVALUATION OF THE TUBE DRAINAGE APPLICATION IN THE CRYOLITHOZONE**

This paper considers the issues of tube drainage design for a tailings dam located in the zone of permafrost soils continuous distribution. For determining the filtration rate flowing into drainage from the tailings dam it was necessary to analyze the formation of its filtration regime considering certain features: alternating interlayers of permeable and low permeable soils in the tailings dump's body, characteristics of alluvial mills and pulp parametres, alluvion technologies. On the basis of the research of tailings dam's filtration regime formation were determined water flow rates streaming into the left and right drainage branches. During hydraulic computations the diameter of drainage pipe and its throughput capacity, filling depth and required embedment of the drainage pipe were specified; conditions of the drainage trouble-free operation were discovered.

**К e y w o r d s:** permafrost, tailings dam, filtration, tube drainage of the «Perfokor» type, drainage efficiency.

### **REFERENCES**

1. Rasskazov L.N., Orehov V.G., Pravdivets Yu.P., Vorob'ev G.A. Gidrotehnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie [Hydro-technical utilities: learning guide]. Moscow, Stroyizdat, 2011. Part 1. 581 p. (in Russian)
2. Lypachev Yu. P. Gidrotehnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie [Hydro-technical utilities: learning guide]. Moscow, PFUR, 2008. 302 p. (in Russian)
3. Lopatov A.B., Butyugin V.V. Problemy promyshlennoy gidrotehniki v kriolitozone [Problems of industrial hydraulic engineering in the permafrost zone]. Moscow, Nedra-Business Center, 2005. 239 p. (in Russian)
4. Dzyubenko L.F., Kozhevnikov A.A. Otsenka fil'tratsionnogo rezhima khvostokhranilishcha v protsesse ego zapolneniya [Seepage conditions estimation of a tailings dam during its fillings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 7. Pp. 50–59. (in Russian)
5. Dzyubenko L.F., Sukhno A.M. Osobennosti formirovaniya fil'tratsionnogo rezhima khvostokhranilishcha na merzлом treshchinovatom osnovaniye [Peculiarities of the formation of seeping conditions of tailings dams on the cracked frozen foundation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 7. Pp. 52–58. (in Russian)
6. Dzyubenko L.F., Kuznetsova Yu.A., Sukhno A.M., Yanenko A.P. Raschet ustoychivosti ograzhdayushchey damby khvostokhranilishcha [Stability design of a tailings dam bund wall]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 3. Pp. 28–38. (in Russian)
7. Sol'skiy S.V., Novitskaya O.I., Kubetov S.V. Otsenka effektivnosti drenazhnykh i protivofil'tratsionnykh ustroystv betonnykh plotin na skal'nom osnovaniye (na primere Bureyskoy GES) [Assessment of efficiency of drainage and antifiltrational devices of concrete dams on the rocky basis (on the example of the Bureya Hydroelectric Power Station)]. Inzhenerno-stroiteльnyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]. 2014. No. 4. Pp. 28–38. (in Russian)

8. Osipova M.A., Koryagina S.I. Otsenka effektivnosti drenazhnoy sistemy terrasirovannogo sklona nagornogo parka v g. Barnaule [Evaluation of the effectiveness of the drainage system the terraced slope of the Nagorny Park in Barnaul]. Polzunovskiy al'manakh [Polzunovskii almanac]. 2017. Vol. 2. No. 4. Pp. 180–183. (in Russian)
  9. Mitrakovich A.I., Klimkov V.T., Kaz'miruk I.Ch., Lebedev V.V. Otsenka vodoproemnoy sposobnosti drenazhnykh trub pri ispol'zovanii sovremenennykh zashchitnykh fil'tratsionnykh materialov [Drainage pipes water regeiving capacity estimation on application of modern protective filtering materials]. Melioratsiya [Melioration]. 2013. No. 1(69). Pp. 57–65. (in Russian)
  10. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya: spravochnik proektirovshchika [Hydraulic Structures: design engineer reference book]. G.V. Zheleznyakov, Yu.A. Ibad-Zade, P.L. Ivanov et al. Ed. V.P. Nedrigi. Moscow, Stroyizdat, 1984. 543 p. (in Russian)
  11. Melent'ev V.A., Kolpashnikov N.P., Volnin B.A. Namyvnye hidrotekhnicheskie sooruzheniya (Osnovy rascheta i proektirovaniya) [Alluvial hydrotechnical utilities]. Moscow, Energiya, 1973. 247 p. (in Russian)
-

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 69.05:658.7

А.В. ЗЕМСКОВ, М.С. КЛЫКОВ

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В РЕСУРСАХ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ РАСПИСАНИЯ

Рассмотрена задача планирования спроса на материальные ресурсы с учетом вероятностного хода сооружения объектов. Ее решение позволяет при минимальных значениях временного резервирования поступлений материалов и конструкций существенно повысить устойчивость разрабатываемых расписаний поставок. В статье дана математическая постановка задачи оптимизации временного резервирования спроса, определено условие оптимальности, предложен расчетный механизм определения рациональных значений резервирования спроса.

Ключевые слова: строительство, материальное обеспечение, спрос, планирование, временное резервирование, оптимизация, календарные графики, реализация, вероятностный характер.

Анализ реализации календарных графиков работ компаний, занимающихся строительством, позволяет сделать вывод о необходимости учета надежности расписания при планировании ресурсной потребности [1]. Это означает, что при прогнозировании интенсивности расходования материалов, конструкций и изделий необходимо рассматривать возможные отклонения  $x_{ij}$  сроков выполнения  $T_i^{(x)}$ ,  $T_j^{(x)}$  работ  $ij$  расписания от запланированных дат  $T_i^{(x)}$ ,  $T_j^{(x)}$ .

Учет возможных отклонений  $x_{ij}$ , отражающих риск и неопределенность, предлагается осуществлять в соответствии с методологией стохастического программирования в управлении запасами. Применительно к рассматриваемой задаче для снижения риска несвоевременного выполнения работ строительного графика предлагается введение временного резервирования  $\tau_{ij}$  поставок материалов и конструкций  $q_{ij}$  (элементарных поставок) по всем работам  $ij$  расписания [2].

Если завысить значения  $\tau_{ij}$ , то это приведет к большим издержкам, связанным с затратами по временному резервированию поступлений материальных ресурсов. При значении  $\tau_{ij} \rightarrow 0$  строительная компания понесет значительные затраты из-за дефицита в материально-технических ресурсах [3, 4]. Поэтому необходим поиск такой стратегии прогнозирования спроса на

материалы, конструкции и изделия, при которой суммарные средние затраты строительного предприятия  $\sum_{ij \in \varepsilon} w(\tau_{ij})$  по временному резервированию ресурсов и вследствие их дефицита были бы минимальными,  $\varepsilon - [ij / ij]$  – множество работ расписания.

