

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 6 (702)

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Тел./факс +7 (383) 266 28 59 [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Оценка и прогнозирование физико-химического сопротивления стеклощелочных композитов и методы его повышения .....	5
Бердов Г.И., Плетнев П.М., Бернацкий А.Ф., Хританков В.Ф., Виноградов С.А. Исследование влияния дисперсных минеральных добавок на свойства строительных материалов на цементных вяжущих диэлькометрическим методом .....	15
Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И., Гаусс К.С. Исследование механических свойств твердеющего цементного камня при различных изотермических условиях .....	23
Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А., Акст Д.В. Практическое использование метода компрессионных кривых для определения параметров прессования керамических изделий .....	30

### ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

#### ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ,

#### ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

#### ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА

Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние .....	41
---	----

### ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,

### ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Шлычков В.А., Дегтярев В.В. Обоснование параметров шугозащитных дамб у речных водозаборов с помощью численной модели плановых течений .....	49
---	----

### НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Молодин А.В. К вопросу комфортных температурных условий эксплуатации традиционного чукотского жилища в условиях Крайнего Севера. Часть 1 .....	60
--	----

### НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Герасимов С.И., Зиновьев В.Б., Попов А.М. Экспериментально-расчетный метод учета нагрева тензодатчика при измерении деформации элементов конструкций .....	72
--	----

Гребенюк Г.И., Пуртов В.В., Павлик А.В., Кулешова Н.И. Расчет предельных нагрузок на односрезные нагельные соединения растянутых деревянных элементов с использованием решений формируемых условно-экстремальных задач .....	81
--	----

Калугин Ю.Б., Клыков М.С., Тупицын Р.Ю. Особенности применения двойственного графа для определения минимального разреза сетевой модели .....	94
--	----

Нуждин Л.В., Павлюк К.В. Учет влияния деформационной анизотропии грунта при расчете осадок фундаментов .....	101
--	-----

Смолин Ю.П., Караполов А.М., Востриков К.В. Решение задачи об определении осадки водонасыщенного анизотропного грунта, уплотняемого в условиях компрессии.....	113
--	-----

---

Памяти Дмитрия Георгиевича Копаницы, выдающегося ученого и педагога 122

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. 6 (702)**

June 2017

**Scientific-theoretical journal**

**Published since March 1958**

**Monthly**

---

---

*EDITORIAL BOARD*

V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd

A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow

A.A. Volkov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow

V.A. Vorob'yov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow

V.G. Gagarin, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow

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

J. Despotović, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia

V.T. Erofeev, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saransk

G.V. Esaulov, Acad. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow

V.I. Zhadanov, DSc (Eng), Prof., Orenburg

M. Ivetić, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia

V.A. Ignat'yev, DSc (Eng), Prof., Volgograd

V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk

V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk

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

P. Lieblang, Dr., Prof., Technische Hochschule, Köln, Germany

L.S. Lyakhovich, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Tomsk

V.M. Mitasov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk

V.I. Morozov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg

Zh. S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Kazakhstan

Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg

G.I. Pustovetov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk

V.G. Sebeshev, Honour. Mem. RAACS, PhD, Prof. (*Edinor-in-Chief*), Novosibirsk

Yu.L. Skolubovich, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk

Yu. A. Feofanov, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg

Jong Wan Hu, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea

Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh

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

Phone number/fax +7 (383) 266 28 59

[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## CONTENTS

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Assessment and forecasting of physical and chemical resistance of glass alkali composites and methods of his increase .....	5
Berdov G.I., Pletnev P.M., Bernatskiy A.F., Khritankov V.F., Vinogradov S.A. High-frequency dielectrometrical control of influence of dispersed mineral additions quantity on properties of cement compositions .....	15
Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Boyarintsev A.P., Mokshin D.I., Gauss K.S. Investigation of mechanical properties of hardening cement stone under different isothermal conditions .....	23
Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A., Akst D.V. Practical use of the compression curves method for parameter determination of ceramic products compression .....	30

### ENGINEERING LIFE SUPPORT SYSTEMS

#### OF THE INHABITED PLACES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION

Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical investigation of flow in profiled ventilation tee at junction .....	41
---	----

### HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Shlychkov V.A., Degtyarev V.V. The rationale of parameters of frazil ice proof dams at river water intake using a numeral model of planned streams .....	49
--	----

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

Molodin A.V. To the issue of comfort temperature conditions in traditional Chukotka's houses in Far North regions. Part 1 .....	60
---	----

### SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

Gerasimov S.I., Zinov'ev V.B., Popov A.M. Evaluation of strain-measurement error caused by heating of strain gauge .....	72
--	----

Grebenyuk G.I., Purtov V.V., Pavlik A.V., Kuleshova N.I. Calculation of limit loads on single shear dowel connection compounds of tension wooden elements using solutions of formable condition-extreme problems .....	81
--	----

Kalugin Yu.B., Klykov M.S., Tupitsyn R.Yu. Features use the dual graph to determine the minimum cut of the network schedule .....	94
---	----

Nuzhdin L.V., Pavlyuk K.V. Influence deformation anisotropy in the calculation of settlements of foundation.....	101
--	-----

Smolin Yu.P., Karaulov A.M., Vostrikov K.V. Consolidation process of saturated anisotropic clay soil during odometric testing .....	113
---	-----

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 666.612.22 : 54

В.Т. ЕРОФЕЕВ, А.П. ФЕДОРЦОВ, А.Д. БОГАТОВ, В.А. ФЕДОРЦОВ

### ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТЕКЛОЩЕЛОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ И МЕТОДЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ

Свойства стеклощелочных композитов недостаточно изучены, в том числе их сопротивление воздействию агрессивных сред (физико-химическое сопротивление), а соответственно нет исследований по его оценке, прогнозированию и повышению. Приводятся исследования стойкости (сопротивления) композитов в средах различной агрессивности, на основании которых и общих закономерностей диффузионной и химической кинетики определены функции, позволяющие оценивать и прогнозировать сопротивление изделий в зависимости от параметров массопереноса и химических реакций, размеров. Указываются способы повышения этого сопротивления.

**Ключевые слова:** отход производства, стеклощелочный композит, физико-химическое сопротивление, агрессивная среда, продукты жизнедеятельности микробов, скорости массопереноса и химических реакций, повышение сопротивления воздействию.

Материалы зданий и сооружений в период эксплуатации часто подвергаются воздействию агрессивных сред. Стеклощелочные композиты также могут взаимодействовать с такими средами и со временем в них происходят изменения, которые необходимо оценивать и прогнозировать [1].

Известно, что изменения в структуре композитов, происходящие под влиянием агрессивных сред, зависят от скоростей массопереноса и химических взаимодействий, геометрии изделия, длительности воздействия среды. Тогда функция физико-химического сопротивления  $R_{\phi,x}$  может быть в общем виде выражена как [2]:

$$R_{\phi,x} = f(V_m, V_p, L, t), \quad (1)$$

где  $V_m$  – скорость массопереноса;

$V_p$  – скорость химических реакций;

$L$  – характерный размер тела;

$t$  – время воздействия агрессивной среды.

Для определения функции физико-химического сопротивления материала необходимо знать изменение прочности бетона за любой промежуток времени в результате физического и химического воздействия среды на его структуру, т.е.  $\Delta\sigma(V_m, V_p, L, t)$ .

Тогда, определяя функцию как изменяемый во времени относительный показатель прочности, можем записать [3]:

$$R_{\phi x} = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 \pm \Delta\sigma(V_m, V_p, L, t)}{\sigma_0} = 1 \mp \Delta_t^\phi \mp \Delta_t^x, \quad (2)$$

где  $\sigma_t$  – показатель прочности материала в момент времени  $t$ ;  
 $\sigma_0$  – первоначальный показатель прочности, где  $\Delta_t^\phi, \Delta_t^x$  – изменение показателя физико-химического сопротивления за время  $t$  в результате соответственно физического и химического воздействия среды.

Знак « $\mp$ » в выражениях объясняется тем, что при выдержке материала в агрессивной среде возможна не только его деградация, но и упрочнение.

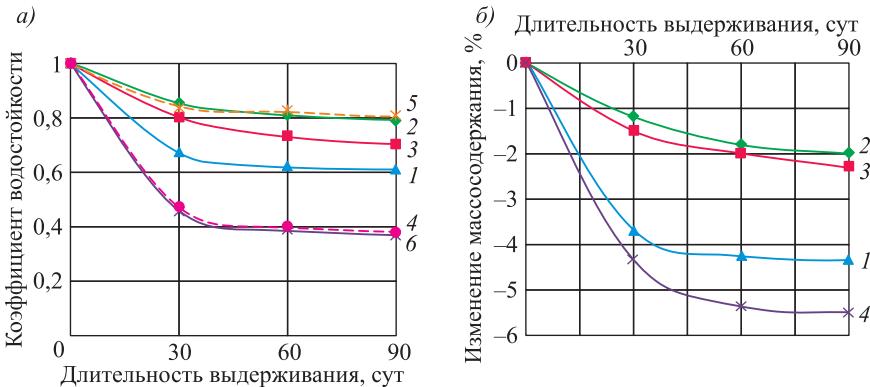
Таким образом, при действии агрессивных сред на стеклощелочные композиты потери их прочности могут быть следствием физических процессов, когда нет химических взаимодействий или они протекают с незначительной скоростью; химических реакций, в случае незначительного влияния физических факторов; комбинированного действия среды, приводящего к изменению показателя сопротивления как в результате физического, так и химического воздействия.

