

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

**СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 10 (706)  
Октябрь 2017 г.

Научно-теоретический журнал  
Издается 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 Штутгарта, 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. Игнатъев, 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, КарГТУ, 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  
E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

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

Журавлев А.А., Журавлев Д.А. Расчет устойчивости стержневой конструкции многогранной конфигурации .....	5
Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Моделирование и расчет армированного основания из зернистых материалов .....	14
Жывалевская И.В., Кремнев А.П. Определение несущей способности винтовых свай, выполняемых в защитной среде цементного раствора .....	23

### **СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В. Повышение пластической прочности пенобетона, получаемого из сухих смесей .....	32
Хадбаатар А., Машкин Н.А., Стенина Н.Г., Молчанов В.С., Петров И.И., Зибницкая Н.Е. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ Монголии в автомобильном строительстве .....	38

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

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Ананьин К.В., Карасев Д.В. Моделирование процесса тепломассообмена в трубчатом абсорбере .....	47
Кочева М.А., Суворов Д.В. Влияние электрического поля на факел пламени в топке теплогенератора .....	63

### **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ**

Лихачева А.Е. Особенности эволюции архитектурно-планировочных типов крестьянских фермерских хозяйств .....	69
Завылёнков С.А. О классификации помещений многофункциональных жилых комплексов .....	77

### **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

Герасимов С.И., Жилкин В.А., Попов А.М. Повышение точности измерения перемещений поверхности деформируемых объектов по способу компенсации интерференционных полос в контактном голографическом интерферометре .....	83
Кузнецов А.О., Королев К.В., Полянкин Г.Н., Караулов А.М. Предельное давление армированного грунта на ограждающие конструкции .....	93

### **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Меерович М.Г. Деревянное наследие Томска .....	104
--	-----

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. 10 (706)

October 2017

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 Editor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (*Deputy Editor-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. (*Editor-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

E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

## CONTENTS

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

<b>Zhuravlev A.A., Zhuravlev D.A.</b> Calculation of straight resistance construction of multidimensional configuration .....	5
<b>Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N.</b> Modelling and calculation of the reinforced basis from granular materials .....	14
<b>Zhyvalevskaya I.V., Kremnev A.P.</b> Determination of the bearing capacity of screw piles, executed in the protective environment of cement mortar .....	23

### **BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

<b>Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emel'yanov A.I., Kiselev E.V.</b> Increasing of plastic strength of foam concrete obtained from dry mixes .....	32
<b>Khadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G., Molchanov V.S., Petrov I.I., Zibnitskaya N.E.</b> Use the ash wastes of TPP of Mongolia in highway construction ....	38

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

<b>Shilyaev M.I., Khromova E.M., Anan'in K.V., Karasev D.V.</b> Modeling the process of heat and mass transfer in a tubular absorber .....	47
<b>Kocheva M.A., Suvorov D.V.</b> Effect of electric field on the flame in the furnace of the heat generator .....	63

### **SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY**

<b>Likhacheva A.E.</b> Features of evolution of architectural and planning types of country farms .....	69
<b>Zavylenkov S.A.</b> About classification of premises of multifunctional residential complexes .....	77

### **SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY**

<b>Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Popov A.M.</b> Improvement of surface displacements determination accuracy for contact holographic interferometry by interference fringes compensation method .....	83
<b>Kuznetsov A.O., Korolev K.V., Polyankin G.N., Karaulov A.M.</b> Limiting pressure of the reinforced ground upon protecting designs .....	93

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



УДК 624.074.4.046.3

А.А. ЖУРАВЛЕВ, Д.А. ЖУРАВЛЕВ

### РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ МНОГОГРАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Приводятся результаты исследования устойчивости стержневой конструкции трубчатой формы, структурообразующим элементом которой является многогранное кольцо, подвергающееся действию узловых радиальных сил равной величины. Анализ устойчивости проводится с использованием основных уравнений теории Р. Мизеса для расчета пространственных ферм на примере одного из элементов регулярной конструкции, вписанной в правильную шестигранную призму. Установлена зависимость между безразмерным параметром критической нагрузки и углом наклона стержней к основанию призмы, что дало возможность определить границы устойчивости рассматриваемой системы упругих стержней.

**Ключевые слова:** стержневая трубчатая конструкция, устойчивость, многогранное кольцо, выпучивание, характеристический полином.

С вопросами устойчивости равновесия упругих систем приходится встречаться во многих случаях. Одним из таких случаев является задача об устойчивости стержневой трубчатой конструкции в форме выпуклого многогранника, вписанной в круговой цилиндр и находящейся под действием равномерного радиального давления. Основу стержневой конструкции регулярной структуры составляют правильные многоугольники, вписанные в окружность радиуса  $r$  и повернутые в основаниях круговых колец друг относительно друга на угол  $180^\circ$  (рис. 1). Обозначим через  $l$  естественную длину стержней этих правильных многоугольников, связанных между собой наклонными прямыми стержнями, естественная длина которых принимается равной  $l_1$ . При этом под естественным состоянием системы понимается такое состояние, когда она не испытывает действия никаких внешних или внутренних сил.

Пусть стержневая конструкция находится под действием равномерного поперечного давления в виде узловых радиальных сил  $P$ . Под действием сил  $P$  стержневая конструкция кольца деформируется и в деформированном состоянии длины стержней становятся соответственно равными  $a$  и  $a_1$ . При определенном уровне значений этих сил форма равновесия может

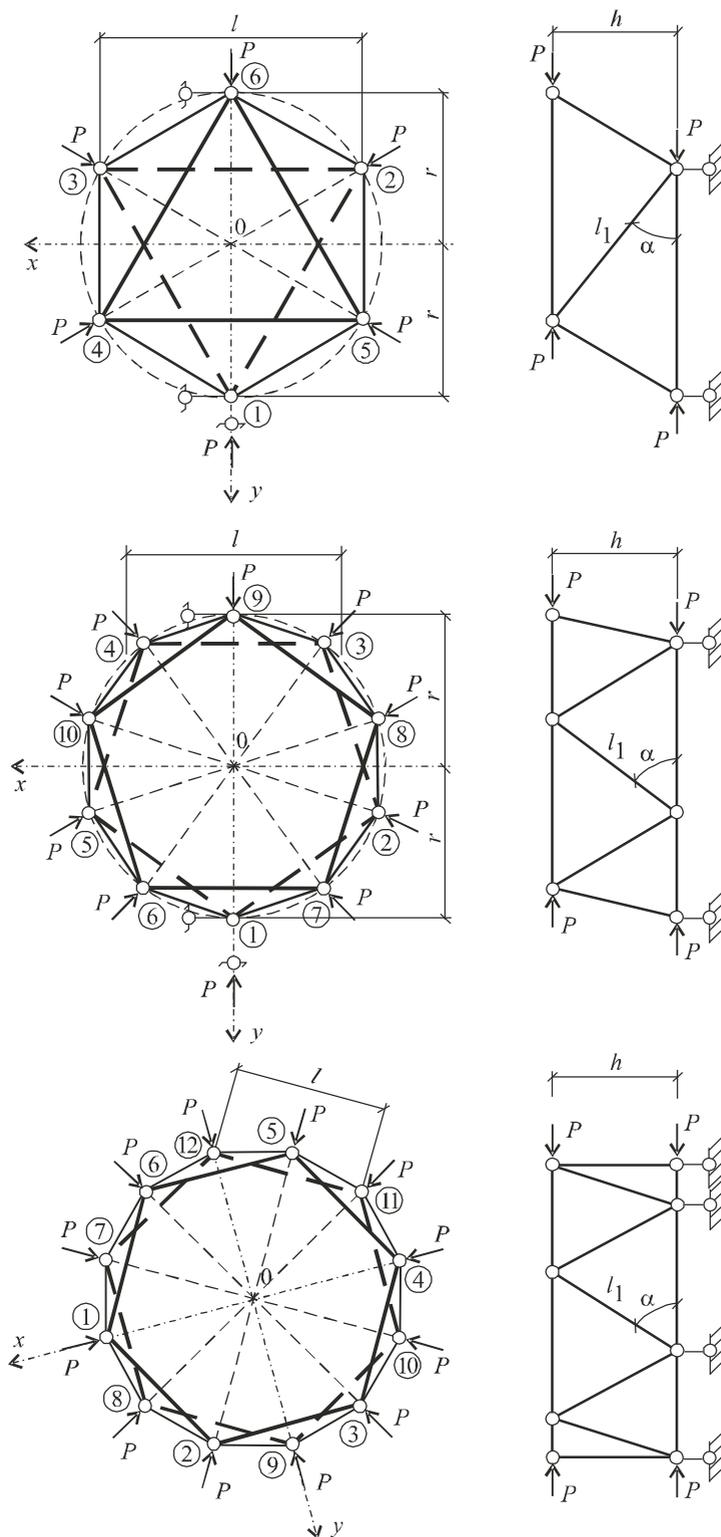


Рис. 1. Стержневые конструкции колец в форме выпуклого многогранника

стать неустойчивой и стержневая конструкция может выпучиться, причем сохраняется прямолинейность ее стержневых элементов. Считая, что все стержни пространственной конфигурации выполнены из одного и того же материала с модулем упругости  $E$ , примем площади поперечных сечений стержней многоугольных колец равными  $F$ , а наклонных стержней  $F_1$ .

Для анализа выпучивания трубчатой конструкции, считая последнюю достаточно протяженной вдоль образующей цилиндра, рассмотрим многократно повторяющуюся часть ее между многоугольными кольцами на примере простейшей стержневой конструкции, состоящей из шести горизонтальных стержней и такого же числа наклонных стержней (рис. 2).

Отнесем пространственную ферму к прямоугольной системе декартовых координат, помещая ее начало в центр окружности, описанной около нижележащего треугольника стержневой конструкции. Оси  $x$  и  $y$  совместим с соответствующими направлениями горизонтального и вертикального диаметров кольцевой части цилиндра высотой  $h$ , а положительное направление оси  $z$ , являющейся осью вращения для рассматриваемой осесимметричной конструкции, ориентируем по вертикали вверх. Для произвольного узла  $k$  пространственной фермы, в котором сходятся  $i$  стержней, уравнения равновесия деформированной конфигурации принимают вид [1]:

$$\Sigma \left\{ \frac{EF}{l} \left[ (\delta x_k - \delta x_i) \left( 1 - \frac{l}{a} \sin^2 \alpha \right) + (\delta y_k - \delta y_i) \frac{l}{a} \cos \alpha \cos \beta + (\delta z_k - \delta z_i) \frac{l}{a} \cos \alpha \cos \gamma \right] \right\}_{ik} = 0, \quad (1)$$

$$\Sigma \left\{ \frac{EF}{l} \left[ (\delta x_k - \delta x_i) \frac{l}{a} \cos \alpha \cos \beta + (\delta y_k - \delta y_i) \left( 1 - \frac{l}{a} \sin^2 \beta \right) + (\delta z_k - \delta z_i) \frac{l}{a} \cos \beta \cos \gamma \right] \right\}_{ik} = 0, \quad (2)$$

$$\Sigma \left\{ \frac{EF}{l} \left[ (\delta x_k - \delta x_i) \frac{l}{a} \cos \alpha \cos \gamma + (\delta y_k - \delta y_i) \frac{l}{a} \cos \beta \cos \gamma + (\delta z_k - \delta z_i) \left( 1 - \frac{l}{a} \sin^2 \gamma \right) \right] \right\}_{ik} = 0. \quad (3)$$

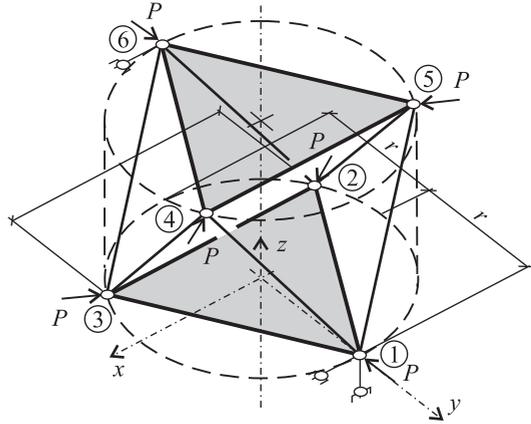


Рис. 2. Простейшая стержневая конструкция кольца в форме выпуклого многогранника с треугольным основанием

Первоначальная длина стержня между любыми двумя узлами  $i$  и  $k$  здесь считается равной  $l_{ik}$ , а длина этого же стержня после деформирования фермы  $a_{ik}$ . Компонентами малого смещения узла  $k$  являются  $\delta x_k, \delta y_k, \delta z_k$ , а узла  $i$  соответственно  $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ . Через  $\alpha_{ik}, \beta_{ik}, \gamma_{ik}$  обозначены углы между стержнями  $ik$  и осями координат  $x, y$  и  $z$  [2]. В последующем целесообразно ввести обозначения:  $n = \frac{F_1 l}{Fl_1}$ ;  $m = n \cos^2 \alpha$ . Здесь  $\alpha$  означает угол

наклона стержней на боковой поверхности стержневого многогранника высотой  $h$  к плоскости  $xy$ .

Записав уравнения равновесия (1)–(3) для всех свободных узлов пространственной системы, получим столько линейных уравнений, сколько имеется независимых смещений. Принятая смещенная форма становится возможной, когда эти уравнения могут дать для смещений  $\delta x, \delta y$  и  $\delta z$  решения, отличные от нуля. Таким образом, критическая нагрузка получается путем приравнивания нулю определителя полученной системы уравнений [3]. При этом предполагается, что в смещенном состоянии имеет место симметрия стержневой конструкции относительно оси  $y$ .

В соответствии с принятой расчетной схемой (рис. 2) первые два уравнения равновесия системы упругих стержней в смещенном состоянии при  $k = 2$  ( $i = 1, 3, 5, 6$ ) запишутся следующим образом:

$$\left[2 + \frac{3}{4}(m-\lambda)\right] \delta x_2 - \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda) \delta y_2 - \delta x_3 + \frac{\sqrt{3}}{4} m \delta y_6 - \frac{\sqrt{3}}{2} m \tan \alpha \delta z_6 = 0, \quad (4)$$

$$-\frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda) \delta x_2 + \left[2 + \frac{5}{4}(m-\lambda)\right] \delta y_2 - (1-\lambda) \delta y_3 - m \delta y_5 - m \tan \alpha \delta z_5 - \frac{1}{4} m \delta y_6 + \frac{1}{4} m \tan \alpha \delta z_6 = 0. \quad (5)$$

Для узла  $k = 3$  ( $i = 1, 2, 4, 6$ ) получаем

$$-\delta x_2 + \left[2 + \frac{3}{4}(m-\lambda)\right] \delta x_3 + \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda) \delta y_3 - \frac{\sqrt{3}}{4} m \delta y_6 + \frac{\sqrt{3}}{2} m \tan \alpha \delta z_6 = 0, \quad (6)$$

$$-(1-\lambda) \delta y_2 + \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda) \delta x_3 + \left[2 + \frac{5}{4}(m-\lambda)\right] \delta y_3 - m \delta y_4 - m \tan \alpha \delta z_4 - \frac{1}{4} m \delta y_6 + \frac{1}{2} m \tan \alpha \delta z_6 = 0. \quad (7)$$

Продолжив процедуру составления уравнений для узла  $k = 4$  ( $i = 1, 3, 5, 6$ ), имеем

$$\left[2 + \frac{3}{4}(m-\lambda)\right] \delta x_4 - \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda) \delta y_4 + \frac{\sqrt{3}}{2} m \tan \alpha \delta z_4 - \delta x_5 - \frac{\sqrt{3}}{2} \lambda \delta y_6 = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 -m\delta y_3 - \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda)\delta x_4 + \left[2 + \frac{5}{4}(m-\lambda)\right]\delta y_4 + \frac{1}{2}m\tan\alpha\delta z_4 - \\
 -(1-\lambda)\delta y_5 - \left(1 - \frac{1}{4}\lambda\right)\delta y_6 = 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 -m\tan\alpha\delta y_3 + \frac{\sqrt{3}}{2}m\tan\alpha\delta x_4 + \frac{1}{2}m\tan\alpha\delta y_4 + 2(1+m\tan^2\alpha - \lambda)\delta z_4 - \\
 -(1-\lambda)\delta z_5 - (1-\lambda)\delta z_6 = 0.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Аналогично для узла  $k = 5$  ( $i = 1, 2, 4, 6$ ) запишем следующие три уравнения в виде:

$$\begin{aligned}
 -\delta x_4 + \left[2 + \frac{3}{4}(m-\lambda)\right]\delta x_5 + \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda)\delta y_5 - \\
 -\frac{\sqrt{3}}{2}m\tan\alpha\delta z_5 + \frac{\sqrt{3}}{4}\lambda\delta y_6 = 0,
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 -m\delta y_2 - (1-\lambda)\delta y_4 + \frac{\sqrt{3}}{4}(m-\lambda)\delta x_5 + \left[2 + \frac{5}{4}(m-\lambda)\right]\delta y_5 + \\
 + \frac{1}{2}m\tan\alpha\delta z_5 - \left(1 - \frac{1}{4}\lambda\right)\delta y_6 = 0,
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 -m\tan\alpha\delta y_2 - (1-\lambda)\delta z_4 - \frac{\sqrt{3}}{2}m\tan\alpha\delta x_5 + \frac{1}{2}m\tan\alpha\delta y_5 + \\
 + 2(1+m\tan^2\alpha - \lambda)\delta z_5 - (1-\lambda)\delta z_6 = 0.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Поскольку в узле  $k = 6$  ( $i = 2, 3, 4, 5$ ) введено закрепление, препятствующее смещению в направлении оси  $x$ , то в данном случае нам потребуется составить только два уравнения по типу уравнений (2) и (3), а именно:

$$\begin{aligned}
 \frac{\sqrt{3}}{4}m\delta x_2 - \frac{1}{4}m\delta y_2 - \frac{\sqrt{3}}{4}m\delta x_3 - \frac{1}{4}m\delta y_3 - \frac{\sqrt{3}}{4}\lambda\delta x_4 - \left(1 - \frac{1}{4}\lambda\right)\delta y_4 + \\
 + \frac{\sqrt{3}}{4}\lambda\delta x_5 - \left(1 - \frac{1}{4}\lambda\right)\delta y_5 + 2\left[1 + \frac{1}{4}(m-\lambda)\right]\delta y_6 - m\tan\alpha\delta z_6 = 0,
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{\sqrt{3}}{2}m\tan\alpha\delta x_2 + \frac{1}{2}m\tan\alpha\delta y_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}m\tan\alpha\delta x_3 + \frac{1}{2}m\tan\alpha\delta y_3 - \\
 -(1-\lambda)\delta z_4 - (1-\lambda)\delta z_5 - m\tan\alpha\delta y_6 + 2(1+m\tan^2\alpha - \lambda)\delta z_6 = 0.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Здесь принято  $\lambda = l/a$ .

Критическое значение сжимающих сил  $P$  найдем, приравняв нулю определитель системы уравнений (4)–(15). Отсюда получаем характеристический полином двенадцатого порядка относительно параметра  $\lambda$ , описывающего неустойчивость равновесия рассматриваемой пространственной системы стержней.

$$p_{12}(\lambda) = \lambda^4(\lambda-2)[\lambda-(1+m)]p_2(\lambda)p_4(\lambda) = 0, \tag{16}$$

где  $p_2(\lambda)$  представляет собой полином второго порядка

$$p_2(\lambda) = (\lambda - 2)(\lambda - 1) - m \left( 1 + \frac{1}{2} \tan^2 \alpha \right) \lambda + m(1 + \tan^2 \alpha) = 0. \quad (17)$$

Содержание последнего сомножителя в характеристическом уравнении (16) можно раскрыть, записав определитель четвертого порядка так:

$$\begin{vmatrix} \lambda - m - 2 & 0 & 0 & m \tan \alpha \\ 0 & \lambda - m - 2 & 1 & 0 \\ 2 & \lambda - 2m & 3(\lambda - 2)/2 & 0 \\ 2m \tan \alpha & m \tan \alpha & 0 & 3\lambda - 2m \tan^2 \alpha - 3 \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

Раскрывая этот определитель, получаем

$$p_4(\lambda) = \left[ \frac{3}{2}(\lambda - 2)^2 - \left( 1 + \frac{3}{2}m \right) \lambda + 5m \right] [3(\lambda - 2)(\lambda - 1) - 2(\lambda - 2)m \tan^2 \alpha - 3(\lambda - 1)m] - 2m^2 \tan^2 \alpha = 0. \quad (19)$$

Как видим, из выражения (16) следует, что  $\lambda_{1,2,3,4} = 0$ ;  $\lambda_5 = 2$ ;  $\lambda_6 = 1 + m \cos^2 \alpha$ . Из этих значений нас может интересовать только последний результат. Далее из условия статического равновесия, записываемого в виде

$$\sqrt{3}EF \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) = -P, \quad (20)$$

получаем формулу для определения критической нагрузки

$$P_{\text{кр}} = \sqrt{3}EF \frac{m}{1+m}. \quad (21)$$

В частном случае, когда площади поперечных сечений всех 12 стержней одинаковы, а также равны естественные длины как горизонтальных, так и наклонных стержней, имеем  $\cos \alpha = \sqrt{3}/3$ ;  $n = 1$ . В этом случае выражение (21) принимает вид

$$P_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{3}}{4}EF. \quad (22)$$

К такому же результату приводится решение задачи об устойчивости элементарной треугольной ячейки, находящейся под действием самоуравновешенных сил  $P$ .

В сплюснутом состоянии пространственная конфигурация многогранного кольца переходит в плоскостную стержневую систему, у которой  $l_1 = r = \sqrt{3}l/3$ . При этом если  $F_1 = F$ , то  $n = \sqrt{3}$  и по формуле (21) имеем

$$P_{\text{кр}} = \frac{3(\sqrt{3}-1)}{2}EF. \quad (23)$$

Нетрудно заметить, что величина критической нагрузки оказывается здесь более чем в 2,5 раза выше, чем вычисленная согласно выражению (22).

Если обратиться теперь к уравнению (17), то полином  $p_2(\lambda)$  в уже рассмотренном частном случае, когда  $m = 1/3$  и  $\tan^2 \alpha = 2$ , запишется так:

$$P_2(\lambda) = \lambda^2 - \frac{11}{3}\lambda + 3 = 0. \quad (24)$$

Решение квадратного уравнения (24) дает

$$\lambda_7 = \frac{11 + \sqrt{13}}{6}; \quad \lambda_8 = \frac{11 - \sqrt{13}}{6}.$$

Из этих двух значений параметра  $\lambda$  смысл имеет воспользоваться только первым из них. При этом получим

$$P_{кр} = \frac{\sqrt{3}}{18}(7 + \sqrt{13})EF. \quad (25)$$

Сопоставление выражений (25) и (22) показывает, что наименьшее значение критической нагрузки определяется формулой (21).

Обратимся еще раз к уравнению (19), которое при  $m = 1/3$  и  $\tan^2 \alpha = 2$  запишется следующим образом:

$$P_4(\lambda) = 81\lambda^4 - 71\lambda^3 + 2205\lambda^2 - 2869\lambda + 1326 = 0. \quad (26)$$

Из этого уравнения наименьшее значение параметра  $\lambda > 1$  получается равным  $\lambda = \frac{147}{125} = 1,176$ . Следовательно, переход от устойчивой формы равновесия стержневой системы в неустойчивое состояние будет иметь место исключительно при величине критической нагрузки, вычисляемой с помощью выражения

$$P_{кр} = \frac{22\sqrt{3}}{147}EF. \quad (27)$$

Пользуясь выражением (21) и принимая  $m = \sqrt{3}\cos^3 \alpha$ , можем получить кривую, выражающую зависимость между безразмерным параметром критической нагрузки  $P_{кр}^*$  и  $\alpha$ . Вторая кривая такого рода, приведенная на рис. 3, соответствует результатам вычислений согласно уравнению (17). Эти результаты обозначены кружками. Как видим, обе кривые пересекаются в общей точке при  $\alpha = 45^\circ$ . Третья кривая, построенная с помощью уравнения (19) и отмеченная точками, ограничивает область значений критической нагрузки в интервале  $32^\circ < \alpha < 62^\circ$ .

Выбранный для исследования случай устойчивости стержневой конструкции трубчатой формы представляет интерес по той причине, что от стержневой конструкции можно путем преобразования правой части выра-

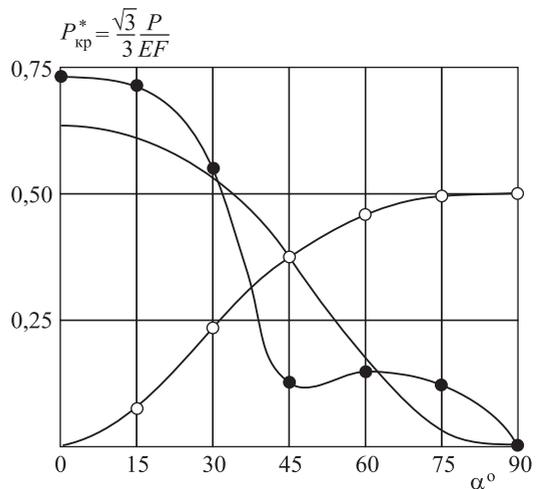


Рис. 3. Границы устойчивости при радиальном давлении в зависимости от угла наклона стержней на поверхности трубчатой конструкции

жения (27) перейти к многогранному кольцу, состоящему из тонких пластинок толщиной  $t$ . Для этого достаточно воспользоваться следующим соотношением [4, 5]:

$$EF = \sqrt{3}Et/2. \quad (28)$$

Таким образом, для тонколистовой трубчатой конструкции имеем

$$P_{кр} = \frac{11}{49}Et. \quad (29)$$

Рассматриваемой трубчатой поверхности с треугольными гранями в форме правильных треугольников соответствует изометричная поверхность правильной шестиугольной призмы. Площадь каждой из 6 граней такой призмы равна  $A = \sqrt{2}lr/2$ .

Для складки замкнутого профиля в виде шестиугольной призмы, по граням которой приложена равномерно распределенная нагрузка интенсивностью  $P$ , применение выражения (29) приводит к следующему результату:

$$P_{кр} = \frac{44\sqrt{2}}{147}E \frac{t}{r}. \quad (30)$$

При  $\mu = 1/3$  формула (30) может быть записана в виде

$$P_{кр} \cong \frac{E}{\sqrt{3}(1-\mu^2)} \frac{t}{r}. \quad (31)$$

Следовательно, критическое давление имеет в этом случае на 30 % меньшую величину по сравнению с критическим напряжением сжатой вдоль оси цилиндрической оболочки радиуса  $r$  и толщиной  $t$  [6].

В заключение заметим, что полученный результат не противоречит известному положению, согласно которому выпучивание короткого цилиндра при осевом сжатии происходит при меньших критических значениях осевых сил, нежели чем для длинного цилиндра.

При последующем размельчении конструктивной сети длины элементов ее ячеек будут уменьшаться и это обстоятельство окажется определяющим с точки зрения существования безызгибной формы деформации стержней при выпучивании трубчатой конструкции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлев А.А., Журавлев Д.А. Стержневые конструкции цилиндрических оболочек. Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2014. 224 с.
2. Рабинович И.М. Об устойчивости стержней в статически неопределимых системах. М.; Л.: Гострансиздат, 1932. 36 с.
3. Mises R., Ratzendorfer I. Die Knicksicherheit von Fachwerken // Z. für angewandte Math. und Mech. 1925. S. 218–231.
4. Журавлев А.А. О возможности замены пластинчато-стержневых систем решетчатыми при расчете сетчатых куполов // Облегченные строительные конструкции покрытий зданий. Ростов н/Д, 1974. С. 17–22.

5. Klöppel K., Schar dt R. Zur Berechnung von Netzkuppeln// Stahlbau. 1962. 34. H.5. S.129–136.
6. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Физматгиз, 1971. 807 с.

**Журавлев Александр Александрович**, д-р техн. наук, проф.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

**Журавлев Дмитрий Александрович**, канд. техн. наук, доц.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Получено после доработки 11.09.17

**Zhuravlev Alexander Alexandrovich**, DSc, Professor

Don State Technical University, Rostov-on-Don

**Zhuravlev Dmitriy Alexandrovich**, PhD, Ass. Professor

Don State Technical University, Rostov-on-Don

## **CALCULATION OF STRAIGHT RESISTANCE CONSTRUCTION OF MULTIDIMENSIONAL CONFIGURATION**

The results of tubular structure stability investigation of the core structure are given, the structure-forming element of it is a polyhedral ring subjected to the action of nodal radial forces of equal magnitude. The stability analysis is carried out using the basic equations of R. Mises's theory for the calculation of spatial trusses using the example of one of the elements of a regular construction inscribed in a regular hexagonal prism. The dependence between the dimensionless parameter of the critical load and the angle of inclination of the rods to the base of the prism was established, which made it possible to determine the stability limits of the system of elastic rods.

**Key words:** core tubular structure, stability, polyhedral ring, buckling, characteristic polynomial.

### REFERENCES

1. Zhuravlev A.A., Zhuravlev D.A. Sterzhnevye konstruksii tsilindricheskikh obolochek [Rod designs of cylindrical covers]. Rostov-on-Don, 2014. 224 p. (in Russian)
2. Rabinovich I.M. Ob ustoychivosti sterzhney v staticheski neopredelimykh sistemakh [On the stability of rods in statically indeterminate systems]. Moscow; Leningrad, Gostransizdat, 1932. 36 p. (in Russian)
3. Mises R., Ratzerdorfer I. Die Knicksicherheit von Fachwerken. Z. für angewandte Math. und Mech. 1925. S. 218–231.
4. Zhuravlev A.A. O vozmozhnosti zameny plastinchato-sterzhnevykh sistem reshchatymi pri raschete setchatykh kupolov [On the possibility of replacing the plate-rod systems by lattice ones in the calculation of reticular domes]. Oblegchennye stroitel'nye konstruksii pokrytiy zdaniy [Light weight building construction buildings]. Rostov-on-Don, 1974. Pp. 17–22. (in Russian)
5. Klöppel K., Schar dt R. Zur Berechnung von Netzkuppeln. Stahlbau. 1962. 34. H.5. S.129–136.
6. Timoshenko S.P. Ustoychivost' sterzhney, plastin i obolochek [Stability of rods, plates and shells]. Moscow, Fizmatgiz, 1971. 807 p. (in Russian)

УДК 624.04:625.731.812

С.А. МАТВЕЕВ, Е.А. МАРТЫНОВ, Н.Н. ЛИТВИНОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АРМИРОВАННОГО ОСНОВАНИЯ ИЗ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Расчетная модель армированного плоской георешеткой зернистого слоя рассмотрена как двухслойная плита на упругом основании, состоящая из жестко сцепленных между собой слоев. Нижний слой, моделирующий георешетку, представлен однородным композитным ортотропным слоем с физико-механическими характеристиками, существенно отличающимися от характеристик вышележащего слоя. Слой основания под армированной плитой учтен с помощью коэффициента постели. Расчет многослойной плиты на упругом основании выполнен методом Бубнова–Галеркина. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчетов с результатами штамповых испытаний основания из щебня, армированного плоской георешеткой со стальными волокнами в полиэтиленовой оболочке.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** армирование, зернистое основание, георешетка, двухслойная плита на упругом основании, прогиб.

Армирование грунтов широко применяется при строительстве сооружений [1]. В последние десятилетия для этих целей активно используются геосинтетические материалы [2]. Наиболее эффективными для армирования оснований из зернистых материалов являются объемные и плоские георешетки [3–6]. Существующие нормативные документы по использованию в качестве армирующих материалов для грунтовых оснований, в том числе из зернистых материалов, различных геосинтетических материалов основаны, как правило, на частных эмпирических исследованиях. Следует признать, что в настоящее время в Российской Федерации нет единой научно обоснованной методологической базы для их использования. Для создания такой базы требуются серьезные экспериментально-теоретические исследования. В качестве одного из подходов к решению данной проблемы предлагается следующее: моделировать основание из зернистого материала, армированное плоской георешеткой, как двухслойную плиту на упругом основании.

Примем гипотезу, что слой щебня, который фактически представляет собой дискретную среду, будет вести себя как сплошная связная среда при условии, что в основании слоя размещена плоская георешетка (рис. 1), воспринимающая растягивающие напряжения и тем самым обеспечивающая работу зернистого слоя как плиты на упругом основании [7–10]. В таком случае для расчета армированного слоя щебеночного основания может быть использована техническая теория изгиба плит [11]. При малых деформациях основные усилия в таких плитах возникают от изгиба. При этом появляются как растягивающие, так и сжимающие напряжения в слое. Щебень как дискретный материал не способен воспринимать растяги-

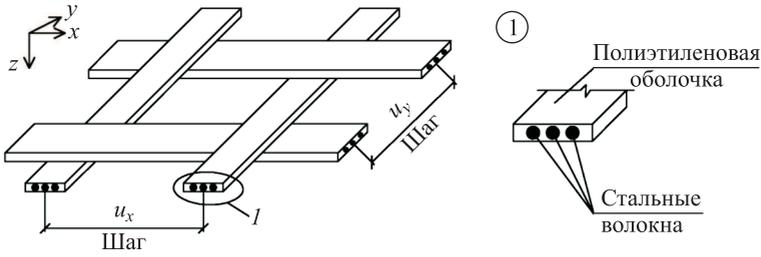


Рис. 1. Схема георешетки

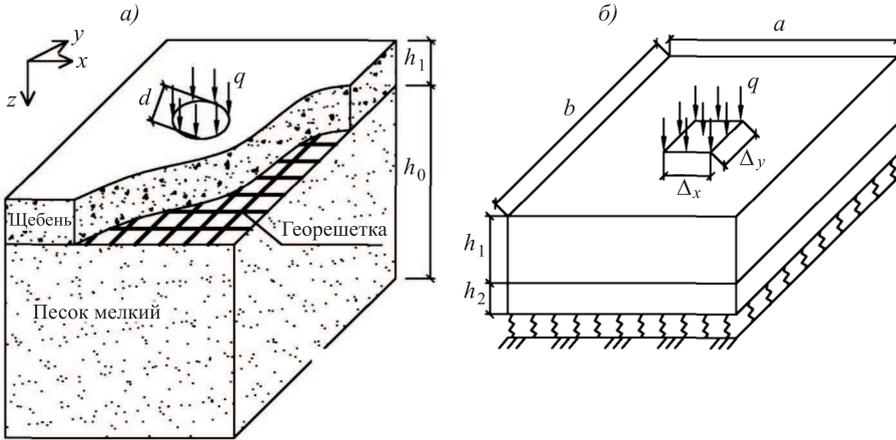


Рис. 2. Армированный зернистый слой  
а – схема испытания; б – расчетная схема

вающие напряжения. При армировании плоской георешеткой отдельные щебенки зацепляются за ее «поперечные» ребра, заставляя «продольные» ребра георешетки работать на растяжение. Из этих соображений армированный слой щебня можно рассматривать как двухслойную плиту на упругом основании, состоящую из жестко сцепленных между собой слоев (рис. 2, б). Физико-механические характеристики нижнего армирующего слоя будут существенно отличаться от характеристик вышележащего слоя.