Поскольку процесс определения оптимальных значений  $\tau_{ij}$  инвариантен по отношению к работам строительного графика, рассмотрим математическую модель, алгоритм расчета применительно к одной работе ( $ij$ ). Введем следующие обозначения:

$P(x)$  – вероятность опережения элементарной поставки по отношению к датам  $T_i^{(o)}, T_j^{(o)}$  в количестве  $x$  единиц времени;

$g$  – размер издержек за резервирование складируемых ресурсов на единицу времени;

$g(\tau - x)P(x)$  – издержки, связанные с избыточным временным резервированием  $\tau - x$  материальных ресурсов по расписанию. В состав этих издержек входят затраты на содержание складов и обслуживающего персонала; потери от физической порчи и убыли хранимого имущества; от морального старения конструкций и деталей; потери от омертвления средств в запасах материалов [5, 6];

$p'$  – размер затрат, связанных с дефицитом складируемых ресурсов единицы времени;

$p'(\tau - x)p(x)$  – затраты, связанные с дефицитом в материальных ресурсах и пропорциональные продолжительности дефицита, равной  $x - \tau$ . Основную часть составляют затраты, связанные с увеличением продолжительности строительства объектов;

$p''$  – размер затрат вследствие несвоевременного обеспечения материальными ресурсами, не зависящий от длительности дефицита;

$p''P(x)$  – затраты вследствие запаздывания поставки материалов и конструкций на  $x - \tau$  единиц времени и не зависящие от продолжительности дефицита. К этим затратам относятся потери, связанные с переходом бригад, перемещением машин и механизмов [7];

$w(\tau)$  – суммарные средние затраты, соответствующие временному резервированию элементарной поставки  $q$  в количестве, равном  $\tau$ .

Математическое ожидание затрат, соответствующее временному резервированию элементарной поставки  $q$  на  $\tau$  единиц времени, определится как

$$w(\tau) = g \sum_{x=0}^{\tau} P(x)(\tau - x) + p' \sum_{x=\tau+1}^{\infty} P(x)(x - \tau) + p'' \sum_{x=\tau+1}^{\infty} P(x). \quad (1)$$

Решение задачи сводится к нахождению выходного параметра (значения  $\tau^*$ ), минимизирующего функцию затрат  $w(\tau)$  при входных параметрах, отвечающих условиям:  $P(x)$  – вероятностная величина;  $\tau, x$  – целые неотрицательные числа;  $g > 0, p' > 0, p'' > 0$ .

Определить условие минимума  $w(\tau)$  для всей функции затрат в общем виде не представляется возможным, поэтому процесс оптимизации разобьем на два этапа. На первом этапе определим условие отыскания  $\tau^+$ , которому

соответствует минимум функции затрат  $w(\tau)$ , включающей первые два слагаемых:

$$w(\tau) = g \sum_{x=0}^{\tau} P(x)(\tau - x) + p'' \sum_{x=\tau+1}^{\infty} P(x), \quad (2)$$

где  $\tau^+$  – условно-оптимальное значение временного резервирования элементарной поставки  $q$  складируемых ресурсов. Далее принимая во внимание, что учет дополнительных затрат  $p'' \sum_{x=\tau+1}^{\infty} P(x)$ , не зависящих от продолжительности дефицита, только увеличит значение оптимального резервирования, минимизирующую функцию затрат (1), приближение к оптимальной величине  $\tau^*$  предлагается осуществлять путем непосредственного вычисления значений функции, начиная с  $w(\tau^+)$ , до тех пор пока не будет выполнено условие

$$w(\tau_{i-1}) > w(\tau_i) < w(\tau_{i+1}). \quad (3)$$

Рассмотрим определение условия, соответствующего условно-оптимальному значению временного резервирования  $\tau$  элементарной поставки  $q$ . В самом общем случае переменная  $x$  является вероятностной непрерывно распределенной величиной, поэтому выражение (2) запишем в виде:

$$w(\tau) = g \int_0^{\tau} (\tau - x) f(x) dx + p' \int_{\tau}^{+\infty} (x - \tau) f(x) dx, \quad (4)$$

$$w(\tau) = \min, \text{ если } \frac{dw}{d\tau} = 0, \text{ поэтому} \quad (5)$$

$$\frac{dw}{d\tau} = g \frac{d}{dw} \int_0^{\tau} (\tau - x) f(x) dx + p' \frac{d}{d\tau} \int_{\tau}^{+\infty} (x - \tau) f(x) dx = 0, \quad (6)$$

откуда находим условие для условно-оптимального значения  $\tau^+$ :

$$\frac{\frac{d}{d\tau} \int_0^{\tau} (\tau - x) f(x) dx}{\frac{d}{d\tau} \int_{\tau}^{+\infty} (x - \tau) f(x) dx} = -\frac{p'}{g}. \quad (7)$$

В (7) интеграл в числителе левой части является математическим ожиданием величины излишнего резервирования элементарной поставки  $q$ . Производная этой величины является предельным ожидаемым излишним резервированием [8]. Интеграл в знаменателе левой части представляет собой математическое ожидание нехватки опережения в случае недостаточного временного резервирования элементарной поставки  $q$ . Производная этой величины является предельным ожидаемым недостаточным времененным резервированием.

Таким образом, из (7) условно-оптимальное значение достигается, когда отношение предельного ожидаемого излишнего резервирования к предельному ожидаемому недостаточному временному резервированию равно соот-

ношению  $-\frac{p'}{g}$ . Для вычисления интегралов в левой части используем теорему математического анализа о дифференцировании под знаком интеграла.

Если дана функция с пределами  $b$  и  $c$ , зависящими от переменной  $v$ , следующего вида:

$$q(v) = \int_{b(v)}^{c(v)} f(vu) du, \quad (8)$$

то производная этой функции есть

$$\frac{dq(v)}{dv} = \int_{b(v)}^{c(v)} \frac{df(vu)}{dv} du + f(v, c(v)) \frac{dc(v)}{dv} - f(v, b(v)) \frac{db(v)}{dv}. \quad (9)$$

Указанная теорема [7], как правило, используется в тех случаях, когда величины  $b$  и  $c$  конечны, но она справедлива и для бесконечных пределов интегрирования. Используя (9) и вычисляя интеграл в числителе выражения (7), получим

$$\frac{d}{d\tau} \int_0^\tau (\tau - x) f(x) dx = \int_0^\tau f(x) dx + (\tau - \tau) = \int_0^\tau f(x) dx. \quad (10)$$

Аналогично, вычисляя производную дифференциала в знаменателе формулы (7), получаем

$$\frac{d}{d\tau} \int_\tau^{+\infty} (x - \tau) f(x) dx = - \int_\tau^{+\infty} f(x) dx. \quad (11)$$

Таким образом, условие (7) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\int_0^\tau f(x) dx}{\int_\tau^{+\infty} f(x) dx} = \frac{p'}{g}. \quad (12)$$