Предложенная классификация потерь прочности позволяет упрощать выражения для оценки и прогнозирования физико-химического сопротивления композитов.

Рассмотрим случай, когда на композиты действует лишь физически активная среда. При действии таких сред на строительные композиты наиболее вероятны следующие физические процессы и связанные с ними изменения, влияющие на их прочность: растворение и вымывание связующего вещества или его составляющих [4]; адсорбционное понижение прочности (эффект П.А. Ребиндера) и пластификация связующего вещества [5]; обводнение и нарушение контакта связующих веществ с заполнителями и наполнителями, что приводит к уменьшению прочности композита; ослабление напряженных участков, уменьшение или более равномерное распределение внутренних напряжений в объеме элемента и как следствие упрочнение материала; набухание композитных элементов и увеличение в связи с этим напряженности связей, ведущей к прочностным изменениям.

В работе [6] установлено, что водостойкость стеклощелочного композита находится в зависимости от количества растворенных и вымытых составляющих связующего вещества (рисунок). С увеличением потери массосодержания возрастают потери прочности. Растворимость возрастает с увеличением свободного гидроксида натрия, который в водной среде действует на гель кремниевой кислоты, снова превращает его в легко растворимое вещество [7].

Вымывание составляющих связующего вещества является окончательным физическим процессом, хорошо контролируемым, которому предшествует адсорбция воды и ее проникновение в структуру материала, приводящее к пластификации материала, уменьшению адгезионного взаимодействия частиц в результате обводнения поверхности контакта, облегчению трещинообразования [8]. Очевидно, что чем больше вымывание, тем интенсивнее протекают и другие процессы, способствующие разрушению материала.



Зависимость изменения коэффициента водостойкости (а) и массосодержания (б) стеклощелочных связующих веществ, отверженных тепловлажностной обработкой [6] от длительности выдерживания

1–4 – по эксперименту; 5, 6 – по функции (6); 1 – состав связующего вещества с керамзитовой пылью; 2, 5 – состав с добавкой ЭД-16 в количестве 3 мас. ч.; 3 – состав связующего вещества с бинарной добавкой (керамзит + известняк в соотношении 1 : 1); 4, 6 – состав с мелом

Обозначим через  $Q_t$  количество веществ, вымытых из материала за время  $t$ . Принимая во внимание установленную прямую зависимость снижения прочности от  $Q_t$ , получим:

$$\Delta_t^\phi = \alpha Q_t, \quad (3)$$

$$\Delta_{\max}^\phi = \alpha Q_{\max}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;

$\Delta_{\max}^\phi$  – максимальное снижение относительной прочности под воздействием физически активных сред;

$Q_{\max}$  – максимальное количество веществ, вымытых из материала.

Определив из выражения (4)  $\alpha$  и подставив его в (3), получим

$$\Delta_t^\phi = \Delta_{\max}^\phi Q_t / Q_{\max}, \quad (5)$$

где  $Q_t / Q_{\max} = F$  – функция завершенности процесса вымывания.

Таким образом, для определения потерь прочности стеклощелочного композита от действия физически активных сред необходимо знать количество вымытых составляющих веществ в любой момент времени.

Применимально к параллелепипеду при граничном условии первого рода выражение для функции сопротивления  $R_\phi^{\text{пар}}$  примет следующий вид:

$$R_\phi^{\text{пар}} = 1 - \Delta_{\max}^\phi \times \\ \times \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} B_n B_m B_l \exp[-(\mu_n^2 / K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_l^2 K_3^2) Fo] \right\}, \quad (6)$$

где  $B_n = 2 / \mu_n^2$ ,  $B_m = 2 / \mu_m^2$ ,  $B_l = 2 / \mu_l^2$ ,  $\mu_n = (2n-1)\pi/2$ ,  $\mu_m = (2m-1)\pi/2$ ,

$\mu_l = (2l-1)\pi/2$ ,  $Fo = Dt / R^2$  – число Фурье,  $R$  – обобщенный размер,  $\frac{1}{R^2} =$

$$= \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_3^2}, \quad K_i = \frac{R}{R_i} (i = 1, 2, 3).$$

$2R_1$ ,  $2R_2$ ,  $2R_3$  – размеры элементов.

Выражение (6) было применено для прогнозирования водостойкости стеклощелочных связующих веществ с добавкой смолы ЭД-16 в количестве 3 мас. ч. и добавкой мела (см. рисунок, таблицу).

**Результаты сравнения расчетов по оценке сопротивления стеклощелочного связующего вещества воздействию воды**

Время выдержки в воде, сут	Значения критерия Фурье (Fo) и показатели сопротивления для составов					
	с добавкой смолы ЭД-16			с добавкой мела		
	Fo	по эксперименту	$R_{\phi,x}^{\text{пар}} (1 \text{ чл.})$ по (6)	Fo	по эксперименту	$R_{\phi}^{\text{пар}} (1 \text{ чл.})$ по (6)
30	0,065	0,85	0,84	0,49	0,46	0,47
60	0,130	0,81	0,82	0,98	0,39	0,40
90	0,194	0,79	0,80	1,47	0,37	0,38

Испытанию в среде подвергали образцы размером  $2 \times 2 \times 2$  см. Коэффициент диффузии  $D$  был рассчитан по кривым десорбции. Он составил соответственно для материала с добавкой ЭД-16  $3 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/ч, с добавкой мела  $2,27 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/ч. Максимальное снижение показателя сопротивления  $\Delta_{\max}^{\phi}$  было найдено экспериментально и оказалось равным 0,3 и 0,63 соответственно для материала с добавкой смолы и добавкой мела. При этом для определения  $\Delta_{\max}^{\phi}$  можно применять образцы меньших размеров, так как при полном насыщении снижение показателя сопротивления примерно одинаково для различных по размерам, но подобных элементов, или прогнозировать по кривым потери прочности.

Из таблицы видно, что расчет сопротивления по выражению (6) достаточно точно описывает экспериментальные исследования. Таким образом, при отсутствии химических реакций, а также при их наличии и условии, что их скорость значительно меньше скорости проникновения агрессивной среды и снижение прочности в прогнозируемый период происходит в основном из-за физического воздействия среды, для прогнозирования сопротивления можно применить функцию, в которой не учтена роль химического взаимодействия.

Действие на стеклощелочные композиты растворов кислот, щелочей, продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, согласно проведенным исследованиям [3, 6, 9], сопровождается химическими взаимодействиями, учет влияния которых на изменение прочности становится необходимым из-за их разрушающего характера.

В зависимости от соотношения скоростей массопереноса и химических реакций разрушение стеклощелочных материалов под воздействием агрессивных сред, включая и продукты жизнедеятельности микроорганизмов, как и других строительных композитов, может протекать в трех основных кинетических областях [2, 10]:

– в первой области (внутренней кинетической) процесс деструкции материала протекает с одной скоростью по всему объему материала. Область реализуется в случаях, когда скорость массопереноса значительно больше скорости химических реакций. Происходит быстрое насыщение материала

агрессивной средой. Она может реализоваться также для изделий небольших толщин и при длительном воздействии агрессивных сред;

– во второй области (внешней диффузионно-кинетической) процесс разрушения контролируется проникновением среды и происходит в тонком слое до полного его изменения. Постепенно зона реакции смещается вглубь изделия. Область реализуется в условиях, благоприятствующих большей скорости реакции, чем проникновения;

– в третьей промежуточной области (внутренней диффузионно-кинетической или переходной) процесс разрушения развивается неравномерно в значительном объеме материала, больше с его поверхности. Область реализуется в условиях, когда скорости проникновения среды и ее взаимодействия с составляющими материала сопоставимы между собой.

Поскольку снижение характеристики прочности в результате химических реакций вызвано разрывом химических связей, то  $\Delta_t^x$  в (2) можно определить как

$$\Delta_t^x = \frac{n_t}{n_0}, \quad (7)$$

где  $n_t$  – количество разорванных связей в композите;

$n_0 = C_k^0 V_0$  – первоначальное количество связей в композите, способных к разрыву;

$C_k^0$  – первоначальная концентрация связей в композите, способных к разрыву;

$V_0$  – объем элемента из композита.

Количество разорванных связей в композите при испытании материала после выдержки в агрессивной среде на сжатие можно определить из выражения

$$n_t = \overline{C_k(t)V_0}, \quad (8)$$

где  $\overline{C_k(t)} = \frac{1}{R} \int_0^R C_k(x, t) dx$  – средняя концентрация разорванных связей в материале в виде пластины в любой момент времени  $t$ ;

$C_k(x, t)$  – концентрация разорванных связей в точке пластины в любой момент времени  $t$ .