Полагая, что при изгибе двухслойной плиты для всех ее слоев справедлива гипотезы Кирхгофа–Лява, представим дифференциальное уравнение изгиба плиты в следующем виде [11]:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 3D_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + D_{33}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 2D_{23} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + C_z w + q = 0, \quad (1)$$

где  $C_z$  – коэффициент постели;

$q = q(x, y)$  – интенсивность нагрузки на поверхности плиты;

$w = w(x, y)$  – функция прогибов;

$D_{11} - D_{33}$  – постоянные, характеризующие упругие свойства плиты и определяемые из выражений:

$$\begin{aligned} D_{11} &= d_{11} + c_{11}c_{11}^*; & D_{12} &= A_{12}^{(1)}g_1 + A_{12}^{(2)}g_2; \\ D_{22} &= A_{22}^{(1)}g_1 + A_{22}^{(2)}g_2; & D_{33} &= A_{33}^{(1)}g_1 + A_{33}^{(2)}g_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Входящие в первое выражение (2) постоянные  $d_{11}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{11}^*$  вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} d_{11} &= A_{11}^{(1)}g_1 + A_{11}^{(2)}g_2; & c_{11}^* &= \frac{(c_{21}b_{12} - c_{11}b_{22})}{(b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21})}; \\ c_{11} &= A_{11}^{(1)}p_1 + A_{11}^{(2)}p_2; & c_{21} &= A_{21}^{(1)}p_1 + A_{21}^{(2)}p_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A_{kj}$  – коэффициенты пропорциональности между напряжениями и деформациями, принимаемые для первого (неармированного) слоя:

$$A_{11}^{(1)} = A_{22}^{(1)} = \frac{E}{1-\nu^2}; \quad A_{33}^{(1)} = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad A_{12}^{(1)} = A_{21}^{(1)} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}, \quad (4)$$

здесь  $E$  – модуль упругости щебеночного слоя;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Входящие в выражения (3) постоянные определяются по формулам:

$$g_1 = \frac{h_1^3}{3}; \quad g_2 = \frac{1}{3}(3h_1^2 + 3h_1h_2 + h_2^2)h_2, \quad (5)$$

$$p_1 = \frac{h_1^2}{2}; \quad p_2 = \frac{1}{2}(2h_1 + h_2)h_2, \quad (6)$$

здесь  $h_1$ ,  $h_2$  – толщины 1-го и 2-го слоев соответственно;

$$b_{11} = A_{11}^{(1)}h_1 + A_{11}^{(2)}h_2; \quad b_{22} = A_{22}^{(1)}h_1 + A_{22}^{(2)}h_2; \quad b_{12} = A_{12}^{(1)}h_1 + A_{12}^{(2)}h_2. \quad (7)$$

Плоская георешетка представляет собой регулярную структуру с ячейками прямоугольной формы размерами  $u_x \times u_y$ , образованную из пересекающихся под прямым углом ребер (см. рис. 1). Каждое ребро состоит из стальных армирующих волокон, размещенных внутри полиэтиленовой оболочки. Суммарная площадь поперечных сечений армирующих волокон, ориентированных вдоль оси  $x$ , приходящаяся на ширину  $u_y$  поперечного сечения армирующей прослойки, нормального к оси  $x$ , равна

$$A_{ax} = n_x A_b, \quad (8)$$

где  $A_b$  – площадь поперечного сечения одного волокна;

$n_x$  – количество армирующих волокон, параллельных оси  $x$ , приходящихся на ширину  $u_y$  поперечного сечения.

Соответственно суммарная площадь поперечных сечений армирующих волокон, ориентированных вдоль оси  $y$ , приходящаяся на ширину  $u_x$  поперечного сечения армирующей прослойки, нормального к оси  $y$ , равна

$$A_{ay} = n_y A_b, \quad (9)$$

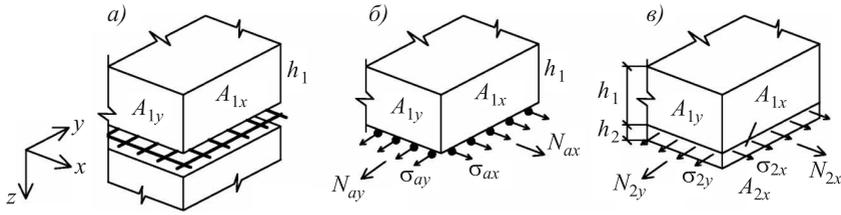


Рис. 3. Армированная плита

*a* – конструктивная схема плиты; *б* – усилия и напряжения в армирующих волокнах;  
*в* – усилия и напряжения в сплошном композитном слое

где  $n_y$  – количество армирующих волокон, параллельных оси  $y$ , приходящихся на ширину  $u_x$  поперечного сечения.

Заменим отдельно расположенные армирующие волокна (рис. 3, б) сплошным упругим композитным слоем толщиной  $h_2$  (рис. 3, в) с площадями поперечных сечений, нормальных к осям  $x$  и  $y$ , соответственно

$$A_{2x} = u_y h_2; \quad A_{2y} = u_x h_2 \quad (10)$$

и коэффициентами армирования

$$\omega_x = \frac{A_{ax}}{A_{2x}}; \quad \omega_y = \frac{A_{ay}}{A_{2y}}. \quad (11)$$

Такая замена позволяет упростить и унифицировать расчетную модель армированного слоя, представив ее в виде двухслойной системы с различными упругими характеристиками, постоянными в пределах каждого слоя.

Полагаем, что нормальные напряжения  $\sigma_{2x}$  и  $\sigma_{2y}$  в поперечных сечениях композитного слоя двухслойной плиты, совпадающих с гранями ячейки армирующей решетки, распределены равномерно по площадям  $A_{2x}$  и  $A_{2y}$  соответственно (рис. 3, в), а их равнодействующие  $N_{2x}$  и  $N_{2y}$  определяются из равенств

$$N_{2x} = \sigma_{2x} A_{2x}, \quad N_{2y} = \sigma_{2y} A_{2y}. \quad (12)$$

Усилия в армирующих волокнах  $N_{ax}$  и  $N_{ay}$  представим выражениями

$$N_{ax} = \sigma_a A_{ax}, \quad N_{ay} = \sigma_a A_{ay}, \quad (13)$$

где  $\sigma_a$  – нормальное напряжение в армирующем волокне.

Учитывая равенства (11)–(13), из условий

$$N_{ax} = N_{2x}, \quad N_{ay} = N_{2y} \quad (14)$$

получим

$$\sigma_{2x} = \omega_x \sigma_a, \quad \sigma_{2y} = \omega_y \sigma_a. \quad (15)$$

Предположим, что для плиты, состоящей из двух упругих слоев, жестко соединенных между собой, справедлива гипотеза прямых нормалей Кирхгофа–Лява.

Для расчета на изгиб многослойной плиты на упругом основании используем метод Бубнова–Галеркина [11]. Функцию прогибов зададим в виде двойного тригонометрического ряда

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (16)$$

где  $m$  и  $n$  – целые числа в диапазоне  $1 \dots m$  и  $1 \dots n$ ;  
 $a$  и  $b$  – размеры плиты, м;  
 $w_{mn}$  – коэффициент ряда, вычисленный по формуле

$$w_{mn} = \frac{q_{mn}}{(D_0 + C_z)}, \quad (17)$$

здесь  $D_0$  – общая цилиндрическая жесткость плиты

$$D_0 = \left[ D_{11} \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 + 2(D_{12} + D_{33}) \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n\pi}{b} \right)^4 \right]; \quad (18)$$

$q_{mn}$  – коэффициент ряда по нагрузке

$$q_{mn} = \frac{16q}{\pi^2 mn} \sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{m\pi \Delta x}{2a} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi \Delta y}{2a}, \quad (19)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – размеры грузовой площадки (см. рис. 2, б).

Максимальный прогиб возникает в точке с координатами  $x = a/2, y = b/2$ .  
 Подставляя эти значения координат в выражение (16), получим

$$w_{\max} = w \left( \frac{a}{2}, \frac{b}{2} \right) = \sum_m \sum_n w_{mn} \sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2}. \quad (20)$$

При вычислении максимального прогиба по формуле (20) необходимо удерживать только нечетные члены ряда  $m = 1, 3, 5, \dots; n = 1, 3, 5, \dots$ . При этом выражение (20) примет вид

$$w_{\max} = w \left( \frac{a}{2}, \frac{b}{2} \right) = \sum_m \sum_n w_{mn}; \quad m, n = 1, 3, 5, \dots \quad (21)$$

Экспериментальные исследования проводились в грунтовом канале Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ). Эксперимент заключался в определении упругого прогиба поверхности двухслойной конструкции, состоящей из слоя щебня фракции 40–70 мм толщиной  $h_1 = 0,2$  м и слоя мелкого песка толщиной  $h_0 = 0,9$  м. На границе раздела слоев была уложена плоская георешетка со стальными волокнами из пружинной проволоки диаметром 0,6 мм. Число проволок в ребре георешетки составляло 3, 6 и 9 штук. Шаг ячейки 50×50, 75×75, 100×100 мм. Щебень отсыпался послойно с уплотнением на заранее уплотненный слой песка. Нагружение осуществлялось через круглый штамп диаметром  $d = 0,33$  м. Нагрузка прикладывалась с помощью гидравлического домкрата ступенями по 10 кН и достигала 50 кН. Схема испытания приведена на рис. 2, а. Прогиб определялся с помощью индикаторов часового типа, установленных на верхней поверхности штампа. Измерения проводились как при нагружении, так и при разгрузке конструкции для выделения упругой составляющей прогиба. В качестве контрольной величины использована экспериментально установленная для неармированной конструкции величина прогиба  $w = 1,46$  мм.

Для сравнения результатов экспериментальных измерений с теоретическими исследованиями был выполнен расчет двухслойной конструкции из щебня и песка: слой щебня толщиной  $h_1 = 0,2$  м с модулем упругости  $E = 68,8$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ . Модуль упругости армированного слоя, вычисленный методом осреднения по Фойгту (правило смесей), составит 509 МПа при представлении сплошной плиты в виде 4 слоев, 562 МПа – 5 слоев, 823 МПа – 10 слоев. Размеры плиты в плане  $a = b = 1,5$  м. Слой песка толщиной  $h_0 = 0,9$  м выполняет роль упругого основания с коэффициентом постели  $C_z = 116\,308$  кН/м<sup>3</sup>. Грузовая площадка в виде квадрата со сторонами  $\Delta_x = \Delta_y = 0,30$  м, равновеликой площади круглого штампа. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $q = 530$  кПа.

При вычислении максимального прогиба по формуле (21) было удержано три члена ряда ( $m = n = 1, 3, 5$ ), что обеспечило достаточную для практических целей точность. Результаты расчетов и сопоставление с экспериментальными данными приведены в таблице.

### Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Размер ячейки, мм	Число армирующих проволок в ребре	Упругий прогиб $w$ , мм		Погрешность, %
		теоретический	экспериментальный	
50×50	3	0,998	0,947	5,39
	6	0,898	1,212	25,79
	9	0,818	0,925	11,57
75×75	3	1,038	0,860	17,15
	6	0,962	0,998	3,61
	9	0,898	0,917	2,07
100×100	3	1,111	0,862	22,41
	6	0,998	1,595	59,81
	9	0,945	0,995	5,30

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что армирование плоской георешеткой со стальными волокнами слоя щебня, лежащего на песчаном основании, позволяет снизить упругий прогиб системы «щебень–песок» более чем на 40 %.

Анализ и сопоставление теоретических и экспериментальных результатов исследования, представленных в таблице, показывает их хорошую сходимость, что является подтверждением адекватности предложенной расчетной модели. Ее суть заключается в том, что слой из зернистого материала, например, щебня, армированный уложенной в его основание георешеткой, можно рассматривать как работающую на изгиб плиту на упругом основании за счет эффекта армирования. Эффект армирования возникает вследствие того, что слой щебня, который фактически является дискретной средой и не воспринимает растягивающих напряжений, включается в работу по всей своей толщине, а не только в сжатой зоне. Это происходит за счет механического зацепления отдельных зерен с георешеткой.

**Заклучение.** Предложенная методика расчета армированного зернистого слоя как двухслойной плиты на упругом основании с использованием технической теории изгиба методом Бубнова–Галеркина приводит к быстро сходящемуся ряду. Это делает возможным применять ее при практических расчетах оснований из зернистых материалов, армированных плоскими георешетками.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джонс К.Д. Сооружения из армированного грунта. М.: Стройиздат, 1989. 280 с.
2. Щербина Е.В. Геосинтетические материалы в строительстве. М.: Изд-во «АСВ», 2004. 112 с.
3. Казарновский В.Д., Мерзликин А.Е., Гладков В.Ю. К оценке области рационального применения армирующих сеток в дорожных одеждах нежесткого типа // Повышение долговечности дорожных конструкций / Тр. Союздорнии. М., 1986. С. 68–75.
4. Баданин А.Н., Колосов Е.С. Определение несущей способности армированного георешеткой грунтового основания // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 4. С. 25–32.
5. Фомин А.П., Коренков А.Б. Экспериментальные исследования по применению полимерных геосеток (плоских георешеток) для армирования слоев дорожных одежд из крупнозернистых материалов // Дороги и мосты. 2008. № 19/1. С. 123–133.
6. Maheshwari P., Chandra S., Basudhar P.K. Modelling of beams on geosynthetic-reinforced granular fill-soft soil system subjected to moving loads // Geosynthetics Intern. 2004. Vol. 11. No. 5. P. 369–376.
7. Гладков В.Ю. К вопросу о методике проектирования армированного щебеночного основания // Повышение долговечности дорожных конструкций / Тр. Союздорнии. 1986. С. 61–67.
8. Кудрявцев С.А., Шишкина К.М., Михайлин Р.Г. Штаповые испытания щебеночных оснований в крупномасштабном лотке // Науч.-техн. проблемы транспорта, промышленности и образования / Тр. Всерос. науч.-практ. конф. 21–23 апреля 2010. В 6 т. Т. 2. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. С. 213–216.
9. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Effect of Reinforcing The Base of Pavement With Steel Geogrid // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 587–589. P. 1137–1140.
10. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Determine The Reinforcement Effect of Gravel Layer on a Sandy Foundation // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 662. P. 164–167.
11. Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // Вестн. СибАДИ. 2015. № 4 (44). С. 80–86.

**Матвеев Сергей Александрович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: dfsibadi@mail.ru  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск  
**Мартынов Евгений Анатольевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: asp\_evq@mail.ru  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск  
**Литвинов Николай Николаевич**, ст. препод.; E-mail: niklitvinov\_23@mail.ru  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск

Получено 05.09.17

**Matveev Sergey Alexandrovich**, DSc, Professor; E-mail: dfsibadi@mail.ru  
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

**Martynov Eugene Anatol'evich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: asp\_evq@mail.ru  
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

**Litvinov Nikolay Nikolaevich**, Senior Lecturer; E-mail: niklitvinov\_23@mail.ru  
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

## **MODELLING AND CALCULATION OF THE REINFORCED BASIS FROM GRANULAR MATERIALS**

The calculation model of the granular layer reinforced with geogrid is submitted as the two-layer plate with rigidly connected layers on the elastic basis. The lower layer models a geogrid. It is presented by a uniform composite orthotropic layer with physicommechanical characteristics significantly different from characteristics of an overlying layer. The basis layer under the reinforced plate is replaced like the coefficient of the bed. Calculation of a multilayered plate on the elastic basis is executed by Bubnov-Galerkina's method. Satisfactory coincidence of calculations results to results of stamp tests of the basis from the crushed stone layer reinforced by geogrid with steel fibers in a polyethylene cover is received.

**Key words:** reinforcement, the discrete basis, geogrid, effect of reinforcing, a plate on the elastic basis, a deflection.

### REFERENCES

1. Dzhouns K.D. Sooruzheniya iz armirovannogo grunta [Construction of reinforced soil]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 280 p. (in Russian)
2. Shcherbina E.V. Geosinteticheskie materialy v stroitel'stve [Geosynthetic materials in construction]. Moscow, ASV, 2004. 112 p. (in Russian)
3. Kazarnovskiy V.D., Merzlikin A.E., Gladkov V.Yu. K otsenke oblasti ratsional'nogo primeneniya armiruyushchikh setok v dorozhnykh odezhdakh nezhestkogo tipa [To the evaluation of the field of rational use of reinforcing meshes in road clothes of non-rigid type]. Povyshenie dolgovechnosti dorozhnykh konstruktsiy: Trudy Soyuzdornii [Improving the durability of road structures: Works of the Soyuzdornii]. Moscow, 1986. Pp. 68–75. (in Russian)
4. Badanin A.N., Kolosov E.S. Opredelenie nesushchey sposobnosti armirovannogo georeshetkoy gruntovogo osnovaniya [Determination of the bearing capacity of a geogrid reinforced soil base]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Engineering and construction magazine]. 2012. No. 4. Pp. 25–32. (in Russian)
5. Fomin A.P., Korenkov A.B. Eksperimental'nye issledovaniya po primeneniyu polimernykh geosetok (ploskikh georeshetok) dlya armirovaniya sloev dorozhnykh odezhd iz krupnozernistykh materialov [Experimental studies on the use of polymeric geogrids (flat geogrids) for reinforcing layers of road clothes from coarse materials]. Dorogi i mosty [Roads and bridges]. 2008. No. 19/1. Pp. 123–133. (in Russian)
6. Maheshwari P., Chandra S., Basudhar P.K. Modelling of beams on geosynthetic-reinforced granular fill-soft soil system subjected to moving loads. Geosynthetics Intern. 2004. Vol. 11. No. 5. Pp. 369–376.
7. Gladkov V.Yu. K voprosu o metodike proektirovaniya armirovannogo shchebenochnogo osnovaniya [On the method of designing a reinforced crushed stone base]. Povyshenie dolgovechnosti dorozhnykh konstruktsiy. Trudy Soyuzdornii [Increasing the durability of road structures. Works of the Soyuzdornii]. 1986. Pp. 61–67. (in Russian)

8. Kudryavtsev S.A., Shishkina K.M., Mikhaylin R.G. Shtampovye ispytaniya shchebenochnykh osnovaniy v krupnomasshtabnom lotke [Stamp testing of crushed stone in a large-scale tray]. Nauchno-tekhnicheskie problemy transporta, promyshlennosti i obrazovaniya. Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Scientific and technical problems of transport, industry and education. The proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. In 6 vol. Vol. 2. Khabarovsk, 2010. Pp. 213–216. (in Russian)
  9. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Effect of Reinforcing The Base of Pavement With Steel Geogrid. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 587–589. Pp. 1137–1140.
  10. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Determine The Reinforcement Effect of Gravel Layer on a Sandy Foundation. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 662. Pp. 164–167.
  11. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoy odezhdyy [Experimental-theoretical studies of the reinforced pavement foundation]. Vestnik SibADI [Papers of the SibADI]. 2015. No. 4 (44). Pp. 80–86. (in Russian)
-

УДК 624.159.4+624.046

И.В. ЖЫВАЛЕВСКАЯ, А.П. КРЕМНЕВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТОВЫХ СВАЙ,  
ВЫПОЛНЯЕМЫХ В ЗАЩИТНОЙ СРЕДЕ  
ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА**

Рассмотрена технология усиления фундаментов существующих зданий винтовыми сваями, выполняемыми в защитной среде цементного раствора. Данный метод усиления фундаментов заключается в применении винтовой металлической сваи, которая погружается в жидкий цементный раствор. Рассмотрено испытание свай, выполняемых в защитной среде цементного раствора, на статическую нагрузку методом релаксации напряжений. Особенностью данного метода является испытание грунтов статической вдавливающей нагрузкой ступенчатым нагружением до заданных значений осадок. Выполнен расчет несущей способности винтовой сваи, выполняемой в защитной среде цементного раствора по результатам статического зондирования. Представлены результаты испытания свай ускоренным методом релаксации напряжений. Установлено, что винтовые сваи, выполняемые в защитной среде цементного раствора, обладают хорошими показателями по несущей способности. Кроме того, возможно их использование в сложных инженерно-геологических условиях, а в частности, при высоком уровне грунтовых вод.

**Ключевые слова:** усиление фундаментов, винтовая свая, расчет, несущая способность, статическое зондирование, метод релаксации напряжений.

С течением времени по ряду причин, будь то ошибки на этапах проектирования или строительства, значительное превышение допустимого уровня нагрузок либо естественный износ, фундаменты существующих зданий нуждаются в реконструкции.

Основными причинами, обуславливающими необходимость усиления оснований и переустройства фундаментов, являются:

- увеличение деформативности и ухудшение условий устойчивости оснований в результате дополнительного увлажнения или ухудшения свойств грунтов в силу изменения инженерно-геологических условий;
- снижение прочности материала фундамента с течением времени в результате эксплуатации здания или сооружения;
- реконструкция здания или сооружения с существенным увеличением нагрузки на фундаменты;
- возведение нового здания рядом с существующим, которое создает дополнительную нагрузку на основание существующего здания (сооружения);
- в результате развития недопустимых осадок, происходящих, как правило, в результате ошибок, допущенных при проектировании здания (сооруже-

ния) вследствие неправильной оценки несущей способности и деформативности основания [1–3].

В настоящее время существует множество методов усиления и реконструкции фундаментов существующих зданий, которые рассматриваются в ряде работ как отечественных, так и зарубежных авторов, например [1–7]. Нами предлагается метод усиления фундаментов с помощью винтовых свай, выполняемых в защитной среде цементного раствора. Он заключается в применении металлических свай с винтовой опорной пластиной, которые погружаются в жидкий цементный раствор. Особенностью данного метода является отсутствие обсадных труб, что позволяет применять его в условиях ограниченности пространства. Кроме того, метод усиления фундаментов с помощью винтовых свай, выполняемых в защитной среде цементного раствора, может быть использован при высоком уровне грунтовых вод. Для определения несущей способности данного вида свай на площадке исследования в промышленной зоне г. Новополюцк были проведены инженерно-геологические изыскания. В процессе исследований были выполнены работы по изучению геологического строения и гидрогеологических условий площадки, определению физико-механических свойств грунтов основания.

Результаты изысканий показали, что площадку слагают следующие грунты:

Техногенные отложения thIV.

ИГЭ-1. Насыпной слой.

Озерно-ледниковые отложения lgIIIрzs.

ИГЭ-2. Песок пылеватый средней прочности.

ИГЭ-3. Суглинок тугопластичный средней прочности.

Моренные отложения gIIIрz.

ИГЭ-4. Супесь моренная пластичная средней прочности.

ИГЭ-5. Супесь моренная пластичная прочная.

Гидрогеологические условия площадки характеризуются наличием грунтовых вод. Грунтовые воды вскрыты в слое песков пылеватых (ИГЭ-2) на глубине 0,6–0,8 м от поверхности. В наиболее влажные периоды года возможно повышение уровня грунтовых вод.

Геологическое строение площадки представлено на инженерно-геологическом разрезе (рис. 1).

Устройство винтовой сваи в защитной среде цементного раствора выполняется в следующей технологической последовательности:

– изначально выполняется бурение скважин полыми шнеками 1 диаметром 300 мм и длиной 1 м до достижения проектной отметки –2,00 м (рис. 2, а);

– после достижения шнеком 1 проектной отметки –2,00 м нижний башмак 2 (долото) открывается и производится заполнение скважины жидким цементным раствором 3 с водоцементным соотношением В:Ц = 1 : 1,25 для первой сваи и В:Ц = 1 : 1,5 для второй сваи через воронку 4 с одновременным подъемом полых шнеков 1 (рис. 2, б). Цементный раствор 3 на данном этапе выполняет функцию бурового раствора для предотвращения обрушения стенок скважин;

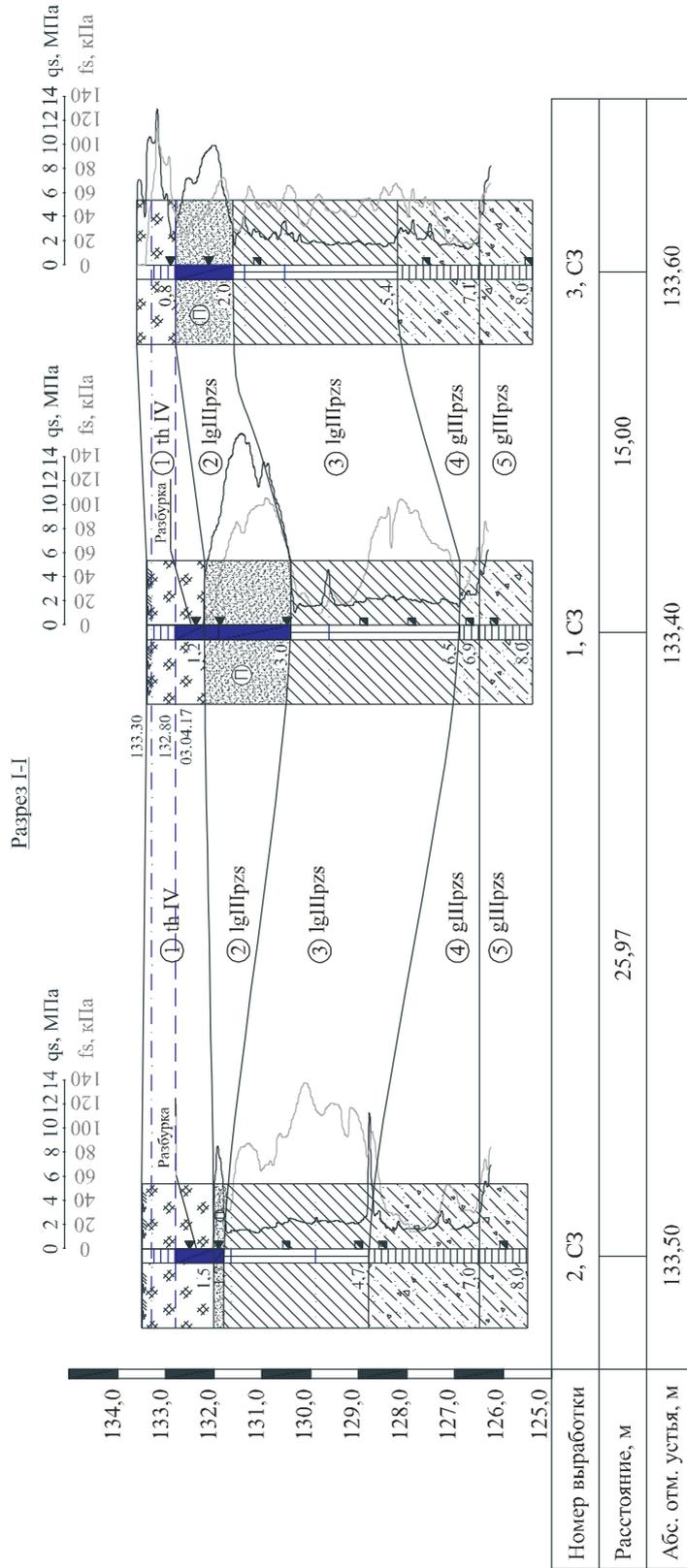


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез:

thIV – техногенные отложения, lgIIIpzs – озерно-ледниковые отложения, gIIIpzs – моренные отложения

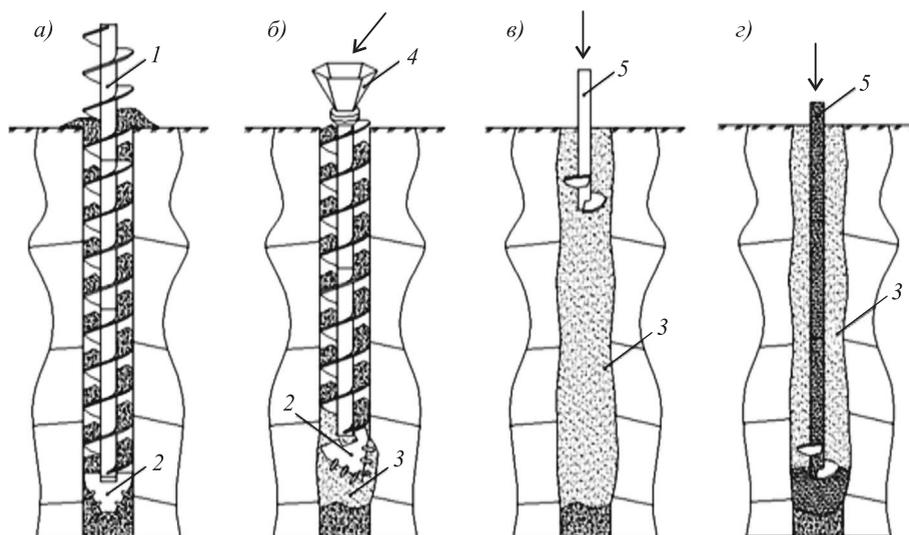


Рис. 2. Технологическая последовательность устройства винтовой сваи в защитной среде цементного раствора

– после извлечения шнека *1* и заполнения скважины цементным раствором *3* в скважину засыпается 10 кг щебня и производится погружение винтовой сваи *5* (рис. 2, *в*). После свободного погружения свая *5* завинчивается обратным вращением бурового станка;

– затем выполняется дополнительная опрессовка забоя скважины путем нагнетания цементного раствора через полость винтовой сваи *5* (рис. 2, *г*) [8, 9].

Устройство винтовых свай в защитной среде цементного раствора подробно рассмотрено в [10].

**Расчет несущей способности винтовой сваи, выполняемой в защитной среде цементного раствора по результатам статического зондирования.** В ходе проведения инженерно-геологических изысканий на площадке строительства в г. Новополоцк было произведено статическое зондирование грунтов, по результатам которого рассчитана несущая способность винтовой сваи.

Расчет был выполнен согласно П2–2000 к СНБ 5.01.01–99<sup>1</sup> по формуле

$$F_u = R_s \cdot A + R_{fs} \cdot h \cdot U,$$

где  $R_s$  – среднее значение предельного сопротивления грунта под нижним концом сваи по данным статического зондирования в рассматриваемой точке определяется в соответствии с П2–2000 к СНБ 5.01.01–99<sup>1</sup> по формуле 4.4,  $R_s = 1,239$  МПа;

$A$  – площадь поперечного сечения сваи,  $A = 0,07065$  м<sup>2</sup> ;

$R_{fs}$  – среднее значение предельного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи по данным статического зондирования в рассматриваемой точке

<sup>1</sup> П2–2000 к СНБ 5.01.01–99 Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов. Введ. 01.07.2001. Минск: Приказ Министерства архитектуры и строительства РБ от 25.06.2000, рег. № 319, с. 26.

определяется в соответствии с ПЗ–2000 к СНБ 5.01.01–99<sup>1</sup> по формуле 4.5,

$$R_{fs} = 0,01125 \text{ МПа};$$

$h$  – глубина погружения сваи в грунт, м;

$U$  – периметр поперечного сечения ствола сваи,  $U = 0,942$  м.

Среднее значение предельного сопротивления сваи в точке статического зондирования:

$$F_u = 1,239 \cdot 0,07065 + 0,01125 \cdot 0,942 \cdot 2 = 0,109 \text{ МН} = 109 \text{ кН}.$$

Несущая способность сваи, работающей на сжимающую нагрузку, по результатам статического зондирования определяем по формуле

$$F_d = \frac{\sum_i F_u}{n \cdot \gamma_g},$$

где  $F_u$  – частное значение предельного сопротивления сваи в точке статического зондирования, кН, определяемое в соответствии с 4.4 настоящего Пособия;

$n$  – количество точек статического зондирования, шт.;

$\gamma_g$  – коэффициент надежности (безопасности) по грунту, устанавливаемый в зависимости от изменчивости полученных частных значений предельного сопротивления сваи в точках статического зондирования ( $F_u$ ) и числа точек при значении доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  в соответствии с требованиями ГОСТ 20522.

$$F_d = \frac{109}{1 \cdot 1,25} = 87,2 \text{ кН}.$$

**Статическое испытание свай.** Полученные образцы винтовых свай после достижения буровым раствором проектной прочности были испытаны статической вдавливающей нагрузкой ускоренным методом релаксации напряжений согласно СТБ 2242–2011<sup>2</sup>. Данный метод испытания проводится путем нагружения сваи ступенями до достижения заданного значения осадки с последующим снятием отсчетов по приборам до условной стабилизации нагрузки (прекращения релаксации нагрузки). Значение осадок на каждой ступени регламентируется СТБ 2242–2011<sup>2</sup> в зависимости от грунтовых условий на боковой поверхности сваи и интервала достигнутых осадок сваи. По боковой поверхности испытанных образцов залегают песчаные грунты средней плотности.

Для проведения испытания была произведена установка и центровка гидравлического домкрата относительно геометрического центра тяжести винтовой сваи, для обеспечения центрального нагружения, выполнен упор под домкрат и установлены индикаторы измерения перемещения часового типа (рис. 3).

<sup>2</sup> СТБ 2242–2011 Грунты. Методы полевых испытаний сваями. Введ. 02.07.2012. Минск: Постановление Госстандарта РБ от 22.12.2011, рег. № 94, с. 37.



Рис. 3. Установка для испытания свай методом релаксации напряжений

Испытания проводились до достижения общей осадки 40 мм. Результаты испытаний представлены на графике зависимости осадки свай от нагрузки: для свай с отношением В:Ц = 1,25 (рис. 4, а) и с В:Ц = 1,5 (рис. 4, б).

После проведения испытания опытные образцы свай были извлечены из грунта, очищены и распилены. На рис. 5, а показана свая с отношением В:Ц = 1,25, на рис. 5, б – В:Ц = 1,5.

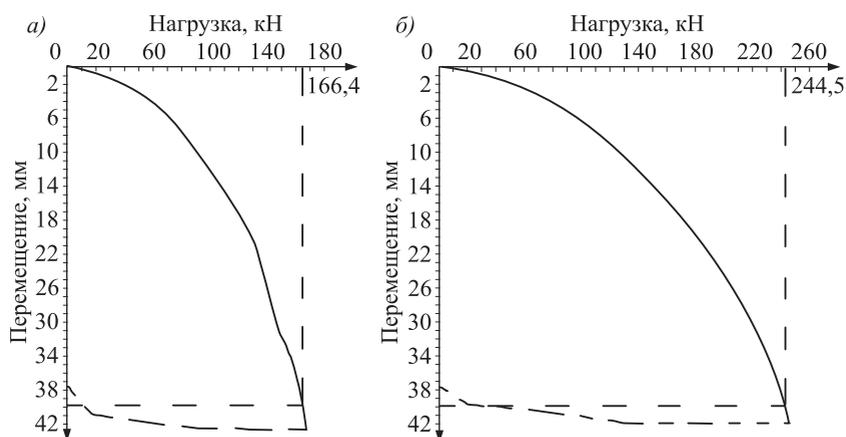


Рис. 4. График зависимости осадки свай от нагрузки

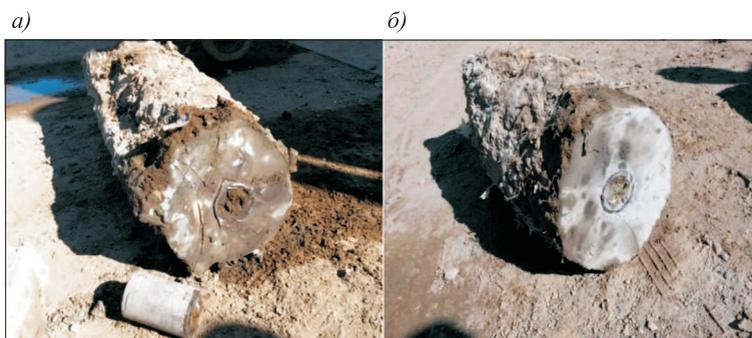


Рис. 5. Опытные образцы свай, извлеченные из грунта

**Заключение.** По результатам испытаний свай ускоренным методом релаксации напряжений нагрузка, при которой осадка сваи достигла 40 мм, составила 166,4 кН для свай с  $V : \Omega = 1 : 1,25$  и 244,5 кН для свай с  $V : \Omega = 1,5$ .