Интеграл в знаменателе левой части (12) есть вероятность того, что  $x > \tau$ , т.е. временное резервирование элементарной поставки в размере  $\tau$  окажется недостаточным. Эту вероятность назовем коэффициентом риска  $-\alpha$ . Интеграл в числите левой части выражения (12) есть вероятность того, что  $x < \tau$ , следовательно:

$$\int_0^\tau f(x) dx = a - \alpha, \quad (13)$$

где  $\int_0^{+\infty} f(x) dx = a - \alpha$  – вероятность, соответствующая положительным откло-

нениям сроков выполнения календарных планов. По результатам статистических исследований в строительных компаниях, параметр  $a$  составил 0,47. Учитывая полученные соотношения (12) и (13), имеем условие

$$\frac{\alpha}{a-\alpha} = \frac{p'}{g}. \quad (14)$$

Из (14) получаем выражение оптимального коэффициента  $\alpha$  и оптимального коэффициента  $a - \alpha$ :

$$\alpha = a \frac{p'}{p' + g}; \quad (15)$$

$$a - \alpha = a \frac{g}{p' + g}. \quad (16)$$

Таким образом, условно-оптимальное значение временного резервирования  $\tau^+$  элементарной поставки  $q$  к плановым срокам начала  $T_i^{(o)}$  и окончания  $T_j^{(o)}$  работы  $ij$  расписания должно быть таким, чтобы коэффициент  $\alpha = a \frac{p'}{p' + g}$ ,

а коэффициент  $a - \alpha = a \frac{g}{p' + g}$ . Определение оптимального значения  $\tau^*$ , минимизирующего функцию затрат (1), осуществляется путем непосредственного вычисления значений этой функции, начиная с  $w(\tau^+)$ , до тех пор, пока не будет выполнено условие (3).

Учитывая, что статистическая информация по отклонениям сроков выполнения работ, а также математическая модель, на основе которой формируются строительные расписания, носят дискретный характер [1, 3], примем для вычисления оптимальных значений  $\tau$  дискретную математическую модель.

При отыскании  $\tau^+$  используем то обстоятельство, что если  $\tau^+$  увеличить или уменьшить на единицу времени, то соответствующие средние суммарные затраты вследствие резервирования спроса только увеличатся, т.е.

$$w(\tau^+ - 1) > w(\tau^+) < w(\tau^+ + 1). \quad (17)$$

Далее заменим в формуле  $\tau$  на  $\tau + 1$  и после некоторых преобразований получаем

$$w[\tau + 1] = g \sum_{x=0}^{\tau} P(x)(\tau - x) + g \sum_{x=0}^{\tau} P(x) + p' \sum_{x=\tau+1}^{+\infty} P(x)(x - \tau) - p' \sum_{x=\tau+1}^{+\infty} P(x). \quad (18)$$

Используя выражение и учитывая соотношение

$$\sum_{x=\tau+1}^{+\infty} P(x) = a - \sum_{x=0}^{\tau} P(x), \quad (19)$$

запишем это равенство в следующем виде:

$$w(\tau + 1) = w(\tau) + (p' + g) \sum_{x=0}^{\tau} P(x) - ap'. \quad (20)$$

Заменяя в полученном равенстве  $\tau$  на  $\tau - 1$ , после преобразований получаем

$$w(\tau - 1) = w(\tau) - (p' + g) \sum_{x=0}^{\tau-1} P(x) + ap'. \quad (21)$$

Используя два последних выражения, перепишем (17) в виде следующих условий:

$$w(\tau - 1) = w(\tau) - (p' + g) \sum_{x=0}^{\tau-1} P(x) + ap';$$

$$w(\tau^+ - 1) - w(\tau^+) = -(p' + g) \sum_{x=0}^{\tau^+-1} P(x) + ap' > 0. \quad (22)$$

Для практических вычислений полученные условия запишем в следующем виде:

$$\sum_{x=0}^{\tau^+-1} P(x) < \frac{p'}{p' + g} < \sum_{x=0}^{\tau^+} P(x)p'. \quad (23)$$

Алгоритм расчета  $\tau^+$  заключается в последовательном вычислении левой и правой частей неравенства (23) до тех пор, пока не будет найдено значение  $\tau^+$ , при котором оно выполняется. Для сокращения количества итерационных расчетов функции затрат (1) при приближении к  $\tau^*$  на отрезке  $(\tau^+ - \tau^*) < (\tau^* - \tau^k)$  предлагается технология минимизации функции одной переменной;  $\tau^k$  – максимально возможная величина опережения элементарной поставки  $q$ .

Из проведенного статистического анализа отклонений сроков выполнения строительных процессов [1, 9, 10] следует, что в практических расчетах можно принять  $\tau^k = 66$  дн. Для расчета прогнозируемой календарной потребности в материальных ресурсах, соответствующей найденным оптимальным значениям  $\tau_{ij}^*$ , определяются календарные сроки  $T_i^{(\tau)}$ ,  $T_j^{(\tau)}$  по всем работам  $ij$  строительного расписания:

$$T_i^{(\tau)} = T_i^{(o)} - \tau_{ij}; \quad T_j^{(\tau)} = T_i^{(\tau)} + t_{ij}^{(\tau)}, \quad (24)$$

где  $t_{ij}^{(\tau)}$  – продолжительность выполнения работы, рассчитываемая с учетом отклонений действительных продолжительностей работ от длительностей в календарных строительных графиках. Вероятностный характер отклонений продолжительностей работ учитывается введением в расчет с доверительной вероятностью  $P = 0,954$  минимально возможной длительности работы  $t_{ij}^{(\tau)}$ , определяемой как

$$t_{ij}^{(\tau)} = t_{ij}^{(o)} (\text{antiln } a - 2\sigma) = 0,79t_{ij}^{(o)}, \quad (25)$$

где  $t_{ij}^{(o)}$  – расчетные продолжительности работ  $ij$  календарного плана.

Предложенный способ прогнозирования ресурсного спроса с учетом факторов риска используется в составе программного комплекса автоматизированного рабочего места руководителей работ (АРМ РР) в строительных подразделениях АО «Компания Мостострой», ООО «Мостостроительная компания-10», ООО «Строительная компания Мост-Восток». Эксплуатация программного модуля управления запасами позволила на 27–34 % повысить

надежность разрабатываемых строительных графиков со снижением издержек, связанных с временным резервированием материальных ресурсов и затрат вследствие их дефицита.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zemskov A.V., Klykov M.S., Grigor'ev N.P. Planning of resource maintenance at building of railway bridge // Scientific Journal MATEC Web of Conferences. 2017. № 106 (4). DOI: 10.1051/matecconf/201710605002.
2. Деменева Е.А., Полоз В.Н. Организация строительства малых водопропускных сооружений: монография. Хабаровск: Изд-во Дальневост. гос. ун-та путей сообщения, 2013. 99 с.
3. Потапова И.В. Совершенствование календарного планирования строительства транспортных сооружений: монография. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. 116 с.
4. Олейник П.П. Основы организации и управления в строительстве: учебник. М.: ACB, 2014. 76 с.
5. Лукьянова З.А., Ромин С.Г. Управление запасами на предприятии // Науч. аспект. 2013. № 1. С. 28–30.
6. Тускаева З.Р. Оценка способов обновления материально-технической базы в строительстве // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 1. С. 152–160.
7. Перевезев П.П., Блинов А.О., Угрюмова Н.В. Механизм интеграции методов совершенствования бизнес-процессов организаций: монография. Челябинск: Издат. Центр ЮУрГУ, 2013. 285 с.
8. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. II. М.: Озон, 2012. 656 с.
9. Рачков М.Ю. Технические средства автоматизации: учебник для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2018. 180 с.
10. Шрайбфедер Д. Эффективное управление запасами / пер. с англ. 2-е изд. М.: Альпина Бизнес Букс, 2012. 304 с.