В свою очередь  $C_k(x, t)$  находится из решения уравнения

$$W_x = \frac{dC_k(x, t)}{dt} = k [C_k^0 - C_k(x, t)] C_A(x, t), \quad (9)$$

где  $W_x$  – скорость химической реакции;

$k$  – константа скорости распада химических связей;

$C_A(x, t)$  – концентрация агрессивной среды в точке пластины в любой момент времени  $t$ .

Концентрация  $C_A(x, t)$  применительно к пластине на основании решения, приведенного в работе [11], определяется выражением

$$C_A(x, t) = C_A^0 [1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_o)], \quad (10)$$

где  $C_A^0$  – равновесная концентрация агрессивной среды.

Для изделий (тел) формы параллелепипеда или бруса решение сводится к подобной задаче для неограниченных пластин [11].

Рассмотрим частный случай решения уравнения (9), когда концентрация агрессивной среды не меняется с течением времени, т.е.  $C_A(x, t) = \text{const}$ . Имеет место внутренняя кинетическая область деструкции. Концентрация разорванных связей не меняется по сечению, а будет зависеть только от времени действия среды

$$C_k(x, t) = \overline{C_k(t)}.$$

Решение уравнения (9) относительно концентрации разорванных связей значительно упрощается. Для показателя сопротивления композитов агрессивным средам, определяемого протеканием химических реакций по всему объему изделия, как и в случае воздействия на цементные бетоны [2], получим выражение

$$R_x = 1 - \frac{\overline{C_k(t)}}{C_k^0} = \exp(-K_{\phi}t), \quad (11)$$

$R_x$  – функция сопротивления химическому воздействию среды;

$K_{\phi} = kC_A(x, t)$  – эффективная константа скорости распада связей.

Если имеют место условия, благоприятствующие большей скорости реакции, чем диффузии, то для определения показателя сопротивления находят глубину проникновения фронта реакции [10, 12]. Для этих целей применяют решения диффузационного уравнения, которые сводятся к виду [2]:

$$x = A\sqrt{Dt}, \quad (12)$$

где  $x$  – координата фронта проникновения реакции;

$A$  – постоянная для данного материала и агрессивной среды величина.

При коэффициенте диффузии  $D \approx \text{const}$  решение (12) принимает вид

$$x = K_{\text{пр}}\sqrt{t}, \quad (13)$$

где  $K_{\text{пр}} = A\sqrt{D}$  – константа проникновения среды.

Зная координату фронта проникновения реакции, можно оценить количество разорванных связей в материале в любой момент времени, а соответственно и его прочность. Для функции химического сопротивления элемента ( $R_x$ ) в виде прямоугольной призмы получим

$$R_x = 1 - \Delta_t^x = 1 - \frac{K_{\text{пр}}\sqrt{t}S_{\text{пов}}^{\delta} - 4hK_{\text{пр}}^2t}{V_0}, \quad (14)$$

где  $S_{\text{пов}}^{\delta}$  – площадь боковой поверхности призмы;

$h$  – высота призмы.

Выражение (14) нашло применение в случаях, когда определяющая роль в снижении прочности композита отводится химическому взаимодействию, протекающему с поверхности в тонком слое.

В промежуточной (переходной) области имеют место условия, когда скорости проникновения и химического взаимодействия сопоставимы между собой. Очевидно, что проникновение будет на некоторое время опережать химическое взаимодействие. Опережает и физическое воздействие среды,

требующее обязательного учета при прогнозировании. Разрыв химических связей будет осуществляться неравномерно по объему изделия. Для определения концентрации разорванных связей в точках пластины в любой момент времени  $t$  необходимо решить уравнение (9), когда концентрация агрессивной среды  $C_A(x, t)$  изменяется неравномерно по сечению и времени. Для плотных композитов, когда  $[C_k^0 - C_k(x, t)] \gg C_A(x, t)$ , можно записать [13]

$$k[C_k^0 - C_k(x, t)] = K, \quad (15)$$

где  $K$  – обобщенная константа скорости распада химических связей.

Тогда уравнение (9) примет следующий вид:

$$W_x = \frac{dC_k(x, t)}{dt} = KC_A(x, t). \quad (16)$$

Решив уравнение (16) относительно концентрации разорванных связей в точках тела в любой момент времени и найдя среднее их значение по объему элемента, можно применительно к пластине определить изменение показателя сопротивления, вызванного химическим воздействием среды ( $\Delta_t^x$ ):

$$\Delta_t^x = K_{\text{сон}} t \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n [1 - \exp(-\mu_n^2 Fo)] / \mu_n^2 Fo \right\}, \quad (17)$$

где  $K_{\text{сон}} = KC_A^0 / C_k^0$  – константа изменения показателя сопротивления;

$C_A^0$  – равновесная концентрация агрессивной среды;

$Fo = Dt/R^2$  – число Фурье;

$B_n = 2/\mu_n^2$ ,  $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$ .

Выражение (17), как ранее уже было сказано, является также основой при определении  $\Delta_t^x$  для изделий в форме параллелепипеда и бруса.

Результаты экспериментального исследования сопротивления стеклощелочных композитов воздействию агрессивных сред позволяют сделать вывод, что в целях его повышения и уменьшения растворимости в воде и растворах кислот и щелочей связующие вещества необходимо подвергать модификации и наполнению. Приведем отдельные способы повышения сопротивления стеклощелочных связующих веществ: экранизация поверхности пор отверженными пленками полимера (см., напр., рисунок, добавка ЭД-16); модификация связующего вещества неорганическими добавками, которые при взаимодействии с его компонентами образуют малорастворимые соединения, обладающие связующими свойствами (см., напр., [6]); введение наполнителей, способных в результате химического взаимодействия образовывать из растворимых соединений вещества с меньшей растворимостью, обладающие связующими свойствами; обработка поверхности композитов веществами, способными к отталкиванию компонентов агрессивной среды [4]; введение в составы композитов веществ, способных к адсорбции и (или) отталкиванию компонентов агрессивной среды [14]; введение добавок, способных при действии агрессивной среды образовывать буферные системы, ослабляющие химическое воздействие на структурообразующие составляющие композита [15, 16]; применение активных сред, способных образовывать на поверхности изделий плотные и инертные слои [13, 17].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. и др. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 196 с.
2. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-4. С. 708–716.
3. Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. и др. Ограждающие конструкции на основе каркасного керамзитобетона для производственных зданий / под общ. ред. Ю.М. Баженова, В.Т. Ерофеева. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. 212 с.
4. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
5. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформирования и разрушения // Физико-химическая механика: избр. тр. М.: Наука, 1979. С. 203–268.
6. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Богатов А.Д. [и др]. Строительные материалы на основе отходов стекла. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. 120 с.
7. Глинка Н.Л. Общая химия: учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1979. 720 с.
8. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М.: Стройиздат, 1976. 128 с.
9. Богатов А.Д., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Биостойкие строительные композиты на основе отходов стекла // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. С. 124–130.
10. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967. 491 с.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Вышш. шк., 1967. 599 с.
12. Новичков П.И. Теоретические основы коструирования железобетонных элементов с учетом сопротивления физическим и химическим воздействиям. СПб.: Наука, 2011. 216 с.
13. Федорцов А.П. Позитивная коррозия бетонов как предпосылка улучшения их свойств агрессивными воздействиями // Вестн. Мордов. ун-та. 2002. № 1–2. С. 152–156.
14. Соломатов В.И., Федорцов А.П. Позитивная коррозия бетонов // Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов. Казань: Изд-во КХТИ им. С.М. Кирова, 1982. С. 10–13.
15. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Андронов А.Ф. Теоретические предпосылки повышения биологического и химического сопротивления бетонов посредством буферных систем // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. С. 69–73.
16. Соломатов В.И., Дудынов С.В., Федорцов А.П. Цементные растворы с буферными системами // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 7–8. С. 54–58.
17. Федорцов А.П. Улучшение свойств бетонов агрессивными воздействиями // Вестн. Мордов. ун-та. 2003. № 1–2. С. 135–138.

**Ерофеев Владимир Трофимович**, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева, г. Саранск

**Федорцов Анатолий Петрович**, канд. техн. наук, доц.

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

**Богатов Андрей Дмитриевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: bogatovad@list.ru

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

**Федорцов Владислав Анатольевич**, асп.

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

Получено 17.05.17

**Erofeev Vladimir Trofimovich**, Academician of RAASN, DSc, Professor

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Fedortsov Anatoliy Petrovich**, PhD, Ass. Professor

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Bogatov Andrey Dmitrievich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: bogatovad@list.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Fedortsov Vladislav Anatol'evich**, Post-graduate Student

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

## **ASSESSMENT AND FORECASTING OF PHYSICAL AND CHEMICAL RESISTANCE OF GLASS ALKALI COMPOSITES AND METHODS OF HIS INCREASE**

Properties of composites are insufficiently studied, including their resistance to influence of hostile environment, and respectively there are no researches on his assessment, forecasting and increase. In work pilot studies of firmness (resistance) of composites are given in environments of various aggression on the basis of which and the general regularities of diffusive and chemical kinetics the functions allowing to estimate and predict resistance of products depending on parameters of a mass transfer and chemical reactions, the sizes are defined. Ways of increase of this resistance are specified.