Расчетное значение несущей способности сваи по результатам статического зондирования, составило 87 кН. На основании полученных данных можно сделать вывод, что сваи, выполняемые по данной технологии, обладают высокими показателями несущей способности. Расчетное значение несущей способности сваи и значения, полученные в ходе испытания свай, отличаются более чем в 2 раза. На основе этого можно сделать вывод, что существующие методы расчета несущей способности свай для данного метода их устройства являются неточными. Таким образом, необходимо совершенствовать методику расчета несущей способности винтовой сваи, выполняемой в защитной среде цементного раствора. Кроме того, несущая способность сваи зависит от водоцементного отношения раствора, который используется в процессе устройства сваи. Преимуществом данной технологии усиления фундаментов существующих зданий является возможность применения их в сложных инженерно-геологических условиях, в частности, в местах с высоким уровнем грунтовых вод и в стесненных условиях подвалов реконструируемых зданий и сооружений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полицук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. Нортхемптон: STT; Томск: STT, 2004. 476 с.
2. Никитенко М.И. Буроинъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений: монография. Минск: БНТУ, 2007. 580 с.
3. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 4-е изд., перераб. и доп. М., 2000. 320 с.
4. Titan Injection Pile. An innovation prevails. Design and construction // National Technical Approval. Z-34.15.209, p. 1–43.
5. Deep Soil Mixing (DSM). Improvement of weak soils by the DSM method. A company of Keller Group plc, p. 7.
6. Швец В.Б., Феклин В.И., Гинзбург Л.К. Усиление и реконструкция фундаментов. М.: Стройиздат, 1985. 204 с.
7. Шихов А.Н. Реконструкция гражданских и промышленных зданий: монография. Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2015. 399 с.
8. Кремнев А.П. Усиление фундаментов существующих зданий при помощи металлических свай, устраиваемых в защитной среде цементного раствора // Геотехника Беларуси: наука и практика. Минск: БНТУ, 2013. С. 166–170.
9. Пат. № U9349 Республики Беларусь, Винтовая свая, устраиваемая в защитной среде цементного раствора / А.П. Кремнев, В.В. Андрикович; заявитель и патентообладатель Учреждение образования «Полоцкий государственный университет» № 20121154; заявл. 26.12.2012; опубл. 30.08.2013.
10. Жывалевская И.В. Технология усиления фундаментов существующих зданий винтовыми сваями, выполняемыми в защитной среде цементного раствора // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства / сб. науч. ст. Гродно: ГрГУ, 2017. С. 99–101.

**Жывалевская Ирина Викторовна**, студ., препод.

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Республика Беларусь

**Кремнев Александр Павлович**, канд. техн. наук, доц.  
Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

Получено после доработки 04.09.17

**Zhyvalevskaya Irina Viktorovna**, Undergraduate, Lecturer  
Yanko Kupala State University of Grodno, Republic of Belarus  
**Kremnev Alexander Pavlovich**, PhD, Ass. Professor  
Polotsk State University, Republic of Belarus

## **DETERMINATION OF THE BEARING CAPACITY OF SCREW PILES, EXECUTED IN THE PROTECTIVE ENVIRONMENT OF CEMENT MORTAR**

The technology of strengthening of foundations of existing buildings by screw piles, executed in the protective environment of the cement mortar considered in this article. In this method use of metal screw piles, which is immersed in a liquid cement mortar. Reviewed test piles to be performed in the protective environment of the cement mortar on the static load method of stress relaxation. The peculiarity of this method is to check of soil static load on the speed loading and to specified values of a precipitate. The calculation of the bearing capacity of screw piles, executed in the protective environment of cement mortar according to the results of the static sounding, had made. The results of test piles accelerated method of stress relaxation was presented. It is established that the screw piles, performed in the protective environment of cement mortar, have good indicators of bearing capacity. In addition, it is possible to use them in complex engineering-geological conditions, and in particular at a high level of groundwater.

**Key words:** strengthening of foundations, screw piles, settlement, bearing capacity, static sensing, the method of stress relaxation.

### REFERENCES

1. Polishchuk A.I. Osnovy proektirovaniya i ustroystva fundamentov rekonstruiemykh zdaniy [Basics of design and arrangement of foundations of building under reconstruction]. Northampton, STT; Tomsk, STT, 2004. 476 p. (in Russian)
2. Nikitenko M.I. Buroin'ektsionnye ankery i svai pri stroitel'stve i rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy: monografiya [Buroinjection anchors and piles in the construction and reconstruction of buildings and structures: monography]. Minsk: BNTU, 2007. 580 p. (in Russian)
3. Kononov P.A. Osnovaniya i fundamenty rekonstruiemykh zdaniy [Bases and foundations of reconstructed buildings]. Moscow, 2000. 320 p. (in Russian)
4. Titan Injection Pile. An innovation prevails. Design and construction. National Technical Approval. Z-34.15.209, p. 1–43.
5. Deep Soil Mixing (DSM). Improvement of weak soils by the DSM method. A company of Keller Group plc, p. 7.
6. Shvets V.B., Feklin V.I., Ginzburg L.K. Usilenie i rekonstruktsiya fundamentov [Strengthening and reconstruction of foundations]. Moscow, Stroyizdat, 1985. 204 p. (in Russian)
7. Shikhov A.N. Rekonstruktsiya grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniy: monografiya [Reconstruction of civil and industrial buildings: monography]. Perm', 2015. 399 p. (in Russian)

8. K r e m n e v A.P. Usilenie fundamentov sushchestvuyushchikh zdaniy pri pomoshchi metallicheskih svay, ustraivaemykh v zashchitnoy srede tsementnogo rastvora [Strengthening foundations when using metal piles located in the protective environment of cement mortar]. Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika [Geotechnics of Belarus: science and practice]. Minsk, BNTU, 2013. Pp. 166–170. (in Russian)
  9. Pat. No. U9349 Republic of Belarus, Vintovaya svaya, ustraivaemaya v zashchitnoy srede tsementnogo rastvora [Screw pile, arranged in the protective environment of cement mortar]. A.P. Kremnev, V.V. Andrikovich; applicant and patentee of PGU. No. 20121154; appl. 26.12.2012; publ. 30.08.2013. (in Russian)
  10. Z h y v a l e v s k a y a I.V. Tekhnologiya usileniya fundamentov sushchestvuyushchikh zdaniy vintovymi svayami, vypolnyaemymi v zashchitnoy srede tsementnogo rastvora [Technology of strengthening the foundations of existing buildings with screw piles, performed in the protective environment of cement mortar]. Traditsii, sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva [Traditions, modern problems and prospects for the development of construction]. Grodno, GrSU, 2017. Pp. 99–101. (in Russian)
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.327:666.973.6

**В.Д. ЧЕРКАСОВ, В.И. БУЗУЛУКОВ, А.И. ЕМЕЛЬЯНОВ, Е.В. КИСЕЛЕВ**

### **ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПЕНОБЕТОНА, ПОЛУЧАЕМОГО ИЗ СУХИХ СМЕСЕЙ**

Проведены исследования прочностных характеристик неавтоклавных пенобетонов плотностью 400–800 кг/м<sup>3</sup>, полученных из сухих смесей, в зависимости от количества пенообразователя. Показана возможность использования в качестве эффективного и экологичного порообразователя сухого концентрата белковой природы, полученного из отходов производства антибиотиков. Исследовано влияние количества пенообразующей добавки на сроки схватывания вяжущего, прочность цементного камня, кинетику набора пластической прочности пенобетонной массы. С целью решения задачи по интенсификации процессов структурообразования ячеистого бетона изучено влияние таких добавок, как сульфат натрия, хлорид кальция, силикат натрия на пластическую прочность пенобетонной массы.

**Ключевые слова:** пенобетон, сухие смеси, пенообразователь, добавки, прочность.

В последние годы появилось большое разнообразие рецептурных композиций и различных добавок, технологических приемов и оборудования, позволяющих совершенствовать производство пенобетонных изделий [1–6]. Одним из перспективных направлений улучшения технологии получения неавтоклавных пенобетонов является их производство на основе сухих смесей. Применение сухих смесей позволяет приготовить ячеистый бетон по одностадийной технологии без специального дорогостоящего оборудования и непосредственно на строительной площадке. В результате чего можно добиться сокращения сроков строительства и снижения его стоимости.

Кроме того, необходимость применения сухих смесей диктуется изменением концепции в строительном производстве, а именно сокращением объемов крупнопанельного строительства и переходом на малоэтажное строительство. Учитывая рассредоточенность населения, их использование для домостроения в сельской местности наиболее целесообразно.

Известно, что возможности получения пенобетонов с заданными свойствами во многом определяются качеством используемого пенообразователя. Основные требования, предъявляемые к пенообразователям, – это высокая

© Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В., 2017

кратность и стойкость получаемой пены в растворе, а также отсутствие негативного влияния на свойства конечного продукта. Кратность пены должна составлять не менее 15. Стойкость технической пены характеризуется коэффициентом стойкости пены в цементном тесте (С) при лабораторных исследованиях, а в производственных условиях коэффициентом использования пены. Значения этих коэффициентов позволяют определить не только совместимость технической пены со средой твердеющего раствора, но и показывают объемную долю использования пены в приготовлении поризованного раствора. Получаемую техническую пену можно считать удовлетворительной, если значение С от 0,8 до 0,85, а качественной при С = 0,95.

В качестве эффективного и экологичного порообразователя был использован сухой концентрат белковой природы, полученный нами из отходов производства антибиотиков [7–9]. Применение данного пенообразователя позволяет получить устойчивую пену кратностью 23, с коэффициентом стойкости в цементном тесте, равным 0,9.

**Таблица 1. Влияние состава сухой смеси на свойства пенобетона**

Плотность пенобетона, кг/м <sup>3</sup>	Материалы				Прочность пенобетона при сжатии, МПа
	цемент, кг	мел, кг	пенообразователь <sup>1</sup>	сульфат железа <sup>2</sup>	
400	255	109	1,8	19	0,9
500	318	137	1,64	19	1,4
600	382	163	1,54	19	1,9
700	445	191	1,49	19	2,6
800	509	218	1,4	19	3,5

<sup>1</sup> Пенообразователь в сухой смеси берется от массы цемента.

<sup>2</sup> Сульфат железа используется во всех составах в качестве добавки, стабилизирующей пену, и берется от массы пенообразователя.

Нами получены сухие смеси, позволяющие готовить неавтоклавные пенобетоны плотностью 400–800 кг/м<sup>3</sup>, составы которых представлены в табл. 1. При этом технология производства изделий достаточно проста: затворяют сухую смесь определенным количеством воды; полученный раствор перемешивают в скоростном смесителе в течение 3–5 мин. Затем пенобетонную смесь выдерживают при нормально-влажностных условиях.

Однако применение в сухих смесях поверхностно-активных веществ, необходимых для поризации бетонной смеси, приводит к значительному замедлению процессов схватывания и твердения цементной системы (рис. 1, табл. 2). Наблюдаемые зависимости, по-видимому, обусловлены адсорбцией молекул белков на цементе, в ре-

**Таблица 2. Зависимость прочности цементного камня от количества пенообразователя**

Количество пенообразователя, % от массы цемента	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте			
	1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
0	7,7	21,8	27,6	37,1
0,5	5,4	16,1	29	38,4
1	3,3	14,7	24,8	36,1
1,5	1,2	12,9	23,1	35,3
2	0,6	9,9	20,1	33,2
2,5	0,53	6,5	17,5	30,9

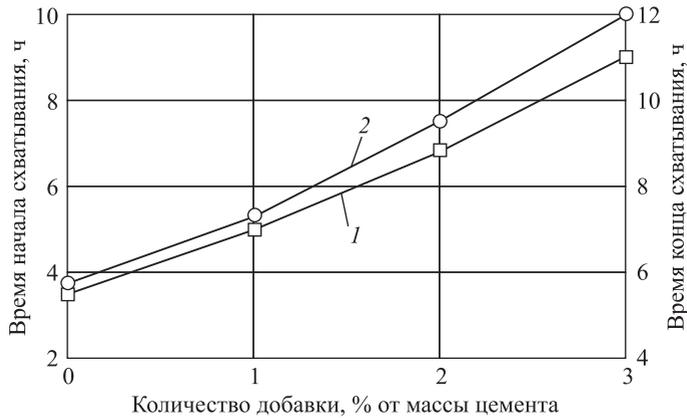


Рис. 1. Влияние количества пенообразующей добавки на сроки схватывания цемента  
1, 2 – сроки схватывания цемента: начало, конец

зультате чего замедляется скорость его гидратации. Подтверждение этому – увеличение сроков схватывания цемента, а также уменьшение прочности цементного камня на ранних стадиях твердения с повышением дозировки пенообразователя.

Замедление набора пластической прочности ячеисто-бетонного сырца в присутствии белковой пенообразующей добавки приводит к повышению продолжительности технологического цикла изготовления изделий. Поэтому возникает такая технологическая проблема, как интенсификация процессов структурообразования ячеистого бетона. Эффективным способом решения этой задачи является введение в сухую смесь различного рода химических добавок [10].

В данной работе в качестве ускорителей твердения пенобетонной смеси были испытаны сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), хлорид кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) и силикат натрия в порошкообразном виде. Оптимальное количество добавок в сухой смеси следующее: сульфат натрия и хлорид кальция – 1,5 %, силикат натрия – 3 % (от массы цемента). Кинетика набора пластической прочности пенобетонной массы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Пластическая прочность пенобетона при содержании в сухой смеси добавок  
1 – без добавок; 2 – сульфат натрия; 3 – хлорид кальция, 4 – силикат натрия

Из анализа данных рис. 2 следует, что силикат натрия является наиболее эффективным ускорителем набора пластической прочности пенобетона, которая достигает значения  $300\text{--}350\text{ г/см}^2$  (пластическая прочность ячеисто-бетонной смеси, при которой осуществляется расформовка бетона-сырца и его разрезка) через 11 ч твердения материала при нормально-влажностных условиях. При добавлении в сухую смесь сульфата натрия и хлорида кальция расформовку ячеистого бетона-сырца можно осуществлять через 18–19 ч твердения. Пенобетон, полученный из сухой смеси, в состав которой не входят ускорители твердения, следует расформовывать через 25 ч твердения.

**Выводы.** 1. Использование в сухой смеси силиката натрия позволяет значительно уменьшить время выдержки пенобетона в формах и тем самым сократить продолжительность технологического цикла изготовления изделий.

2. Разработанные сухие смеси могут быть использованы при производстве мелкоштучных изделий, при устройстве полов, а также при возведении зданий и сооружений из монолитного пенобетона, использование которого позволит снизить энергетические и трудовые затраты при строительстве и сократить его продолжительность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // Строит. материалы. 2017. № 7. С. 20–24.
2. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Савенко В.П., Карпушенков С.А. Сухая смесь для получения жаростойкого пенобетона // Строит. материалы. 2017. № 7. С. 25–29.
3. Кожухова Н.И., Войтович Е.В., Череватова А.В., Жерновский И.В., Алехин Д.А. Термостойкие ячеистые материалы на основе композиционных гипсокремнеземных вяжущих // Строит. материалы. 2015. № 6. С. 65–69.
4. Бессонов И.В., Шигапов Р.И., Бабков В.В. Теплоизоляционный пеногипс в малоэтажном строительстве // Строит. материалы. 2014. № 7. С. 9–13.
5. Бартењева Е.А., Машкин Н.А. Исследование свойств модифицированного пенобетона // Строит. материалы. 2017. № 10. С. 36–40.
6. Бузулуков В.И., Черкасов В.Д., Емельянов А.И., Сыркина Н.П., Гарцева С.О. Белковый пенообразователь для пенобетонов // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 7. С. 23–27.
7. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И. Пенообразователь для цементных систем // Вестн. Волж. регион. отд-ния РААСН. 2015. Вып. 18. С. 182–183.
8. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И. Строительные биотехнологии и биокomпозиты. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. 192 с.
9. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В. Пенобетоны на основе пенообразователя из белков микробного синтеза. Получение и применение в строительстве. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. 100 с.
10. Дворкин Л.И., Дворкин Л.О. Основы бетоноведения. СПб.: ИнфоОл, 2006. 690 с.

**Черкасов Василий Дмитриевич**, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: cherkasov-vd@yandex.ru

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

**Бузулуков Виктор Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: buzulukov-v@mail.ru

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

**Емельянов Алексей Иванович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: emeljanovai@list.ru

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

**Киселев Евгений Викторович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: keva30@rambler.ru

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 14.09.17

**Cherkasov Vasily Dmitrievich**, Corr. Member of RAASN, DSc, Professor;

E-mail: cherkasov-vd@yandex.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Buzulukov Viktor Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: buzulukov-v@mail.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Emel'yanov Aleksey Ivanovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: emeljanovai@list.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Kiselev Eugene Viktorovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: keva30@rambler.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

## **INCREASING OF PLASTIC STRENGTH OF FOAM CONCRETE OBTAINED FROM DRY MIXES**

The strength characteristics of non-autoclave foam concrete with a density of 400–800 kg/m<sup>3</sup>, obtained from dry mixtures, are investigated, depending on the amount of foaming agent. The possibility of using a dry concentrate of protein nature, obtained from waste products of antibiotic production, is shown to be effective and ecological pore-forming agent. The influence of the amount of foaming additive on the setting time of the binder, the strength of the cement stone, the kinetics of the plastic strength set of the foam concrete mass was investigated. In order to solve the task of integrating the processes of structure formation of cellular concrete, the influence of such additives as sodium sulfate, calcium chloride, sodium silicate on the plastic strength of the foam concrete mass has been studied.

**Key words:** foam concrete, dry mix, foam concentrate, additives, durability.

### REFERENCES

1. Slavcheva G.S., Chernyshov E.M., Novikov M.V. Teploeffektivnye penobetonny novogo pokoleniya dlya maloetazhnogo stroitel'stva [Thermal efficient foam concrete of new generation for low-rise construction]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2017. No. 7. Pp. 20–24. (in Russian)
2. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Savenko V.P., Karpushenkov S.A. Sukhaya smes' dlya polucheniya zharostoykogo penobetona [Dry mixture to obtain a heat-resistant foam]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2017. No. 7. Pp. 25–29. (in Russian)
3. Kozhukhova N.I., Voytovich E.V., Cherevatova A.V., Zhernovskiy I.V., Alekhin D.A. Termostoykie yacheistye materialy na osnove kompozitsionnykh gipsokremnezemnykh vyazhushchikh [Heat resistant wire mesh materials on the basis of composite binders gipsokartonnykh]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2015. No. 6. Pp. 65–69. (in Russian)

4. Bessonov I.V., Chigapov R.I., Babkov V.V. Teploizolyatsionnyy penogips v maloetazhnom stroitel'stve [Heat-insulating foamed gypsum in low-rise construction]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2014. No. 7. Pp. 9–13. (in Russian)
  5. Barten'eva E.A., Machkin N.A. Issledovanie svoystv modifitsirovannogo penobetona [Investigation of the properties of modified foam concrete]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2017. No. 10. Pp. 36–40. (in Russian)
  6. Buzulukov V.I., Cherkasov V.D., Emel'yanov A.I., Syrkina N.P., Gartseva S.O. Belkovyy penoobrazovatel' dlya penobetonov [Protein Converter for foam concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 7. Pp. 23–27. (in Russian)
  7. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emel'yanov A.I. Penoobrazovatel' dlya tsementnykh sistem [Foaming agent for cement systems]. Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya RAASN [Bulletin of the Volga regional office of the Russian Academy of architecture and construction sciences]. 2015. No. 18. Pp. 182–183. (in Russian)
  8. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I. Stroitel'nye biotekhnologii i biokompozity [Construction of biotechnology and biocomposites]. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2016. 192 p. (in Russian)
  9. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emel'yanov A.I., Kiselev E.V. Penobetonny na osnove penoobrazovatelya iz belkov mikrobnogo sinteza. Poluchenie i primenenie v stroitel'stve. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2011. 100 p. (in Russian)
  10. Dvorkin L.I., Dvorkin L.O. Osnovy betonovedeniya [Concrete science]. St. Petersburg, 2006. 690 p. (in Russian)
-

УДК 691.33 : 625.7.06

**А. ХАДБААТАР, Н.А. МАШКИН, Н.Г. СТЕНИНА, В.С. МОЛЧАНОВ,  
И.И. ПЕТРОВ, Н.Е. ЗИБНИЦКАЯ****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ  
ТЭЦ МОНГОЛИИ В АВТОДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Представлены результаты исследования золошлаковых отходов Эрдэнэтской и Дарханской ТЭЦ Монголии как компонентов грунтозолобетонных для укрепления верхних слоев земляного полотна автомобильных дорог, устройства оснований дорожных одежд и обочин. Актуальность темы связана с растущей потребностью автодорожного строительства в местных материалах, с одновременной утилизацией золошлаковых отходов. В работе были использованы современные методы физико-химических исследований материалов: сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ и порошковая рентгенография. Золо Эрдэнэтской и Дарханской ТЭЦ имеют кислый высокоуглеродистый состав, содержат мало кальция и вследствие этого не обладают заметными вяжущими свойствами. При применении таких зол в грунтозолобетонах для укрепления верхних слоев земляного полотна, устройства оснований дорожной одежды и обочин автомобильных дорог рекомендуется использовать добавки цемента, а также известки или природного известняка. Это позволяет повысить прочность грунтозолобетона до 4,7 МПа при введении 20–30 % золы и 7–10 % цемента. В случае замены 50 % цемента известняком грунтозолобетон набирает прочность до 3,5 МПа. Научная новизна результатов связана с доказательством возможности использования золошлаковых отходов Эрдэнэтской и Дарханской ТЭЦ Монголии в дорожных грунтозолобетонах и определении оптимальных составов смесей.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновские методы, химический состав, вяжущие свойства, дорожные грунтозолобетоны.

**1. Введение и объект исследования.** Среди промышленных отходов одно из первых мест по объемам занимают золы и шлаки от сжигания твердых видов топлива (уголь разных видов, горючие сланцы, торф) на тепловых электрических станциях (ТЭЦ). На многих ТЭЦ ежегодный выход золы и шлака превышает 1 млн т, а на станциях, сжигающих многозольное топливо, достигает 5 млн т. Содержание золошлаковых отходов требует значительных затрат, в то же время в строительстве используется не более 7 % запасов золошлаковых отходов (ЗШО).

Золо и шлаки ТЭЦ являются материалами, прошедшими высокотемпературную обработку и получившими специфические свойства, предопределяющие возможность их эффективного использования в производстве различных строительных материалов, в том числе и для дорожного строительства<sup>1</sup> [1–8].

<sup>1</sup> ОДМ 218.2.031–2013 «Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве». Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). М.: Информатодор, 2013. 75 с.

© Хадбаатар А., Машкин Н.А., Стенина Н.Г., Молчанов В.С., Петров И.И., Зибницкая Н.Е., 2017

Например, в Новосибирской области зола используется при производстве товарного бетона, бетонных блоков, тротуарной плитки, при монолитном строительстве и в качестве компонента в сухих строительных смесях.

Новосибирские ТЭЦ используют канско-ачинские и кузнецкие угли, получая в результате золы и шлаки с разными свойствами. В табл. 1 представлен химический состав зол кузнецких углей различных ТЭЦ Сибирского региона.

**Таблица 1. Химический состав зол-уноса ТЭЦ Кузбасса**

Наименование ТЭС	Химический состав, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	П.п.п.	M <sub>к</sub>	M <sub>с</sub>
Южно-Кузбасская ГРЭС (старый отвал)	65–67	24–30	5–7	2–5	1–1,5	0,02–0,2	9–15	19,2	2,3
Южно-Кузбасская ГРЭС (новый отвал)	58–68	17–26	6–10	3–3,5	0,8–2	0,2–0,7	8–14	18,3	3
Томь-Усинская ГРЭС	59–63	18–25	8–10	3–5	1–3	0,2–0,3	11–25	13,7	2,8
Кузнецкая ТЭЦ	56,2	26,3	9,13	2,95	3	0,79	14,18	13,8	2,1
Кемеровская ГРЭС	58,3	22,2	11,16	3,44	2,26	0,34	11,54	11,8	2,4
ТЭЦ-5 г. Новосибирска	54,2–59,1	19,8–21,6	3,5–4,6	3–5	1–3	0,7–1,1	0,8–5,8	12–13	2,2–2,4

Примечание. M<sub>к</sub> – модуль кислотности, M<sub>с</sub> – силикатный модуль, п.п.п. – потери при прокаливании.

Как видно из табл. 1, кислые золы (малокальциевые) отличаются нестабильностью химического состава, содержат большое количество кремнезема и малое количество оксида кальция, поэтому не обладают самостоятельными вяжущими свойствами. Наиболее стабильной по химическому составу является зола ТЭЦ-5 г. Новосибирска, обладающая также наименьшим количеством несгоревших органических остатков (п.п.п.). Кислые золы ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4 г. Новосибирска отличаются повышенным содержанием несгоревших частиц (п.п.п. 10–20 %) и поэтому без специальной обработки мало пригодны в производстве бетонов.

Использование ЗШО ТЭЦ в развитых странах мира составляет более 60 %. Широко распространена практика строительства заводов при ТЭЦ по полной переработке ЗШО в различные строительные материалы. Если в России объем перерабатываемых ЗШО составляет около 7 %, то в Монголии всего 3 % от их текущего выхода. Например, из 20–35 тыс. т ЗШО Дарханской и Эрдэнэтской ТЭЦ (Монголия) используется в строительстве не более 1 тыс. т в год.

Причина этого кроется в недостаточной изученности ЗШО Монголии, отсутствии проверенных регламентированных составов строительных смесей с использованием ЗШО и налаженного золоотбора, а также адаптированных для условий Монголии технологий комплексной переработки ЗШО

в строительные материалы. При этом основой целенаправленного использования ЗШО Монголии является знание их химического и минерально-фазового состава.

## 2. Результаты физико-химических исследований ЗШО Монголии и обоснование технологий их использования в дорожном строительстве.

ЗШО Дарханской и Эрдэнэтской ТЭЦ Монголии были изучены методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с рентгеноспектральным микроанализом и рентгенофазового анализа (Институт катализа СО РАН). Использовались приборы: сканирующий электронный микроскоп «JSM-6460 LV» с приставкой INCA Oxford Instruments для рентгеноспектрального микроанализа и рентгеновский дифрактометр Bruker D-8 Advance (Германия).

По данным комплекса методов ЗШО обеих ТЭЦ имеют очень близкий минерально-фазовый и химический состав. На рис. 1 показаны данные исследования ЗШО Дарханской ТЭЦ с помощью СЭМ, рентгеноспектрального микроанализа (рис. 2), а также рентгенограммы зол (рис. 3). Соответ-

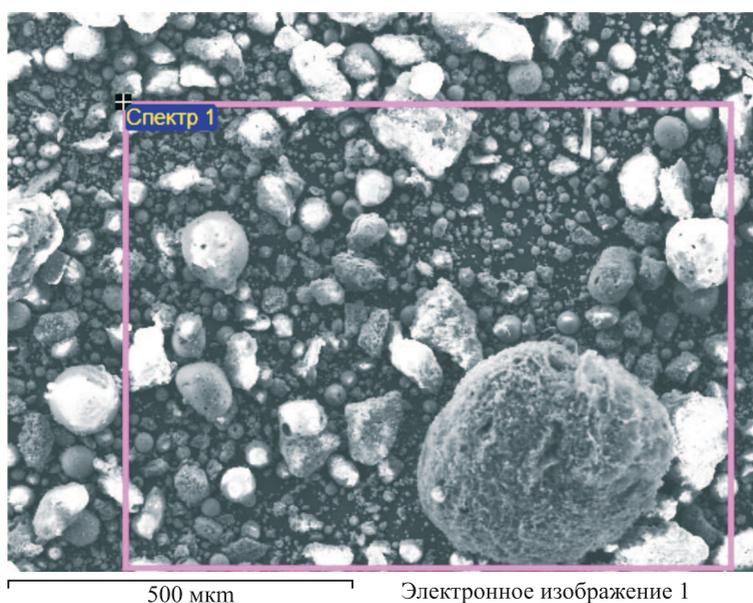


Рис. 1. СЭМ-изображение ЗШО Дарханской ТЭЦ

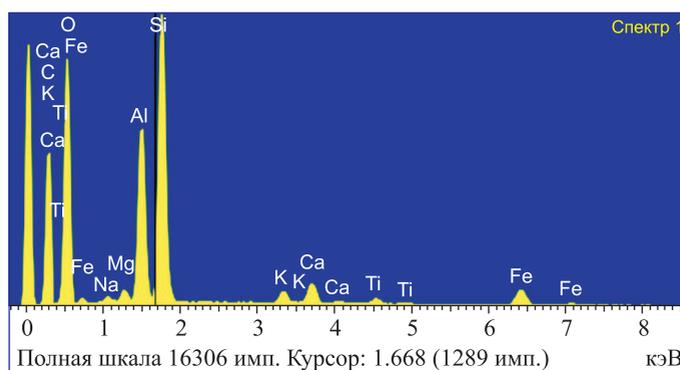


Рис. 2. Спектр рентгеноспектрального микроанализа ЗШО Дарханской ТЭЦ

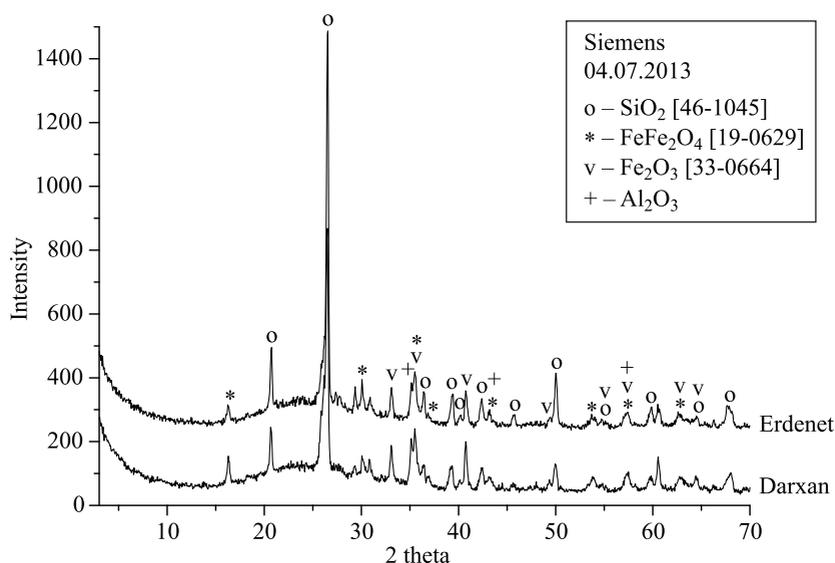


Рис. 3. Рентгенограммы ЗШО Дарханской и Эрдэнэтской ТЭЦ

Таблица 2. Состав образца ЗШО Дарханской ТЭЦ

Элемент	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Вес. %	22,60	49,80	0,29	0,56	7,49	12,36	0,69	1,41	0,52	4,31
Атом. %	31,95	52,87	0,21	0,39	4,71	7,47	0,30	9,60	0,18	1,31

ствующий элементный состав образца ЗШО Дарханской ТЭЦ представлен в табл. 2.

По результатам рентгеноспектрального микроанализа ЗШО Дарханской и Эрдэнэтской ТЭЦ – высокоуглеродистые, малокальциевые. В Дарханской золе среднее содержание Ca – 0,95 % (от 0,28 до 7,41 %); в Эрдэнэтской – среднее содержание Ca – 1,41 %. Частицы круглой формы на СЭМ-изображениях представляют собой глобулы сажи (чистый углерод). Остальные фазы – это в основном окислы Fe, Al, Si, Mg, часто в виде шпинели ( $FeAl_2O_4$  или  $MgAl_2O_4$ ). На СЭМ-изображениях хорошо видно распределение железа, оно имеет ярко-белый контраст.

Данные рентгенофазового анализа (рис. 3) показывают близкое соответствие фазового состава ЗШО ТЭЦ Дархана и Эрдэнэта. Это же следует из данных рентгеноспектрального микроанализа. Оба вида ЗШО имеют кислый (малокальциевый), высокоуглеродистый состав. Такие ЗШО, содержащие мало кальция, имеют низкие вяжущие свойства. Следовательно, они будут иметь хорошее сцепление только с теми грунтами, в которых достаточно соединений кальция (высокоизвестковый грунт). В Монголии такие грунты встречаются чрезвычайно редко. Поэтому при применении исследованных ЗШО в грунтозолобетонах для устройства оснований автомобильных дорог придется использовать добавки цемента, извести или природного известняка [9, 10].

Данный технологический вывод основан на фундаментальных данных об аквакомплексе  $[2SiO_3-OH_2-M^{n+}M^{m+}]$  (где  $M^{n+}$  – одно- и двухвалентные

катионы:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и др.,  $\text{M}^{m+}$  – многовалентные катионы:  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^3$  и др.) как решении проблемы структурно-химического связывания воды в алюмосиликатных системах [10]. Структурные позиции в аквакомплексе могут замещаться всеми элементами таблицы Менделеева. Исключением является Ca (также Sr и Ba), который из-за особенностей строения своих внешних электронных оболочек не может входить в аквакомплекс. Это свойство обуславливает особую роль кальция в эволюции как живой, так и минеральной материи. Показано [9,10], что именно это свойство является причиной схватывания, твердения и упрочнения в системах C(Ca) – S(Si) – H ( $\text{H}_2\text{O}$ ) [10]. Таким образом, основой природы вяжущих свойств в C – S – H системе является реализация антагонистических свойств Ca и Si по отношению к связыванию с водой.

Возможности использования цемента и извести в дорожном строительстве Монголии ограничены высокой стоимостью и малыми объемами их местного производства. Поэтому исследования были сосредоточены на применении известняка в качестве компонента дорожных грунтозолобетонов.

Химический состав известняков месторождений Монголии (г. Дархан), определенный методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа, представлен в табл. 3.

**Таблица 3. Химический состав дарханских известняков (Монголия)**

Месторождение	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	Cl	CaO	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	SrO
Компания «Эрэл»	0,36	1,23	0,38	0,53	–	0,09	0,09	53,48	–	0,13	0,31
Гора Буурал	0,16	19,48	1,49	3,44	0,09	0,37	0,06	29,61	0,08	0,62	–

### **3. Результаты физико-механических испытаний грунтозолобетонов.**

В табл. 4 и 5 приведены результаты испытаний образцов грунтозолобетона (7,07×7,07×7,07 см) на основе супеси (содержит 5,5–7 % глинистых частиц, Дархан) и ЗШО Дарханской ТЭЦ, твердевшего на пористом основании до 28 сут, с использованием цементного вяжущего ЦЕМ II/A-III 32,5Н (ПЦ400 Д20) без добавок (см. табл. 4) и с добавками известняка (табл. 5), по ГОСТ 5802–86 (2002) «Растворы строительные. Методы испытаний».