**Земсков Александр Викторович**, асп.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
**Клыков Михаил Степанович**, д-р техн. наук, проф.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

Получено после доработки 19.12.17

**Zemskov Alexander Viktorovich**, Post-graduate Student  
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

**Klykov Michael Stepanovich**, PhD, Professor  
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

## FORECASTING RESOURCE REQUIREMENTS WITH A SCHEDULE OF RELIABILITY

In article the demand planning task on material resources taking into account a likelihood course of a construction of objects is considered. Its decision allows at the minimum values of time reservation of receipts of materials and designs it is essential to raise stability of developed building schedules. In article mathematical problem definition of

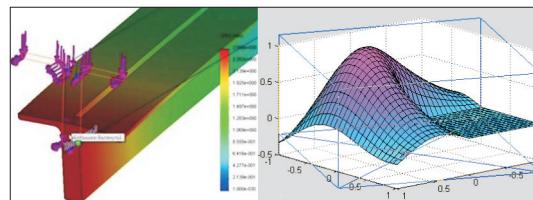
optimisation of time reservation of demand is given, the optimality condition is specified, the settlement mechanism of determination of rational values of reservation of demand is offered.

**Key words:** building, material maintenance, demand, planning, time reservation, optimisation, schedule diagrammes, realisation, likelihood character.

## REFERENCES

1. Zemskov A.V., Klykov M.S., Grigor'ev N.P. Planning of resource maintenance at building of railway bridge. Scientific Journal MATEC Web of Conferences. 2017. No. 106 (4). DOI: 10.1051/matecconf/201710605002.
2. Demeneva E.A., Poloz V.N. Organizatsiya stroitel'stva malykh vodopropuschnykh sooruzheniy: monografiya [The organisation of building of small water throughput constructions: the monography]. Khabarovsk: Publishing FESTU, 2013. 99 p. (in Russian)
3. Potapova I.V. Sovershenstvovanie kalendarnogo planirovaniya stroitel'stva transportnykh sooruzheniy: monografiya [Perfection of scheduling of building of transport constructions: the monography]. Khabarovsk: Publishing FESTU, 2010. 116 p. (in Russian)
4. Oleynik P.P. Osnovy organizatsii i upravleniya v stroitel'stve: uchebnik [Bases of the organisation and management in building: textbook]. Moscow, ASV, 2014. 76 p. (in Russian)
5. Luk'yanova Z.A., Roman S.G. Upravlenie zapasami na predpriyatiu [Enterprise inventory management]. Nauchnyy aspekt [The scientific aspect]. 2013. No. 1. Pp. 28–30. (in Russian)
6. Tuskayeva Z.R. Otsenka sposobov obnovleniya material'no-tehnicheskoy bazy v stroitel'stve [Estimation of ways of updating of material base in building]. Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk [Actual problems of the humanities and natural sciences]. 2013. No. 1. Pp. 152–160. (in Russian)
7. Pereverzev P.P., Blinov A.O., Uglyumova N.V. Mekhanizm integratsii metodov sovershenstvovaniya biznes-protsessov organizatsiy: monografiya [The mechanism of integration of methods of enhancement of business processes of the organizations: the monography]. Chelyabinsk: Publishing Center of UYrGU, 2013. 285 p. (in Russian)
8. Fichtenholz G.M. Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya. T. II [Course differential and integral calculations]. Vol. II. Moscow, Publishing Ozon, 2012. 656 p. (in Russian)
9. Rachkov M.Yu. Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata [Automation means: textbook for academic baccalaureate]. 2-nd publ., corr. and add. Moscow, Publishing Urait, 2018. 180 p. (in Russian)
10. Schreibfeder J. Effektivnoe upravlenie zapasami [Efficient control stocks]. Transf. from eng. 2-nd publ. Moscow, Alpina Business Books, 2012. 304 p. (in Russian)

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 69.05 : 658.512.6

Ю.Б. КАЛУГИН

### ПОИСК МИНИМАЛЬНОГО РАЗРЕЗА СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ СЛИЯНИЕМ ВЕРШИН ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛЕНДАРНЫХ ПЛАНОВ ПО СРОКАМ

Изложена сущность определения минимального разреза сетевой модели с помощью слияния вершин (стягивания ребер) критической сети в ходе оптимизации календарного плана по срокам. Представлены примеры расчета локальных минимальных сечений критической сети с помощью данного метода и глобального минимального разреза. Установлено, что правильность определения глобального минимального разреза существенно зависит от выбранной последовательности слияния вершин. Реализация предлагаемых подходов позволит определить работы, подлежащие оптимизации, рассчитать величину сокращения их продолжительности и число привлекаемых ресурсов.

**Ключевые слова:** календарное планирование и управление проектом, метод критического пути, оптимизация календарных планов по срокам.

Строительство объекта – это комплексный процесс, включающий большое количество разнообразных задач, выполняемых различными исполнителями, отображаемый календарными графиками. При формировании календарных планов и графиков в случае превышения плановых сроков над директивными требуется сокращение общей продолжительности. Кроме того, при оперативном управлении ходом работ необходимо также периодически корректировать календарный график по срокам.

Сокращение плановых сроков календарных графиков до директивных (сжатие) предполагает в первую очередь интенсификацию работ критического пути. Очевидно, что в первую очередь должны сокращаться критические работы, требующие минимального числа привлекаемых ресурсов для такого сжатия [1–5].

После сокращения критического пути на величину минимального значения общего резерва времени [6] производится перерасчет графика с повторным определением всех критических работ. Очевидно, что в этом случае цепочка работ единственного критического пути трансформируется в дальнейшем в критическую сеть, для оптимизации (сжатия) которой могут быть использованы соответствующие подходы и методы [1, 3, 4, 7, 8]. Наиболее часто для поиска таких критических работ сетевой модели используется алгоритм Форда–Фалкерсона о максимальном потоке (минимальном разрезе)

и его разновидности [7–9]. Использование потоковых алгоритмов предполагает целочисленные значения потоков и многошаговые итерационные процедуры [10–19].