**К e y w o r d s:** withdrawal of production, composite, physical and chemical resistance, hostile environment, waste products of microorganisms, speeds of a mass transfer and chemical reactions, increase of resistance to influence.

### **REFERENCES**

1. S o l o m a t o v V.I., E r o f e e v V.T., S m i r n o v V.F. et al. Biologicheskoe sопротивление materialov [Biological resistance of materials]. Saransk, Publishing house of Mordov. un-ta, 2001. 196 p. (in Russian)
2. E r o f e e v V.T., F e d o r t s o v A.P., B o g a t o v A.D., F e d o r t s o v V.A. Biokorroziya tsementnykh betonov, osobennosti ee razvitiya, otsenki i prognozirovaniya [Biological corrosion of cement concrete, features of her development, assessment and forecasting]. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. 2014. No. 12-4. Pp. 708–716. (in Russian)
3. B a z h e n o v Yu.M., E r o f e e v V.T., M i t i n a E.A. et al. Ograzhdayushchie konstruktsii na osnove karkasnogo keramzitobetona dlya proizvodstvennykh zdaniy. Pod obshch. red. Yu.M. Bazhenova, V.T. Erofeeva [The protecting designs on the basis of a frame expanded clay concrete for production buildings]. Saransk, Publishing house of Mordov. un-ta, 2004. 212 p. (in Russian)
4. M o s k v i n V.M., I v a n o v F.M., A l e k s e e v S.N., G u z e e v E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow, Stroyizdat, 1980. 536 p. (in Russian)

5. Re binder P.A., Shchukin E.D. Poverkhnostnye yavleniya v tverdykh telakh v protsessakh ikh deformirovaniya i razrusheniya [The superficial phenomena in solid bodies in processes of their deformation and destruction]. Fiziko-khimicheskaya mekhanika: izbr. tr. [Physical and chemical mechanics: chosen works]. Moscow, Nauka, 1979. Pp. 203–268. (in Russian)
6. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Bogatov A.D. et al. Stroitel'nye materialy na osnove otkhodov stekla [Construction materials on the basis of glass waste]. Saransk, Publishing house of Mordov. un-ta, 2005. 120 p. (in Russian)
7. Glinka N.L. Obschaya khimiya: uchebnoe posobie dlya vuzov [General chemistry: manual for higher education institutions]. Leningrad, Khimiya, 1979. 720 p. (in Russian)
8. Verbitskiy G.P. Prochnost' i dolgovechnost' betona v vodnoy srede [Durability and durability of concrete in the water environment]. Moscow, Stroyizdat, 1976. 128 p. (in Russian)
9. Bogatov A.D., Erofeev V.T., Smirnov V.F. Biostoykie stroitel'nye kompozity na osnove otkhodov stekla [Biostable construction composites on the basis of glass waste]. Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Biological damages and biological corrosion in construction: materials of the International scientifically technical conference]. Saransk, Publishing house of Mordov. un-ta, 2004. Pp. 124–130. (in Russian)
10. Frank-Kamenskiy D.A. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow, Nauka, 1967. 491 p. (in Russian)
11. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967. 599 p. (in Russian)
12. Novichkov P.I. Teoreticheskie osnovy kostruirovaniya zhelezobetonnykh elementov s uchetom soprotivleniya fizicheskim i khimicheskim vozdeystviyam [Theoretical bases of designing of reinforced concrete elements taking into account resistance to physical and chemical impacts]. Saint Petersburg, Nauka, 2011. 216 p. (in Russian)
13. Fedortsov A.P. Pozitivnaya korroziya betonov kak predposylka uluchsheniya ikh svoystv aggressivnymi vozdeystviyami [Positive corrosion of concrete as prerequisite of improvement of their properties by aggressive influences]. Vestnik Mordov. un-ta [Mordovia University Bulletin]. 2002. No. 1-2. Pp. 152–156. (in Russian)
14. Solomatov V.I., Fedortsov A.P. Pozitivnaya korroziya betonov [Positive corrosion of concrete]. Rabotosposobnost' kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov v usloviyakh vozdeystviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov [Operability of composite construction materials in the conditions of influence of various operational factors]. Kazan, Publishing house of KHTI im. S.M. Kirova, 1982. Pp. 10–13. (in Russian)
15. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Andronov A.F. Teoreticheskie predposylki povysheniya biologicheskogo i khimicheskogo soprotivleniya betonov posredstvom bufernykh system [Theoretical prerequisites of increase in biological and chemical resistance of concrete by means of buffer systems]. Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Biological damages and biological corrosion in construction: materials of the International scientifically technical conference]. Saransk, Publishing house of Mordov. un-ta, 2004. Pp. 69–73. (in Russian)
16. Solomatov V.I., Dudynov S.V., Fedortsov A.P. Tsementnye rastvory s bufernymi sistemami [Cement mortars with buffer systems]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1995. No. 7–8. Pp. 54–58. (in Russian)
17. Fedortsov A.P. Uluchshenie svoystv betonov aggressivnymi vozdeystviyami [Improvement of properties of concrete by aggressive influences]. Vestnik Mordov. un-ta [Mordovia University Bulletin]. 2003. No. 1–2. Pp. 135–138. (in Russian)

УДК 691.54 : 620.1

Г.И. БЕРДОВ, П.М. ПЛЕТНЕВ, А.Ф. БЕРНАЦКИЙ,  
В.Ф. ХРИТАНКОВ, С.А. ВИНОГРАДОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК  
НА СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ЦЕМЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ  
ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Эффективность применения минеральных добавок в составы цементных материалов зависит от многих факторов, в том числе от вида и количества вводимой добавки. Общепринятая методика оценки действия добавки предусматривает определение прочности образцов цементного камня после твердения. В то же время наряду с показателем прочности выбор оптимального количества добавки может быть осуществлен по структурно-чувствительным диэлектрическим характеристикам цементных смесей. Показано, что на концентрационной зависимости содержания минеральной добавки – волластонита в начальный период (10–120 мин) после затворения обнаруживается экстремальное (минимальное) значение диэлектрических потерь, соответствующее оптимальному количеству (7 мас. %) добавки при достижении максимальной прочности цементным камнем. Четкая корреляционная связь между диэлектрическими и механическими свойствами позволяет рассматривать диэлькометрический метод анализа как перспективный, оперативный и малотрудоемкий способ по выбору оптимального содержания добавок и технологических режимов производства цементных материалов.

**Ключевые слова:** цементный камень, минеральные добавки, волластонит, диэлькометрия, диэлектрические свойства.

Дисперсные минеральные наполнители (добавки) широко используются для модификации строительных материалов, изменения в требуемом направлении их технологических и эксплуатационных свойств. Применение таких добавок позволяет в значительной мере реализовывать потенциальные возможности неорганических вяжущих веществ (цементных, магнезиальных, гипсовых) и полимерных материалов.

Во многих случаях введение добавок обеспечивает сокращение расхода дорогостоящих вяжущих веществ. Для обеспечения высокой эффективности действия минеральных тонкомолотых наполнителей важен не только их состав, но и вводимое их количество и дисперсность.

Дисперсные минеральные добавки могут оказывать следующие воздействия на структуру и свойства композиционных материалов [1]:

- микроармируют структуру цементного камня;
- обусловливают перераспределение механических напряжений между искусственным камнем и частицами добавки;
- препятствуют распространению микротрещин в структуре материала;

- выступают в качестве центров кристаллизации при образовании гидратных фаз;
- воздействуют на процесс гидратационного твердения вяжущего вещества.

Эффективность действия добавки зависит от ее дисперсности. Теоретический анализ на основе представлений о плотнейшей упаковке частиц в структуре материала показывает, что при близких значениях плотности и дисперсности вяжущего вещества и добавки оптимальное ее содержание составляет около 8 % от массы вяжущего вещества. Если дисперсность добавки больше, чем вяжущего вещества, то ее оптимальное количество будет меньше [2].

К числу эффективных минеральных добавок к цементу относится волластонит. В работе [2] показано, что при введении добавки волластонита в количестве 2; 5; 9; 11 % от массы цемента происходит увеличение прочности при сжатии образцов цементного камня, цементно-песчаного раствора и бетона как при твердении в течение 28 сут в нормальных условиях, так и после тепловлажностной обработки. При удельной поверхности порошка волластонита, равной 287 м<sup>2</sup>/кг, максимальное увеличение прочности цементных материалов (на 15–20 %) достигается при количестве вводимой добавки 7–9 % от массы цемента.

Действие минеральной добавки может проявляться уже на начальных стадиях взаимодействия цемента с водой. Для исследования этого процесса использован высокочастотный диэлькометрический анализ концентрированных суспензий цемент–вода, т.е. цементного теста нормальной густоты.

Диэлькометрия (или диэлектрометрия) – метод исследования структуры и свойств веществ путем определения их диэлектрических свойств – диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) [3, 4].

Диэлькометрия успешно применима в тех случаях, когда одним из компонентов, участвующих во взаимодействии, является вода. Это характерно для процесса взаимодействия вяжущих веществ с водой и формирования структуры искусственного камня.