**Таблица 4. Результаты лабораторных испытаний грунтозолобетона с добавкой портландцемента**

№ смеси	Состав, мас. %			Вода, % (осадка конуса 8 см)	Прочность при сжатии, МПа (28 сут)
	цемент (ПЦ 400)	зола (Дархан)	грунт (супесь)		
1	2	3	4	5	6
1	10	27	63	30	4,7
2	10	25	65	30	4,3
3	10	20	70	30	4,3
4	10	18	72	30	4,7
5	9	28	63	28	4,6
6	9	25	66	28	4,3
7	9	22	69	28	4,3

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6
8	9	20	71	28	4,6
9	8	27	65	26	4,3
10	8	25	67	26	4,3
11	8	22	70	26	4,5
12	8	20	72	26	4,3
13	7	30	63	24	4,3
14	7	29	64	24	4,4
15	7	28	65	24	4,2
16	–	30	70	23	0,9

Таблица 5. Результаты лабораторных испытаний грунтозолобетона с добавкой портландцемента и известняка

№ смеси	Состав, мас. %				Вода, % (осадка конуса 8 см)	Прочность при сжатии, МПа (28 сут)
	цемент (ПЦ 400)	известняк («Эрэл»)	зола (Дархан)	грунт (супесь)		
1	5	5	27	63	27	3,5
2	5	5	25	65	27	3,3
3	5	5	20	70	27	3,2
4	5	5	18	72	27	3,0
5	4	6	28	63	26	3,0
6	4	6	25	66	26	2,9
7	4	6	22	69	26	2,9
8	3	7	20	70	25	2,6
9	3	7	27	65	25	2,5
10	3	7	25	67	25	2,5

**4. Заключение.** Результаты испытаний образцов показали, что грунтозолобетон на основе ЗШО Дарханской ТЭЦ набирает прочность до 4,7 МПа при введении 20–30 % золы и 7–10 % цемента (см. табл. 4). Бесцементный состав имеет прочность менее 1 МПа. В случае замены 50 % цемента известняком грунтозолобетон набирает прочность до 3,5 МПа (табл. 5), что свидетельствует о перспективности применения грунтозолобетонных составов с добавками известняков при устройстве оснований дорожных одежд и обочин автомобильных дорог Монголии.

В соответствии с теорией аквакомплекса [10] можно рассчитывать на еще более высокие показатели прочности грунтозолобетонных составов, если вводить в их состав природные  $C - S$  (силикаты кальция) минералы, значительные запасы которых имеются в отвальных материалах угольных разрезов. Исследования в этом направлении проводятся в НГАСУ (Сибстрин) и НГТУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко Г.И., Фок Н.А. Исследование возможности применения низкокальциевых золошлаковых отходов в растворах и мелкозернистых бетонах // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы V Всерос. науч.-практ. конф. 2015. С. 336–339.
2. Овчаренко Г.И., Гильмияров Д.И., Викторов А.В., Фок Н.А. Новая технология переработки кислых золошлаковых отходов ТЭЦ в строительные материалы // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 10 (646). С. 14–19.
3. Овчаренко Г.И., Хижинкова Е.Ю., Горн К.С. Влияние активации цементно-зольных композиций на прочность камня // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 6. С. 9–13.
4. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction // Procedia Engineering 2. Ser. «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016». 2016. P. 1558–1562.
5. Sirotiyuk V.V., Ivanov Y.V., Shevtsov V.R. Monitoring results of an experimental area of roadbed made of ash-and-slag mixture // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: Материалы IV Междунар. науч.-практ. семинара. 2012. С. 179–181.
6. Сиротюк В.В., Лунев А.А., Иванов Е.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна // Автомоб. дороги. 2016. № 6. С. 72.
7. Лунев А.А., Сиротюк В.В. Применение золошлаковых смесей для вертикальных планировок и строительства городских дорог // Техника и технологии строительства. 2015. Т. 1. С. 24–31.
8. Применение зол уноса и золошлаковых отходов при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информ. № 1331/ Е.И. Путилин, В.С. Цветков. М.: ФГУП «СоюздорНИИ», 2003. 31 с.
9. Хадбаатар А., Стенина Н.Г., Машкин Н.А. Исследование золошлаковых отходов ТЭЦ Монголии с целью применения в автодорожном строительстве // 13<sup>th</sup> annual concrete conference. American Concrete Institute, Монгольский технологический университет. Улан-Батор: NEW PRESS, 2014. С. 97–99.
10. Стенина Н.Г. Строительная индустрия в свете решения проблемы связывания воды в силикатном веществе: монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014. 48 с.

**Хадбаатар Анхбаяр**, асп., препод.

Дарханский филиал Технологического университета, Монголия, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Машкин Николай Алексеевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mashkin@corp.nstu.ru  
Новосибирский государственный технический университет

**Стенина Нина Георгиевна**, д-р геол.-минерал. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Молчанов Виктор Сергеевич**, канд. техн. наук, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Петров Игорь Игоревич**, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Зибницкая Надежда Егоровна**, директор ООО «Базис-Строй», г. Новосибирск

Получено 11.09.17

**Khadbaatar Ankhbayar**, Post-graduate Student, Senior Lecturer

Darhanskiy branch of Technological University, Mongolia, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Mashkin Nikolay Alekseevich**, DSc, Professor; E-mail: mashkin@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Russia

**Stenina Nina Georgievna**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Molchanov Viktor Sergeevich**, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Petrov Igor' Igorevich**, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Zibnitskaya Nadezhda Egorovna**, Director Ltd «Basis-Stroy», Novosibirsk, Russia

## **USE THE ASH WASTES OF TPP OF MONGOLIA IN HIGHWAY CONSTRUCTION**

The results of research of ash-slag wastes Jerdjenjetskoj and Darhanskoj TPP of Mongolia as a component of gruntozolobetonov to strengthen the upper layers of the roadbed of highways. The relevance of the themes associated with the growing demand for road construction in local materials, while disposing of the ash wastes. In the work were used modern methods of physico-chemical research materials: scanning electron microscopy, x-ray spectrum analysis and powder x-ray microanalysis. Both types of ash have sour, high carbon, composition, contains little calcium and, consequently, do not have visible astringent properties. When applying such evils in gruntozolobetonah to strengthen the upper layers of the roadbed (grounds of the pavement) and verges of roads, it is recommended to use additives for cement, as well as lime or natural limestone. This allows you to increase the strength of the gruntozolobetona up to 4,7 MPa at introduction 20–30 % ash and 7–10 % cement. In case of replacement of 50 % cement limestone gruntozolobeton is gaining strength to 3,5 MPa. The scientific novelty of the results associated with the proof of the possibility of using ash wastes of Mongolia in road gruntozolobetonah and determining the optimal compositions of mixtures.

**Key words:** ash-slag wastes, Scan Electron microscopy and X-ray methods, chemical composition, cementing properties, road ash-soil concrete.

### **REFERENCES**

1. Ovcharenko G.I., Fok N.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya nizko-kal'tsievyykh zoloshlakovykh otkhodov v rastvorakh i melkozernistykh betonakh [Investigation of the possibility of using low-calcium ash-and-slag wastes in mortars and fine-grained concretes]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy. Materialy V Vseros. nauch.-prakt. konf. [Modern technics and technology: problems, current state and prospects. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]*. 2015. Pp. 336–339. (in Russian)
2. Ovcharenko G.I., Gilmiyarov D.I., Viktorov A.V., Fok N.A. Novaya tekhnologiya pererabotki kislykh zoloshlakovykh otkhodov TETS v stroitel'nye materialy [A new technology for processing acidous ash and slag wastes of CHPP into construction materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*. 2012. No. 10 (646). Pp. 14–19. (in Russian)
3. Ovcharenko G.I., Khizhinkova E.Yu., Gorn K.S. Vliyanie aktivatsii tsementno-zol'nykh kompozitsiy na prochnost' kamnya [Effect of activation of cement-ash compositions on the strength of a stone]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*. 2010. No. 6. P. 9–13. (in Russian)

4. Khadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of the ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction. *Procedia Engineering* 2. Ser. «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016». 2016. Pp. 1558–1562.
5. Sirotiyuk V.V., Ivanov Y.V., Shevtsov V.R. Monitoring results of experimental roadbed area made of ash-and-slag mixture. Ash and slag of TPP: removal, transport, processing, storage. *Materials of the IV International Scientific and Practical Seminar*. 2012. Pp. 179–181.
6. Sirotiyuk V.V., Lunev A.A., Ivanov E.V. Zoloshlakovaya smes' dlya zemlyanogo polotna [Ash-and-slag mixture for the roadbed]. *Avtomobil'nye dorogi* [Automobile roads]. 2016. No. 6. P. 72. (in Russian)
7. Lunev A.A., Sirotiyuk V.V. Primenenie zoloshlakovykh smesey dlya vertikal'nykh planirovok i stroitel'stva gorodskikh dorog [Application of ash and slag mixtures for vertical planning and construction of urban roads]. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva* [Technique and technology of construction]. 2015. Vol. 1. Pp. 24–31. (in Russian)
8. Primenenie zol unosa i zoloshlakovykh otkhodov pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog. *Obzornaya informatsiya* [Use of fly ash, ash and slag wastes in the construction of motor roads. Overview]. No. 1331. E.I. Putilin, V.S. Tsvetkov. Moscow, FGUP SoyuzDorNII, 2003. 31 p. (in Russian)
9. Khadbaatar A., Stenina N.G., Mashkin N.A. Issledovanie zoloshlakovykh otkhodov TETs Mongolii s tsel'yu primeneniya v avtodorozhnom stroitel'stve [Study of ash and slag wastes of Mongolian TPP's for their use in road construction]. 13th annual concrete conference. American Concrete Institute, Mongolian University of Technology, Ulaanbaatar, NEW PRESS, 2014. Pp. 97–99.
10. Stenina N.G. Stroitel'naya industriya v svete resheniya problemy svyazyvaniya vody v silikatnom veshchestve: monografiya [The building industry in light of solving the problem of water binding in a silicate substance: monograph]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2014. 48 p. (in Russian)

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



УДК 628.5.1

**М.И. ШИЛЯЕВ, Е.М. ХРОМОВА, К.В. АНАНЬИН, Д.В. КАРАСЕВ**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ТРУБЧАТОМ АБСОРБЕРЕ**

Построена математическая модель процесса абсорбции газов в трубчатом абсорбере (ТА) в двух вариантах вертикальной упаковки трубок – квадратной в поперечном сечении и максимально уплотненной, треугольной, по центрам диаметров трубок. При моделировании использованы теоретические значения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи для пленочных течений, полученные авторами в предыдущих исследованиях и проверенные на известном эмпирическом материале. Проведены расчеты абсорбции  $SO_2$  на воду в двух вариантах упаковки трубок, более высокая степень извлечения  $SO_2$  из парогазового потока получена в первом варианте. Проведен сравнительный анализ в соответственных двух случаях: в первом – когда открыто все поперечное живое сечение и во втором – когда открыто только внутреннее сечение трубок для прохода очищаемых газов и орошающей жидкости – абсорбента. Проведены сравнительные расчеты для трубчатого абсорбера и насадочной колонны (НК) в соответственных условиях по эффективным диаметрам элементов насадки, связанным с удельными поверхностями и порозностями для обоих типов аппаратов. Получены одинаковые эффективности извлечения  $SO_2$  на воду в ТА и НК, но существенно различные гидравлические сопротивления. Даны практические рекомендации к расчету ТА и конструктивному оформлению упаковки трубок.

**Ключевые слова:** трубчатый абсорбер, пленочный теплообмен, эффективность извлечения целевых газовых компонентов из парогазового потока.

**Введение.** Инженерные расчеты абсорберов различного типа основываются до сих пор на эмпирических данных по объемным коэффициентам теплообмена и массообмена. Базовым трудом для этих целей служит монография [1]. Однако, как показано в [2–4], использование этих коэффициентов не позволяет надежно рассчитывать промышленные аппараты и их оптимизировать по режимным параметрам работы, энергозатратам и габаритам при заданной эффективности извлечения целевых газовых компонентов. Они не дают возможности объективно сравнивать аппараты различного типа между собой по техническим условиям эксплуатации, а также комбинировать их в комплексные пыле- и газоочистные экономичные, высокоэффективные системы. Эти обстоятельства определяются тем, что в них не входят многие

© Шиляев М.И., Хромова Е.М., Ананьин К.В., Карасев Д.В., 2017

определяющие параметры процесса тепло- и массообмена и соответственно газоочистки в аппаратах, а также неучетом установления термодинамического равновесия этих параметров по длине (высоте) их рабочих объемов, за пределами которой межфазный теплообмен и массообмен отсутствует. В этой связи экспериментальные и объемные коэффициенты теплообмена и массообмена, полученные для отдельного типа аппаратов, как бы «размазаны» (осреднены) по всему рабочему объему и не отражают реальности процесса, что наглядно показано в вышецитируемых работах авторов.

Нахождение расстояния от входа очищаемых газов в аппарат, на котором устанавливается равновесное состояние термодинамических параметров, ответственных за абсорбционный процесс, важно с точки зрения определения необходимой длины (высоты) рабочего объема аппарата, превышение которой связано с неоправданными габаритами установок, а следовательно, излишними материальными и энергетическими затратами на газоочистку. Для расчета этого расстояния нужны адекватные математические модели. Такие модели авторами построены и верифицированы для полых форсуночных скрубберов (ПФС), скрубберов Вентури (СВ) [2, 3], насадочных колонн [4]. В настоящей статье предлагается модель для трубчатых абсорберов (ТА), ее анализ и сравнение ТА с НК по эффективности и экономичности газоочистки. Основные теоретические положения, на которых построена модель процесса тепломассообмена в НК, использованы и при моделировании газоочистки в ТА.

**1. Теоретический анализ.** *Упаковка трубок, порозность, удельная поверхность, гидравлический диаметр.* Будем рассматривать упаковку трубок в абсорбере в вертикальном исполнении. Внешний диаметр трубок примем равным  $d_{a1}$ , внутренний  $d_{a1} - 2\Delta$ , где  $\Delta$  – толщина стенки трубок. Упаковка трубок может быть осуществлена по-разному: 1) квадратом (рис. 1, а) и треугольником (рис. 1, б) по осям соприкасающихся трубок. Для простоты, не нарушающей общности, примем поперечное сечение рабочего объема абсорбера квадратным.

Определим для варианта 1) полную порозность на все поперечное сечение рабочего объема аппарата  $\varepsilon$ , удельную поверхность тепло- и массообмена  $a$  и гидравлический диаметр условного порового канала  $d_h$  (рис. 1).

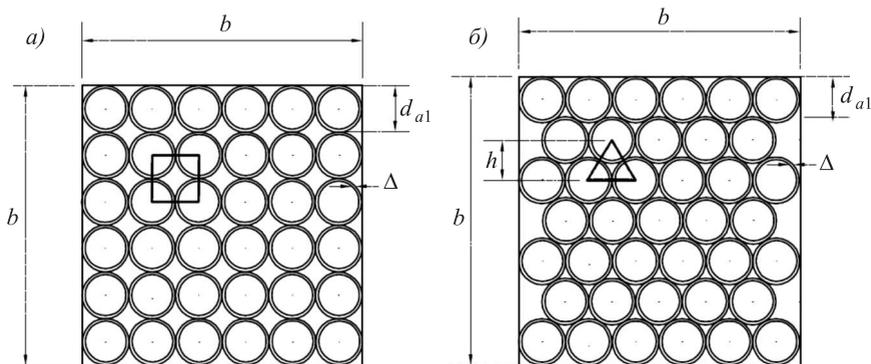


Рис. 1. Два способа упаковки трубок в сечении рабочего объема ТА  
 а – квадратное расположение осей трубок; б – треугольное расположение осей трубок

Полная порозность для этого случая будет равна:

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\left( \frac{\pi d_{a1}^2}{4} - \frac{\pi (d_{a1} - 2\Delta)^2}{4} \right) nl}{b^2 l}, \quad (1)$$

где  $b$  – сторона квадратного сечения рабочего объема аппарата;  $l$  – высота трубок;  $n$  – количество трубок в сечении, причем

$$n_1 = \left( \frac{b}{d_{a1}} \right)^2. \quad (2)$$

Из (1) при условии (2) получаем

$$\varepsilon_1 = 1 - \pi \bar{\Delta} (1 - \bar{\Delta}), \quad (3)$$

где  $\bar{\Delta} = \Delta / d_{a1}$  – относительная толщина стенки трубки.

Если на стенке трубки образуется пленка жидкости толщиной  $\delta$ , то порозность определяется формулой

$$\varepsilon'_1 = 1 - \pi \bar{\Delta}' (1 - \bar{\Delta}'), \quad (4)$$

где  $\bar{\Delta}' = \bar{\Delta} + \delta / d_{a1}$ .

Удельная поверхность с учетом взаимодействия с парогазовым потоком внутренней и внешней поверхности трубок, исключая внутреннюю поверхность корпуса аппарата вследствие ее относительной малости, определится соотношением

$$a_1 = \frac{[\pi d_{a1} + \pi (d_{a1} - 2\Delta)] nl}{b^2 l} = 2\pi \frac{1 - \bar{\Delta}}{d_{a1}}. \quad (5)$$

В данном случае  $a = a'$ , поскольку

$$a'_1 = \frac{[\pi (d_{a1} + 2\delta) + \pi (d_{a1} - 2\Delta - 2\delta)] nl}{b^2 l} = 2\pi \frac{1 - \bar{\Delta}}{d_{a1}}. \quad (6)$$

Гидравлический диаметр условного порового канала найдем исходя из общего его определения

$$d_{h1} = \frac{4F}{P_s n}, \quad (7)$$

где  $F$  – площадь живого сечения аппарата;

$P_s$  – общий смоченный периметр поверхности теплообмена, при этом

$$F = \varepsilon_1 b^2, \quad (8)$$

$$P_s = [\pi d_{a1} + \pi (d_{a1} - 2\Delta)] n. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (7), получим

$$d_{h1} = \frac{2\varepsilon}{\pi (1 - \bar{\Delta})} d_{a1}, \quad d'_{h1} = \frac{2\varepsilon'}{\pi (1 - \bar{\Delta}')} d_{a1}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_f$ ,  $\varepsilon_f$  – объемная концентрация жидкости в рабочем объеме аппарата, распределенная по стенкам трубок в виде пленки толщиной  $\delta$ .

Если объемы между трубками исключить, оставив для прохода газов только внутренние каналы трубок, то аналогичным образом можно получить:

– для порозности

$$\varepsilon_{1t} = \frac{\pi}{4} (1-2\bar{\Delta})^2, \quad \varepsilon'_{1t} = \frac{\pi}{4} (1-2\bar{\Delta}')^2; \quad (11)$$

– для удельной поверхности

$$a_{1t} = \pi (1-2\bar{\Delta}) \frac{1}{d_{a1}}, \quad a'_{1t} = \pi (1-2\bar{\Delta}') \frac{1}{d_{a1}}; \quad (12)$$

– для гидравлического диаметра условных поровых каналов

$$d_{h1t} = d_{a1} - 2\bar{\Delta}, \quad d'_{h1t} = d_{a1} \left( 1 - 2\bar{\Delta} - 2 \frac{\delta}{d_{a1}} \right). \quad (13)$$

Для варианта 2) (рис. 1, б), исключая межтрубчатое пространство, получим следующие соотношения:

– общее количество трубок

$$n_2 = (n_1 + n_1 - 1) m, \quad (14)$$

где  $n_1$  – количество трубок в первом ряду (рис. 1, б);

$n_1-1$  – количество трубок во втором ряду;

$m$  – количество пар рядов по второму измерению квадрата со стороной  $b$ .

При этом

$$m = \frac{b}{h} = \frac{b}{2d_{a1} \cos 30^\circ}, \quad (15)$$

$$n_1 = \frac{b}{d_{a1}}. \quad (16)$$

Подставляя (15) и (16) в (14), будем иметь

$$n_2 = (2n_1 - 1) \frac{b}{2d_{a1} \cos 30^\circ} = \left( 2 \frac{b}{d_{a1}} - 1 \right) \frac{b}{2d_{a1} \cos 30^\circ} \approx \left( \frac{b}{d_{a1}} \right)^2 \frac{1}{\cos 30^\circ}, \quad (17)$$

поскольку, как правило,  $\frac{2b}{d_{a1}} \gg 1$ .

Следовательно, для порозности при закрытом межтрубчатом пространстве получим соотношение

$$\varepsilon_{2t} = \frac{\pi (d_{a1} - 2\bar{\Delta})^2}{4} \frac{nl}{b^2 l} = \frac{\pi}{4 \cos 30^\circ} (1-2\bar{\Delta})^2, \quad \varepsilon'_{2t} = \frac{\pi}{4 \cos 30^\circ} (1-2\bar{\Delta}')^2; \quad (18)$$

– для удельной поверхности

$$a_{2t} = \frac{\pi (d_{a1} - 2\bar{\Delta}) nl}{b^2 l} = \frac{\pi}{\cos 30^\circ} (1-2\bar{\Delta}) \frac{1}{d_{a1}}, \quad (19)$$

$$a'_{2t} = \frac{\pi}{\cos 30^\circ} (1 - 2\bar{\Delta}') \frac{1}{d_{a1}}; \quad (20)$$

– для гидравлического диаметра

$$d'_{h2t} = d_{a1} \left( 1 - 2\bar{\Delta} - 2 \frac{\delta}{d_{a1}} \right). \quad (21)$$

**2. Уравнения сохранения модели.** Уравнение теплообмена жидкости на стенках трубок и самих трубок с фильтрационным парогазовым потоком:

$$\frac{d}{d\tau} [C_f(T_f - T_0) + C_m(T_m - T_0)] = q + \sum r_i g_i, \quad (22)$$

при  $\tau = 0$   $T_f = T_{f0}$ ,  $T_m = T_{m0}$  для  $0 \leq x \leq 1$ ,  
где

$$C_f = c_f \rho_f \varepsilon_f, \quad C_m = c_m \rho_m (1 - \varepsilon), \quad (23)$$

где  $c_f$  и  $c_m$ ,  $\rho_f$  и  $\rho_m$  – удельные теплоемкости и плотности жидкости и материала трубок соответственно;

$\varepsilon_f$  – объемная концентрация жидкости в рабочем объеме абсорбера;

$T_f$  и  $T_m$  – температуры жидкости и трубок;  $T_0 = 273$  К;

$q$  – тепловой поток от поверхностей с температурой  $T_w$  пленок в трубках и парогазовой смеси, Дж/(м<sup>3</sup> · с):

$$q = -\alpha d' [T_w - T], \quad (24)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К), примем в соответствии с работой [5] в среднем равным

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{4\delta} \approx 2 \frac{\lambda}{\delta}, \quad (25)$$

где  $\text{Nu} = \frac{4\alpha\delta}{\lambda}$  – теплообменное число Нуссельта пленочного течения;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности парогазового потока;

$T$  – температура парогазового потока;

$g_i$  – массовый поток  $i$ -го газового компонента, включая пар жидкости, кг/(м<sup>3</sup> · с):

$$g_i = -\beta_i d' [\rho_{wi} - \rho_i], \quad (26)$$

где  $\beta_i$  – коэффициент массоотдачи, м/с;

$\rho_{wi}$  и  $\rho_i$  – парциальные плотности компонентов парогазового потока у поверхности пленки в состоянии насыщения и в потоке, кг/м<sup>3</sup>, вычисляем по формуле [1, 5]

$$\beta_i = 3,41 \frac{D_i}{\delta}, \quad (27)$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -го компонента в парогазовом потоке, вычисляемый для всех компонентов, включая пар жидкости:

$$D_i = D_{i0} \frac{B}{B_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,8}, \quad B_0 = 101325 \text{ Па}, \quad (28)$$

$$B = B_0 + \Delta P, \quad B = \Sigma P_i, \quad (29)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на длине трубок  $l$ , Па,

$$P_i = \frac{\rho_i RT}{M_i}, \quad (30)$$

где  $R = 8,314 \cdot 10^3$  Дж/(кмоль · К);

$M_i$  – молекулярная масса  $i$ -го компонента парогазового потока;

$P_i$  и  $\rho_i$  – парциальное давление и плотность  $i$ -го компонента парогазового потока.

Парциальную плотность  $\rho_i$  для реагирующих компонентов будем вычислять с помощью уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_i \vec{u}_f) = -g_i, \quad (31)$$

при  $\tau = 0$   $\rho_i = \rho_{i0}, \quad 0 \leq x \leq l,$

где  $\vec{u}_f$  – вектор скорости парогазового потока в каналах для одномерного стационарного потока, рассчитываемый в соответствии с уравнением неразрывности для нейтрального газа

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_g \vec{u}_f) = 0, \quad (32)$$

при  $\tau = 0$   $\rho_g = \rho_{g0}, \quad 0 \leq x \leq l,$

по соотношению

$$u_f = u_{f0} \frac{\rho_{g0} \varepsilon - \varepsilon_{f0}}{\rho_g \varepsilon - \varepsilon_f}, \quad (33)$$

где  $u_{f0}$  – скорость парогазового потока на входе в трубки;

$\rho_{g0}$  – парциальная плотность нейтрального газа на входе в трубки;

$\varepsilon_{f0}$  – объемная концентрация жидкости на входе в трубки.

Парциальные плотности  $\rho_{wi}$  для газовых компонентов на границе раздела фаз будем определять из закона Генри [1]

$$P_{wi} = m_{px,i} x_i, \quad (34)$$

где  $m_{px,i}$  – константы фазового равновесия, зависящие только от температуры, определяются по данным [1, 6–8] и другой справочной литературе;

$x_i$  – мольная концентрация  $i$ -го газового компонента в жидкой фазе, которую рассчитываем по его весовой концентрации  $c_{mp,i}$  из уравнения [1]

$$x_i = \frac{c_{mp,i}}{\frac{c_{mp,i}}{M_i} + \frac{1}{M_s}}, \quad (35)$$

где  $M_s$  – молекулярная масса растворителя, для воды  $M_s = 18$  кг/кмоль, при этом  $c_{mp,i}$  находим из уравнения сохранения массы  $i$ -го компонента

$$\frac{dc_{mp,i}}{d\tau} = \frac{g_i}{\varepsilon_f \rho_f}, \quad (36)$$

при  $\tau = 0$   $c_{mp,i} = 0, \quad 0 \leq x \leq l,$

для водяного пара примем аппроксимацию [9]:

$$P_{w,wv} = P_{cr} \exp \left[ A_1 \ln \left( \frac{T_f}{T_{cr}} \right) + A_2 f_2 \right], \quad (37)$$

$$f_2 = \frac{4 \left( \frac{T_f}{T_{cr}} - 1 \right)}{\frac{T}{T_{cr}}} + f_1 - 5,3 \ln \left( \frac{T_f}{T_{cr}} \right), \quad f_1 = \left( \frac{T_f}{T_{cr}} - 1 \right) \left[ \frac{\left( \frac{T_f}{T_{cr}} + 1 \right)^2}{5} + 0,5 \right], \quad (38)$$

$T_{cr} = (344,1 + 273) \text{ К}, P_{cr} = 221,29 \cdot 10^5 \text{ Па}, A_1 = 7,5480, A_2 = 2,7870.$

Для определения температуры парогазового потока будем использовать уравнение теплообмена в виде

$$\rho \frac{d(c(T - T_0))}{d\tau} = -q, \quad (39)$$

при  $\tau = 0$   $T = T_{00}, \quad 0 \leq x \leq l,$

где  $c$  – удельная теплоемкость парогазового потока:

$$c = \frac{\sum \rho_i c_i}{\rho}, \quad (40)$$

где  $c_i$  – удельные теплоемкости компонентов парогазового потока, включая пар жидкости,  $\rho$  – плотность парогазового потока:

$$\rho = \sum \rho_i. \quad (41)$$

Тепловой эффект абсорбции  $i$ -х газовых компонентов на границе раздела фаз при  $T = T_w$  будем вычислять по формуле [1]

$$r_i = \frac{1}{M_i} RT^2 \frac{d \ln m_{px,i}(T)}{dT}, \quad (42)$$

а для водяного пара примем приближенно

$$r_{wv} = 2500 \text{ кДж/кг}. \quad (43)$$

Скорость пленки вычисляем по уравнению [4]:

$$w = \frac{g \rho_f \delta^2}{3 \mu_f} \pm \frac{1}{2} \frac{\delta}{\mu_f} \tau_{s0}, \quad (44)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;  
 $\mu_f$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;

$\tau_{s0}$  – напряжение трения на границе поверхность пленки – парогазовый поток на входе в трубки, при этом знак «+» соответствует прямотоку и  $u_f > w$ , знак «-» – противотоку и  $u_f < w$ .

Напряжение трения  $\tau_{s0}$  определяется по известной формуле из гидродинамики для круглого канала диаметром  $d'_{h0}$  [10]:

$$\tau_{s0} = \frac{1}{4} \frac{d'_{h0}}{l} \Delta P_0, \quad (45)$$

а перепад давления  $\Delta P_0$  по формуле [10–13]:

$$\Delta P_0 = \lambda_h \frac{l}{d'_{h0}} \rho_0 \frac{(u_{f0} - w_0)^2}{2}, \quad (46)$$

где

$$\rho_0 = \sum \rho_{i0}, \quad (47)$$

где  $\lambda_h$  – коэффициент гидравлического трения:

$$\lambda_h = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad \text{при } \text{Re} \geq 2300, \quad \lambda_h = \frac{64}{\text{Re}} \quad \text{при } \text{Re} < 2300, \quad (48)$$

$$\text{Re} = \frac{u_{f0} d'_{h0} \rho_0}{\mu_0}, \quad u_f = \frac{u_0}{\varepsilon - \varepsilon_{f0}},$$

где  $u_0$  – скорость парогазового потока на все сечение рабочего объема аппарата.

Для концентрации жидкости  $\varepsilon_f$  запишем следующее уравнение сохранения массы:

$$\frac{d\varepsilon_f}{d\tau} = \frac{1}{\rho_f} g_{wv}, \quad (49)$$

при  $\tau = 0$   $\varepsilon_f = \varepsilon_{f0}, \quad 0 \leq x \leq l,$

где  $g_{wv}$  определяется по формуле (26) для водяного пара.

Найдем эффективность абсорбции  $i$ -го газового компонента

$$\eta_i = 1 - \frac{[(\rho_i u_f) d_h'^2]_l}{[(\rho_i u_f) d_h'^2]_0}. \quad (50)$$

**Коэффициент орошения.** Для задания начальных условий  $w_0, \varepsilon_{f0}$  необходимо связать эти параметры с коэффициентом орошения  $q_f$ :

$$q_f = \frac{L_f}{L_{gd0}} = \frac{w_0 \varepsilon_{f0}}{u_0}, \quad (51)$$

где  $w_0$  – начальная скорость пленки;

$\varepsilon_{f0}$  – начальная объемная концентрация жидкости.

С другой стороны, при квадратном расположении трубок и открытом сечении межтрубчатого пространства

$$\varepsilon_{f0_1} = \frac{\delta_0 [\pi (d_{a1} - 2\Delta) + \pi d_{a1}] n l}{b^2 l} = 2\pi \delta_0 \frac{[1 - \bar{\Delta}]}{d_{a1}}. \quad (52)$$

Приравнивая (51) и (52), получим

$$\delta_{01} = \frac{1}{2\pi} q_1 \frac{u_0}{w_0} \frac{d_{a1}}{1-\bar{\Delta}}. \quad (53)$$

Если закрыты межтрубочные пространства, то

$$\varepsilon_{f01t} = \frac{\delta_0 d_{a1} (1-2\bar{\Delta}) n}{b^2} = \pi \delta_0 \frac{[1-2\bar{\Delta}]}{d_{a1}}, \quad (54)$$

$$\delta_{01t} = \frac{1}{\pi} \frac{u_0}{w_0} \frac{d_{a1}}{1-2\bar{\Delta}}. \quad (55)$$

Для треугольного расположения трубок в (52)–(55) надо подставить  $n$  по формуле (17), тогда получим

$$\varepsilon_{f02} = 2\pi \delta_0 \frac{[1-\bar{\Delta}]}{\cos 30^\circ d_{a1}}, \quad (52')$$

$$\delta_{02} = \frac{1}{2\pi} q_1 \frac{u_0}{w_0} \frac{d_{a1} \cos 30^\circ}{1-\bar{\Delta}}, \quad (53')$$

$$\varepsilon_{f02t} = \pi \delta_0 \frac{[1-2\bar{\Delta}]}{d_{a1} \cos 30^\circ}, \quad (54')$$

$$\delta_{02t} = \frac{1}{\pi} \frac{u_0}{w_0} \frac{d_{a1} \cos 30^\circ}{1-2\bar{\Delta}}. \quad (55')$$

Для НК с шаровыми элементами насадки имеем [4]

$$\delta_0 = \frac{1}{6} \frac{\varepsilon_{f0}}{1-\varepsilon} d_{a1}, \quad (56)$$

здесь  $d_{a1}$  – диаметр шаров.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** Сформулированная выше модель численно реализовалась в стационарной постановке, основанием для которой является значительное превосходство переноса энергии парогазовым потоком в осевом направлении трубок по сравнению с поперечным, в связи с чем процесс тепломассообмена в условных поровых каналах можно принять адиабатическим. При этом за счет тонкости стенок трубок, их высокой теплопроводности можно положить  $T_m = T_f = T_w$ . В этих условиях второе слагаемое уравнения (23) слева за счет неподвижности стенок трубок исчезает.