Простым и достаточно эффективным методом поиска минимального разреза в сети критических работ сетевого графика являются методы, основанные на использовании двойственного графа [20–23] и методе ветвей и границ [24–26].

Двойственный граф строится следующим образом: на каждой грани первичного графика (сетевой модели, состоящей из критических работ) размещается вершина двойственного. Вершины двойственного графа, лежащие на соседних гранях первичного, соединяются так, чтобы каждой дуге первичного графика соответствовала одна дуга двойственного графа.

Кратчайший путь на сети двойственного графа и определит минимальный разрез первичного графика (сетевой модели критических работ) [23].

Данный подход применим только к плоским сетевым графикам. И хотя в подавляющем большинстве случаев сетевые графики являются плоскими, возникают случаи поиска минимального разреза в графиках, не являющихся плоскими.

Достаточно интересным способом поиска минимального разреза в неориентированном графе является алгоритм Штор–Вагнера и связанные с ним подходы [27, 28].

Идея метода заключается в следующем. К произвольно выбранной вершине графа последовательно добавляются самые «связанные» с ней вершины, формируя первое множество. Тогда локальный минимальный разрез либо разделяет две последние вершины, либо эти вершины находятся во втором множестве, а разрез разделяет два множества. После слияния двух последних вершин цикл повторяется до тех пор, пока не останется две вершины. Минимальный среди всех найденных локальных разрезов и окажется искомым глобальным минимальным разрезом.

Представляется целесообразным рассмотрение возможности использования аналогичного подхода для поиска минимального разреза и в сетевой модели, которая является ориентированным графом с одной начальной и одной конечной вершинами.

Общий подход для поиска минимального разреза сетевой модели методом слияния вершин (стягиванием ребра) достаточно прост. Рассмотрим критическую сеть (фрагмент сетевой модели, в которой все работы являются критическими) (рис. 1). Над дугами (работами графика, изображенными сплошными линиями) представлены значения привлекаемых ресурсов для сокращения соответствующей работы на единицу времени (стоимость сокращения соответствующей работы).

Очевидно, что для любого разреза начальная и конечная вершины должны находиться в разных множествах.

Вначале определяется разрез между вершиной 1 и соседними вершинами 2, 3, 4 (рис. 2).

$$R_0 = \sum \Delta r_{1j}. \quad (1)$$

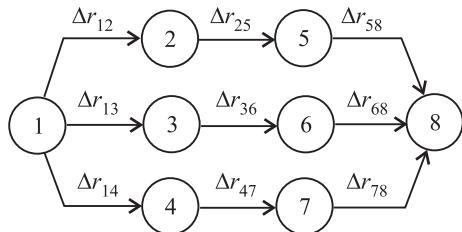


Рис. 1. Фрагмент критической сети

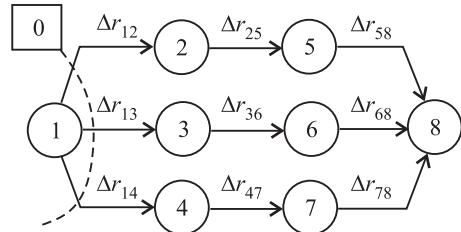


Рис. 2. Первоначальный разрез

Затем производится последовательное слияние (объединение) вершины 1 с этими соседними вершинами. При этом на первом шаге происходит слияние вершин 1 и 2 (рис. 3). (Порядок выбора вершин для слияния в данном примере соответствует нумерации вершин, хотя в общем случае требует отдельного рассмотрения.)

На втором шаге к слитым вершинам 1 и 2 (объединенной вершине 1, 2) добавляется вершина 3 (следующая по нумерации) (рис. 4).

На каждом  $m$ -м шаге определяется значение соответствующего разреза (2) (рис. 5).

$$R_m = \sum \Delta r_{ij}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер события, входящего в объединенную вершину;

$j$  – номер события, соседнего с объединенной вершиной.

После ряда аналогичных процедур сеть на 6-м шаге выглядит следующим образом (рис. 6).

Минимальный из всех разрезов на каждом шаге определит искомые работы для «сжатия»

$$R = \min R_m. \quad (3)$$

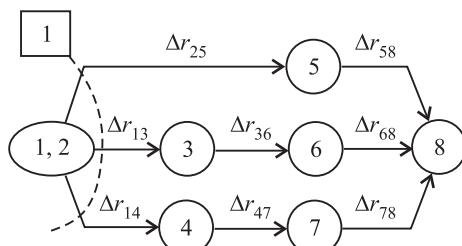


Рис. 3. Первый шаг слияния

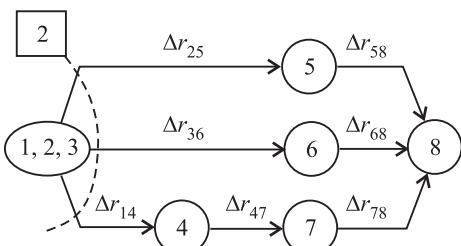


Рис. 4. Второй шаг

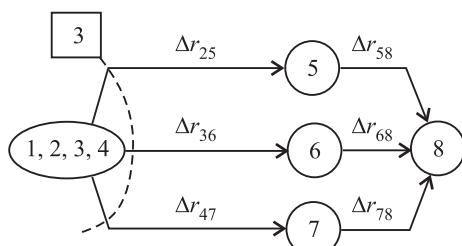


Рис. 5. Третий шаг

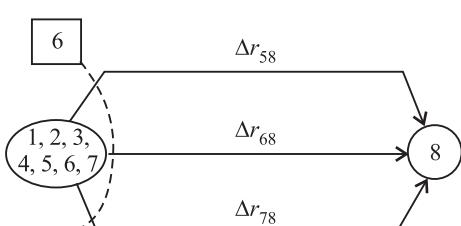


Рис. 6. Шестой шаг слияния вершин

В таблице представлены параметры работ критической сети, соответствующие рис. 1. Они установлены случайным образом в соответствии с равномерным законом распределения от 1 до 9. Определены локальные и глобальные минимальные разрезы для 15 различных вариантов. Порядок выбора вершин для слияния в одном случае соответствовал нумерации вершин 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, а в другом 1, 2, 5, 3, 6, 4, 7.