Молекулы воды обладают большим дипольным моментом –  $6,17 \cdot 10^{-30}$  Кл · м. Их ориентация при наложении внешнего электрического поля обусловливает высокую диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ) воды, а при действии высокочастотного электрического поля – высокий уровень диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ).

Диэлектрические свойства воды подробно изучены. При + 20 °С и частоте около 1 МГц ( $\epsilon$ ) = 78,2; ( $\operatorname{tg}\delta$ ) = 0,4 [5]. Диэлектрические свойства портландцемента в исходном и гидратированном состояниях мало исследованы. Об их значениях можно судить по аналогии с другими силикатами и гидросиликатами, такими как волластонит, форстерит, слюда, тальк. Так, у керамики, основу которой составляет волластонит ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), при + 20 °С и частоте 1 МГц ( $\epsilon$ ) = 6,5–7; ( $\operatorname{tg}\delta$ ) = (3–4) · 10<sup>-4</sup>. У кристаллических тел, содержащих полярные молекулы воды, диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери выше, чем у безводных веществ. Например, у кристаллического

двуводного гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) на частоте 1,5 МГц ( $\epsilon = 26$ , для кристаллического талька ( $\epsilon = 18$  [6].

При взаимодействии с портландцементом вода переходит в связанное состояние в составе гидросиликатов и гидроалюминатов. По уровню диэлектрических свойств концентрированных суспензий цемент–вода можно исследовать процесс гидратации цемента и формирования структуры искусственного камня по изменению состояния воды.

Определение диэлектрических свойств успешно используется при исследовании цементных материалов, в том числе цементного теста [7–14]. При этом обычно определяется электрическая проводимость цементных образцов. Вместе с тем важную информацию о структуре и свойствах гидратирующегося цемента можно получить, определяя диэлектрические потери и электрическую емкость исследуемых систем.

В данной работе исследовано влияние количества минеральной добавки (волластонита) на диэлектрические свойства цементного теста нормальной густоты в процессе его твердения.

Исследован портландцемент производства ОАО «Искитимцемент» (Новосибирская обл.) марки ПЦ 400 Д 20.

Минералогический состав, мас. %:  $\text{C}_3\text{S} - 55$ ;  $\text{C}_2\text{S} - 18$ ;  $\text{C}_3\text{A} - 11$ ;  $\text{C}_4\text{AF} - 14$

Удельная поверхность – 320 м<sup>2</sup>/кг

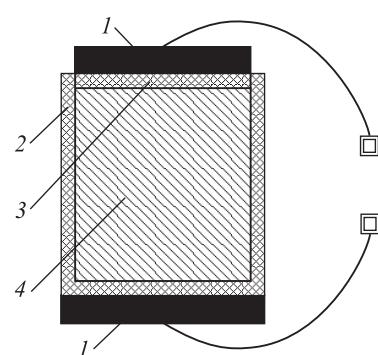
Химический состав цемента, мас. %:  $\text{SiO}_2 - 20,81$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 6,9$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 4,6$ ;  $\text{CaO} - 65,5$ ;  $\text{MgO} - 1,3$ ;  $\text{SO}_3 - 0,4$ ; п.п.п. – 0,5.

В качестве добавки вводился волластонит – однокальциевый силикат ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), близкий по составу к основным клинкерным минералам – трехкальциевому  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  и двухкальциевому силикату кальция  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . В работе использован волластонит Алтайского месторождения (рудник «Веселый»). Его химический состав, мас. %:  $\text{SiO}_2 - 53,4$ ;  $\text{CaO} - 34,7$ ;  $\text{MgO} - 0,3$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3,1$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,3$ ; п.п.п. – 0,2. Дисперсность волластонита определена методом лазерной гранулометрии на приборе PRO-7000 Sieshin Enterprises Co. LTD, Tokyo. Средний размер зерен был равен 50 мкм.

Количество вводимой добавки составляло 1; 5; 7; 9 мас. %. Водотвердое отношение было равно 0,3, что соответствовало цементному тесту нормальной густоты.

Определение диэлектрических свойств композиций указанного состава проведено на измерителе добротности Tesla BM-560 на частоте 1,5 МГц.

Для измерения диэлектрических свойств применена специальная измерительная ячейка (рис. 1). Она представляет собой стакан из полиэтилена (2), имеющего низкую электропроводность, закрываемый полиэтиленовой крышкой (3). К внешней поверхности крышки и дну цилиндра плотно крепятся металлические электроды (1). Заполняемый исследуемой суспензией объем ячейки имел внутренний диаметр 90 мм, высоту 50 мм.



Rис. 1. Измерительная ячейка  
1 – электроды; 2 – полиэтиленовая ячейка; 3 – крышка; 4 – исследуемый материал

В опытах измерялась емкость и добротность ячейки пустой, заполненной водой и исследуемой суспензией.

Добротность контура с пустой ячейкой составляла 130, емкость 132,7 пФ. Контур с ячейкой, заполненной водой, имел добротность, равную 40, емкость – 111,7 пФ.

Определялось изменение добротности ( $\Delta Q$ ) и емкости ( $\Delta C$ ) при заполнении измерительной ячейки исследуемой композицией. Расчет тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) производился по известным формулам.

На концентрационной зависимости содержания волластонита в водной суспензии цемента в начальный период (10 мин) после затворения обнаруживается экстремальное (минимальное) значение диэлектрических потерь при содержании 7 мас. % волластонитовой добавки (рис. 2). Это связано с тем, что при таком количестве в начальный период наиболее активно происходят процессы адсорбции молекул воды дисперсным волластонитом, приводящие к резкому уменьшению диэлектрических потерь. При увеличении времени после затворения (60–120 мин) концентрационные экстремумы диэлектрических потерь сглаживаются, что может свидетельствовать о влиянии протекающих процессов гидратации цемента.

При увеличении добавки волластонита более 7 мас. % начинают превалировать процессы гидратации цемента с образованием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , что вызывает рост диэлектрических потерь. Наименьшему уровню  $\operatorname{tg}\delta$  и наибольшей его стабильности в процессе гидратации во времени соответствует количество добавки волластонита, равное 7 мас. % (рис. 3). Такое количество добавки является оптимальным, согласно исследованиям авторов [2], по дости-

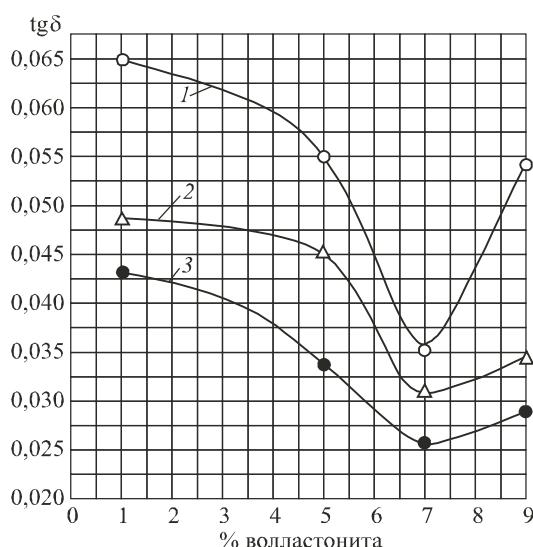


Рис. 2. Изменение тангенса угла диэлектрических потерь цементной суспензии с добавкой волластонита в начальный период затворения  
1 – время от начала затворения 10 мин; 2 – то же, 60 мин; 3 – то же, 120 мин

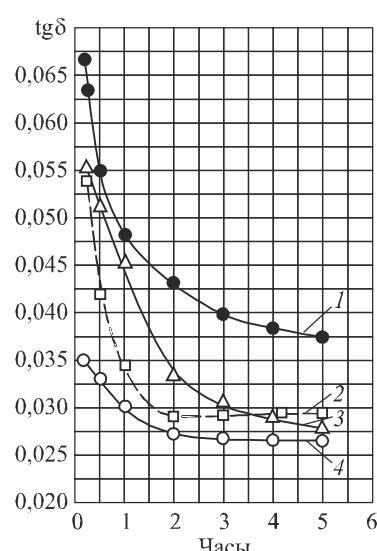


Рис. 3. Изменение тангенса угла диэлектрических потерь в процессе твердения цементной суспензии при различном содержании волластонита  
1 – 1 мас.%; 2 – то же, 5%; 3 – то же, 7%; 4 – то же, 9%

жению максимального повышения прочности цементного камня, цементно-песчаного раствора и бетона.

При меньшем количестве добавки (менее 7 мас. %) диэлектрические потери смеси явно больше и спад их со временем твердения более крутой, чем при содержании волластонита 7 мас. %.

Выявленный оптимум вводимого волластонита в систему цемент–вода по диэлектрическому показателю имеет четкую корреляционную связь с прочностью образцов цементного камня – минимуму потерь соответствует максимум прочности (рис. 4).