Дифференциальные уравнения (22), (32), (37), (39), (49) приводятся к виду:

$$w \frac{dC_f (T_f - T_0)}{dx} = q + \sum r_i g_i, \quad (57)$$

при  $x = 0$

$$T_f = T_{f0} = T_{m0};$$

$$\frac{d\rho_i u_f}{dx} = -g_i, \quad (58)$$

при  $x = 0$

$$\begin{aligned} \rho_i &= \rho_{i0}, \quad u_f = u_{f0}; \\ \rho u_f \frac{dc(T-T_0)}{dx} &= -q, \end{aligned} \quad (59)$$

при  $x = 0$

$$\begin{aligned} T &= T_{00}; \\ w \frac{d\varepsilon_f}{dx} &= \frac{g_{wv}}{\rho_f}, \end{aligned} \quad (60)$$

при  $x = 0$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f0}.$$

На рис. 2 представлены результаты расчета процесса абсорбции в ТА и НК для соответственных условий. Так, для параметров рис. 2 для ТА  $a = 298,3$  1/м при  $d_{a1} = 0,02$  м,  $\varepsilon = 0,851$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а для НК  $a = 298,3$  1/м при  $d_{ae} = 0,003$  м,  $\varepsilon = 0,851$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Переход осуществлен по формуле для шаровых элементов насадки с эквивалентным диаметром

$$d_{ae} = \frac{6}{a}(1 - \varepsilon). \quad (61)$$

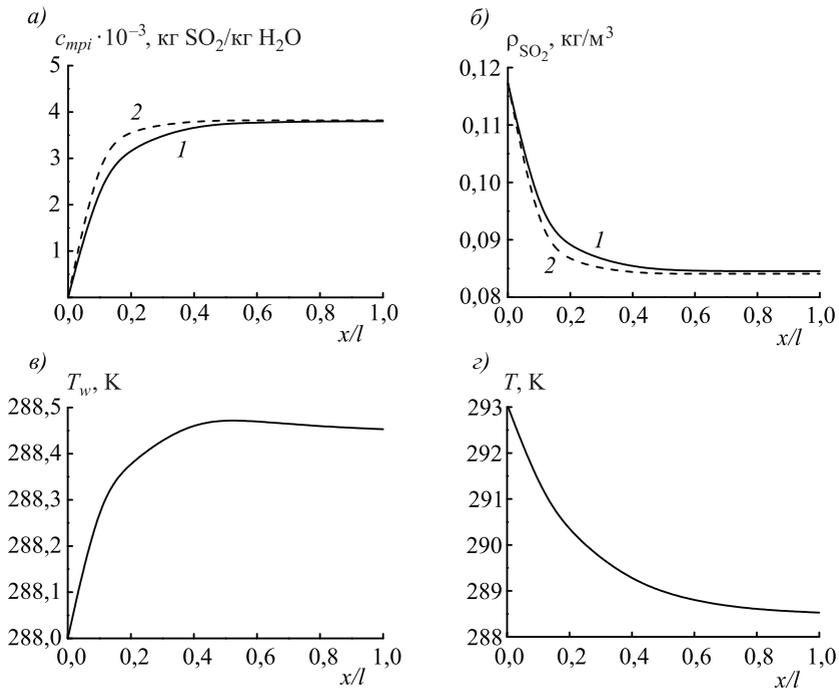


Рис. 2. Сравнение параметров процесса абсорбции SO<sub>2</sub> в ТА при открытом межтрубочном пространстве и в НК для соответственных условий:  $u_0 = 2$  м/с,  $l = 0,2$  м,  $T_{00} = 293$  К,  $T_{m0} = 288$  К,  $d_{wv,0} = 0,01$  кг/кг сух. возд.,  $d_{SO_2,0} = 0,1$  кг/кг сух. возд.,  $q_f = 0,0953$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon = 0,851$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 1 – НК:  $d_{ae} = 0,003$  м,  $\varepsilon_{f0} = 0,06823$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\eta_{SO_2} = 0,25584$ ,  $w = 0,28$  м/с,  $u_f = 2,6$  м/с,  $\Delta P_1 = 207,68$  Па; 2 – ТА:  $d_{a1} = 0,02$  м,  $\varepsilon_{f0} = 0,8821$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\eta_{SO_2} = 0,24629$ ,  $w = 0,082$  м/с,  $u_f = 2,6$  м/с,  $\Delta P_2 = 1,12$  Па

Как следует из графиков, эффективности извлечения  $\text{SO}_2$  на воду в обоих случаях почти одинаковы и составляют порядка 25 %. Различие приблизительно в 1 % связано с осреднением гидравлического диаметра каналов по внутреннему и внешнему пространству трубок по формуле (7). Однако потери давления на длине  $l = 0,2$  м весьма различны и отличаются друг от друга в 186 раз не в пользу НК. Как в том и другом случае состояние термодинамического равновесия достигается на одинаковой длине от входа  $x_p \approx 0,6l$ , которой можно ограничиться при выборе длины трубок. Параметры  $w$ ,  $u_f$ ,  $\varepsilon_f$  по длине трубок и толщине насадки практически не меняются (графики не приводятся).

На рис. 3 представлены результаты расчета процесса абсорбции в ТА при закрытом межтрубчатом пространстве и НК для соответственных условий: для ТА  $a = 141,3$  1/м при  $d_{a1} = 0,02$  м,  $\varepsilon = 0,636$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а для НК  $a = 141,3$  1/м при  $d_{ae} = 0,0155$  м (по формуле перехода (57)),  $\varepsilon = 0,636$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Как видно из рис. 3, в ТА и НК эффективность достигается практически одинаковой, но ниже, чем при открытом межтрубчатом пространстве. Это связано с существенным уменьшением удельной поверхности теплообмена более чем в 2 раза. В этом случае гидравлическое сопротивление тоже будет меньшим в ТА, чем в НК, – в 27 раз. Разница уменьшилась за счет уменьшения эквивалентной порозности, соответственно увеличения скорости парогазового потока в трубках.

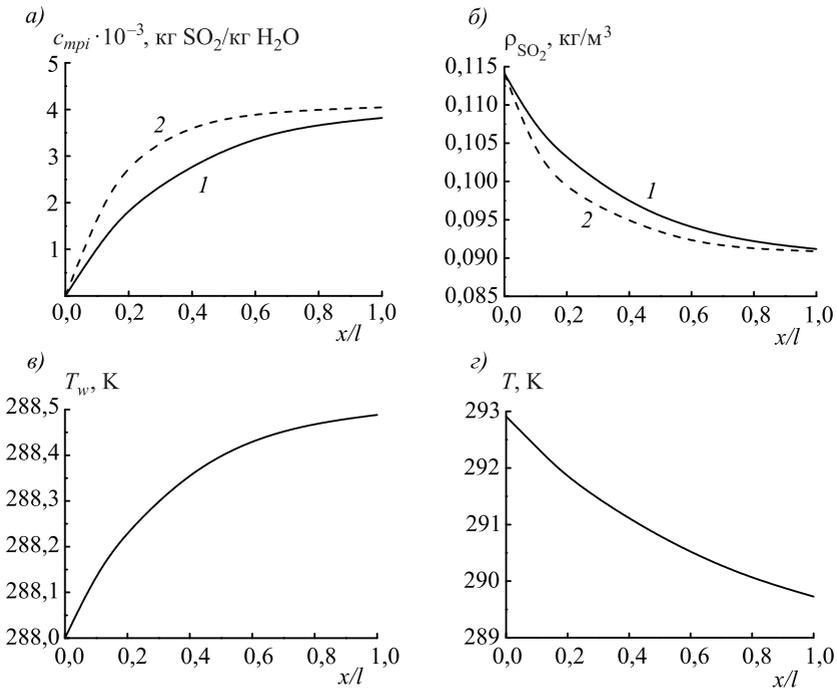


Рис. 3. Сравнение параметров процесса абсорбции  $\text{SO}_2$  в ТА при закрытом межтрубчатом пространстве и в НК для соответственных условий:  $u_0 = 2$  м/с,  $l = 0,2$  м,  $T_{00} = 293$  К,  $T_{m0} = 288$  К,  $d_{wv,0} = 0,01$  кг/кг сух. возд.,  $d_{\text{SO}_2,0} = 0,1$  кг/кг сух. возд.,  $q_f = 0,00953$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon = 0,636$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

1 – НК:  $d_{ae} = 0,0155$  м,  $\varepsilon_{p0} = 0,0385$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\eta_{\text{SO}_2} = 0,19783$ ,  $w = 0,5$  м/с,  $u_f = 3,35$  м/с,  $\Delta P_1 = 180,15$  Па; 2 – ТА:  $d_{a1} = 0,02$  м,  $\varepsilon_{p0} = 0,0495$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\eta_{\text{SO}_2} = 0,19712$ ,  $w = 0,37$  м/с,  $u_f = 3,4$  м/с,  $\Delta P_2 = 6,64$  Па

При теоретическом преимуществе по эффективности варианта с открытым межтрубочным пространством по сравнению с вариантом с закрытым межтрубочным пространством равномерно распределить жидкость в виде пленки по внутренней и внешней поверхностям трубок технически чрезвычайно затруднительно, практически невозможно. Сложно обеспечить в этом случае устойчивое движение. Второй вариант более предпочтителен. Организация устойчивого и равномерного распределения пленки по внутренним поверхностям трубок может быть легко обеспечена раскруткой разбрызгиваемой жидкости на входе за счет шнекового устройства внутри трубок, создающего вращательное движение парогазового потока. Вследствие действия возникающих при этом центробежных сил диспергируемые капли жидкости отбрасываются к стенкам, образуя вращающуюся на них пленку. В этом случае, как показано в [4], коэффициенты массоотдачи и теплоотдачи будут даже выше, чем при течении пленки без вращения.

На рис. 4 представлено сравнение параметров процесса абсорбции  $\text{SO}_2$  в ТА при закрытом межтрубочном пространстве и треугольной упаковке трубок и в НК для соответственных условий. Получена практически одинаковая эффективность извлечения  $\text{SO}_2$  на воду, но выше, чем при квадратной упаковке трубок. Этот вариант упаковки трубок более предпочтителен. Кроме того, заметим, что межтрубочное пространство может быть использо-

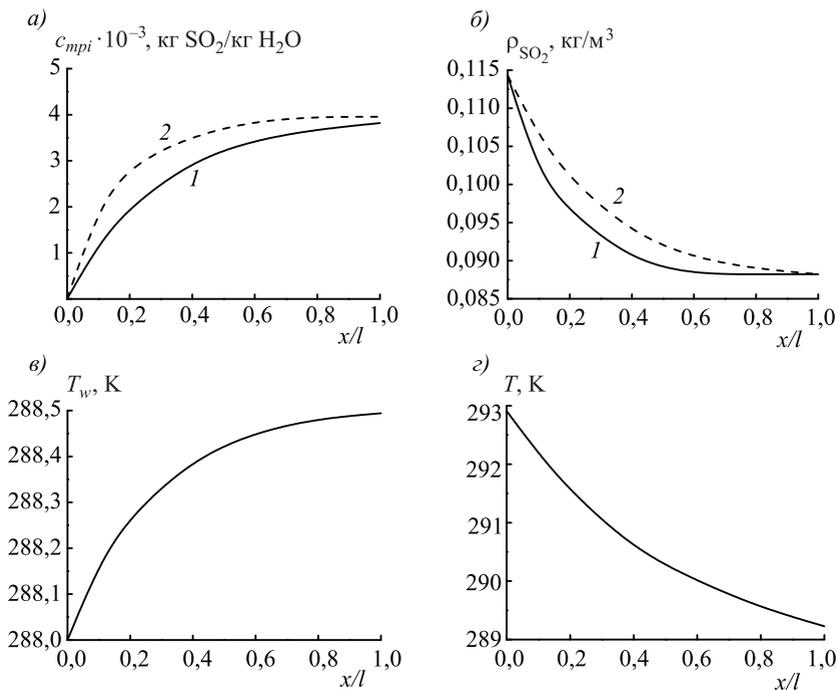


Рис. 4. Сравнение параметров процесса абсорбции  $\text{SO}_2$  в ТА при закрытом межтрубочном пространстве и треугольной упаковке трубок и в НК для соответственных условий:

$$u_0 = 2 \text{ м/с}, l = 0,2 \text{ м}, T_{00} = 293 \text{ К}, T_{m0} = 288 \text{ К}, d_{w,v,0} = 0,01 \text{ кг/кг сух. возд.}, \\ d_{\text{SO}_2,0} = 0,1 \text{ кг/кг сух. возд.}, q_f = 0,00953 \text{ м}^3/\text{м}^3, \varepsilon = 0,734 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$1 - \text{НК}: d_{ae} = 0,0097836 \text{ м}, \varepsilon_{f0} = 0,045 \text{ м}^3/\text{м}^3, \eta_{\text{SO}_2} = 0,2257, w = 0,43 \text{ м/с}, u_f = 2,9 \text{ м/с}, \\ \Delta P_1 = 138 \text{ Па}; 2 - \text{ТА}: d_{a1} = 0,02 \text{ м}, \varepsilon_{f0} = 0,05 \text{ м}^3/\text{м}^3, \eta_{\text{SO}_2} = 0,22466, w = 0,37 \text{ м/с}, \\ u_f = 2,92 \text{ м/с}, \Delta P_2 = 1,94 \text{ Па}$$

вано для охлаждения трубок с целью поддержания их температуры на наиболее низком уровне, а соответственно и температуры пленки жидкости, способствующей более эффективному извлечению целевого газового компонента на абсорбент.

Проведенные расчеты при пониженном в 2 раза и повышенном в 1,5 раза коэффициенте теплоотдачи результатов практически не изменили. Заметим, что для НК расчет коэффициента массоотдачи проводился по эмпирическим зависимостям [14].

**Выводы.** Предложена и проанализирована математическая модель процесса извлечения целевых газовых компонентов в трубчатом абсорбере при различной упаковке трубок с их вертикальным расположением. Установлено конструктивное преимущество установки трубок с треугольным взаимным расположением осей в сравнении с квадратным при закрытом межтрубном пространстве, которое может быть использовано для подачи охлаждающей жидкости и поддержания температуры абсорбента на технически приемлемом наиболее низком уровне. Показано, что при одинаковой эффективности абсорбирования газовых компонентов по энергозатратам трубчатые абсорберы обладают несравненным преимуществом перед насадочными колоннами. Предложена для обеспечения равномерного и устойчивого течения пленки по стенкам трубок закрутка парогазового потока с диспергированным абсорбентом на входе с помощью шнекового устройства, устанавливаемого в виде спиральной ленты внутри трубок. Модель может быть использована для инженерных расчетов и оптимизации определяющих термодинамических и конструктивных параметров трубчатых абсорберов и для их сравнения с другими типами аппаратов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Изд-во «Химия», 1976. 655 с.
2. Шильяев М.И., Хромова Е.М., Голстых А.В. Контактный тепло- и массообмен в форсуночных и барботажных аппаратах. Моделирование, оптимизация теплообмена и абсорбционно-конденсационной пылегазоочистки. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 271 с.
3. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers. Mass Transfer – Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling. Vienna, Austria: In Tech, 2013. P. 163–194.
4. Шильяев М.И., Хромова Е.М. Моделирование процесса абсорбции газов в насадочных колоннах // Материалы XV Междунар. науч. конф. «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», 19–29 сентября 2017 г., г. Порту. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2017. С. 165–177.
5. Шильяев М.И., Голстых А.В. Гидродинамика и теплообмен пленочных течений в полях массовых сил и их приложения. М.: ИНФРА-М, 2014. 198 с.
6. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Изд. 8-е, перераб. и доп. Л.: Химия, 1976. 552 с.
7. Перельман В.И. Краткий справочник химика / под общ. ред. чл.-кор. АН СССР Б.В. Некрасова. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит-ры, 1954. С. 260–261.

8. Горонковский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии / под общ. ред. акад. АН УССР А.Т. Пилипенко. Киев: Наук. думка, 1987. 829 с.
9. Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 319 с.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1973. 847 с.
11. Федяевский К.К., Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И. Гидромеханика. Л.: Изд-во «Судостроение», 1968. 568 с.
12. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высш. шк., 1962. 655 с.
13. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. 502 с.
14. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979. 176 с.

**Шильяев Михаил Иванович**, д-р техн. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Хромова Елена Михайловна**, канд. физ.-мат. наук, доц.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Ананьин Кирилл Викторович**, студ.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Карасев Дмитрий Васильевич**, студ.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 11.09.17

**Shilyaev Mikhail Ivanovich**, DSc, Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Khromova Elena Mikhailovna**, PhD, Ass. Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Anan'in Kirill Viktorovich**, Post-graduate Student

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Karasev Dmitriy Vasil'evich**, Post-graduate Student

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

## **MODELING THE PROCESS OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A TUBULAR ABSORBER**

A mathematical model of the process of gas absorption in a tubular absorber (TA) is constructed in two versions of vertical tube packing – square in cross section and maximally condensed, triangular, in the centers of tube diameters. In the simulation, the theoretical values of the heat transfer and mass transfer coefficients for film flows, obtained by the authors in previous studies and tested on a known empirical material, were used. Calculations of SO<sub>2</sub> absorption on water in two versions of tube packing were carried out, a higher degree of extraction of SO<sub>2</sub> from a vapor-gas stream was obtained in the first variant. A comparative analysis is carried out in the corresponding two cases: in the first case, when all the cross section is open and in the second case when only the internal section of the tubes for the passage of the cleaned gases and the irrigating liquid of the absorbent is open. Comparative calculations for a tubular absorber and a packed column (NK) under appropriate conditions for the effective diameter of the nozzle elements associated with specific surfaces and porosity for both types of apparatus are carried out. The same

efficiency of extraction of SO<sub>2</sub> by water in TA and NK has been obtained, but significantly different hydraulic resistances. Practical recommendations are given for the calculation of TA and the structural design of the packaging of tubes.

**Key words:** tubular absorber, film heat and mass transfer, efficiency of extraction of target gas components from gas-vapor flow.

## REFERENCES

1. R a m m V.M. Absorbtsiya gazov [Absorption of gases]. Moscow, Publishing house «Chemistry», 1976. 655 p. (in Russian)
2. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Tolstykh A.V. Kontaktnyy teplo- i massoobmen v forsunochnykh i barbotazhnykh apparatakh. Modelirovanie, optimizatsiya teplomassoobmena i absorbtsionno-kondensatsionnoy pylegazo-ochistki [Contact heat and mass transfer in the nozzle and Barbie platemaking machines. Simulation, optimization of heat and mass transfer and absorption and condensation of gas treatment]. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 271 p.
3. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers. Mass Transfer – Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling. Vienna, Austria: In Tech, 2013. Pp. 163–194.
4. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modelirovanie protsesssa absorbtsii gazov v nasadochnykh kolonnakh [Modeling of the process of gas absorption in packed columns]. Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. «Kachestvo vnutrennego vozdukhha i okruzhayushchey sredy», 19–29 sentyabrya 2017 g., g. Portu [Materials of the XV International scientific conference «Quality of the internal air and the environment», September 19–29, 2017, Porto]. Volgograd, Publishing house, VolgGASU, 2017. Pp. 165–177. (in Russian)
5. Shilyaev M.I., Tolstykh A.V. Gidrodinamika i teplomassoobmen plenochnykh techeniy v polyakh massovykh sil i ikh prilozheniya [Hydrodynamics and heat and mass transfer film flows in the fields of mass forces and their applications]. Moscow, INFRA-M, 2014. 198 p. (in Russian)
6. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov chimicheskoy tekhnologii [Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology]. Ed. 8th, trans. and additional. Leningrad, Chemistry, 1976. 552 p. (in Russian)
7. Perel'man V.I. Kratkiy spravochnik po khimii [Quick reference book of the chemist]. Under the general ed. member corr. AN SSSR B.V. Nekrasov. Ed. 3rd correction. and additional. Moscow, Gos. nauchno-tekhn. publishing house of chemical literature, 1954. Pp. 260–261. (in Russian)
8. Goronovskiy I.T., Nazarenko Yu.P., Nekryach E.F. Kratkiy spravochnik po khimii [Quick reference book on chemistry]. Under the Society. Ed. acad. A.S. of the Ukrainian SSR. Pilipenko. Kiev: Naukova dumka, 1987. 829 p. (in Russian)
9. Bogoslovskiy V.N., Poz M.Ya. Teplofizika apparatov utilizatsii tepla sistem otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukhha [Thermal physics of heat recovery systems of heating devices, ventilation and air conditioning]. Moscow, Stroyizdat, 1983. 319 p. (in Russian)
10. L o y t s y a n s k i y L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of a liquid and gas]. Ed. 4th, revised. and additional. Moscow, Science, 1973. 847 p. (in Russian)

11. Fedyaevskiy K.K., Voytkunskiy Ya.I., Faddeev Yu.I. *Gidromekhanika* [Hydromechanics]. Leningrad, Publishing house «Shipbuilding», 1968. 568 p. (in Russian)
  12. Kafarov V.V. *Osnovy massopredachi* [Fundamentals of mass transfer]. Moscow, Higher school, 1962. 655 p. (in Russian)
  13. Povkh I.L. *Tekhnicheskaya gidromekhanika* [Technical Hydromechanics]. Ed. 2nd, revised. and additional. Leningrad, Machine building. Leningrad branch, 1976. 502 p. (in Russian)
  14. Aeron M.E., Todes O.M., Narinskiy D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem* [Devices with a stationary granular bed]. Leningrad, Chemistry, 1979. 176 p. (in Russian)
-

УДК 662.951.5

М.А. КОЧЕВА, Д.В. СУВОРОВ

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ  
В ТОПКЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА**

Представлены аспекты использования электрического поля в топке котлоагрегата для повышения энергетической эффективности котлов различных марок на углеводородном газообразном топливе. Во введении рассматриваются современные широко используемые методы оптимизации, а также направления повышения эффективности работы котлоагрегатов. Особое внимание уделяется ограничению использования данных методов применительно к существующим котлам, работающим на всей территории Российской Федерации. В описании процесса горения изложен механизм горения и воздействия электрического поля на факел пламени, приводящий к повышению теплотехнических характеристик котла. Применение в котельных установках: описаны особенности использования высоковольтного поля в топке котлоагрегата с учетом высокотемпературной среды. В заключение предложено мероприятие по повышению эффективности работы теплогенераторов марки ДКВР с помощью внешнего электрического поля, воздействующего на факел пламени в топке котла.

**Ключевые слова:** котлоагрегаты, электрическое поле, энергоэффективность, теплоэнергетика, высоковольтные электроды, коррекция факела.

**Введение.** Российская Федерация располагает на огромных территориях с высокой потребностью регионов в тепловой энергии. В качестве источника теплоты для обеспечения регионов тепловой энергией чаще всего применяются котельные установки.

Наиболее распространенным источником теплоты являются районные котельные, использующие газообразные горючие углеводороды. Наиболее популярными котельными агрегатами в СССР были котлы серий ДЕ, ДКВР, большая часть из которых эксплуатируется по сей день в соответствии с паспортными характеристиками. Каждая серия котлов имеет свои конструктивные особенности и отличия. Повышение энергетической эффективности и снижение расхода энергоресурсов – это важное направление в экономическом развитии и снижении конечной стоимости товаров и услуг. Повышение эффективности работы котельной установки в большинстве случаев связано с ее полной реконструкцией. Оптимизация процесса теплопередачи от факела пламени к тепловоспринимающим поверхностям нагрева осуществляется при помощи моделирования современными физико-математическими программными продуктами, целью которых является оптимизация геометрии поверхностей топки и конструкции горелки [1, 2]. На сегодняшний день оптимизация котельной может зависеть:

- от регулирования процесса горения за счет разрежения в топке котла и изменения соотношения газ/воздух;
- от формы факела при изменении конструкции горелки;

– от геометрических характеристик топки (с улучшением теплоотдачи с площади поверхности котла и снижения теплового напряжения топки).

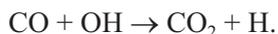
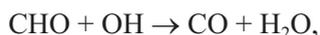
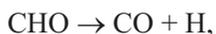
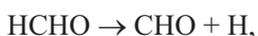
Кардинальная реконструкция топки котлов или конвективных пучков несет в себе затраты, сравнимые с заменой котла целиком, что не желательно для работающих котельных из-за несоизмеримых затрат на перевооружение экономическому эффекту.

Один из методов повышения энергетической эффективности котельных установок – использование конденсационных теплообменников [3] для снижения температуры части дымовых газов ниже температуры точки росы и использование теплоты фазового перехода продуктов сгорания природного газа. При этом образуется ряд сложностей, например, утилизация конденсата, не пригодного к использованию в качестве теплоносителя, и возможность образования кислоты на внутренней поверхности газового тракта.

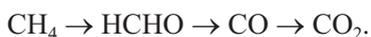
**Описание процесса горения.** При разработке большинство тепловоспринимающих поверхностей нагрева котлоагрегата рассчитывались на номинальную мощность работы котла. При снижении мощности котлоагрегата сокращается подача топливовоздушной смеси, вследствие чего происходит сокращение длины факела пламени. При этом излучающая поверхность факела сокращается, приводя к снижению теплообмена излучением на тепловоспринимающие поверхности топки, следовательно, тепловое напряжение топочного объема становится менее равномерным.

При снижении равномерности теплового напряжения в топке котла появляются зоны с различными температурными диапазонами, что в свою очередь приводит к температурным напряжениям в стальных поверхностях нагрева и сказывается на сроке эксплуатации котла. Также снижение длины факела приводит к ухудшению процесса передачи теплоты излучением к тепловоспринимающим поверхностям нагрева топки, ввиду сокращения излучающей поверхности.

Пламена углеводородных топлив относятся к пламенам с высокой степенью ионизации, с концентрацией заряженных частиц порядка  $10^{10}$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Внешнее электрическое поле будет воздействовать на частицу, имеющую заряд, меняя траекторию ее перемещения. Данный метод воздействия электрического поля широко исследовался в лабораториях [4–9] и не носил прикладной характер. Воздействие внешнего электрического поля на процессы при сжигании топлива имеет сложный характер. Реакция горения метана проходит в следующей последовательности:



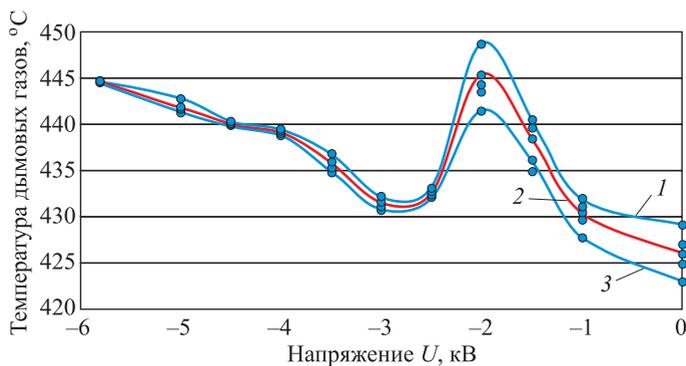
Или в сокращенном варианте написания последовательности реакции



Некоторые молекулы, образующиеся в промежуточном этапе реакции, обладают дипольным моментом. На них внешнее электрическое поле будет оказывать влияние. Движение частиц при сжигании топливовоздушной смеси соответствует Максвелловскому распределению частиц. В соответствии с классической (неквантовой) электродинамикой сила, с которой электромагнитное поле действует на точечную заряженную частицу, называют силой Лоренца. При этом нет единого определения с точки зрения разделения действия электрического или магнитного поля. В этой работе под силой Лоренца подразумевается сила воздействия внешнего электрического поля на заряженную частицу или комплексный эффект электрического и магнитного полей.

**Применение в котельных установках.** Физическое моделирование электрического поля высокой напряженности в топке котлоагрегата является сложной задачей из-за высокотемпературных характеристик среды и высокой проводимости факела. Плазма пламени является временным эффектом для отдельно взятого объема топливной смеси и существует короткое время при прохождении экзотермической реакции горения. Во время прохождения реакции смесь является высокоионизированной. Степень ионизации на несколько порядков превышает расчетную хемионизацию. Электрическое поле воздействует на заряженные частицы, которые образуются в ходе реакции. Верхним пределом воздействия электрического поля на факел пламени является пробой через высокоионизированную плазму.

Лабораторные эксперименты подтверждают воздействие электрического поля на факел в виде увеличения тепловыделения и изменения формы факела. Воздействие электрического поля на факел пламени котлоагрегата дает возможность изменить характеристики котла. Изменение формы факела позволит равномернее распределять его по объему топки, оптимизируя процесс теплоотдачи от факела к тепловоспринимающим поверхностям топки котла. Подтверждением увеличения мощности котла также является рост температуры продуктов сгорания (см. рисунок) в зависимости от прикладываемого напряжения на электроды. Анализ продуктов сгорания производился в лабораторных условиях, приближенных к реальным [10].



Изменение температуры дымовых газов от прикладываемого напряжения при сжигании природного газа

1 – линия максимума температур; 2 – средняя линия температур;  
3 – линия минимума температур

В топке температура среды составляет 600–1800 °С при сжигании природного газа, что позволяет использовать в качестве материала электродов нержавеющую сталь с температурой плавления более 1800 °С в температурных зонах, минуя высокотемпературное ядро факела.

Еще одной особенностью при моделировании электрического поля в топке котлоагрегата является стекание электрического тока на металлические поверхности котла, заземленные через жидкий теплоноситель. Продукты сгорания вокруг тепловоспринимающих поверхностей нагрева имеют диэлектрическую проницаемость ниже, чем плазма факела, что препятствует стеканию тока от напряженного электрода на стенки котла. В котлах марки ДКВР внутренние тепловоспринимающие поверхности топки обкладываются шамотным кирпичом, имеющим низкую электрическую проводимость, что способствует повышению безопасности работы котла.

**Выводы.** Топливоздушная смесь при горении является плазмой с высокой концентрацией заряженных частиц. Внешнее электрическое поле будет воздействовать на заряженные частицы факела, повышая теплотехнические характеристики котлоагрегата, что подтверждается лабораторными исследованиями. Котлы марки ДКВР имеют внутренний экран из шамотного кирпича, понижающий диэлектрическую проницаемость к стенкам котла, что располагает к экранированному моделированию внешнего электрического поля, воздействующего на пламя. В качестве материала электродов рекомендуется выбор из нержавеющей стали с температурой плавления выше 1800 °С.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Костюк В.Е. Моделирование аэродинамических процессов водотрубного парового котла ДКВР (ДЕ)-10/14 // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2016. № 44. С. 79–86.
2. Макаров А.Н., Окунева В.В., Галичева М.К. Инновационная топка парового котла энергоблока электростанции // Вестн. Твер. гос. техн. ун-та. 2016. № 2(30). С. 143–148.
3. Кладов Д.Б., Кобелев Н.С. Исследование конденсационных теплообменников в теплогенерирующей среде // Электрика. 2011. № 11. С. 29–32.
4. Кочева М.А., Суворов Д.В. Анализ экспериментальных данных по воздействию электрического поля на факел пламени в топочной камере котельной установки // Вестн. ВРО РАСН. 2016. № 19. С. 225–228.
5. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Венедиктов В.С. Угледородное диффузионное пламя в переменном электрическом поле // Сб. тр. 6-й всерос. науч. конф. с междунар. участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. М., 2016. Т. II. С. 34–39.
6. Гаранин А.Ф. Влияние постоянного и импульсно-периодического электрического поля на горение пропановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 1. С. 22–25.
7. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Венедиктов В.С. Стабилизация диффузионного поднятого угледородного пламени внешним периодическим электрическим полем // ФГВ. 2017. Т. 53. № 1. С. 38–42.

8. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Стабилизация поднятого диффузионного факела электрическим полем с изменяемой во времени конфигурацией // *Материалы XI междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях*. Алушта, 2016. С. 141–144.
9. Громцев С.А., Громцев А.С., Пурмал М.Я. Вепольная интенсификация горения топлива в топке теплового аппарата // *Науч. журн. НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2014. № 1. С. 10–14.
10. Кочева М.А., Суворов Д.В. Экспериментальное исследование снижения вредных выбросов СО и NO<sub>x</sub> при наложении электрического поля отрицательной напряженности на факел пламени // *Фундам. исследования*. 2017. № 10. (ч. 2). С. 233–238.

**Кочева Марина Алексеевна**, канд. техн. наук, доц.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

**Суворов Денис Владимирович**, ассист.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 08.09.17

**Kocheva Marina Alekseevna**, PhD, Ass. Professor

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Suvorov Denis Vladimirovich**, Assistant

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **EFFECT OF ELECTRIC FIELD ON THE FLAME IN THE FURNACE OF THE HEAT GENERATOR**

The article presents aspects of the use of the electric field in the furnace of a boiler to increase the energy efficiency of boilers of different brands for hydrocarbon gaseous fuels. In the introduction – examines the current widely used optimization methods, as well as improving the efficiency of the boilers. Special attention is paid to the restriction of the use of these methods as applied to existing boilers, operating on all territory of the Russian Federation. In the description of the burning process – set out the mechanism of combustion and the effects of electric fields on the flame leading to improvement of thermal performance of the boiler. Application in boiler plants – describes the specifics of using high voltage fields in the furnace of a boiler subject to high temperature environment. In conclusion, the proposed measures to increase the efficiency of heat generators of the brand DKVR the action of an external electric field in the boiler furnace.

**Key words:** boilers, electric field, energy efficiency, power system, high voltage electrodes, the impact on the torch.

### REFERENCES

1. Red'ko A.A., Davidenko A.V., Pavlovskiy S.V., Kostyuk V.E. Modelirovanie aerodinamicheskikh protsessov vodotrubnogo parovogo kotla DKVR (DE)-10/14 [Modeling of aerodynamic processes water-tube steam boilers DKVR (DE)-10/14]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «HPI»* [Herald of the National University Technonogy «HPI»]. 2016. No. 44. P. 79–86.
2. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Innovatsionnaya topka parovogo kotla energobloka elektrostantsii [Innovative furnace of steam boiler unit power plant]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Tver State Technical University]. 2016. No. 2(30). Pp. 143–148. (in Russian)

3. K l a d o v D.B., K o b e l e v N.S. Issledovanie kondensatsionnykh teploobmennikov v teplogeneriruyushchey srede [A study of the condensation heat exchangers heatgenerating environment]. *Elektrika* [Electrician]. 2011. No. 11. Pp. 29–32. (in Russian)
4. K o c h e v a M.A., S u v o r o v D.V. Analiz eksperimental'nykh dannykh po vozdeystviyu elektricheskogo polya na fakel plameni v topochnoy kamere kotel'noy ustanovki [Analysis of experimental data on effects of electric field on the flame in the combustion chamber of the boiler plant]. *Vestnik VRO RASN* [Bulletin of RFO RASN]. 2016. No. 19. Pp. 225–228. (in Russian)
5. T u p i k i n A.V., T r e t ' y a k o v P.K., V e n e d i k t o v V.S. Uglevodorodnoe diffuzionnoe plama v peremennom elektricheskom pole [Hydrocarbon diffusion flames in an alternating electric field]. *Sbornik trudov 6-y vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem im. I.F. Obraztsova i Yu.G. Yanovskogo* [Proceedings of 6-th all-Russian scientific conference with international participation of them. I.F. Obraztsov and Yu.G. Yanovskiy]. Moscow, 2016. Vol. II. Pp. 34–39. (in Russian)
6. G a r a n i n A.F. Vliyanie postoyannogo i impul'sno-periodicheskogo elektricheskogo polya na gorenje propanovozdushnoy smesi [Influence of continuous and pulse-periodic electric fields on combustion of a mixture proprofessional]. *Fizika gorenija i vzryva* [Physics of combustion and explosion]. 2008. Vol. 44. No. 1. Pp. 22–25. (in Russian)
7. T u p i k i n A.V., T r e t ' y a k o v P.K., V e n e d i k t o v V.S. Stabilizatsiya diffuzionnogo podnyatogo uglevodorodnogo plameni vneshnim periodicheskim elektricheskim polem [Stabilization of lifted diffusion flame of a hydrocarbon external periodic electric field]. *FGV* [SCF]. 2017. Vol. 53. No. 1. Pp. 38–42. (in Russian)
8. K o z u l i n V.S., T r e t ' y a k o v P.K., T u p i k i n A.V. Stabilizatsiya podnyatogo diffuzionnogo fakela elektricheskim polem s izmenyaemoy vo vremeni konfiguratsiey [Stabilization of lifted diffusion flame electric field variable in time by the configuration]. *Materialy XI mezhdunarodnoy konferentsii po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh* [Proceedings of the XI international conference on nonequilibrium processes in nozzles and jets]. Alushta, 2016. Pp. 141–144. (in Russian)
9. G r o m t s e v S.A., G r o m t s e v A.S., P u r m a l M.Ya. Vepol'naya intensifikatsiya gorenija topliva v topke teplovogo apparata [Su intensification of burning fuel in the furnace thermal apparatus]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [The scientific journal ITMO. Series Processes and equipment for food production]. 2014. No. 1. Pp. 10–14. (in Russian)
10. K o c h e v a M.A., S u v o r o v D.V. Eksperimental'noe issledovanie snizheniya vrednykh vybrosov CO i NO<sub>x</sub> pri nalozhenii elektricheskogo polya otritsatel'noy napryazhennosti na fakel plameni [Experimental investigation to reduce emissions of co and NO<sub>x</sub> when applying a negative electric field intensity on the flame]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2017. No. 10 (p. 2). Pp. 233–238. (in Russian)

## **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ**



УДК 728.6

**А.Е. ЛИХАЧЕВА**

### **ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ ТИПОВ КРЕСТЬЯНСКИХ ФЕРМЕРСКИХ ХОЗЯЙСТВ**

Эволюция крестьянских товарных хозяйств в России в начале XX в. остановилась, в отличие от стран Западной Европы и Северной Америки, в которых за прошедшее столетие сложились разнообразные типы фермерских хозяйств. Поиск моделей современных крестьянских фермерских хозяйств (КФХ) Сибири учитывает особенности эволюции архитектурно-планировочных структур отечественных крестьянских хозяйств товарного типа и опыт планировочной организации фермерских хозяйств зарубежных стран, схожих с Россией по природно-климатическим и градостроительным условиям, что позволяет сравнить характер эволюции крестьянских товарных хозяйств России и фермерских хозяйств за рубежом как процесс адаптации к новым условиям.