Анализ представленных результатов показывает, что правильность определения глобального минимального разреза существенно зависит от выбранной последовательности слияния вершин. Так, при последовательности слияния 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 выявленный локальный минимальный разрез является

#### **Результаты определения разрезов сети при различной последовательности слияния вершин**

№ п/п	Параметры работ										Локальные минимальные разрезы при порядке слияния вершин		Глобальный минимум
	$\Delta r_{12}$	$\Delta r_{13}$	$\Delta r_{14}$	$\Delta r_{25}$	$\Delta r_{36}$	$\Delta r_{47}$	$\Delta r_{58}$	$\Delta r_{68}$	$\Delta r_{78}$	1,2,3,4, 5,6,7	1,2,5,3 6,4,7		
1	2	6	1	3	4	9	4	5	8	25-36-14 $S = 8$	58-36-14 $S = 9$	12-36-14 $S = 7$	
2	5	8	9	1	9	4	9	3	6	25-36-47 $S = 14$	58-68-47 $S = 16$	25-68-47 $S = 8$	
3	4	3	8	6	4	7	5	5	9	12-13-14 $S = 15$	12-13-14 $S = 15$	12-13-47 $S = 14$	
4	2	1	9	6	2	3	3	9	7	58-36-47 $S = 8$	12-13-14 $S = 12$	12-13-47 $S = 6$	
5	9	1	1	8	4	3	7	6	6	25-13-14 $S = 10$	58-13-14 $S = 9$	58-13-14 $S = 9$	
6	2	6	9	5	5	1	3	3	4	58-68-47 $S = 7$	58-68-47 $S = 7$	12-68-47 $S = 6$	
7	9	9	2	4	4	3	2	1	4	58-68-47 $S = 6$	58-68-14 $S = 5$	58-68-14 $S = 5$	
8	3	8	4	5	4	3	6	5	1	25-36-47 $S = 12$ 58-68-78 $S = 12$	58-68-78 $S = 12$	12-36-78 $S = 8$	
9	5	1	5	6	8	2	2	6	4	58-68-47 $S = 10$	58-13-14 $S = 8$	58-13-47 $S = 5$	
10	6	4	1	7	2	3	5	8	4	25-36-14 $S = 10$ 58-36-47 $S = 10$	58-36-14 $S = 8$	58-36-14 $S = 8$	
11	1	8	9	9	4	2	8	1	5	58-68-47 $S = 11$	58-68-47 $S = 11$	12-68-47 $S = 4$	
12	9	1	3	1	8	4	6	7	9	25-13-14 $S = 5$	25-13-14 $S = 5$	25-13-14 $S = 5$	
13	7	5	4	3	7	3	2	3	5	58-68-47 $S = 8$	58-68-47 $S = 8$	58-68-47 $S = 8$	
14	4	9	2	1	6	3	3	8	7	25-36-14 $S = 9$	58-36-14 $S = 11$	25-36-14 $S = 9$	
15	7	7	1	9	5	8	4	6	3	25-36-14 $S = 12$	58-36-14 $S = 10$	58-36-14 $S = 10$	

глобальным в 3 случаях из 15. При последовательности слияния 1, 2, 5, 3, 6, 4, 7 выявленный локальный минимальный разрез является глобальным в 6 случаях из 15. При этом в 6 случаях из 15 выявленные локальные минимальные разрезы совпадают для двух различных последовательностей слияния вершин.

Необходимо отметить, что из 27 возможных вариантов разрезов представленного примера данный метод использовал лишь 7. В результате для 8 вариантов глобальный минимальный разрез установлен не был. В этих условиях следует обосновать порядок выбора вершин для слияния, позволяющий определить глобальный (или близкий к нему локальный) минимальный разрез.

**Выводы.** 1. В условиях значительного превышения фактических сроков реализации проектов над плановыми сроками задача сокращения календарного графика («сжатие») является весьма актуальной. Существующие методы и модели такого сжатия сети используют в основном методы линейного программирования и потоковые алгоритмы, применение которых вследствие требования целочисленности ограничено. Кроме того, нелинейный характер изменения числа привлекаемых ресурсов при изменении продолжительности работы усложняет задачу.

2. Простым и достаточно эффективным методом поиска минимального разреза в сети критических работ сетевого графика является метод, основанный на стягивании ребер (слиянии вершин) графа. Выполненные расчеты по определению минимальных разрезов сети этим методом показали, что правильность определения глобального минимального разреза существенно зависит от выбранной последовательности слияния вершин.

3. В этих условиях следует обосновать последовательность слияния вершин графа, позволяющую установить глобальный (или близкий к нему локальный) минимальный разрез критической сети.

4. Реализация изложенного подхода позволит определять минимальные разрезы в сетевых графиках, что в свою очередь будет способствовать поиску оптимальных вариантов «сжатия» календарных графиков и как следствие – сокращению планируемой продолжительности строительства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А в д е е в Ю.А. Выработка и анализ плановых решений в сложных проектах. М.: Экономика, 1971. 96 с.
2. А ф а н а с ь е в В.А. Поточная организация строительства. Л.: Стройиздат, 1990. 303 с.
3. Б а р к а л о в П.С., Б у р к о в а И.В., Г л а г о л е в А.В., К о л п а ч е в В.Н. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами. М.: ИПУ РАН, 2002. 65 с.
4. М а л ь ц е в Ю.А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений. М.: Академия, 2010. 320 с.
5. К а л у г и н Ю.Б., Т у п и ц ы н Р.Ю. Оптимизация календарных планов по срокам (сжатие). Программа для ЭВМ. № 2017618044. 21.07.17.
6. К а л у г и н Ю.Б., Т у п и ц ы н Р.Ю. Выбор работ для «сжатия» критического пути календарного графика // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 2. С. 29–38.
7. Ford L.R., Fulkerson D.R. Maximal flow through a network // Canadian Journal on Mathematics. 1956. No. 8. P. 394–404.

8. Майн и ка Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981. 326 с.
9. Mubarak S. Construction Project Scheduling and Control Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2010. 437 p.
10. Elmabrouk O.M. Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique // Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Istanbul, Turkey, July 3–6, 2012.
11. Haga W.A., O'Keefe T. Crashing PERT networks: a simulation approach. Paper presented at the 4th International conference of the Academy of Business and Administrative Sciences Conference Quebec City, Canada July 12–14, 2001.
12. Kolish R., Hartmann S. Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Project Scheduling—Recent Models, Algorithms and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 147–178.
13. Najib G., Nabil S., Rizk J. Crash: an automated tool for schedule crashing // International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 374–394.
14. Perera S. Linear Programming Solution to Network Compression // Journal of the Construction Division/Proceedings of the ASCE. 1980. Vol. 106. No. 3. P. 315–316.
15. Sahu K., Sahu M. Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. International Review of Applied Engineering Research. ISSN 2248–9967. 2014. Vol. 4. No. 5. P. 403–412.
16. Chassidakis A.P., Sakellaropoulos S.P. Time-cost optimization of construction projects with generalized activity constraints // J. Constr. Eng. Manag., ASCE 131 (10). 2005. P. 1115–1124.
17. Jiang A., Issa R.R.A., Malek M. Construction project cash flow planning using the Pareto optimality efficiency network model // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. 17(4). P. 510–519.
18. Liu S.-S., Wang C.-J. Optimizing project selection and scheduling problems with time-dependent resource constraints // Automation in Construction. 2011. Vol. 20. Issue 8. P. 1110–1119.
19. Chiu H.N., Tsai D.M. An efficient search procedure for the resource-constrained multi-project scheduling problem with discounted cash flows // Construction Management and Economics. 2002. 20(1). P. 55–66.
20. Деменева Е.А. Оптимизация расписаний строительства транспортных водопропускных сооружений по времени и ресурсам // Трансп. стр-во. 2010. № 5. С. 20–21.
21. Клыков М.С., Деменева Е.А. Выбор вариантов интенсификации строительства малых водопропускных сооружений железной дороги // Архитектура и строительство России. 2012. № 3. С. 2–12.
22. Малышев Б.С. Двойственный сетевой график // Проблемы разработки и внедрения АСУ на машиностроительных предприятиях. Новосибирск, 1972. 164 с.
23. Калугин Ю.Б., Клыков М.С., Тупицын Р.Ю. Особенности применения двойственного графа для определения минимального разреза сетевой модели // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 6. С. 94–100.
24. Rogalska M., Bojeiko W., Hejduk Z. Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling // Automation in Construction. 2008. 18. P. 24–31.
25. Adeli H., Karim A. Scheduling/cost optimization and neural dynamics model for construction // J. Constr. Engng. and Mgmt., ASCE. 1997. 123. P. 450–458.
26. Баркалов С.А., Воротилина М.А., Курочкина П.Н., Потапенко А.М. Распределение ресурсов по минимальной продолжительности работ // Системы управления и информационные технологии. 2005. № 2(19). С. 64–67.