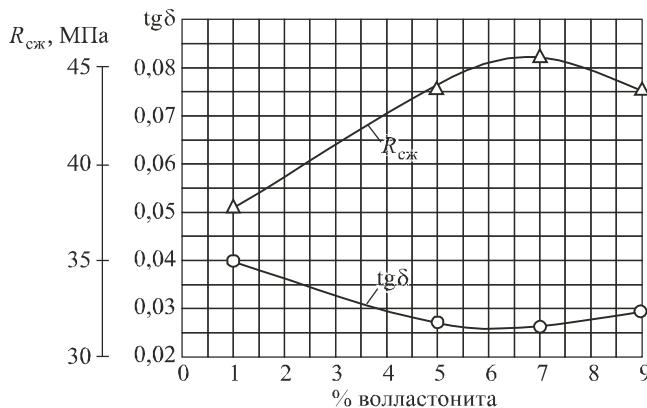


Рис. 4. Влияние добавки волластонита на прочность при сжатии и тангенс угла диэлектрических потерь цементно-песчаного камня

Изменение емкости для исследуемых смесей невелико (см. таблицу). Этот показатель оказался менее информативным, чем диэлектрические потери смесей.

Таким образом, диэлькометрический анализ концентрированных цементных суспензий уже на начальной стадии после затворения смеси позволяет определить оптимальное количество минеральной добавки – волластонита, обеспечивающее необходимую структуру цементного теста, которая определяет при твердении наиболее высокую прочность цементного материала в виде камня, цементно-песчаного раствора и бетона. Следовательно, высокочастотный диэлькометрический анализ может успешно быть использован для определения оптимального количества дисперсных минеральных добавок к цементу без проведения длительных и трудоемких испытаний образцов и аналитических исследований процесса гидратационного твердения цемента, т.е. он может служить экспресс-методом контроля технологического процесса при производстве цементных строительных материалов.

Время от начала затворения, мин	$\Delta C, \text{пФ}$ , при концентрации волластонита, мас. %			
	1	5	7	9
30	32,2	34,1	32,1	33,7
60	31,4	33,1	31,8	34,8
90	31,3	33,1	31,9	34,8
120	31,2	33,1	31,9	34,8
150	31,1	33,0	32,0	34,8
180	31,1	33,2	32,0	34,6
210	31,2	33,1	32,0	34,5
240	31,3	33,0	31,9	34,5
270	31,3	33,0	31,8	34,4
300	31,2	32,9	31,7	34,4

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
2. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н. Влияние минеральных наполнителей на свойства композиционных строительных материалов. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2013. 124 с.
3. Заринский В.А. Диэлькометрия. Химическая энциклопедия. Т. 2. М.: Сов. энциклопедия, 1990. 210 с.
4. Заринский В.А., Ермаков В.И. Высокочастотный химический анализ. М.: Наука, 1970. 200 с.
5. Диэлектрики и их применение / пер. с англ. под ред. Д.М. Казарновского. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 336 с.
6. Водопьянов К.А. Температурно-частотная зависимость угла диэлектрических потерь в кристаллах с полярными молекулами // Докл. АН СССР. 1952. Т. 94. № 5. С. 919–921.
7. Levita G. [et al.]. Electrical properties of fluidified Portland cement mixes in the early stage of hydration // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. No. 6. P. 923–930.
8. Salem Th.M. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes // Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32. No. 9. P. 1473–1481.
9. Lianzhen Xiao, Xiaosheng Wei. Early age compressive strength of pastes by electrical resistivity method and maturity method // Thechnol. Mater. Sci. Fd. J. Wuhan Univ. 2011. Vol. 26. No. 5. P. 983–989.
10. Topcu Like Bekir, Uygunoglu Tayfun, Hocaoglu Ismail // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 28. No. 1. P. 414–420.
11. Xiaosheng Wei [et al.]. Influence of calcium sulfate state and fineness of cement on hidration of Portland cements using electrical measurement // Thechnol. Mater. Sci. Fd. J. Wuhan Univ. 2006. Vol. 21. No. 4. P. 141–145.
12. Yoon S.S., Kim H.C., Hill R.M. The dielectric response of hydrating porous cement paste // Journal of Physics D: Applied Physics. 1996. Vol. 29. No. 3. P. 869–875.
13. McCarter William J. Effects of temperature on conduction and polarization in Portland cement mortar // The Journal of the American Ceramic Society. 1995. Vol. 78. No. 2. P. 411–415.
14. Heical M. [et al.]. Electrical conductivity, physico-chemical and mechanical characteristics of fly ash pozzolanic cement // Silicat. ind. 2004. Vol. 69. No. 11-12. P. 93–102.

**Бердов Геннадий Ильич**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Плетнев Петр Михайлович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: pletnevpm@stu.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Бернацкий Анатолий Филиппович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: bernatsky@sibstrin.ru

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

**Хританков Владимир Федорович**, д-р техн. наук;

E-mail: vkhritankov@mail.ru

Новосибирский государственный аграрный университет

**Виноградов Семен Алексеевич**, асп.;

E-mail: semenvinogradov@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 26.05.17

**Berdov Gennadii Il'ich**, DSc, Professor

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

**Pletnev Petr Mikhailovich**, DSc, Professor; E-mail: pletnevpm@stu.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Bernatskiy Anatoliy Filippovich**, DSc, Professor;

E-mail: bernatsky@sibstrin.ru

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

**Khritankov Vladimir Fedorovich**, DSc; E-mail: vkhritankov@mail.ru

Novosibirsk State Agrarian University, Russia

**Vinogradov Semen Alekseevich**, Post-graduate Student;

E-mail: semenvinogradov@yandex.ru

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

## **HIGH-FREQUENCY DIELECTROMETRICAL CONTROL OF INFLUENCE OF DISPERSED MINERAL ADDITIONS QUANTITY ON PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITIONS**

Efficiency of the use of mineral additions in cement materials compositions depends on many factors, including the type and quantity of additions. Widely used methods of evaluation of addition's effect foresees determination of strength of cement stones samples after hardening. At the same time together with the strength index the choice of the optimal quantity of addition can be realized on structural-sensitive dielectric characteristics of cement mixtures. It was shown that on concentration dependence of content of mineral addition-vollastonite in the initial period (10–120 min) after mixing with water, extreme (minimal) value of dielectric losses corresponding to optimal quantity (7 mas. %) of addition with achieving maximal strength by cement stone is found. Distinct correlation connection between dielectric and mechanical properties makes it possible to consider dielectric method of analyses as perspective, operative and not laborious method of the choice of optimal additions content and technological regimes of cement materials production.

**K e y w o r d s:** cement stone, mineral additions, vollastonite, dielectrometry, dielectric properties.

### **REFERENCES**

1. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Dobavki v beton [Additions in concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 188 p. (in Russian)
2. Berdov G.I., Il'ina L.V., Zyrjanova V.N. Vliyanie mineral'nykh napolniteley na svoystva kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Influence of mineral microfillers on properties of compositional building materials]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2013. 124 p. (in Russian)
3. Zarinskii V.A. Diel'kometriya. Khimicheskaya entsiklopediya. T. 2 [Dielectrometry. Chemical encyclopaedia. Vol. 2]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1990. 210 p. (in Russian)
4. Zarinskii V.A., Ermakov V.I. Vysokochastotnyy khimicheskiy analiz [Highfrequency chemical analysis]. Moscow, Nauka, 1970. 200 p. (in Russian)

5. Dielektriки и их применение / пер. с англ. под ред. Д.М. Казарновского [Dielectrics and their application]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1959. 336 p. (in Russian)
6. V o d o p 'y a n o v K.A. Temperaturno-chastotnaya zavisimost' ugla dielektricheskikh poter' v kristallakh s polyarnymi molekulami [Temperature and frequency dependence of an angle of dielectric losses in crystals with polar molecules]. Doklady AN SSSR [Reports of Academy of Sciences of the USSR]. 1952. Vol. 94. No. 5. Pp. 919–921. (in Russian)
7. Levita G. [et al.]. Electrical properties of fluidified Portland cement mixes in the early stage of hydration. Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. No. 6. Pp. 923–930.
8. Saleem Th.M. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes. Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32. No. 9. Pp. 1473–1481.
9. Lianzhen Xiao, Xiaosheng Wei. Early age compressive strength of pastes by electrical resistivity method and maturity method. Thechnol. Mater. Sci. Fd. J. Wuhan Univ. 2011. Vol. 26. No. 5. Pp. 983–989.
10. Topcu Like Bekir, Uygunoglu Tayfun, Hocaoglu Ismail. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 28. No. 1. Pp. 414–420.
11. Xiaosheng Wei [et al.]. Influence of calcium sulfate state and fineness of cement on hidration of Portland cements using electrical measurement. Thechnol. Mater. Sci. Fd. J. Wuhan Univ. 2006. Vol. 21. No. 4. Pp. 141–145.
12. Yoon S.S., Kim H.C., Hill R.M. The dielectric response of hydrating porous cement paste. Journal of Physics D: Applied Physics. 1996. Vol. 29. No. 3. Pp. 869–875.
13. McCarter William J. Effects of temperature on conduction and polarization in Portland cement mortar. The Journal of the American Ceramic Society. 1995. Vol. 78. No. 2. Pp. 411–415.
14. Heical M. [et al.]. Electrical conductivity, physico-chemical and mechanical characteristics of fly ash pozzolanic cement. Silicat. ind. 2004. Vol. 69. No. 11-12. Pp. 93–102.