**Ключевые слова:** эволюция, крестьянское товарное хозяйство, фермерское хозяйство, усадьба, планировка, функциональная организация, архитектура, типология, зарубежный опыт, Западная Сибирь.

В качестве объекта исследования выбраны крестьянские хозяйства товарного типа дореволюционной России, фермерские хозяйства зарубежных стран, близких к России по природно-климатическим и градостроительным условиям развития, а также КФХ, формируемые на территории Западной Сибири. Источником изучения послужили отечественные и зарубежные картографические публикации по материалам этнографических исследований сельских жилищных комплексов на рассматриваемых территориях. В работе сопоставляется информация междисциплинарного характера об особенностях возникновения и этапного развития архитектурно-планировочных типов крестьянских товарных хозяйств в отечественной и зарубежной практике.

Ко второй половине XIX в. в Западной Сибири сложились разнообразные приемы застройки крупных крестьянских усадеб, соответствующие природно-географическим особенностям территорий и обусловленные культурно-историческими, социально-экономическими, этническими и другими факторами [1]. По объемно-планировочному решению развились три основ-

ных типа жилищно-производственных комплексов крестьянских товарных хозяйств старожилов:

– замкнутый тип усадьбы со сплошь крытым внутренним двором в северных и лесотаяжных районах Западной Сибири;

– ограниченно закрытый тип усадьбы с замкнутыми дворами и застроенными по всему периметру хозяйственными помещениями, применялся населением центральных лесостепных и подтаежных районов; был распространен в трактовых селах и на реках с оживленным движением;

– открытый тип жилищно-производственного комплекса, был характерен для южных степных и лесостепных районов Западной Сибири.

В горных долинах Алтая сформировались особые типы слитной застройки дома и надворных строений зажиточных крестьян-старообрядцев: хоромный и охватывающий типы, вызванные высоким снежным покровом.

Удаленность некоторых районов Сибири от широких путей сообщения способствовала сохранению ряда композиционных приемов древнерусского зодчества, таких как «тройные», «двойные» и комбинированные, сложные избы, которые в середине XX в. еще встречались в кержацких селах на реках Бухтарме, Иртыше и в ряде сел Томской области [2]. В зажиточных старожильческих хозяйствах создавались большие усадебные комплексы с двумя, тремя жилыми домами и соответствующим числом построек для скота. Застройка старожильческих усадеб в основном представляла собой волжско-камский или вятский тип, многорядная композиция усадьбы в плане развивалась в глубину участка и нередко вдоль улицы вместо замкнутого двора практиковалось устройство крытых дворов при двойных и тройных избах [3].

После проведения Сибирской железной дороги стали прибывать новоселы, преимущественно из средне- и южно-европейской полосы. В местах, куда в конце XIX – начале XX в. шел переселенческий поток, создавались зоны с новыми этнокультурными традициями, которые отличались от сложившегося быта сибиряков-старожилов [4]. Переселенцы приносили обычаи своих мест, применяя южно-русскую планировку помещений дома. В зонах с новыми этнокультурными традициями складывался ряд региональных типов усадеб зажиточных крестьян-переселенцев: крытый усадебный комплекс украинцев; блокированный в одну линию застройки усадебный комплекс немцев-меннонитов; павильонный тип застройки усадьбы поволжских немцев; блокированный тип с крытым «П»-образным двором волынских немцев; замкнутая прямоугольная усадьба, трехрядная усадьба и усадьба со свободной застройкой на хуторах латышей и другие типы [5].

Переселенцы, селясь этническими группами, сохраняли в структуре усадьбы и жилища свои национальные особенности. С учетом суровых природных условий и сложившихся архитектурно-строительных традиций местных жителей эти особенности видоизменялись и совершенствовались. В начале XX в. продолжилось заселение Западной Сибири немцами-колонистами. Перенеся сюда ростки фермерского хозяйства, они занимались товарным производством; при усадьбах устраивались пивоваренные производства, колбасные мастерские, мукомольные мельницы, маслобойни, работающие на рынок [6]. В зажиточных хозяйствах для большого стада

крупного скота строились комплексы отдельно стоящих животноводческих сооружений.

Важный этап эволюции крестьянских товарных хозяйств был связан с аграрной реформой П.А. Столыпина (1906 г.), центральным звеном которой было постепенное упразднение сельской общины как коллективного собственника земель и создание крепкого семейного крестьянского хозяйства фермерского типа. Аграрная реформа отводила большую роль хуторам, которые должны были обеспечивать наиболее благоприятные условия для развития фермерского производства. Процесс по обустройству хуторов и переселенческих участков под отруба в Западной Сибири в первые годы реформы шел медленно, но к 1911–1914 гг. он ускоряется. От первоначальной практики организации отдельных хуторов землеустроительные органы переходят к выделению земельных угодий под группы хуторов [7]. Зажиточные крестьяне также занимались перевозкой леса, ямщиной и извозом благодаря близости Сибирского торгового тракта. Группа крестьянских товарных хозяйств, составляющая 2–3 % от числа всех крестьянских хозяйств региона, в дальнейшем могла эволюционировать в хозяйства капиталистического, фермерского типа [8]. После Октябрьской революции зажиточные крестьянские хозяйства как товарные производители перестают существовать, трансформируясь в личные подсобные хозяйства.

В XIX в. разные социально-экономические условия определили особые пути исторического развития капитализма в сельском хозяйстве стран Европы и Северной Америки: прусский (Германия и другие европейские страны) и американский [9]. Прусский путь означал медленное перерастание феодально-помещичьего хозяйства в буржуазное и соответствовал условиям, сложившимся в европейской части Российской империи. Американский путь означал свободное развитие крестьянского фермерского хозяйства при отсутствии феодально-помещичьего землевладения и подходил для территории Сибири, где оно отсутствовало. Крестьянская усадьба в Германии столетиями являлась многофункциональным архитектурным объектом, в котором гармонично сочетались функции жилья и безотходного производства. До середины XIX в. во многих крестьянских усадьбах Германии, Голландии, ряда других северных стран животноводческие и хозяйственные помещения совмещались с жилыми помещениями, образуя единое объемно-пространственное решение [10]. К середине XIX в. на отдельных территориях раздробленной Германии сложились различные этнокультурные архитектурно-планировочные типы усадеб зажиточных крестьян. На севере Германии равнинная местность была беспорядочно нарезана лоскутными полями как результат дробления земельных крестьянских наделов, многовекового деления их между наследниками. Сегодня фермерские хозяйства Германии имеют относительно небольшие размеры. В центре страны к началу XXI в. сетка земельных участков стала более крупной и регулярной. Земли нерентабельных КФХ переводятся под крупные животноводческие комплексы и пригородные лесопосадки. Наряду с размещением усадеб на хуторах встречается гнездовое расположение комплексов жилых зданий и блокированных с ними животноводческих построек на удалении от земельных наделов (отрубов),

преимущественно в старых фермерских поселках (например, п. Кольдинген, Нижняя Саксония).

В ряде районов Германии и соседней Голландии усадьбы выстраиваются в сплошную линию, улицу. Их узкие земельные участки вытягиваются в глубину на сотни метров. Некоторые фермы, расположенные в природном и историческом окружении, становятся музейными объектами и используются в рекреационных целях. В Германии поощряется ландшафтное ведение земледелия, зеленые технологии становятся все более доступными [11]. Среди многообразия архитектурно-планировочных решений усадеб КФХ страны следует выделить: *традиционный тип* усадеб, формируемых с конца XIX – первой половины XX в. на основе сохранения архитектурно-художественного образа и прежних строительных решений; *эволюционный тип* предусматривает поэтапное расширение усадьбы с частичным сохранением ее планировочной структуры; отмечаются фрактальные свойства планировочной структуры – повторение традиционно сложившегося архетипа застройки. При размещении КФХ в пригороде имеет место реновация ферм под жилую зону с рекреационно-досуговыми функциями; *модернизационный тип* усадеб основан на обновлении технологических процессов, уплотнении застройки путем формирования моноблоков, применении современных архитектурно-строительных решений; *инновационный тип* комплексов базируется на внедрении высокотехнологичных решений, новых конструктивных схем, альтернативной энергетики; *музейно-досуговый тип* усадебного комплекса предусматривает интеграцию КФХ в структуру музеев под открытым небом, где демонстрируются не только традиционные коллекции предметов, а памятники архитектуры и народного быта, представленные в естественном природном окружении, где производственные функции сочетаются с экскурсионными, торговыми и досуговыми.

В Финляндии КФХ размещаются на удаленных хуторах или группами по 2–3 хозяйства вдоль транспортных коммуникаций. Ландшафт местности с обилием леса, природных водоемов определяет сложную конфигурацию земельных участков КФХ. Основными архитектурно-планировочными типами усадеб Финляндии являются: *традиционный*, который отличается от немецких фермерских хозяйств более свободной планировкой участка; *модернизационный* и *экотуристический* типы усадебных комплексов, учитывающие растущие потребности городского населения Финляндии и приграничных с ней районов России в активном отдыхе на природе. В состав усадьбы кроме гостиниц и гостевых домиков входят конные манежи, сооружения для туризма и рыбалки, спортивные объекты на воде и др.

В Швеции фермерские хозяйства объединяются в небольшие поселки (гнезда) на 4–5 семей, они стали популярным местом отпуска. Большое количество фермеров приспособливают свои хозяйства для нужд туристов, их привлекает деревенская окружающая среда, близость к животным и местные продукты питания.

На размещение КФХ в США оказали большое влияние исторические особенности эволюции системы землепользования. Так, на огромной равнине Молочного пояса земледельческая территория нарезана дорогами на ровные, большие квадраты, на которые делились земельные угодья для пришедших на эту территорию колонистов. Закон о гомстедах, принятый

в 1862 г., предлагал участок земли под ферму («гомстед» – хутор) размером 85 га любой семье переселенцев и укреплял существующую систему малых семейных ферм [12]. В США сложились 9 регионов размещения фермерских хозяйств со специфическими природно-климатическими условиями, аграрно-отраслевой специализацией и с различными архитектурно-планировочными типами КФХ [13]. Хотя в стране преобладают КФХ хуторского типа, но на территории Западных Великих равнин, Северном Кукурузном поясе и в примыкающих к ним районах Канады, где средняя плотность населения – около 9 чел. на км<sup>2</sup>, жилые усадьбы размещаются в фермерских поселках отдельно от земельных участков (отрубов). В штате Пенсильвания с высокой плотностью населения в районе ленточных лесов КФХ растянулись большими группами в виде полос вдоль лесных массивов. В связи с урбанизацией жилые поселения теснят фермерские хозяйства. Полосовая структура размещения фермерских хозяйств преобразуется в разреженную; отдельные КФХ постепенно окружаются жилыми образованиями. В штате Иллинойс земледельческая территория нарезана дорогами на большие квадратные участки площадью в 1 кв. милю (259 га). Усадьбы размещаются по периметру квадратов, вдоль дорог. Здесь основное распространение получили КФХ *традиционного и модернизационного* типов.

В районе г. Ланкастер местное население – меннониты-переселенцы из Центральной Европы предпочитают уединенно-патриархальный, общинно-религиозный образ жизни. Усадьбы старообрядцев размещаются плотной сетью на удалении от дороги, имеют развитую функционально-планировочную структуру, которая отражает специфические особенности семейно-бытовых и хозяйственных процессов. Среди многообразия архитектурно-планировочных решений зарубежных КФХ выделяются две типологические группы: «устойчивая» и «адаптированная». К первой группе относятся хозяйства *традиционного, эволюционного и модернизационного* типов, которые, обновляя свою планировочную структуру, продолжают осуществлять функции стабильного сельхозпроизводителя и успешно конкурируют с крупными агрофирмами. Во вторую, складывающуюся, адаптированную группу можно отнести КФХ конца XX – начала XXI в.: *инновационного, музейно-досугового, экотуристического, рекреационного* и других новых типов. Их функционально-планировочные модели отражают современные подходы к устойчивому развитию территорий, трансформации системы расселения и изменения роли фермерских хозяйств в производстве и сфере обслуживания.

В конце XX в. в России на базе личных подсобных крестьянских хозяйств создаются малые семейные фермерские хозяйства с многопрофильным производством. Крупные и средние специализированные КФХ часто организовывались путем приватизации сельскохозяйственных предприятий. В системе расселения стали формироваться три вида КФХ:

– пригородные многопрофильные и специализированные КФХ, учитывающие особенности развития урбанизированных территорий, высокую плотность населения, развитость транспортной, инженерной инфраструктур, в основном реализуют продукцию местному населению; развивают функции торгового и сервисного обслуживания транзитных пассажиров и городского населения;

– крестьянское специализированное фермерское хозяйство сельскохозяйственных районов, формируемое на началах межхозяйственной кооперации;

– автономное КФХ отдаленных сельскохозяйственных районов.

Встречаются три решения архитектурно-планировочной структуры КФХ: *компактное*, представляющее собой блокированный объем, образованный жилой, хозяйственно-бытовой и производственной частями усадьбы, архитектурно-планировочная структура идентична традиционному замкнутому типу ранних крестьянских товарных хозяйств в Западной Сибири; *гнездовое*, образованное отдельно стоящими зданиями и сооружениями; *кустовое* решение структуры, состоящее из функциональных объектов КФХ, расположенных на отдельных участках.

На территории Западной Сибири идет процесс формирования следующих функционально-планировочных типов усадебных комплексов:

– *переходного типа*, основанных на личных подсобных многопрофильных хозяйствах крестьян и имеющих кустовую планировочную структуру за счет приобретения дополнительных земельных наделов для расширения производства до товарного уровня;

– *традиционного типа*, который характеризуется применением в архитектурно-планировочной организации усадьбы приемов застройки крестьянских зажиточных хозяйств, сложившихся в Западной Сибири в конце XIX – начале XX в.;

– *модернизационному типу* соответствуют усадьбы КФХ, архитектурно-планировочные и конструктивные решения которых отражают технологические обновления производства и архитектурно-пространственной среды;

– *рекреационного типа*, которые имеют функционально-планировочную инфраструктуру для сезонного и длительного отдыха;

– *экотуристического типа и фермерских хозяйств национальной кухни*, использующие богатый и благоприятный для туризма и отдыха природный потенциал территории Западной Сибири и многонациональный характер культуры ее народов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липинская В.А. Жилище восточнославянского населения Сибири // Традиционное жилище народов России: XIX – начала XX в. М.: Наука, 1997. С. 60–78.
2. Бломквист Е.Э., Гринкова Н.П. Бухтарминские старообрядцы. Л.: Изд. Академии наук СССР, 1930.
3. Ащепков Е.А. Русское народное зодчество Западной Сибири. М.: Изд-во Академии архитектуры СССР, 1950.
4. Baikalov V.A. Siberia since 1894 // Slavonic and East European Review. 1933. Vol. XI. No. 32. P. 328–340.
5. Свитнев А.Б. К вопросу об исследовании поселенческо-усадебного комплекса латышей и латгальцев Западной Сибири // Культурологические исследования в Сибири. Омск, 2001. № 1. С. 129–137.
6. Бетхер А.Р., Курманова С.Р., Смирнова Т.Б. Хозяйство и материальная культура немцев Сибири: монография / под общ. ред. Т.Б. Смирновой. Омск: Издат. дом «Наука», 2013.

7. ГАНО – Государственный архив Новосибирской области. Ф. 1988. Оп. 1а, Д. 53; Ф. 270. Оп. 1, Д. 68.
8. Никулин П.Ф. К вопросу о модернизационно-экономических факторах развития сельскохозяйственного производства в Сибири в начале XX в. // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 1 (33). С. 10–14.
9. Ленин В.И. Полное собрание сочинений. М., 1975. Т. 16. С. 216.
10. Kaiser H. Ein Haus und eine Familie in schweren Zeiten: Der Wiederaufbau der Hofanlage Wübbe M. Meyer aus Firrel, Ostfriesland im Museumsdorf Cloppenburg // Stiftung Museums dorf Cloppenburg, 2003. S. 16–31.
11. Савельева И.Н., Ковалев В.Е., Фальченко О.Д. Особенности инновационного развития в аграрном комплексе Германии // Агропродовольственная политика России. 2017. № 4 (64). С. 19–24.
12. Лукин Н.М., Далин В.М. Новая история в документах и материалах. М., 1934. Вып. II. С. 206–209.
13. Терентьева А.С. Фермерские хозяйства США в начале XXI века: состояние и тенденции развития // США и Канада: экономика, политика, культура. 2015. № 12 (552). С. 85–101.

**Лихачева Алла Евгеньевна**, ст. препод.

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусства

Получено 19.09.17

**Likhacheva Alla Evgen'evna**, Senior Lecturer

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

## **FEATURES OF EVOLUTION OF ARCHITECTURAL AND PLANNING TYPES OF COUNTRY FARMS**

Evolution of peasant commodity farms in Russia in the early 20th century has stopped, in contrast to the farms of Western Europe and North America, where over the past century have developed various types of farms. In this regard, finding the best models of modern peasant farms in Siberia should take into account the evolution of farms commercial type period of pre-revolutionary Russia and the foreign experience of architectural organization farms. As an object of study selected architectural and planning solutions farms commercial type of pre-revolutionary Russia, farms in foreign countries like Russian on climatic and urban conditions development, as well as, modern peasant farms folding in Siberia. In the work used historical-genetic and comparative methods: maps information about peculiarities of the interdisciplinary nature of the emergence and development of the architectural landmark.

**Key words:** evolution, peasant commodity economy, farming, homestead, planning, functional organization, architecture, typology, foreign experience, Western Siberia.

### **REFERENCES**

1. Lipinskaya V.A. Zhilishche vostochnoslavyanskogo naseleniya Sibiri [The dwelling of the East Slavic population of Siberia]. Traditsionnoe zhilishche narodov Rossii: XIX – nachala XX v. [Traditional dwelling of the peoples of Russia: the XIX–early XX century]. Moscow, Science, 1997. Pp. 60–78. (in Russian)
2. Blomkvist E.E., Grinkova N.P. Bukhtarminskie staroobryadtsy [Bukhtarma Old Believers]. Leningrad: Publication of the Academy of Sciences of the USSR, 1930. (in Russian)

3. Ashchepkov E.A. Russkoe narodnoe zodchestvo Zapadnoy Sibiri [Russian folk architecture of Western Siberia]. Moscow, Publishing house of the Academy of Architecture of the USSR, 1950. (in Russian)
4. Baikalov V.A. Siberia since 1894. Slavonic and East European Review. 1933. Vol. XI. No. 32. Pp. 328–340.
5. Svitnev A.B. K voprosu ob issledovanii poselenchesko-usadebnogo kompleksa latyshey i latgal'tsev Zapadnoy Sibiri [To the question of the study of the settlement-estate complex of Latvians and Latgalians of Western Siberia]. Kul'turologicheskie issledovaniya v Sibiri [Cultural studies in Siberia]. Omsk, 2001. No. 1. Pp. 129–137. (in Russian)
6. Betkher A.R., Kurmanova S.R., Smirnova T.B. Khozyaystvo i material'naya kul'tura nemtsev Sibiri: monografiya [Economy and material culture of the Germans in Siberia: monograph]. Under the general wording T.B. Smirnova. Omsk: Publishing house «Science», 2013. (in Russian)
7. GANO – Gosudarstvennyy arkhiv Novosibirskoy oblasti [State Archives of the Novosibirsk Region]. Fund 1988. (in Russian)
8. Nikulin P.F. K voprosu o modernizatsionno-ekonomicheskikh faktorakh razvitiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva v Sibiri v nachale XX v. [On the issue of modernization and economic factors in the development of agricultural production in Siberia in the early twentieth century]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Tomsk State University]. 2015. No. 1 (33). Pp. 10–14. (in Russian)
9. Lenin V.I. Polnoe sobranie sochineniy [Complete works]. Moscow, 1975. Vol. 16. P. 216. (in Russian)
10. Kaiser H. Ein Haus und eine Familie in schweren Zeiten: Der Wiederaufbau der Hofanlage Wübbe M. Meyer aus Firrel, Ostfriesland im Museumsdorf Cloppenburg. Stiftung Museums dorf Cloppenburg, 2003. S. 16–31.
11. Savel'eva I.N., Kovalev V.E., Fal'chenko O.D. Osobennosti innovatsionnogo razvitiya v agrarnom komplekse Germanii [Features of innovative development in agrarian complex of Germany]. Agroproduktov'stvennaya politika Rossii [Agri-food policy in Russia]. 2017. No. 4 (64). Pp. 19–24. (in Russian)
12. Lukin N.M., Dalin V.M. Novaya istoriya v dokumentakh i materialakh [News history in documents and materials]. Moscow, 1934. Fasc. II. Pp. 206–209. (in Russian)
13. Terent'eva A.S. Fermerskie khozyaystva SShA v nachale XXI veka: sostoyanie i tendentsii razvitiya [Farms USA in the early XXI century: the status and trends of development]. SShA i Kanada: ekonomika, politika, kul'tura [USA and Canada: economy, policy, culture]. 2015. No. 12 (552). Pp. 85–101. (in Russian)

УДК 728.01

С.А. ЗАВЫЛЁНКОВ

## О КЛАССИФИКАЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Исследуя многофункциональные жилые здания, понимание каждой функции в отдельности так же важно, как и анализ их взаимодействий. Для этого была составлена классификация каждого типа функций. Классификация делит все возможные функции многофункциональных жилых зданий на три группы: жилая функция, функция обслуживания и места приложения труда. По каждой группе выявлены параметры, по которым можно характеризовать помещения как отдельно от системы многофункционального здания, так и во взаимодействии с другими функциональными группами. Получившееся деление позволяет более подробно проследить особенности реализации в помещениях каждого типа функций и смоделировать, как функции будут взаимодействовать в процессе проектирования, основываясь на существующих объектах.

**Ключевые слова:** офисно-жилая структура, интеграция, типология зданий, многофункциональные комплексы, типы помещений.

Рассматривая многофункциональные здания в комплексе взаимодействия функций проживания (отдых, сон, приготовление пищи), общественных пространств (рекреации, функция торговли, спорт, сервисный блок) и мест приложения труда, в первую очередь необходимо рассмотреть каждую из функций в отдельности. Основываясь на ранее разработанных классификациях жилых и общественных зданий [1, 2], типология адаптирована для многофункциональных жилых зданий.

**Жилая функция.** Здесь рассматривается спектр жилых помещений исходя из пяти критериев:

- времени пребывания;
- возможности трансформации;
- комфортности;
- изолированности;
- социального статуса жильца.

Согласно *классификации жилища по времени пребывания*, можно выделить три разновидности, непосредственно влияющие на планировочную структуру жилых помещений.

Постоянное жилье – жилые помещения, предназначенные для проживания человека на всем протяжении времени или до момента изменения состава семьи, и/или улучшения жилищных условий. Постоянное жилье характеризуется наличием трех основных функций жилья (отдых, сон, прием пищи) в едином объеме. Примеры: индивидуальные дома, квартира.

Долгосрочная аренда – отличие от постоянного жилья состоит в намеренном ограничении срока проживания, насыщение функциями таких

помещений зависит от комфортности и продолжительности аренды. При этом жилые помещения, изначально предназначенные для постоянного проживания, могут использоваться в долгосрочной аренде. Пример: апартамент.

Кратковременное пребывание – жилые помещения, не предназначенные для долговременного проживания. Зачастую в объеме таких жилых помещений предусматривают только функцию сна, а отдых и прием пищи – в смежном блоке. Пример: гостиничные номера, общежития.

*Классификация по возможности трансформации.* В общем случае без учета конструктивных особенностей и расположения инженерных сетей можно выделить три степени гибкости планировочной структуры жилых помещений. По мере возрастания возможности перепланировки это: жесткий план (одна функция – одно помещение), помещения с возможностью изменения функционального зонирования, свободная планировка. Примеры для каждого типа соответственно: квартира, квартира-студия, лофт.

*Классификация по изолированности.* Этот параметр классификации будет подробнее рассмотрен в части, описывающей планировочную структуру здания. Но рассматривая степень изолированности жилых помещений в отрыве от планировочной структуры, выделим следующие степени изолированности: совмещенное жилье; изолированность в объеме комнаты; в объеме квартиры; в объеме этажа; в объеме здания.

Последние два критерия отражают не столько планировочную структуру, сколько социально-экономическую принадлежность, описывая степень комфортности и социальный статус жильца [3–5]. Эти параметры не описывают напрямую жилые помещения, но помогают персонифицировать объекты жилой инфраструктуры исходя из портрета потребителя.

Здесь намеренно опускаются некоторые аспекты типологии жилых зданий, такие как конструктивная схема, этажность, климатические характеристики. Данная классификация не ставит целью рассмотрение всех возможных вариантов решения жилых помещений по всем показателям, а определяет граничные условия анализа взаимодействия жилой функции с местами приложения труда, сервисным блоком и общественными пространствами. Это также справедливо для классификаций, приведенных ниже.

**Места приложения труда.** В контексте многофункциональности для определения оптимальных параметров совмещения жилой и общественных функций необходимо разделить все возможные типы мест приложения труда по следующим параметрам [6,7]:

- по характеру труда;
- по численности сотрудников (масштабность);
- по потребности в вспомогательных помещениях;
- по степени воздействия на окружающую среду;
- по режиму функционирования (в том числе по режиму работы);
- по требовательности к планировочной структуре;
- по классу комфортности.

*По характеру труда.* Выделим пять основных направлений трудовой деятельности, определяющих планировочную структуру и требующих раз-

личных условий: интеллектуальный труд/творческая деятельность [8, 9], физический труд, деятельность, связанная с работой с посетителями, смешанная трудовая деятельность.

*По численности сотрудников* (масштабность). Принципиально отличие в планировочных элементах для всех типов мест приложения труда наблюдается в изменении численности работающих в следующих типах мест приложения труда: индивидуальные рабочие места, помещения микроорганизаций (до 10 человек), в организациях с численностью работающих 10 человек и более. Однако с учетом неоднородности видов трудовой деятельности целесообразно сгруппировать типы масштабности по каждому из типов трудовой деятельности.

*По потребности в вспомогательных помещениях.* Помещения приложения труда, с одной стороны, можно разделить на изолированные, требующие наличия непосредственной связи с вспомогательными помещениями и связью эпизодического характера. Под вспомогательными помещениями подразумеваются предприятия питания и копировальные центры. Но при оперировании понятием вспомогательных помещений в более широком смысле к ним также можно отнести складские помещения, вестибюли, гардеробные и прочие помещения, выходящие за критерий достаточных условий для осуществления трудовой деятельности. Это расширение понятия поможет более подробно описать требования к составу помещений всех типов мест приложения труда.

*По степени воздействия на окружающую среду.* Помещения делим, подразумевая возможность размещения их в объеме жилого дома, рассматривая влияние, оказываемое на заблокированные помещения другого функционального назначения. С учетом применения современных экологических технологий негативное воздействие производств на городскую среду может быть минимизировано, что позволит разместить эти производства в санитарных зонах. Таким образом, выделим два типа помещений – вредные, не имеющие возможности размещения в смежных с жилыми помещениями объемах, и безвредные, не обладающие какими-либо ограничениями по размещению [10].

*По режиму функционирования.* Разделим на два направления: по режиму функционирования как системы доступа посетителей (закрытые, открытые, смешанные) и по времени функционирования (в период рабочего дня, ненормированный рабочий день, периодическое использование, круглосуточное). Режим функционирования пространств диктует характер их планировочного совмещения с учетом социально-психологического аспекта и рационального использования помещений.

*По требовательности к планировочной структуре.* Необходимо различать помещения, технологические процессы которых подразумевают четкую планировочную структуру и неэффективны в свободной планировочной структуре. Это деление позволит определить необходимые параметры помещений согласно возможности их размещения. Условно разделим помещения на требующие специальных условий планировочной структуры, не требующие, смешанные.

**Сервисный блок.** В контексте многофункциональных жилых комплексов сервисный блок может быть представлен с двух точек зрения – как по-

мещения обслуживания жилых помещений и мест приложения труда или, наоборот, как основная функция здания, технологическая схема которого подразумевает использование жилых и общественных помещений. Параметры, присущие вспомогательным помещениям, зависят исключительно от типа помещения, к которому они относятся. Помещения обслуживания могут быть классифицированы [11]:

- по режиму работы,
- по направленности (ориентированности),
- по требованиям к планировочным элементам,
- по пропускной способности (мощности),
- по типам предоставляемых услуг.

Классификация помещений обслуживания частично совпадает с классификацией помещений для приложения труда, так как помещения обслуживания для одной группы пользователей жилого комплекса в частном случае будут местом работы для жильцов этого же комплекса, что вызывает необходимость рассматривать эти помещения и как места приложения труда.

Деление помещений обслуживания по направленности касается их «целевой аудитории», подразумевается ориентированность на жильцов, ориентированность на работающих, ориентированность на внешних посетителей или комбинация из этих типов.

По типам предоставляемых услуг важно разделить эти помещения на торговые, рекреационные, помещения питания и общественно образовательные помещения.

Сочетание разнородных функций в непосредственной близости ведет к конфликту требований к отдельной функции, что влечет за собой ограничения к рабочим помещениям или уменьшение комфортности и сокращение типов жилых помещений. Рассматривая место приложения труда как доминирующую функцию, приходим к выводу, что тип жилых помещений должен соответствовать по параметрам времени, характеру трудовой деятельности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Синянский И.А., Манешина Н.И. Типология зданий. М.: Издат. центр «Академия», 2014. 141 с.
2. Буток О.В., Черныш Н.Д. Типологические основы проектирования многофункциональных жилых комплексов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых. 2014. С. 138–142.
3. Скоблицкая Ю.А. Организация обслуживания в многоэтажных жилых комплексах в крупнейшем городе (на примере города Ростова-на-Дону) // Архитектон: известия вузов. № 30. Приложение. 2010.
4. Першина И.Л., Кан А.Ю. Структура доходных жилых комплексов с обслуживанием // Будущее науки. 2013. Т. 2. С. 166–170.
5. Гребенщиков К.Н., Меренков А.В. Принципы организации многоквартирного жилища // Приволжский научный журнал. 2012. № 2. С. 166–169.
6. Матехина О.В., Осипов Ю.К. Градостроительные функции и художественно-композиционная роль общественных зданий в городской среде // Вестн. Сиб. гос. индустр. ун-та. 2016. № 1 (15). С. 31–33.

7. Фомина В.Ф. Архитектурно-конструктивное проектирование общественных зданий: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 97 с.
8. Колгашкина В.А. Предпосылки и основные тенденции формирования в современных условиях жилых комплексов с интегрированными деловыми функциями: автореф. дис. ... канд. архитектуры. М., 2015. 33 с.
9. Чернышева И.В. Типология размещения общественных функций в жилых зданиях повышенной этажности // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн / сб. статей; под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, Е.А. Ахмедовой. Самара: Самар. гос. архит.-строит. ун-т, 2015. С. 151–156.
10. Волков Е.М. Здание, функция и другая функция: замещение, трансформация, наложение // Архитектон: известия вузов. № 26. Приложение. 2009.
11. Григорьев А.Н. Организационно-экономические механизмы формирования сервисных комплексов для различных типов офисных и жилых зданий (на примере г. Москвы): автореф. дис. ... канд. архитектуры. М., 2010. 33 с.

**Завылёнков Семён Аркадьевич**, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 11.09.17

**Zavylenkov Semen Arkad'evich**, Post-graduate Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **ABOUT CLASSIFICATION OF PREMISES OF MULTIFUNCTIONAL RESIDENTIAL COMPLEXES**

Exploring multi-functional residential buildings, understanding each function separately is as important as analyzing their interactions. For this, a classification was made for each type of function. Classification to divide all the possible functions of multi-functional residential buildings into three groups: residential function, service function and place of employment. For each group, parameters were identified for which it is possible to characterize the premises both separately from the multifunctional building system and in interaction with other functional groups. The resulting division allows you to more closely trace the implementation features in the premises, each type of function and simulate how the functions will interact in the design process based on existing objects.

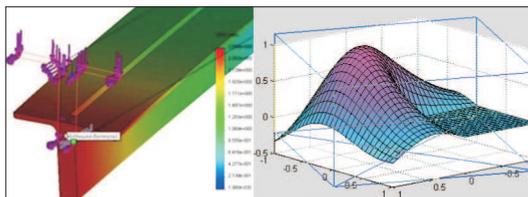
**Key words:** office-residential structure, integration, typology of buildings, multi-functional complexes, types of premises.

## **REFERENCES**

1. Sinyanskiy I.A., Maneshina N.I. Tipologiya zdaniy [Typology of buildings]. Moscow, Publishing tsentr «Akademy», 2014. 141 p. (in Russian)
2. Butok O.V., Chernysh N.D. Tipologicheskie osnovy proektirovaniya mnogofunktional'nykh zhilykh kompleksov [Typological foundations for the design of multifunctional residential complexes]. Pokolenie budushchego: vzglyad molodykh uchenykh [The Generation of the Poor: The View of Young Scientists]. 2014. Pp. 138–142. (in Russian)
3. Skoblitskaya Yu.A. Organizatsiya obsluzhivaniya v mnogoetazhnykh zhilykh kompleksakh v krupneyshem gorode (na primere goroda Rostova-na-Donu) [Organization of maintenance in multi-storage residential complexes in the largest city (on the example of the city of Rostov-on-Don)]. Arkhitekton: izvestiya vuzov [News of Universities]. No. 30. Appendix. 2010. (in Russian)

4. Pershina I.L., Kan A.Yu. Struktura dokhodnykh zhilykh kompleksov s obsluzhivaniem [Structure of profitable residential complexes with maintenance]. *Budushchee nauki* [The Future of Science]. 2013. Vol. 2. Pp. 166–170. (in Russian)
5. Grebenshchikov K.N., Merenkov A.V. Printsipy organizatsii mnogokvartirnogo zhilishcha [Principles of the organization of a multi-unit dwelling]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky scientific journal]. 2012. No. 2. Pp. 166–169. (in Russian)
6. Matekhina O.V., Osipov Yu.K. Gradostroitel'nye funktsii i khudozhestvenno-kompozitsionnaya rol' obshchestvennykh zdaniy v gorodskoy srede [Town-planning functions and the artistic-composite role of public buildings in the city environment]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Industrial University]. 2016. No. 1 (15). Pp. 31–33. (in Russian)
7. Fomina V.F. Arkhitekturno-konstruktivnoe proektirovanie obshchestvennykh zdaniy: uchebnoe posobie [Architectural and constructive design of public buildings: a textbook]. Ul'yanovsk, UISTU, 2007. 97 p. (in Russian)
8. Kologashkina V.A. Predposylki i osnovnye tendentsii formirovaniya v sovremennykh usloviyakh zhilykh kompleksov s integrirovannymi delovymi funktsiyami: avtoref. dis. ... kand. arkhitektury [Preconditions and main tendencies of formation in modern conditions of residential complexes with integrated business functions: the author's abstract of PhD architecture]. Moscow, 2015. 33 p. (in Russian)
9. Chernysheva I.V. Tipologiya razmeshcheniya obshchestvennykh funktsiy v zhilykh zdaniyakh povyshennoy etazhnosti [Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and design]. Collection of articles. Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 2015. Pp. 151–156. (in Russian)
10. Volkov E.M. Zdanie, funktsiya i drugaya funktsiya: zameshchenie, transformatsiya, nalozhenie [Building, function and other function: substitution, transformation, surface]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov* [Architecton: news of universities]. No. 26. Appendix. 2009. (in Russian)
11. Grigor'ev A.N. Organizatsionno-ekonomicheskie mekhanizmy formirovaniya servisnykh kompleksov dlya razlichnykh tipov ofisnykh i zhilykh zdaniy (na primere g. Moskvy): avtoref. dis. ... kand. arkhitektury [Organizational and economic mechanisms for the formation of service complexes for various types of office and residential buildings (the example of Moscow): the author's abstract of PhD architecture]. Moscow, 2010. 33 p. (in Russian)

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 620.172.21

С.И. ГЕРАСИМОВ, В.А. ЖИЛКИН, А.М. ПОПОВ

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СПОСОБУ КОМПЕНСАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС В КОНТАКТНОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Контактный голографический интерферометр представляет собой совокупность исследуемой поверхности и прикрепленной к ней высокоразрешающей регистрирующей среды. Такой способ используется для определения касательных и нормальных перемещений точек поверхности исследуемого объекта. Если голограмма записана вблизи металлизированного высокочастотного раstra, то она восстанавливает информацию, свойственную нескольким оптическим методам: голографической интерферометрии, спекл-фотографии, голографическому муару и зеркально-оптическому методу. Для расшифровки интерференционных картин получены простые аналитические уравнения. Контактные голографические интерферометры эффективно используются для решения ряда задач механики деформируемого тела. Целью настоящей работы является совершенствование метода контактной голографической интерферометрии с целью повышения точности измерения поверхностных перемещений.