27. Mechthild S., Wagner F. A simple min-cut algorithm // Journal of the ACM. 1997. 44 (4). P. 585–591.
28. Nagamochi H., Ibaraki T. Computing edge-connectivity in multiple and capacitated graphs // SIAM Journal on Discrete Mathematics. 1992. 5. P. 54– 66.

**Калугин Юрий Борисович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru  
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений,  
г. Санкт-Петербург

Получено после доработки 15.12.17

**Kalugin Yuriy Borisovich**, DSc, Professor; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru  
Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg,  
Russia

## **SEARCH OF A MINIMUM CUT OF THE NETWORK SCHEDULE BY MERGING VERTICES**

The essence of determining the minimum cut of the network model by merging vertices (edge tightening) of the critical network is presented. Examples of calculation of local minimum of the critical sections of the network using this method and a global minimum cut. It is found that the correctness of determining the global minimum cut significantly depends on the selected sequence of merging vertices. Implementation of the proposed approaches will allow to determine the operation to be optimized, calculate the amount of shortening and the number of resources involved.

**К e y w o r d s:** calendar planning and project management, critical path method, optimize schedules by time.

## REFERENCES

1. Avdeev Yu.A. Vyrobka i analiz planovykh resheniy v slozhnykh proektakh [Development and the analysis of planned decisions in complex projects]. Moscow, Economy, 1971. 96 p. (in Russian)
2. Afanas'yev V.A. Potoknaya organizatsiya stroitel'stva [Flowing organization construction]. Leningrad, Stroyizdat, 1990. 303 p. (in Russian)
3. Barkalov P.S., Burkova I.V., Glagolev A.V., Kolpachev V.N. Zadachi raspredeleniya resursov v upravlenii proektami [Problems of distribution of resources in project management]. Moscow, IPU RAN, 2002. 65 p. (in Russian)
4. Mal'tsev Yu.A. Economiko-matematicheskie metody proektirovaniya transportnykh sooruzheniy [Economic-mathematical methods of design of transport objects]: Moscow, Academia, 2010. 320 p. (in Russian)
5. Kalugin Yu.B., Tupitsyn R.Yu. Optimizatsiya kalendarnykh planov po srokam (szhatie). Programma dlya EVM [Optimization of planned schedules on terms (crashing). Computer program]. No. 2017618044. 21.07.17. (in Russian)
6. Kalugin Yu.B., Tupitsyn R.Yu. Vybor rabot dlya «szhatiya» kriticheskogo puti kalendarnogo grafika [Choice of activities for crashing the critical path of the network schedule]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No 2. Pp. 29–38. (in Russian)
7. Ford L.R., Fulkerson D.R. Maximal flow through a network. Canadian Journal on Mathematics. 1956. No. 8. Pp. 394–404.
8. Maynica E. Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh [Optimizations algorithms for networks and graphs]. Moscow, Mir, 1981. 326 p. (in Russian)

9. Mubarak S. Construction Project Scheduling and Control Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2010. 437 p.
10. Elmabrouk O.M. Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Istanbul, Turkey, July 3–6, 2012.
11. Haga W.A., O'Keefe T. Crashing PERT networks: a simulation approach. Paper presented at the 4th International conference of the Academy of Business and Administrative Sciences Conference Quebec City, Canada July 12–14, 2001.
12. Kolish R., Hartmann S. Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Project Scheduling—Recent Models, Algorithms and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. Pp. 147–178.
13. Najib G., Nabil S., Rizk J. Crash: an automated tool for schedule crashing. International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No 2. Pp. 374–394.
14. Perera S. Linear Programming Solution to Network Compression. Journal of the Construction Division. Proceedings of the ASCE. 1980. Vol. 106. No. 3. Pp. 315–316.
15. Sahu K., Sahu M. Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. International Review of Applied Engineering Research. ISSN 2248–9967. 2014. Vol. 4. No. 5. Pp. 403–412.
16. Chassiakos A.P., Sakellaropoulos S.P. Time–cost optimization of construction projects with generalized activity constraints. J. Constr. Eng. Manag., ASCE 131 (10). 2005. Pp. 1115–1124.
17. Jiang A., Issa R.R.A., Malek M. Construction project cash flow planning using the Pareto optimality efficiency network model. Journal of Civil Engineering and Management. 2011. 17(4). Pp. 510–519.
18. Liu S.-S., Wang C.-J. Optimizing project selection and scheduling problems with time-dependent resource constraints. Automation in Construction. 2011. Vol. 20. Issue 8. Pp. 1110–1119.
19. Chiu H.N., Tsai D.M. An efficient search procedure for the resource-constrained multi-project scheduling problem with discounted cash flows. Construction Management and Economics. 2002. 20(1). Pp. 55–66.
20. Demeneva E.A. Optimizatsiya raspisaniy stroitel'stva transportnykh vodo-propuschnykh sooruzheniy po vremeni i resursam [Optimization of schedules of construction of transport water throughput constructions on time and resources]. Transportnoe stroitel'stvo [Transport construction]. 2010. No. 5. Pp. 20–21. (in Russian)
21. Klykov M.S., Demeneva E.A. Vybor variantov intensifitsirovaniya stroitel'stva malykh vodopropuschnykh sooruzheniy zheleznoy dorogi [Choice of options of an intensification of construction of small artificial constructions of the railroad]. Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii [Architecture and construction of Russia]. 2012. No. 3. Pp. 2–12. (in Russian)
22. Malyshев B.S. Dvoystvennyy setevoy grafik [Dual network schedule]. Problemy razrabotki i vnedreniya ASU na mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh [Problems of development and deployment of ACS at machine-building enterprises]. Novosibirsk, 1972. 164 p. (in Russian)
23. Kalugin Yu.B., Klykov M.S., Tupitsyn R.Yu. Osobennosti primeneniya dvoystvennogo grafa dlya opredeleniya minimal'nogo razreza setevoy modeli [Features use the dual graph to determine the minimum cut of the network schedule]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 6. Pp. 94–100. (in Russian)