УДК 691.54 : 539.4

А.И. ГНЫРЯ, Ю.А. АБЗАЕВ, С.В. КОРОБКОВ, А.П. БОЯРИНЦЕВ,  
Д.И. МОКШИН, К.С. ГАУСС

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЕЮЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ<sup>\*</sup>

Проведено исследование накопления прочностных свойств цементного камня в зависимости от времени в интервале (0...67) часов и разных температурах изотермического твердения: 40, 50, 70 °C соответственно. Было установлено, что при исследованных температурах предел текучести возрастает практически на порядок. Значительно возрастают также упругие модули. Показано, что с ростом времени твердения значительно сокращается пластическая область и в конце исследованного интервала (0... 67) при всех температурах разрушение образцов происходит хрупким образом. На кривых течения в пластической области немонотонны, наблюдается высокая плотность изломов. Основной характеристикой оценки прочностных свойств оказывается предел текучести.

**Ключевые слова:** предел текучести, предел прочности, упрочнение, упругая деформация.

**Введение.** В бетонах различного типа основным связующим является цементный камень (портландцемент). Под внешней нагрузкой локальные напряжения в бетонах распределяются неоднородно. В тяжелых бетонах заполнители, как правило, обладают высокими прочностными характеристиками. И поэтому прочностные свойства определяются прежде всего тяжелыми фракциями бетонов, в приграничных межфазных областях которых сосредотачиваются локальные напряжения, существенно превышающие средние значения по бетону. В бетонах с высокой долей пористой составляющей механические свойства бетонов, наоборот, определяются прежде всего упругими свойствами цементного камня [1–10].

Твердение бетонов является многофакторным процессом, на которое оказывают влияние водоцементное отношение, температура, влажностные условия, количественное содержание фаз и т.д. И как следствие достижение бетонами служебных характеристик оказывается индивидуальным. В литературе оценки прочностных характеристик, как правило, ограничиваются нормированными значениями предела прочности деформированных бетонов относительно значений, соответствующих 28 сут твердения [4]. Данная характеристика, по мнению авторов, является недостаточной при детальном исследовании закономерностей прочностных свойств цементного камня. Представляет определенный интерес изучение механических свойств гидратированного цементного камня современными испытательными машинами

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ (проект НШ-8780.2016.8).

в зависимости от времени, температуры (изотермическое твердение или отжиг), образцы которого не осложнены присутствием различных фракций, свойственных бетонам разного типа.

В работе было проведено исследование механических характеристик гидратированного цементного камня в зависимости от времени, температуры изотермического твердения с целью количественной оценки вариации предела текучести, интенсивности накопления прочностных свойств портландцементами до служебных значений в процессе твердения.

**Методика эксперимента.** Механические испытания сжатием образцов цементного камня проводились на испытательной машине Instron 3382 при комнатной температуре со скоростью деформации 1 мм/мин. Точность определения нагрузки на Instron составляет 5 Н, максимальная нагрузка равна 100 кН. Размеры прямоугольных образцов были выбраны равными 20×20×20 мм. Изотермические испытания производились во влажностной камере. Значения предела текучести, модуля упругости усреднялись по пяти значениям. Схема изотермического твердения приведена на рис. 1.

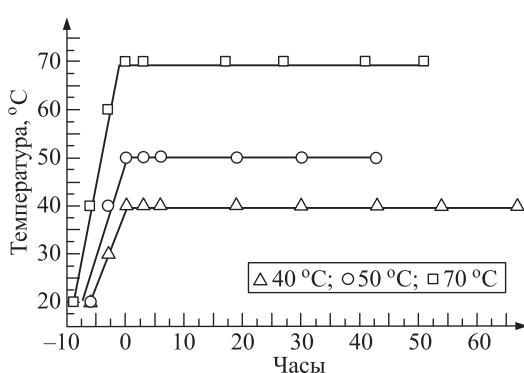


Рис. 1. Схема изотермического прогрева цементного камня при температурах 40, 50 и 70 °C

43 ч. При температуре прогрева 70 °C – 0, 3, 17, 27, 41, 51 ч.

Точность определения температуры во влажностной камере определялась хромель-капелевой (ХК) термопарой диаметром 0,5 мм в on-line режиме с помощью регистратора температур «Теплограф» через универсальный многоканальный адаптер «Терем» и составляла  $\pm 0,5$  °C.

**Результаты исследований.** На рис. 2 в качестве иллюстрации приведены типичные кривые напряжение–деформация ( $\sigma$ – $\epsilon$ ), соответствующие началу твердения (рис. 2, а) и 67 ч (рис. 2, б) при температуре 40 °C.

На рис. 2, б видно, что на кривых выделяются начальная переходная область, протяженный линейный участок (область упругой деформации) и пластическая область.

Область упругого деформирования ограничена линейной зависимостью кривых напряжение–деформация. В пластической области кривые напряжение–деформация имеют сложный вид. На протяженность пластической области оказывает существенное влияние время твердения. На начальных стадиях твердения пластическая область оказывается протяженной, сопоставимой с протяженностью упругой области, и обнаруживается монотонный рост

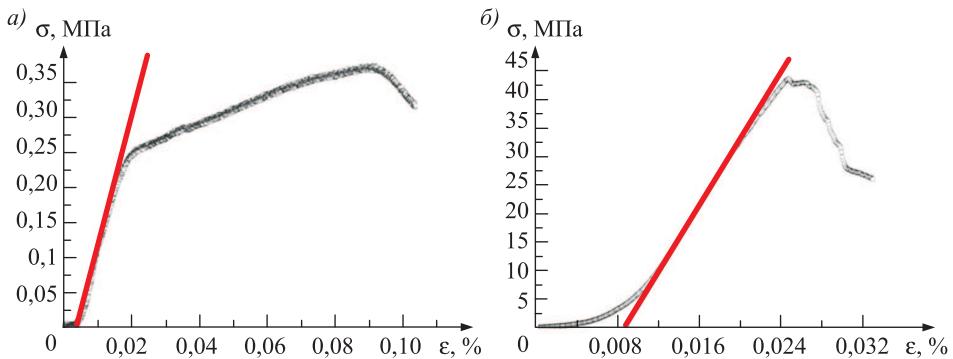


Рис. 2. Кривые напряжение–деформация при температуре твердения 40 °С  
а – время твердения 0 ч; б – время твердения 67 ч. Красные линии соответствуют аппроксимации линейного участка кривых

напряжений течения до значений предела прочности образцов, за которым наблюдается также протяженная область падения напряжений. Указанная последовательность стадийности кривых  $\sigma$ – $\varepsilon$  характерна для начальных стадий твердения при всех исследуемых температурах прогрева. Температура оказывает влияние только на количественные характеристики: предел текучести, прочность и интенсивность упрочнения на кривых  $\sigma$ – $\varepsilon$ . С ростом времени твердения и температуры пластическая область существенно сокращается, на кривых за пределом текучести наблюдается, как правило, высокая плотность изломов. Предел прочности в некоторых случаях практически совпадает с пределом текучести, т.е. разница на кривых  $\sigma$ – $\varepsilon$  составляет доли процентов деформирования. Не представляется возможным выделить закономерности влияния температуры и времени твердения на напряжения течения в пластической области на поздних стадиях твердения. На кривых течения наблюдается как скачкообразный рост напряжений, так и скачкообразное снижение. С ростом времени твердения наблюдается склонность к хрупкому разрушению. Образцы портландцемента в пластической области деформируются индивидуально. Переходная область в процессе изотермического прогрева мало меняется на начальных стадиях твердения. Повышение температуры прогрева и увеличение времени прогрева приводит к существенному сокращению переходной области на кривых течения.

В работе анализировались модуль упругости, предел текучести на кривых напряжение–деформация. Модуль упругости характеризует интенсивность накопления прочности образцов в области упругих деформаций. Предел текучести  $\sigma_0$  на кривых  $\sigma$ – $\varepsilon$  соответствует напряжению перехода от линейного участка зависимости к пластической области. Для оценки модуля упругости линейный участок аппроксимировался зависимостью (рис. 2, красная линия)

$$\sigma = A + G \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – приложенное напряжение;

$\varepsilon$  – деформация;

$A$  – константа;

$G$  – соответствует оценке модуля упругости.

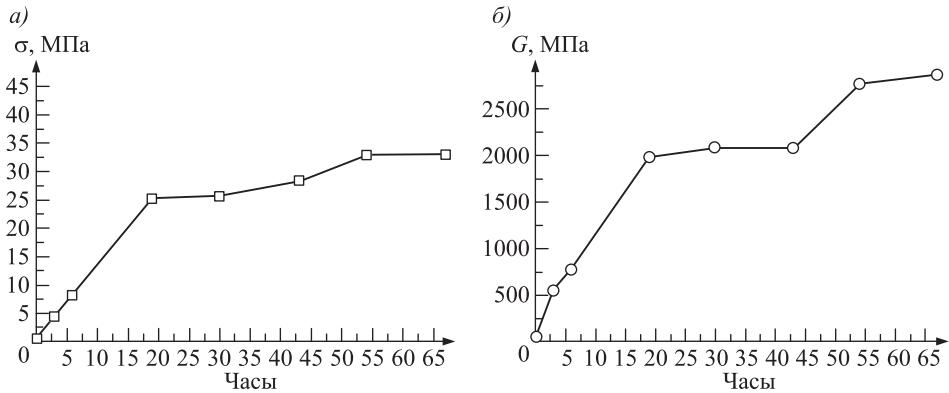


Рис. 3. Зависимости предела текучести ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $G$ ) от времени твердения при температуре 40 °C

Коэффициент линейной корреляции для всех исследуемых образцов был близок к единице (не менее 0,998).