**Ключевые слова:** перемещения, деформации, контактная голографическая интерферометрия.

**Введение.** В работе [1] показана возможность изучения деформированного состояния изделий с помощью контактного голографического интерферометра. Там же выведены разрешающие уравнения для компонент  $U$ ,  $V$ ,  $W$  вектора перемещения  $r$  точек поверхности при коллимированном освещении по нормали к поверхности:

$$V = \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2\cos\gamma}, \quad (1)$$

$$W = \frac{(N_1 + N_2)\lambda}{2(n_3 + \sqrt{n_3^2 - \sin^2\gamma})}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения лазера;

$\gamma$  – угол наблюдения, отсчитываемый от нормали к поверхности;

© Герасимов С.И., Жилкин В.А., Попов А.М., 2017

$n_3$  – показатель преломления промежуточной прозрачной среды, применяемой в интерферометре;

$N_1, N_2$  – номера интерференционных полос в точке поверхности, наблюдаемой под симметричными углами  $\gamma$  ( $N$  может быть дробным числом).

**Определение дробного порядка интерференционной полосы.** В настоящее время одной из причин, сдерживающих широкое внедрение метода голографической интерферометрии в практику исследовательских лабораторий, которые занимаются изучением деформированного состояния различных изделий, является недостаточная точность определения деформаций по экспериментально найденным полям перемещений. Отыскание деформаций сводится к дифференцированию перемещений вдоль пространственных координат. Получаемая в эксперименте интерференционная картина содержит ограниченное число полос, зачастую недостаточное для дальнейшей аппроксимации функции  $N(x, y)$  по дискретному набору данных. Для определения порядка  $N$  интерференционной полосы в произвольной точке (как правило, дробного) воспользуемся методом компенсации. Компенсационные методы широко применяются в фотоупругости [2], в методе муаровых полос (дифференциальный муар) [3, 4]. В голографической интерферометрии также известны работы, использующие компенсацию интерференционных картин для целей неразрушающего контроля при записи голографических интерферограмм с боковым опорным пучком [5].

Ниже рассматривается процесс компенсации полос в накладном голографическом интерферометре при записи интерферограмм в реальном времени [6–9].

Предположим, что для осуществления компенсации используется схема с поворотным зеркалом, изображенная на рис. 1. Введем обозначения:  $l_{1,2}$  – расстояние от срединной плоскости линзы до поверхности накладного интерферометра;  $\phi_0$  – изменение фазы при отражении света от зеркала и от объекта

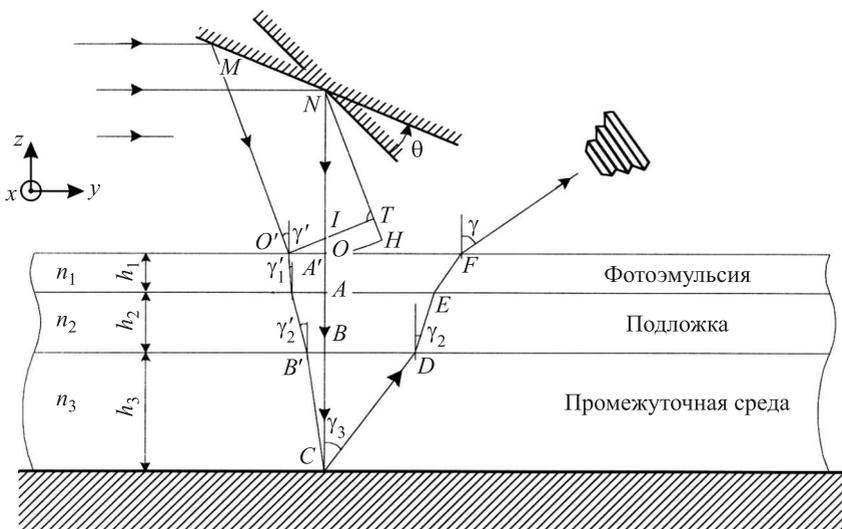


Рис. 1. Ход световых лучей в контактном голографическом интерферометре при отсутствии смещения точек поверхности

как от более плотных, нежели воздух, веществ;  $l_n$  – расстояние от точки  $F$  до наблюдателя;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Оптическая длина пути света при первой экспозиции (нормальное освещение объекта) равна:

$$L_1 = l_1 + \sum_{i=1}^3 h_i n_i + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i} + l_n + \frac{\Phi_o}{k}. \quad (3)$$

При второй экспозиции (наклонное освещение объекта)

$$L_2 = l_2 + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma'_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i} + l_n + \frac{\Phi_o}{k}. \quad (4)$$

Разность хода световых лучей

$$L = L_2 - L_1 = l_2 - l_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma'_2} - \sum_{i=1}^3 h_i n_i. \quad (5)$$

Определим разность  $l_2 - l_1$ . Из рис. 1 следует

$$l_2 - l_1 = TH = NO - NT; \quad \gamma' = 2\theta; \quad OO' = \sum_{i=1}^3 h_i \operatorname{tg} \gamma'_i; \quad O'I = \frac{OO'}{\cos \gamma'}. \quad (6)$$

Нетрудно показать, что

$$L = NO(1 - \cos \gamma') + \sin \gamma' \sum_{i=1}^3 h_i \operatorname{tg} \gamma'_i + \sum_{i=1}^3 h_i n_i \left( \frac{1 - \cos \gamma'_i}{\cos \gamma'_i} \right). \quad (7)$$

Длину отрезка  $NO$  нельзя измерить с необходимой интерферометрической точностью. Поступаем так: изменим угол  $\theta$  на такую величину, чтобы в рассматриваемой точке поверхности объекта появилась первая светлая интерференционная полоса. При этом

$$L = m\lambda, \quad m = 1. \quad (8)$$

Тогда

$$NO = \frac{\lambda - \sin \gamma^{*'} \sum_{i=1}^3 h_i \operatorname{tg} \gamma_i^{*'} - \sum_{i=1}^3 h_i n_i \left( \frac{1 - \cos \gamma_i^{*'}}{\cos \gamma_i^{*'}} \right)}{(1 - \cos \gamma_i^{*'})}. \quad (9)$$

Учитывая, что  $\gamma' = 2\theta$ , из (9) определяем  $NO$ .

Воспользовавшись рис. 2, получим разрешающие уравнения для разности интерферирующих лучей при наличии смещения точек поверхности образца. При расчетах полагаем справедливой гипотезу тождественных точек. Оптические длины пути света при первой и второй экспозициях соответственно равны:

$$L_1 = l_1 + \sum_{i=1}^3 h_i n_i + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i} + FG + \frac{\Phi_o}{k}, \quad (10)$$

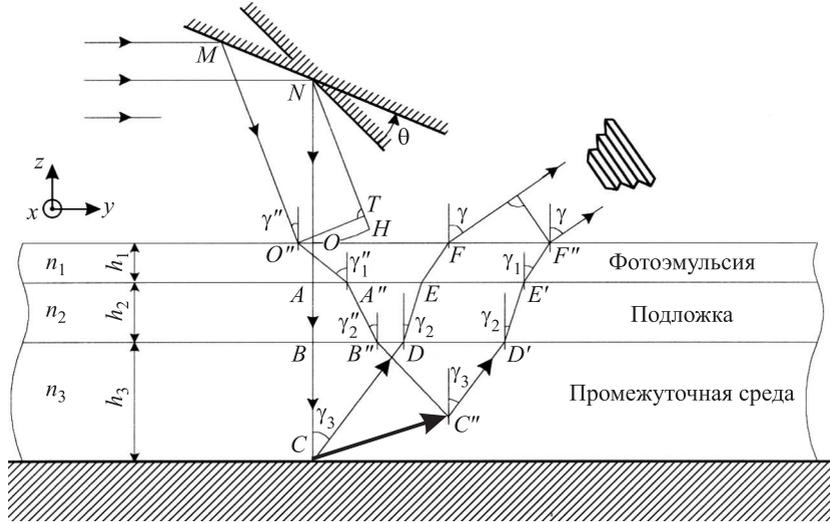


Рис. 2. Ход световых лучей в контактном голографическом интерферометре при компенсации разности хода

$$L_2 = l_2 + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma''_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i} + \frac{(h_3 - W)n_3}{\cos \gamma_3} + \frac{(h_3 - W)n_3}{\cos \gamma''_3} + \frac{\varphi_o}{k}. \quad (11)$$

Разность хода

$$L = L_2 - L_1 = l_2 - l_1 + \sum_{i=1}^2 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma''_i} + \frac{(h_3 - W)n_3}{\cos \gamma_3} - \sum_{i=1}^3 h_i n_i - \frac{h_3 n_3}{\cos \gamma_3} - V \sin \gamma + W \operatorname{tg} \gamma_3 \sin \gamma + \frac{(h_3 - W)n_3}{\cos \gamma''_3}. \quad (12)$$

Определяя разность  $l_2 - l_1$  аналогично сделанному выше и учитывая закон Снеллиуса, получаем для  $L$ :

$$L = V \sin \gamma + W(n_3 + \sqrt{n_3^2 - \sin^2 \gamma}) + A + V \sin \gamma'' + W \frac{(n_3 - \sqrt{n_3^2 - \sin^2 \gamma''})}{\sqrt{n_3^2 - \sin^2 \gamma''}}, \quad (13)$$

где  $A = NO(1 - \cos \gamma'') + \sin \gamma'' \sum_{i=1}^3 h_i \operatorname{tg} \gamma''_i + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma''_i} - \sum_{i=1}^3 h_i n_i$ , а  $NO$  определяется выражением (9).

Отметим более слабую зависимость от угла  $\gamma''$  множителя  $\alpha$  при  $W$  в пятом слагаемом уравнения (13), нежели множителя  $\beta$  при  $V$  в четвертом слагаемом (см. рис. 3). По этой причине можно считать, что чувствительность компенсатора к тангенциальным перемещениям выше, чем к перемещениям из плоскости.

Теперь оценим вклад слагаемого  $A$  в разность хода  $L$ . Полагаем  $h_1 \cong 0, h_2 = h_3 = 1$  мм,  $n_2 = n_3 = 1,45$ ,  $NO = 50$  мм. Эти данные соответствуют случаю, когда фотопластинка ЛОИ-2 прикрепляется к поверхности образца посредством синтетического каучука СКТН. Зависимость  $A$  от  $\gamma''$  приведена на рис. 3. Учитывая, что голограмма позволяет зарегистрировать перемещения  $V$  и  $W$  менее 50 мкм, приходим к выводу, что эта зависимость является доминирующей по отношению к четвертому и пятому слагаемым в уравнении (12).

С учетом сделанных замечаний перепишем (12) в виде

$$L = N^{(1)}\lambda = V \sin \gamma + W(n_3 + \sqrt{n_3^2 - \sin^2 \gamma}) + A(\gamma''). \quad (14)$$

Зависимость дополнительной разности хода  $A(\gamma''_0)$  от угла поворота зеркала компенсатора представлена на рис. 4. Изменяя угол освещения на величину  $\Delta\gamma''_0$ , получим

$$N^{(2)}\lambda = V \sin \gamma + W(n_3 + \sqrt{n_3^2 - \sin^2 \gamma}) + A(\gamma'') + A(\Delta\gamma''_0). \quad (15)$$

Вычитая (14) из (15) и предполагая, что порядковый номер интерференционной полосы в наблюдаемой точке при этом изменился на единицу, находим значение угла  $\Delta\gamma''_0$ . В дальнейшем при компенсации в других точках дробная часть  $\Delta N$  порядкового номера полосы  $N + \Delta N$  ( $0 < \Delta N < 1$ ) будет примерно пропорциональна такой же дробной части от угла  $\Delta\gamma''_0$  (считаем в первом приближении линейной зависимость  $A(\gamma'')$  на начальном участке кривой). На рис. 4 также представлены в единицах полос зависимости абсолютных погрешностей определения номера полосы  $A(\Delta\gamma'')/\lambda$  от угла  $\gamma''$  при различных инструментальных ошибках  $\delta\gamma''$  в установке угла поворота зеркала компенсатора. Отметим, что такой поворот зеркала можно осуществлять с помощью серийно выпускаемой делительной

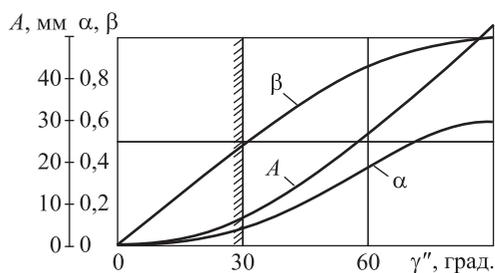


Рис. 3. К оценке чувствительности в методе компенсации

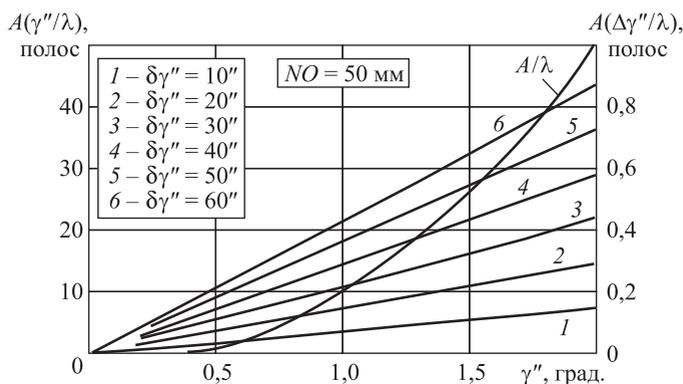


Рис. 4. Зависимость абсолютной погрешности определения номера полосы от угла  $\gamma''$

оптической головки ОДГ-5М, у которой погрешность в определении угла поворота составляет  $\pm 2,5''$ .

**Результаты физического эксперимента.** Ниже рассматриваются два способа контроля положения интерференционных полос.

*Первый способ.* В соответствии с рис. 2 осуществлялась компенсация полос в направлении вертикальной оси  $y$  пластины с отверстием. Размеры образца составляли: ширина – 40 мм, толщина – 1,4 мм, радиус отверстия  $R = 8$  мм. Материал – Д16Т. Растягивающая нагрузка  $P = 750$  Н. Сначала записывалась голограмма ненагруженного образца при нормальном его освещении, а затем в реальном времени наблюдали за поведением картины полос. Изменяя угол поворота зеркала компенсатора, удалось проследить смещение интерференционных полос на величину как меньше, так и больше шага полос [6].

В исходном состоянии  $\gamma' = 0^\circ$  (рис. 5, *a*), что соответствует нормальному освещению образца. Поворот зеркала на  $\gamma' = 25''$  вызывает смещение картины примерно на половину шага полос (рис. 5, *б*). При  $\gamma' = 1'5''$  картина полос передвинулась на целый шаг (рис. 5, *в*) и стала практически конгруэнтна картине полос, представленной на рис. 5, *a*. В дальнейшем, задавая последовательно угол  $\gamma'$  равным  $1'30''$  и  $1'58''$ , получали смещение интерференционных полос на 1,5 и 2 шага соответственно по отношению к исходной картине (при  $\gamma' = 0^\circ$ ).

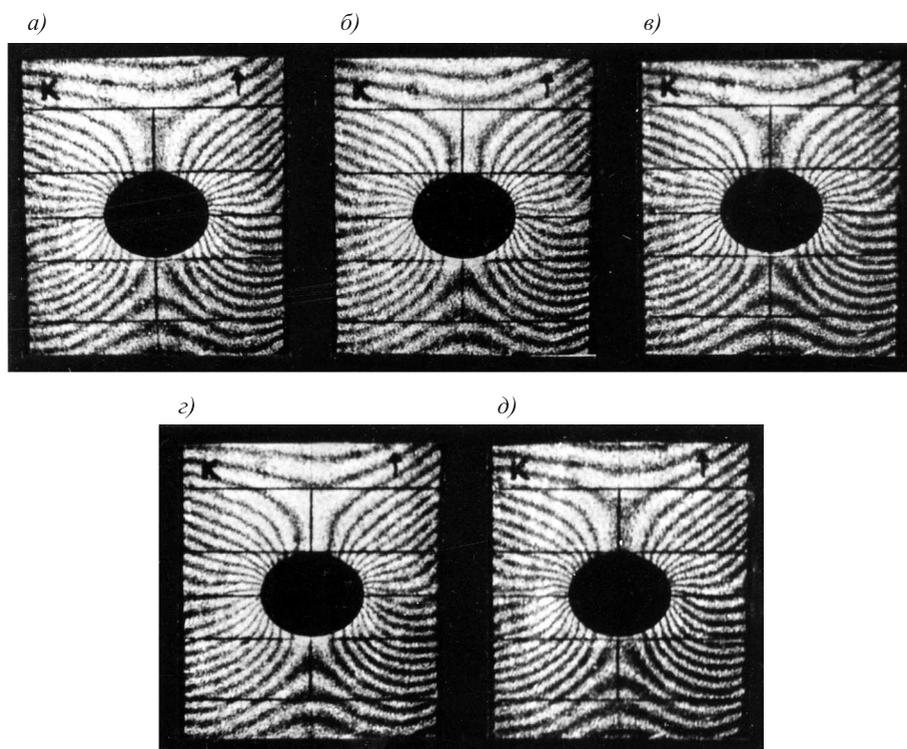


Рис. 5. Фотографии интерференционных полос при различных углах поворота зеркала компенсатора  $\gamma'$   
*a* –  $0^\circ$ , *б* –  $25''$ , *в* –  $1'5''$ , *г* –  $1'30''$ , *д* –  $1'58''$

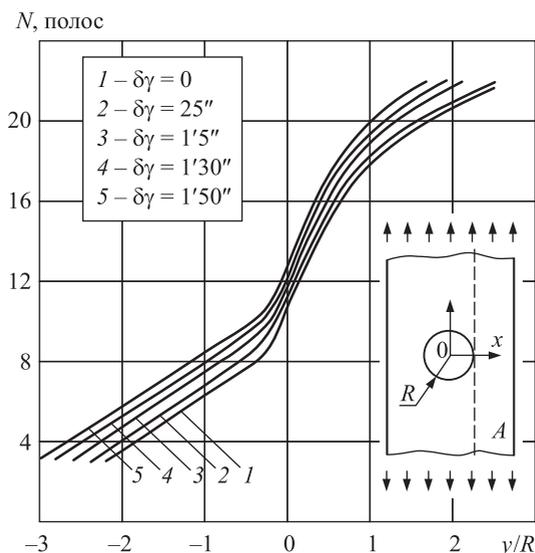


Рис. 6. Результаты компенсации разности хода световых лучей для касательного к отверстию сечения

Для оценки линейности вводимой разности хода были измерены координаты полос в касательном к отверстию сечении (рис. 6). Полученные линии  $N(y)$  при  $x = R$  оказались параллельными на всем протяжении сечения – и вблизи, и на удалении от концентратора, что подтверждает сделанное предположение. Сдвиг на одну полосу соответствует примерно  $1'–1'5''$ . Дробный порядок полосы пропорционален дробной части от  $1'$ .

Использование предложенной методики определения дробного порядка  $N(x, y)$  позволяет более точно, чем при визуальном наблюдении статической картины полос, оценивать значение  $N(x, y)$  в любой точке поверхности. Это оказывается особенно важным вблизи «стоков» и «истоков» интерференционных полос, где  $N(x, y)$  достигает экстремальных значений. Как показывает опыт эксплуатации различных программ аппроксимации функции  $N(x, y)$ , точное задание  $N$  в точке экстремума обеспечивает хорошие результаты при вычислении производных  $\partial N/\partial x$ ,  $\partial N/\partial y$  и, следовательно, деформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$ .

*Второй способ.* Принципиальная оптическая схема проведения эксперимента показана на рис. 7. Луч лазера 1 расширяется микрообъективом 2 и направляется линзой 3 на исследуемую поверхность 4. Фоточувствительная среда 5 крепится на поверхности 4 с помощью ПОС 6. В первоначальном (недеформированном) состоянии объекта линза 3 находится в положении II, что соответствовало коллимированному освещению его поверхности.

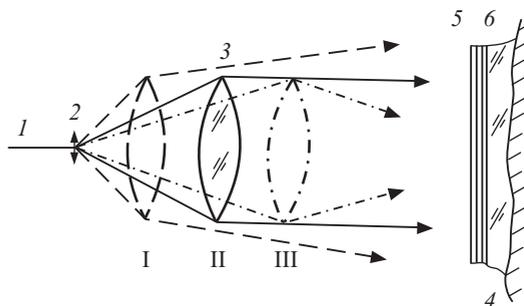


Рис. 7. Схема оптической компенсации со сдвигом коллимирующей линзы

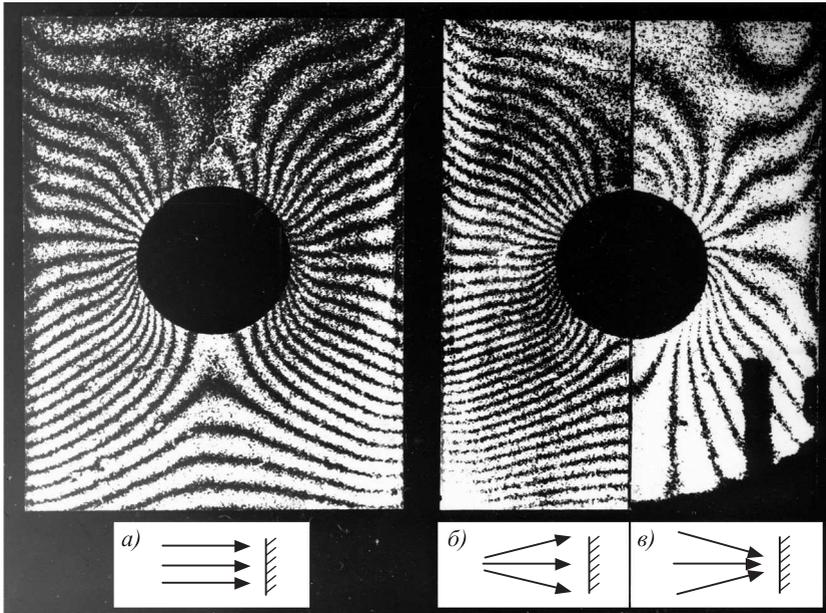


Рис. 8. Фотографии интерференционных полос при различном положении коллимирующей линзы

После первой экспозиции фотопластинка 5 подвергалась фотохимической обработке без отделения от объекта. Затем объект деформировали и освещали сферической волной (расходящейся или сходящейся – линза 3 в положении I или III соответственно).

Типичная фотография интерферограммы, получаемой при использовании коллимированного светового излучения до и после нагружения пластины, приведена на рис. 8, а. Для сравнения на рис. 8, б, в показаны интерферограммы того же объекта при тех же условиях нагружения и наблюдения, но полученные с применением расходящейся и сходящейся сферической волны соответственно. Во втором случае фиктивные и действительные перемещения совпадают по знаку, что приводит к увеличению частоты полос. На третьем снимке – результат сложения действительных и фиктивных перемещений, имеющих различные знаки. Как показали дополнительные эксперименты, фиктивные перемещения линейно зависят от положения линзы 3.

**Выводы.** При упругом характере деформирования материала образца сопоставление экспериментальных данных с результатами аналитического решения показало хорошее их соответствие как по перемещениям, так и по деформациям с напряжениями по всему исследуемому полю, за исключением сингулярных точек, где функция порядков полос  $N(x, y)$  достигала экстремальных значений. Увеличение погрешности в этих точках до 50 % обусловлено недоопределенностью информации о порядках полос и высокой чувствительностью способов вычисления производных к ошибкам в задании исходной информации. Одним из приемов уменьшения ошибок в этих точках является определение дробного порядка полосы с помощью метода компенсации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жилкин В.А., Герасимов С.И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Журн. техн. физики. 1982. Т. 52. № 10. С. 2079–2085.
2. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. О применении лазеров для раздельного определения напряжений и деформаций при поляризационно-оптических исследованиях // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1967. Т. 8. № 5. С. 120–122.
3. Champagne E., Kersh L. Control of holographic interferometric fringe-patterns // J. Opt. Soc. Amer. 1969. Vol. 59. No. 11. P. 1535.
4. Cloud G. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge University Press, USA, 1995. 520 p.
5. Pedrini G., Martínez-García V., Weidmann P., Singh A., Osten W. Optical methods for the analysis of residual stresses and measurement of displacements in the nanometric range // IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Poitiers, France, 19–21 July 2016. P. 570–575.
6. Герасимов С.И., Жилкин В.А. Способ определения дробного порядка интерференционной полосы в накладном голографическом интерферометре // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. №. 4. С. 897–902.
7. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Second Edition. CRC Press, 2015. 919 p.
8. Odintsev I.N., Pisarev V.S. Compensation Speckle Pattern Interferometry in Material Testing Techniques // Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Greece, July 1–6, 2007. P. 599–600.
9. Pichet Pinit, Yudai Nomura, Eisaku Umezaki. Phase Unwrapping for Absolute Fringe Order in Photoelasticity // Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Greece, July 1–6, 2007. P. 653–654.

**Герасимов Сергей Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Gerasimov@stu.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Жилкин Виталий Афанасьевич**, д-р техн. наук, проф.;  
E-mail: zhilkin\_vitalii@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Попов Анатолий Михайлович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 47604@mail.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 11.09.17

**Gerasimov Sergey Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: Gerasimov@stu.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Zhilkin Vitaliy Afanas'evich**, DSc, Professor; E-mail: zhilkin\_vitalii@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Popov Anatoliy Mikhaylovich**, DSc, Professor; E-mail: 47604@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**IMPROVEMENT OF SURFACE DISPLACEMENTS  
DETERMINATION ACCURACY FOR CONTACT  
HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY BY INTERFERENCE  
FRINGES COMPENSATION METHOD**

The contact holographic interferometer is a set of the investigated surface and a high-resolution recording medium attached to it. This method is used to determine the tangential and normal displacements of the points of the surface of the object under

study. If a hologram is recorded near a metallized high-frequency raster, then it restores information inherent in several optical methods: holographic interferometry, speckle photography, holographic moiré and mirror-optical method. For the interpretation of interference patterns, simple analytical equations are obtained. Contact holographic interferometers are effectively used to solve a number of problems in the mechanics of solids. The aim of this work is to improve the method of contact holographic interferometry with the aim of improving the accuracy of measuring surface displacements.

Keywords: displacements, strains, contact holographic interferometry.

## REFERENCES

1. Zhilkin V.A., Gerasimov S.I. O vozmozhnosti izucheniya deformirovannogo sostoyaniya izdeliy s pomoshch'yu nakladnogo interferometra [Study of deformed samples using an interferometer attached to the sample]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Soviet Physics, Technical Physics]. 1982. Vol. 27. No. 10. Pp. 1270–1279.
2. Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. O primeneni laserov dlya razdel'nogo opredeleniya napryazheniy i deformatsiy pri polyarizatsionno-opticheskikh issledovaniyakh [The use of lasers for separate determination of stresses in investigations with polarized light]. Zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1967. Vol. 8. No. 5. Pp. 77–78.
3. Champagne E., Kersh L. Control of holographic interferometric fringe-patterns. J. Opt. Soc. Amer. 1969. Vol. 59. No. 11. P. 1535.
4. Cloud G. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge University Press, USA, 1995. 520 p.
5. Pedrini G., Martínez-García V., Weidmann P., Singh A., Osten W. Optical methods for the analysis of residual stresses and measurement of displacements in the nanometric range. IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Poitiers, France, 19-21 July 2016. Pp. 570–575.
6. Gerasimov S.I., Zhilkin V.A. Sposob opredeleniya drobnogo poryadka interferentsionnoy polosy v nakladnom golograficheskom interferometre [Method of determine interference-fringe fractional order in a superimposed holographic interferometer]. Optika i spektroskopiya [Optics and Spectroscopy]. 1988. Vol. 64. No. 4. Pp. 534–539.
7. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Second Edition. CRC Press, 2015. 919 p.
8. Odintsev I.N., Pisarev V.S. Compensation Speckle Pattern Interferometry in Material Testing Techniques. Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Greece, July 1–6, 2007. Pp. 599–600.
9. Pichet Pinit, Yudai Nomura, Eisaku Umezaki. Phase Unwrapping for Absolute Fringe Order in Photoelasticity. Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Greece, July 1–6, 2007. Pp. 653–654.

УДК 624.131

А.О. КУЗНЕЦОВ, К.В. КОРОЛЕВ, Г.Н. ПОЛЯНКИН, А.М. КАРАУЛОВ

**ПРЕДЕЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ АРМИРОВАННОГО ГРУНТА  
НА ОГГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ**

Изложена методика определения давления грунта, армированного горизонтальными стержнями, на удерживающие конструкции. Получены новые решения теории предельного равновесия грунтов для задач о силовом взаимодействии круглых стержней с призмой обрушения; результаты решений приведены к стандартному виду трехчленной формулы Терцаги. Эти решения позволяют оценить сопротивление горизонтальных армоэлементов продавливанию грунта. Данный эффект снижает вертикальное давление в призме обрушения и соответственно уменьшает величину активного давления грунта на подпорное сооружение. В рамках предлагаемой методики можно установить необходимое количество армоэлементов и их расположение для исключения возможности обрушения грунта без устройства подпорной стенки. Предложенная методика может использоваться при проектировании удерживающих конструкций в котлованах, а также опережающей временной крепи забоя при проходке тоннелей.

**Ключевые слова:** активное давление грунта, схема Кульмана, теория предельного равновесия, котлованы, тоннели.

Расчеты устойчивости грунтовых массивов, армированных горизонтальными элементами, до сих пор находятся в стадии разработки и представляют собой реализацию сильно отличающихся друг от друга схем [1–3], как правило, имеющих ограниченную область применения. В то же время на практике такой способ усиления грунта широко используется как при креплении бортов котлованов [4, 5], так и для временной крепи грунта забоя при проходке подземных выработок [6, 7]. Соответственно, дальнейшая разработка теоретических методов оценки устойчивости горизонтально армированных грунтовых массивов остается актуальной задачей.

В настоящей работе дается решение этой задачи на основе учета силового взаимодействия горизонтального армоэлемента и призмы обрушения в момент потери устойчивости. Предлагаемая методика базируется на приближенном методе Кульмана, плоских статических решениях теории предельного равновесия грунтов (ТПРГ) и гипотезе Фусса–Винклера.

**Давление армированного грунта на удерживающую конструкцию.** На рис. 1 изображена расчетная схема удерживающей конструкции 1 и грунтового массива, армированного горизонтальными стержнями 3. Предполагается, что в предельном состоянии формируется призма обрушения 2, которая смещается по плоской поверхности скольжения. Требуется определить активное давление грунта на удерживающую конструкцию с учетом работы горизонтального армирования.

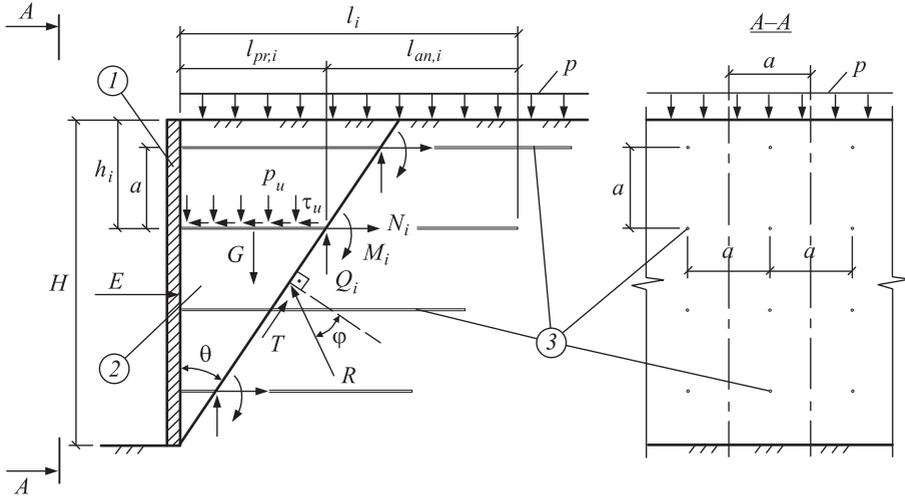


Рис. 1. Расчетная схема армированного откоса

1 – удерживающая конструкция, 2 – призма обрушения; 3 – горизонтальные армоземента

Обозначим высоту удерживающей конструкции  $H$ , давление на верхней бровке  $p$ , угол наклона поверхности скольжения к вертикали  $\theta$ . Шаг армоземента примем одинаковым по горизонтали и вертикали и равным  $a$  (см. рис. 1). Характеристики грунта:  $\gamma$  – удельный вес,  $\varphi$  – угол внутреннего трения,  $c$  – удельное сцепление. На призму обрушения действуют реакция удерживающей конструкции  $E$ , собственный вес призмы обрушения  $G$ , равнодействующая  $P$  внешнего давления  $p$ , реакции  $R$  и  $T$  неподвижной части основания, а также силы  $Q_i$ ,  $N_i$  и моменты  $M_i$ , возникающие в результате передачи части веса призмы обрушения на несмещающийся грунтовый массив посредством  $i$ -го нагеля диаметром  $d = 2r$  и длиной  $l_i$ .

Спроецируем все силы, действующие на призму обрушения, на горизонтальную и вертикальную оси:

$$\begin{aligned} E + T \sin \theta - R \cos(\varphi + \theta) + \sum N_i &= 0; \\ P + G - T \cos \theta - R \sin(\varphi + \theta) - \sum Q_i &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение моментов не рассматривается, поскольку оно лишь устанавливает взаимосвязь между координатами точек приложения сил  $E$  и  $R$  и не имеет однозначного решения без введения дополнительных условий.