24. Rogalska M., Bojeiko W., Hejducki Z. Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling. *Automation in Construction*. 2008. 18. Pp. 24–31.
  25. Ade1i H., Karim A. Scheduling/cost optimization and neural dynamics model for construction. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.*, ASCE. 1997. 123. Pp. 450–458.
  26. Barkalov S.A., Vorotilina M.A., Kurochka P.N., Potapenko A.M. Raspredelenie resursov po minimal'noy prodolzhitel'nosti rabot [ Distribution of resources on the minimum duration of works]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technologies]. 2005. No. 2(19). Pp. 64–67. (in Russian)
  27. Mechthild S., Wagner F. A simple min-cut algorithm. *Journal of the ACM*. 1997. 44 (4). Pp. 585–591.
  28. Nagamochi H., Ibaraki T., Computing edge-connectivity in multiple and capacitated graphs. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*. 1992. 5. Pp. 54–66.
-

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

### ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, НОВАТОР (к 80-летию Алексея Игнатьевича Гныри)



25 января 2018 г. исполнилось 80 лет Алексею Игнатьевичу Гныре, доктору технических наук (1992 г.), профессору (1989 г.), заслуженному деятелю науки РФ (1998 г.), почетному строителю России (2000 г.), почетному работнику высшего профессионального образования Российской Федерации (2006 г.), заслуженному профессору Томского государственного архитектурно-строительного университета, действительному члену МАН ВШ (2008 г.), члену-корреспонденту АИН им. А.М. Прохорова (2007 г.), советнику РААСН (1994 г.), научному руководителю важнейшего направления деятельности Сибирского отделения Российской академии архитектуры и строительных наук (СО РААСН) «Разработка теоретических и инженерно-технологических вопросов энергосбережения в строительстве с учетом региональных условий Сибири», члену редколлегии журнала «Вестник ТГАСУ» (с 1999 г.).

А.И. Гныря родился 25 января 1938 г. в крестьянской семье в с. Александровка Суетского района Алтайского края. С 1956 по 1959 г. учился в Барнаульском строительном техникуме, после окончания которого был направлен в трест «Стройдеталь» Минстроя СССР г. Томска. С 1959 по 1970 г. Алексей Игнатьевич работал на производстве, прошел путь от мастера до главного инженера «Объединения предприятий строительных материалов Томской области», в состав которого входило более 10 заводов. С 1970 г. трудовая деятельность А.И. Гныри связана с Томским государственным архитектурно-строительным университетом (ТГАСУ) (ранее Томский инженерно-строительный институт). В декабре 1970 г. он был избран на должность

доцента кафедры «ТСП», в мае 1972 г. утвержден в ученом звании доцента как высококвалифицированный специалист с большим производственным стажем. С ноября 1972 г. и по настоящее время А.И. Гныря заведует кафедрой «Технология строительного производства» (ТСП) ТГАСУ.

В тесном сотрудничестве с институтом «Теплофизика» СО РАН, научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона (НИИЖБ) А.И. Гныря осуществлял научно-исследовательскую работу по следующим программам: Всероссийская программа министерства общего и профессионального образования «Строительство», Региональная программа (РП), программа энергосбережения МА «Сибирское соглашение», «Комплексная программа развития архитектурно-строительной деятельности в г. Томске и области», «Программа энергосбережения в г. Томске».

В 2017 г. он выиграл очередной грант РФФИ и стал руководителем темы «Исследование тепло- и массообменных процессов при интенсивном твердении бетонов в условиях регионов Сибири, Крайнего Севера и Арктики».

Под руководством А.И. Гныри подготовлены и защищены 5 докторских, 10 кандидатских диссертаций. Он автор учебников и учебных пособий, рекомендованных Министерством образования и АСВ для всех строительных вузов РФ.

Вся научная деятельность А.И. Гныри характеризует его как крупного ученого, известного специалиста в области теории и технологии зимнего бетонирования, аэродинамики и внешнего теплообмена зданий и сооружений, а также как опытного педагога и воспитателя научных и инженерных кадров.

*Друзья, коллеги и ученики сердечно поздравляют глубокоуважаемого Алексея Игнатьевича с замечательным юбилеем и желают здоровья, бодрости и новых успехов на благо строительного образования и строительной науки России.*

*Редакция журнала присоединяется к поздравлениям юбиляру.*



НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**«СТРОИТЕЛЬСТВО»**

Издаётся с марта 1958 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, вступивший в силу с 1 декабря 2015 г.; входит в международную базу данных CA(pt) (Chemical Abstracts).

В журнале публикуются статьи, содержащие новые результаты научных исследований теоретического и прикладного характера, обзорные статьи по состоянию, научным проблемам и перспективам развития теории архитектуры, строительных наук и строительной отрасли, рецензии на книги, научно-техническая информация. Авторы и читатели журнала – научно-педагогические работники, аспиранты, студенты старших курсов строительных вузов, сотрудники научно-исследовательских и проектных институтов, строительных организаций и предприятий.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:**

- Теория сооружений
- Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания и фундаменты
- Строительные материалы и изделия
- Инженерные системы жизнеобеспечения населенных мест, зданий и сооружений. Экологическая безопасность строительства
- Гидroteхническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология
- Технология и организация строительства
- Научные проблемы архитектуры, градостроительства и экологии
- Научно-методический раздел
- В лабораториях вузов
- Достижения науки – производству
- Научно-техническая информация

Принимается подписка  
на 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2018 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4200 р.  
Цена отдельного номера – 700 р.

## **УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!**

Для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus на сайте нашего журнала <http://izvuz.str.sibstrin.ru> размещены

**«ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ».**

### **Внимание!**

1. Объем аннотации – не менее 800 знаков (75 слов и более ), максимум 1200 знаков.
2. Библиографический список должен включать не менее десяти источников.
3. Составление библиографического списка на английском языке (REFERENCES):
  - для ссылок на зарубежные источники на латинице – с сохранением оригинального описания;
  - для ссылок на русскоязычные источники – транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов; название статьи; затем в квадратных скобках – название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, – , //, и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pr., в конце – (in Russian).

Примеры оформления текста статей и REFERENCES – в рубрике «полнотекстовые версии статей».

Редакция имеет право на редакционную обработку статьи. Для контакта с редактором просим сообщать номер мобильного телефона одного из авторов (не для опубликования).

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Обязательны сведения о разработчиках: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация, место работы.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 1 (709) 2018**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 29.01.18. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$   
Усл. печ. л. 9,98+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1111

ООО «Партнеры Сибири»,  
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16