Величины, входящие в уравнения (1), равны (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} G &= 0,5\gamma a H^2 \text{tg} \theta, & P &= p a H \text{tg} \theta, & T &= c a H / \cos \theta, \\ Q_i &= p_u \pi r l_{pr,i}, & N_i &= \tau_u \pi r l_{pr,i}, & l_{pr,i} &= (H - h_i) \text{tg} \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $h_i$  – глубина расположения центра тяжести сечения  $i$ -го армоземента;  $p_u$  и  $\tau_u$  – средние значения вертикального давления и касательных напряжений по верхней полуповерхности стержня.

Разрешая (1) относительно  $E$ , имеем

$$E = (P + G - \sum Q_i) \text{ctg}(\varphi + \theta) - \sum N_i - T \cos \varphi / \sin(\varphi + \theta), \quad (3)$$

а равнодействующая активного давления определится как

$$E_a = \max E(\theta). \quad (4)$$

Для абсолютно гладких армоэлементов ( $\tau_u = 0$ ) наиболее невыгодное положение поверхности скольжения определяется углом  $\theta = \pi/4 - \varphi/2$ . Для шероховатых стержней необходим численный поиск  $\theta$ .

**Напряжения на контакте «армоэлемент–призма обрушения».** Перейдем к проблеме определения  $p_u$  и  $\tau_u$ . Рассмотрим характер взаимодействия призмы обрушения с армирующими элементами. Во-первых, армирующие стержни прорезают призму обрушения при ее соскальзывании; при этом по верхней полуповерхности армоэлемента действует вертикальное давление  $p_u$ , которое будем определять статическим методом ТПРГ. Во-вторых, по этой же части поверхности будет действовать трение интенсивностью  $\tau_u$ .

Рассмотрим определение  $p_u$ . Примем локальную систему координат  $xOz$ , совмещенную с центром тяжести сечения  $i$ -го армоэлемента (рис. 2, а).

Канонические уравнения статического метода плоской задачи ТПРГ имеют вид [8]:

$$dx = dz \operatorname{tg}(\alpha \pm \mu), \quad d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \cdot d\alpha = \gamma(dz \mp dx \operatorname{tg} \varphi), \quad (5)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha = 2\tau_{xz}/(\sigma_z - \sigma_x)$ ;  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_z)/2 + c \operatorname{ctg} \varphi$ ;  $\mu = \pi/4 - \varphi/2$ .

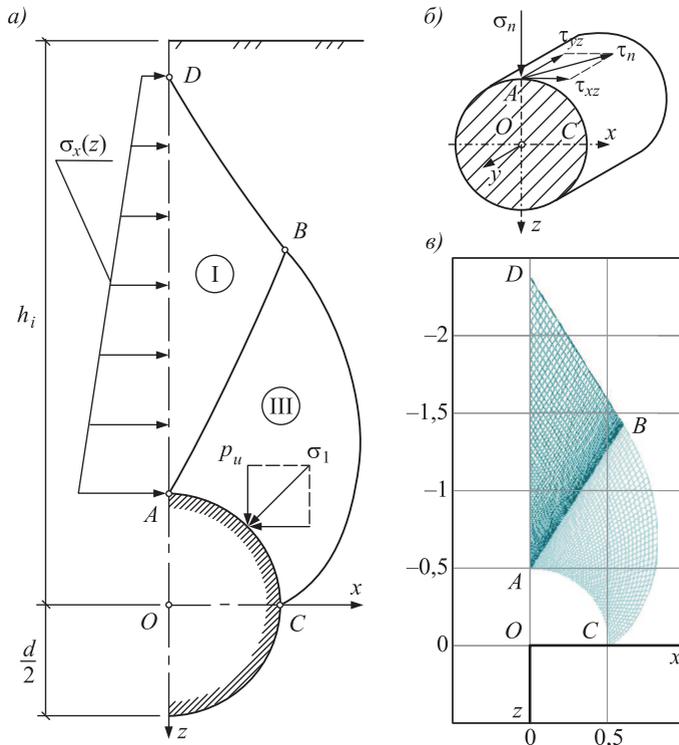


Рис. 2. К задаче о прорезании армоэлементом призмы обрушения  
 а – общая расчетная схема; б – граничные условия по поверхности шероховатого армоэлемента; в – пример сетки линий скольжения

Компоненты предельных напряжений даются известными формулами:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_x \\ \sigma_z \end{matrix} \right\} = \sigma(1 \mp \sin\varphi \cos 2\alpha), \quad \tau_{xz} = \sigma \sin\varphi \sin 2\alpha. \quad (6)$$

Характеру развития областей пластических деформаций отвечает последовательность краевых задач, показанная на рис. 2, а.

В области  $ABD$  решается I краевая задача. При этом на  $AD$  граничные условия могут быть заданы двояко:

$$\alpha = 0, \quad \sigma_x = \sigma_3 = 0, \quad (7)$$

или

$$\alpha = 0, \quad \sigma_x = \sigma_3 = \xi\gamma(h_i + z), \quad (8)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления грунта.

Граничные условия (8) предпочтительнее тем, что учитывают местоположение  $i$ -го армоэлемента. Вместе с тем, поскольку в момент обрушения грунт начинает «просыхаться» между стержнями, в запас прочности можно принять, что по линии  $AD$  давление грунта будет отсутствовать (граничные условия (7)).

В области  $ABC$  решается III краевая задача при известных параметрах канонических уравнений (5) на характеристике  $AB$  и условиях на криволинейной границе  $AC$  (рис. 2, б):

$$x^2 + z^2 = r^2, \quad \alpha = \arctg \frac{dz}{dx} = \pi - \arctg \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}}. \quad (9)$$

В плоской постановке выражение (9) для  $\alpha$  означает, что  $\sigma_1$  направлено по нормали к этой поверхности, т.е. здесь отсутствуют напряжения  $\tau_{xz} = 0$ . Для перехода к пространственному напряженному состоянию применим приближенный прием, согласно которому вдоль нагеля касательные напряжения рассчитаем как для идеально-шероховатой поверхности с использованием полученного значения  $\sigma_1$ :

$$\tau_{yz} = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c, \quad \sigma_n = \sigma_1. \quad (10)$$

С другой стороны, если на  $AC$  допустить наличие касательных напряжений  $\tau_{xz} \neq 0$ , приняв граничное условие по  $\alpha$  любым в пределах

$$\pi - \arctg \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} < \alpha < \frac{3\pi}{2} - \mu - \arctg \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (11)$$

то трение вдоль оси нагеля уменьшится (см. рис. 2, б):

$$\tau_{yz} = \sqrt{\tau_n^2 - \tau_{xz}^2}, \quad \tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c.$$

Следовательно, граничные условия (9) могут относиться и к случаю абсолютно гладкого армоэлемента, и к случаю шероховатого армоэлемента в предположении о том, что трение реализуется только в направлении его

оси. Для практических целей трение вдоль нагеля с большей надежностью можно определять по формуле

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \psi, \quad (12)$$

где  $\operatorname{tg} \psi$  – коэффициент трения стержня о грунт.

На рис. 2, в дан пример сетки линий скольжения, рассчитанный в относительных переменных ( $d = 2r$  – единица длины,  $\gamma d$  – единица напряжений) для следующих исходных данных:  $\varphi = 25^\circ$ ,  $c = 1$ .

Анализ результатов расчета величин  $p_u$  и  $\sigma_1$  для диапазона исходных данных  $\varphi = 0-45^\circ$ ,  $c = 1-250$ ,  $h_i = 1-2500$  показал, что они могут быть представлены в виде линейных аппроксимирующих зависимостей, аналогичных известной трехчленной формуле Терцаги. Без учета глубины расположения армоэлемента (7), для средних значений вертикального и нормального к поверхности давлений, действующих по верхней полу-поверхности стержня, могут быть предложены следующие аппроксимационные зависимости:

$$p_u = N_\gamma \gamma d + N_c c, \quad N_\gamma = (0,32 + 0,488e^{3,393 \operatorname{tg} \varphi})/\pi$$

$$N_c = (2,13 + 4,222e^{2,372 \operatorname{tg} \varphi})/\pi; \quad (13)$$

$$\sigma_1 = N_\gamma \gamma d + N_c c, \quad N_\gamma = (0,526 + 1,219e^{3,806 \operatorname{tg} \varphi})/\pi,$$

$$N_c = (4,414 + 6,97e^{2,858 \operatorname{tg} \varphi})/\pi. \quad (14)$$

С учетом глубины расположения (8) при  $\xi = 0,429$  эти зависимости имеют вид:

$$p_u = N_\gamma \gamma d + N_q \gamma h_i + N_c c, \quad (15)$$

$$N_\gamma = (0,23 - 0,134e^{5,6 \operatorname{tg} \varphi})/\pi, \quad N_q = 0,859e^{3,207 \operatorname{tg} \varphi} / \pi,$$

$$N_c = (2,13 + 4,222e^{2,372 \operatorname{tg} \varphi})/\pi;$$

$$\sigma_1 = N_\gamma \gamma d + N_q \gamma h + N_c c, \quad (16)$$

$$N_\gamma = (0,84 - 0,28e^{6,08 \operatorname{tg} \varphi})/\pi, \quad N_q = 1,346e^{3,71 \operatorname{tg} \varphi} / \pi,$$

$$N_c = (4,414 + 6,97e^{2,858 \operatorname{tg} \varphi})/\pi.$$

В обоих расчетных случаях глубина расположения армирующего стержня должна быть не меньше длины участка  $OD$  (см. рис. 2, а), а именно:

$$h_i > (0,206 + 0,609e^{2,388 \operatorname{tg} \varphi})d. \quad (17)$$

Касательные напряжения вдоль нагеля рассчитываются по формуле (10) или (12). После чего по формулам (2) определяются силы, действующие на призму обрушения, и в соответствии с (3) и (4) находится сила активного давления  $E_a$ . Отметим, что, варьируя параметрами армирования  $a$  и  $d$ , можно добиться  $E_a = 0$ .

**Определение длины армоэлемента.** Перейдем к вопросу определения величины заделки  $l_{an,i}$  нагеля в несмещающийся массив (см. рис. 1). Введем локальную систему координат  $zOy$ , начало которой совместим с точкой пересечения оси  $i$ -го нагеля и плоскости скольжения (рис. 3).

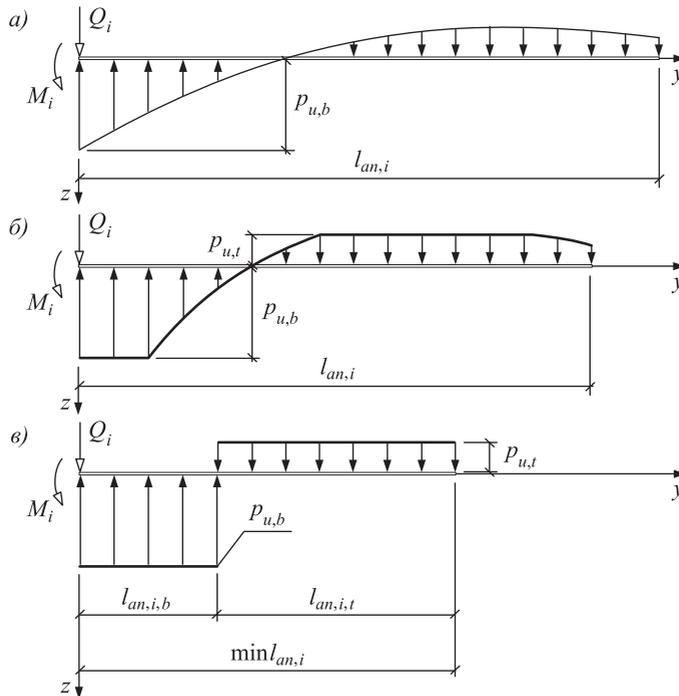


Рис. 3. Схемы к определению длины заделки стержня  
 а – длина заделки стержня, обеспечивающая полностью безопасную работу грунта; б – длина заделки, при которой возникают участки предельного состояния грунта; в – минимально допустимая длина заделки стержня

Определение напряжений и перемещений на контакте «армоэлемент–грунт» выполним по схеме балки на основании Фусса–Винклера:

$$p_z(y) = -Cw(y),$$

где  $p_z(y)$  и  $w(y)$  – напряжения и перемещения точек на контакте «армоэлемент–грунт»;

$C = Kh_i$  – коэффициент постели;

$K$  – коэффициент пропорциональности грунта.

Уравнение изогнутой оси  $i$ -го армоэлемента имеет вид:

$$w(y) = w_0 U_1 + \frac{\delta_0}{\beta} U_2 + \frac{M_0}{\beta^2 EI} U_3 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} U_4, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{Cd}{4EI}}, \quad (18)$$

где  $w_0, \delta_0, M_0, Q_0$  – вертикальное перемещение армоэлемента, угол поворота сечения, изгибающий момент и перерезывающая сила в точке  $y = 0$ ;

$U_1, U_2, U_3, U_4$  – функции А.Н. Крылова;

$EI$  – изгибная жесткость армоэлемента.

Ясно, что  $M_0 = M_i, Q_0 = Q_i$ . Две другие постоянные  $w_0$  и  $\delta_0$  определим, потребовав на конце армоэлемента равенства нулю момента и поперечной силы:

$$M(l_{an,i}) = \frac{1}{EI} \frac{d^2}{dy^2} w(l_{an,i}) = 0, \quad Q(l_{an,i}) = \frac{1}{EI} \frac{d^3}{dy^3} w(l_{an,i}) = 0.$$

Полученная эпюра реакций грунта  $p_z(y)$  не должна превышать несущей способности грунтового массива. Причем величины предельных давлений сверху и снизу армоэлемента, очевидно, будут различными. Обозначим их соответственно  $p_{u,t}$  и  $p_{u,b}$ .

Формирование областей предельного равновесия при определении величины  $p_{u,t}$  совпадает с тем, что было рассмотрено нами выше (см. рис. 2), т.е. значения  $p_{u,t}$  и  $\sigma_{1,t}$  могут быть рассчитаны по формулам (13) и (14) без учета глубины  $h_i$  заложения стержня или по формулам (15) и (16) с учетом  $h_i$ .

Что касается определения величины  $p_{u,b}$ , то здесь необходимо построить специальное решение ТПРГ (рис. 4, а). Для получения этого решения вводим локальную систему координат  $xOz$ , начало которой совмещаем с центром тяжести сечения  $i$ -го армоэлемента. В области  $ABD$  решается I краевая задача при следующих граничных условиях на линии  $AD$ : без учета глубины  $h_i$  заложения стержня –

$$\sigma_x = \sigma_3 = 0, \quad \alpha = \pi; \quad (19)$$

с учетом глубины  $h_i$  заложения стержня –

$$\sigma_x = \sigma_3 = \xi\gamma(h_i + z), \quad \alpha = \pi. \quad (20)$$

Как и в предыдущей задаче (см. рис. 2), принятие граничных условий (19) обеспечивает большую надежность.

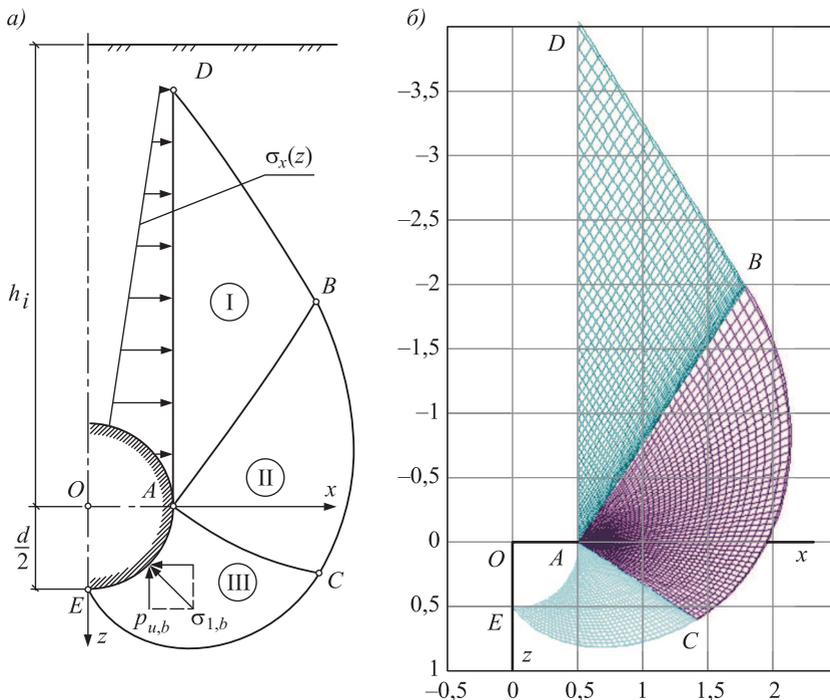


Рис. 4. Правая половина симметричной расчетной схемы прорезания стержнем нижележащего грунта

а – последовательность краевых задач; б – пример сетки линий скольжения

Радиальный веер  $ABC$  определяется решением II краевой задачи с известными параметрами канонических уравнений (5) на  $AB$  и условиях в особой точке  $A$ :

$$\pi > \alpha > \pi/2, \quad \sigma = \frac{\sigma_x^{AD} + c \operatorname{ctg} \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\pi - 2\alpha) \operatorname{tg} \varphi},$$

где  $\sigma_x^{AD}$  – граничное условие по  $\sigma_x$  на  $AD$ , данное формулой (19) или (20).

В области  $ACE$  решается III краевая задача на характеристике  $AC$  и на криволинейной границе  $AE$ , где задано:

$$x^2 + z^2 = r^2, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{dz}{dx} = \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}}.$$

На рис. 4, б показан пример сетки линий скольжения, рассчитанный в тех же относительных переменных  $\gamma$  и  $d = 2r$  для следующих исходных данных:  $\varphi = 25^\circ$ ,  $c = 1$ ,  $h_i = 5$ ,  $\xi = 0,429$ . Предельная нагрузка составила без учета глубины  $h_i$  заложения стержня 82,64, с учетом  $h_i$  – 121,4.

Для исходных данных в диапазоне  $\varphi = 0-45^\circ$ ,  $c = 1-250$ ,  $h_i = 1-2500$  (в относительных переменных –  $d$  и  $\gamma d$ ) могут быть предложены аппроксимационные зависимости без учета глубины положения стержня:

$$p_{u,b} = N_\gamma \gamma d + N_c c, \quad N_\gamma = (-2,202 + 1,341 e^{7,835 \operatorname{tg} \varphi})/\pi, \quad (21)$$

$$N_c = (8,279 + 5,985 e^{4,826 \operatorname{tg} \varphi})/\pi;$$

$$\sigma_{1,b} = N_\gamma \gamma d + N_\gamma c, \quad N_\gamma = (-1,969 + 1,565 e^{7,761 \operatorname{tg} \varphi})/\pi, \quad (22)$$

$$N_c = (12,381 + 8,318 e^{4,648 \operatorname{tg} \varphi})/\pi.$$

С учетом глубины расположения при  $\xi = 0,429$  эти зависимости имеют вид:

$$p_{u,b} = N_\gamma \gamma d + N_q \gamma h_i + N_c c, \quad (23)$$

$$N_\gamma = (1,59 - 0,01 e^{11,60 \operatorname{tg} \varphi})/\pi, \quad N_q = (-0,472 + 0,951 e^{7,04 \operatorname{tg} \varphi})/\pi,$$

$$N_c = (8,279 + 5,985 e^{4,826 \operatorname{tg} \varphi})/\pi;$$

$$\sigma_{1,b} = N_\gamma \gamma d + N_q \gamma h_i + N_c c, \quad (24)$$

$$N_\gamma = (1,77 - 0,0116 e^{11,52 \operatorname{tg} \varphi})/\pi, \quad N_q = (-0,174 + 1,34 e^{6,85 \operatorname{tg} \varphi})/\pi,$$

$$N_c = (12,381 + 8,318 e^{4,648 \operatorname{tg} \varphi})/\pi.$$

Величина  $\sigma_{1,b}$ , как и ранее, требуется для определения трения вдоль оси армоэлемента согласно (10) или (12).

Полученные значения предельного давления  $p_{u,i}$  и  $p_{u,b}$  должны ограничивать величину реакции  $p_z(y)$ . Определившись с пределами, ограничивающими реакцию  $p_z(y)$  сверху и снизу, рассмотрим три возможных расчетных случая нахождения величины  $l_{an,i}$ .

В первом случае (см. рис. 3, *a*) заделка гарантирует полностью безопасную работу грунта за пределами призмы обрушения. Во втором случае (см. рис. 3, *б*) допускается, чтобы на некоторых участках по длине нагеля реакция грунта была равна предельному сопротивлению. Третий случай (см. рис. 3, *в*) дает минимально допустимую величину заделки армоэлемента по условиям статического равновесия.

Достаточность заделки шероховатых армоэлементов следует также дополнительно проверять, исходя из возможности выдергивания. Кроме того, если стержни конструктивно связаны с подпорной стенкой, то величина активного давления также должна учитываться при расчете армоэлемента на выдергивание. Выбор одной из трех рассмотренных расчетных схем нужно осуществлять, исходя из требований, предъявляемых к конкретному строительному объекту.

**Выводы.** Предложенная методика расчета устойчивости грунтовых массивов с использованием армирующих горизонтальных элементов позволяет обоснованно назначать параметры откосов армирования и может быть использована при проектировании котлованов, расчете устойчивости откосов и склонов. Кроме того, полученные результаты позволяют выполнить расчет усиления ядра забоя выработки фиброгласовыми элементами при проектировании мероприятий по обеспечению устойчивости массива грунта при проходке тоннелей на полное сечение.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов Ю.С., Крук Ю.Е. Метрополитены на линиях мелкого заложения. Новая концепция строительства. М.: Центр инжиниринга, маркетинга и рекламы «ТИМР», 1994. 244 с.
2. Dias D., Oreste P. Key factors in the face stability analysis of shallow tunnels // American Journal of Applied Sciences. 2013. No. 10(9). P. 1025–1038.
3. Косте Ж., Сангlera Г. Механика грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 455 с.
4. Савельев Ю.Н. Облегченная стержневая крепь при строительстве тоннельных сооружений Новосибирского метрополитена: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Савельев Юрий Николаевич. Новосибирск, 2002. 155 с.
5. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов зданий и сооружений. СПб.: Изд-во Института «Геореконструкция», 2014. 328 с.
6. Lunardi P. Progetto e costruzione di gallerie—Analisi delle deformazioni controllate nelle Rocce e nei suoli. Milano: Hoepli, 2006. 572 p.
7. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Полянкин Г.Н., Гришин А.Н., Кузнецов А.О., Рублев Д.Е. Геомеханический мониторинг временной крепи железнодорожного тоннеля, проходимого в сложных инженерно-геологических условиях // ФТПРПИ. 2015. № 4. С. 174–197.
8. Королев К.В. Статические решения теории предельного равновесия грунтов о несущей способности грунтовых оснований. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2014. 140 с.

**Кузнецов Анатолий Олегович**, инж.; E-mail: kuzemon91@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Королев Константин Валерьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: korolev\_kv@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Полянкин Геннадий Николаевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: polyankin@mail.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Караулов Александр Михайлович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: karaulov@stu.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 17.07.17

**Kuznetsov Anatoliy Olegovich**, Engineer; E-mail: kuzemon91@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Korolev Konstantin Valer'evich**, DSc, Professor; E-mail: korolev\_kv@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Polyankin Gennadiy Nikolaevich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: polyankin@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Karaulov Alexandr Mikhaylovich**, DSc, Professor; E-mail: karaulov@stu.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **LIMITING PRESSURE OF THE REINFORCED GROUND UPON PROTECTING DESIGNS**

In clause the technique of definition of pressure of the ground reinforced with horizontal cores, on holding designs is stated. New decisions of the theory of limiting balance grounds for problems about power interaction of round cores with a prism caving are received; results of decisions are resulted in a standard kind formulas Terzagi. These decisions allow to estimate resistance horizontal armoelements pressure a ground. The given effect reduces vertical pressure in a prism crack and accordingly reduces size of active pressure of a ground by a retaining construction. Within the framework of an offered technique it is possible to establish necessary quantity armoelements and their arrangement for exception of an opportunity caving a ground without the device of a retaining wall. The offered technique can be used at designing holding designs in foundation ditches, and also outstripping time at made tunnels.

**Key words**: active pressure of a ground, circuit Kuhlman, the theory of limiting balance, foundation ditches, tunnels.

### REFERENCES

1. Frolov Yu.S., Kruk Yu.E. Metropoliteny na liniyakh melkogo zalozheniya. Novaya kontsepsiya stroitel'stva [The subways on lines of small laying. The new concept of construction]. Moscow, Center of engineering, marketing and advertising «ТИМР», 1994. 244 p. (in Russian)
2. Dias D., Oreste P. Key factors in the face stability analysis of shallow tunnels. American Journal of Applied Sciences. 2013. No. 10(9). Pp. 1025–1038.
3. Koste Zh., Sanglera G. Mekhanika gruntov [Mechanics soils]. Moscow, Sroyizdat, 1981. 455 p. (in Russian)
4. Savel'ev Yu.N. Oblegchennaya sterzhnevaya krep' pri stroitel'stve tonnel'nykh sooruzheniy Novosibirskogo metropolitena: dis. ... kand. tekhn. nauk [Facilitat rod support at construction of tunnel constructions of Novosibirsk underground: diss. ... cand. techn. sci.]. Novosibirsk, 2002. 155 p. (in Russian)
5. Ulitskiy V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. Osnovy sovmestnykh raschetov zdaniy i sooruzheniy [Bas of joint calculations of buildings and constructions]. St. Petersburg: Publishing house of Institute «Georeconstruction», 2014. 328 p. (in Russian)

6. Lunardi P. Progetto e costruzione di gallerie – Analisi delle deformazioni controllate nelle Rocce e nei suoli. Milano: Hoepli, 2006. 572 p.
  7. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Полианкин Г.Н., Гришин А.Н., Кузнецов А.О., Рублев Д.Е. Geomekhanicheskiy monitoring vremennoy krepki zheleznodorozhnogo tonnelya, prokhodimogo v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [Geomechanical monitoring of temporal lining in railway tunneling in complex geological conditions]. FTPRPI [Journal of Mining Science]. 2015. No. 4. Pp. 174–197. (in Russian)
  8. Королев К.В. Sticheskie resheniya teorii predel'nogo ravnovesiya gruntov o nesushchey sposobnosti gruntovykh osnovaniy [Static solution of the theory of limit equilibrium of soils about the bearing capacity of soil bases]. Novosibirsk. Publishing house STU, 2014. 140 p. (in Russian)
-

## НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



### ДЕРЕВЯННОЕ НАСЛЕДИЕ ТОМСКА\*

Одной из важнейших задач градостроительного развития исторических поселений России, особенно в отношении крупных, быстро развивающихся городов, является сохранение ее деревянной застройки. Этот с каждым годом все более истончающийся, исчезающий слой городской среды – единственный уникальный отпечаток своеобразия застройки прошлых веков.

Томск относится к тем историческим городам России, где на сегодняшний день сохранилось богатое историко-архитектурное наследие, в том числе и деревянной архитектуры. Без преувеличения можно сказать, что Томск, пожалуй, единственный город России, где практически реализуется программа восстановления и реновации деревянной исторической гражданской архитектуры, благодаря чему в значительном количестве все еще сохраняются и функционируют деревянные здания конца XIX – начала XX в. Однако и в Томске, к сожалению, этот пласт городской культуры с каждым годом несет все больше и больше утрат.

В связи с этим изданная в 2016 г. Томским государственным архитектурно-строительным университетом книга наших коллег В.Г. Залесова и И.В. Куликовой под названием «Архитектура деревянных доходных домов Томска (конец XIX – начало XX в.)» является значительным вкладом в исследование этого уходящего феномена – городской деревянной архитектуры России указанного периода. Авторы уже около двух десятилетий занимаются сбором, классификацией и анализом натуральных и исторических материалов по деревянной застройке Томска, и данная книга обобщает и несет читателю этот уникальный фактический материал. В монографии представлено 328 таблиц графического материала, собранного в результате огромной архивной работы и натуральных фотофиксаций.

Монография состоит из трех крупных блоков повествования, логично объединенных в главы. В первой из них «Жилая застройка в городах Сибири во второй половине XIX – начале XX в.» исследуются социально-экономические предпосылки жилого деревянного домостроения в Сибири вообще и в Томске в частности; выявляются основные этапы становления и развития деревянной жилой застройки губернского города со второй половины

\* Залесов В.Г., Куликова И.В. Архитектура деревянных доходных домов Томска (конец XIX – начало XX в.): монография. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. 420 с.

XIX до начала XX в. и место в этом процессе периода интенсивного домостроения – жилой застройки рубежа XIX и XX в.

Анализируется российское строительное законодательство, относящееся к деревянному домостроительству; рассматривается деятельность муниципальной архитектурно-градостроительной службы Томска, регулировавшей процесс застройки города.

Во второй главе «Типология деревянных доходных домов Томска в конце XIX – начале XX вв.» определяется многообразие планировочных структур деревянных доходных (многоквартирных) домов. Авторы выделяют основные из них, анализируя по типам и по принадлежности к историческим районам города. Типология деревянного доходного многоквартирного дома Томска, проведенная авторами в работе, состоит из четырех принципиальных групп зданий, отличающихся по характеру внутреннего распределительного пространства. Отмечаются особенности типов деревянных доходных домов, различия и общие черты, что подтверждается многочисленными иллюстрациями.

Третья глава «Архитектурно-художественные особенности деревянных доходных домов Томска рубежа XIX–XX вв.» логично завершает монографию. Она посвящена рассмотрению облика деревянных многоквартирных домов, традициям и новаторству в деревянном домостроении. Отмечается яркое своеобразие деревянных доходных жилых домов Томска, подтвержденное многочисленным иллюстративным материалом. Проводится анализ композиций фасадов многоквартирных домов. Приводимые данные подтверждаются таблицами, ссылками на печатные и архивные источники, на графический материал.

Научная значимость данной работы не вызывает сомнений. Книга уже вызвала и еще долгие годы будет вызывать бесспорный интерес как среди специалистов, так и среди широкой общественности. Поскольку она и в текстовом, и в графическом материале сохраняет и передает для потомков тот слой национальной культуры – городское деревянное домостроение конца XIX – начала XX в., которое, к сожалению, невосполнимо утрачивается.

*МЕЕРОВИЧ М.Г., доктор архитектуры, доктор исторических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, заслуженный архитектор России*

## ЭКСПЕРТНЫЙ ЦЕНТР ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ РОССИИ (РОСТЕХНАДЗОР)

В 1999 г. при Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете (Сибстрин) был создан Экспертный центр по экспертизе деклараций безопасности гидротехнических сооружений (ГТС). В 2013 г. он был включен Ростехнадзором по согласованию с МЧС России в число центров, имеющих право проводить государственную экспертизу деклараций безопасности (ГТС), кроме сооружений I–II классов объектов энергетики.



Один из обследованных объектов в Алтайском крае

Экспертный центр, кроме экспертизы деклараций безопасности ГТС на стадии их проектирования, строительства, эксплуатации, капитального ремонта, восстановления или консервации, выполняет следующие виды работ:

- проводит преддекларационные обследования технического состояния ГТС с составлением Акта преддекларационного обследования;
- составляет паспорт безопасности опасного объекта в соответствии с действующим законодательством;
- выполняет оценку риска аварий ГТС, разрабатывает документ «Расчет вероятного вреда, который может быть причинен жизни и здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений»;
- разрабатывает критерии безопасности ГТС, анализирует и оценивает риски возникновения аварий на ГТС в соответствии с действующими нормативно-правовыми документами;
- разрабатывает проект мониторинга безопасности ГТС и инструкцию по ведению мониторинга безопасности, правила эксплуатации ГТС, планы действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на ГТС и планы действий работников эксплуатирующих организаций в случае аварийной ситуации;
- оказывает консультационную помощь заинтересованным физическим и юридическим лицам по вопросам безопасности, оценки эксплуатационного состояния комплекса ГТС и его отдельных элементов (узлов), разработки декларации безопасности ГТС. Экспертный центр имеет право согласовывать проекты мониторинга безопасности гидротехнических сооружений.

На базе экспертного центра проводится предаттестационная подготовка руководителей и специалистов организаций, подконтрольных Ростехнадзору, на право проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений строительных и общепромышленных, теплоэнергетических и гидроэнергетических объектов.

За время существования Экспертного центра были оказаны услуги более 60 организациям в различных регионах России.

ДЕГТЯРЕВ Владимир Владимирович, руководитель Экспертного центра, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии (ГТСБЭ) НГАСУ (Сибстрин)

Адрес: 630008, ул. Ленинградская, 113. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Тел.: +7(383)266 94 11

E-mail: [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru)

## УДАЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ САПРОПЕЛЕВЫХ СТОКОВ

На бальнеологических курортах применяются сапропелевые грязи, имеющие редкое сочетание органических веществ, минеральных солей, микроэлементов, железа в неорганических и органических формах, являющееся высокоэффективным средством для лечения и профилактики многих заболеваний. Сапропели – иловые отложения континентальных водоемов (озер, лагун) – представляют собой темную мягкую массу пресных водоемов в коллоидном состоянии. В зависимости от глубины залегания пласта сапропеля и местоположения в грязевом растворе может содержаться 183–752 мг/дм<sup>3</sup> железа. При использовании на курортах сапропеля смыв от грязевых ванн осуществляется водопроводной и минеральной водой (с высоким содержанием хлоридов). В стоках концентрация железа может достигать более 200 мг/дм<sup>3</sup>, в то время как отвод таких стоков в общий городской коллектор допускается с содержанием железа не более 5 мг/дм<sup>3</sup>.

В связи с этим бальнеологический центр вынужден платить водоканалу значительные штрафы. Вопросам снижения концентрации сапропеля в сточных водах бальнеологических центров в настоящее время не уделяется достаточного внимания.

В Тюменском государственном архитектурно-строительном университете проведены исследования с целью снижения содержания различных форм железа и взвешенных веществ в стоках от бальнеологических ванн реагентным способом с последующим отстаиванием перед отводом в общегородскую сеть.

В качестве реагентов использовались:

- коагулянт – сернокислый алюминий (СА);
- флокулянт – ПАА для ускорения процесса коагуляции;
- доза полиакриламида.

При введении коагулянта в исследуемых растворах наблюдалось интенсивное хлопьеобразование. Мутность воды, обусловленная наличием взвешенных веществ, снижалась быстро и полно. Было установлено, что от ряда показателей воды зависят дозы реагентов для достижения требуемого эффекта снижения содержания железа в сточной воде до 5 мг/дм<sup>3</sup>, а при коагулировании взвешенных веществ и железа уменьшается общее количество остаточного алюминия в объединенном с городом стоке и составляет 0,06 мг/дм<sup>3</sup>.

Предложены формулы по расчету оптимальной дозы реагентов для снижения содержания железа в сточной воде бальнеологических центров до величины, соответствующей «Правилам приема производственных сточных вод в системы канализации населенных пунктов».

За дополнительной информацией можно обращаться к разработчикам.

Разработчики: ЖУЛИН Александр Гаврилович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: semen1941@yandex.ru

ЕЛИЗАРОВА Ольга Дмитриевна, асп.;

E-mail: lelyaezarova@rambler.ru

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издается 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
- Гидротехническое 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 2-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 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».

### **В н и м а н и е!**

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 Pp., 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**  
**№ 10 (706) 2017**

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 27.10.17. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$   
Усл. печ. л. 10,45+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6948

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