На рис. 3–5 приведены зависимости предела текучести и модуля упругости твердеющего цементного камня в зависимости от времени твердения (времени накопления прочности) при различных температурах.

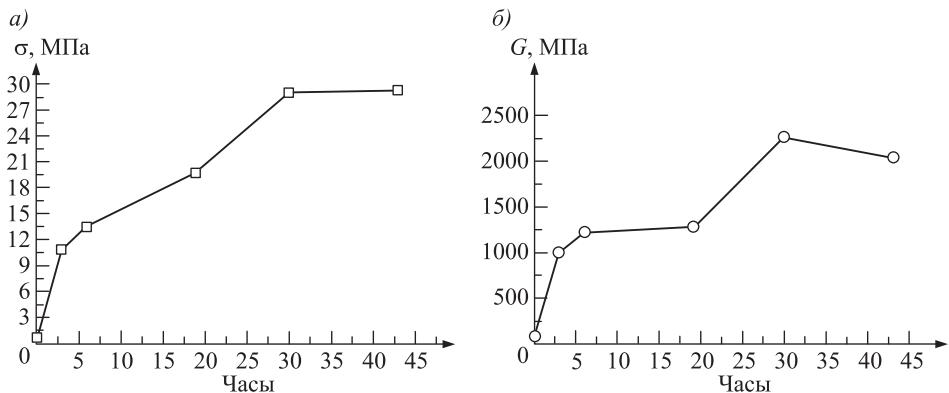


Рис. 4. Зависимости предела текучести ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $G$ ) от времени твердения при температуре 50 °C

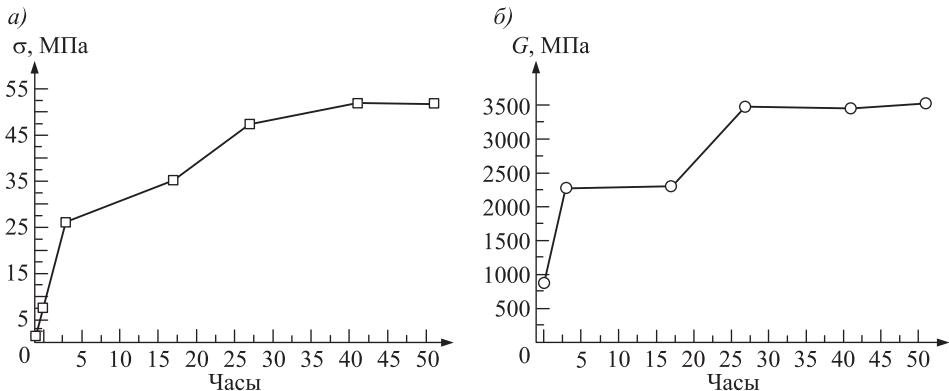


Рис. 5. Зависимости предела текучести ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $G$ ) от времени твердения при температуре 70 °C

Как видно на рис. 3–5, с ростом времени наблюдается существенный рост механических характеристик. За исследуемый промежуток времени предел текучести возрастает более чем на порядок при 40 °C и почти на порядок при 70 °C с момента начала изотермического прогрева. Наблюдаются также значительный рост модуля упругости. Температура прогрева оказывает существенное влияние на интенсивность роста прочности, а также на значения предела текучести (рис. 6). Для иллюстрации на рис. 6 приведены температурные зависимости предела текучести, модуля упругости для 0, 3, 30 и 43 ч твердения. Хорошо видно, что с ростом температуры испытания интенсивность накопления предела текучести, модуля упругости возрастает. За сравнительно небольшой промежуток времени (не более 67 ч) цементный камень набирает значительную долю прочности твердеющего камня относительно 28 сут твердения при комнатной температуре. В работе были получены значения предела текучести, модуля упругости после 28 сут, которые соответствуют проектным характеристикам. Было установлено, что модуль упругости равен ~3630,6 МПа, предел текучести – 51,75 МПа. Очевидно, что после 67 ч твердения прочностные характеристики составляют не менее 75 % прочности от проектных значений. С повышением температуры испытания указанная доля достигается при существенно меньшем времени твердения.

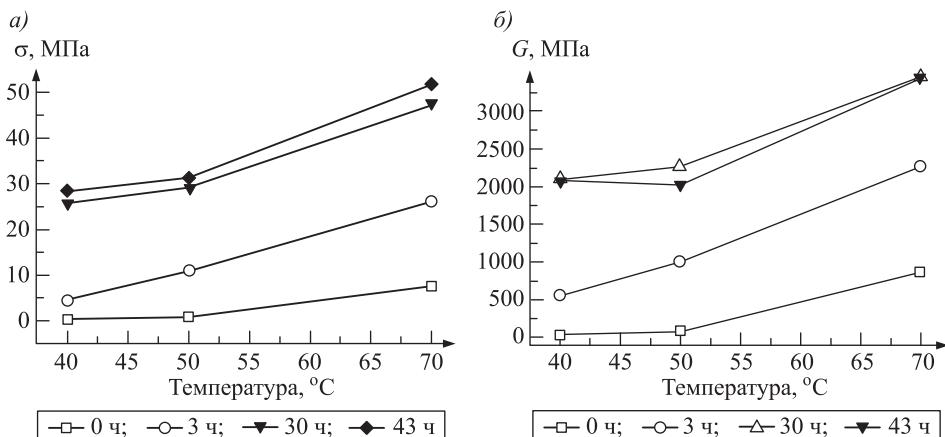


Рис. 6. Температурная зависимость предела текучести (a) и модуля упругости (б)

**Заключение.** Таким образом, исследование механических свойств портландцемента показало, что на кривых напряжение–деформация выделяются следующие стадии: переходная, упругая и пластическая области. Температура и время изотермического твердения оказывают существенное влияние на накопление прочности портландцемента в области пластической деформации. На кривых  $\sigma$ – $\epsilon$  в конце изотермического твердения предел прочности практически совпадает с пределом текучести, деформирование не является монотонным, наблюдается высокая плотность изломов и образцы разрушаются хрупко. Во временном интервале твердения  $\sim (0\dots 67)$  часов предел текучести возрастает практически на порядок, существенно увеличиваются упругие модули. Установлено, что с повышением температуры твердения указанные характеристики возрастают, наблюдается более интенсивное накопление прочности. Основной характеристикой оценки прочност-

ных свойств при разных температурах оказывается предел текучести. В исследуемом интервале времени твердения портландцемент достигает не менее 75 % прочностных проектных характеристик, соответствующих 28 сут твердения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1962. 96 с.
2. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.
3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 644 с.
4. Акимова Т.Н., Васильев Ю.Э. Цементный бетон: учеб. пособие. М.: МАДИ (ГТУ), 2007. 146 с.
5. Миронов С.А. Температурный фактор твердения бетонов. М.: Стройиздат, 1948. 46 с.
6. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Ассоциация строительных вузов, 2007. 528 с.
7. Невиль А.М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972. 343 с.
8. Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С., Евстиин Ю.Р., Салгудей М.М., Санцик М.А., Сербин В.П., Токарчук В.В., Удачkin И.Б., Чистяков В.В. Теория цемента. Киев : Будивельник, 1991. 166 с.
9. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустов гар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения // Инж.-строит. журн. 2013. № 3. С. 36–42.
10. Степанова В.Ф. Долговечность бетона: учеб. пособие для вузов. М.: Ассоциация строительных вузов, 2014. 126 с.

**Гныря Алексей Игнатьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: tsp\_tgasu@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Абзаев Юрий Афанасьевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: abzaev@tsuab.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Коробков Сергей Викторович**, канд. техн. наук, доц.;  
E-mail: korobkov\_1973@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Бояринцев Александр Павлович**, доц.; E-mail: plus2001@rambler.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Мокшин Дмитрий Ильич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: mokshin@sibmail.com

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Гаусс Ксения Сергеевна**, асп., ассист.; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 29.05.17

**Gnyrya Aleksey Ignat'evich**, DSc, Professor; E-mail: tsp\_tgasu@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Abzaev Yuriy Afanas'evich**, DSc, Professor; E-mail: abzaev@tsuab.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Korobkov Sergey Viktorovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: korobkov\_1973@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Boyarintsev Alexandr Pavlovich**, Ass. Professor; E-mail: plus2001@rambler.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Mokshin Dmitriy Il'ich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: mokshin@sibmail.com

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Gauss Kseniya Sergeevna**, Post-graduate Student, Assistant; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

## **INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HARDENING CEMENT STONE UNDER DIFFERENT ISOTHERMAL CONDITIONS**

In the article, a study of the accumulation of strength properties of cement stone depending on the time interval (0... 67) hours and different temperatures of isothermal curing: 40, 50, 70 °C, respectively. It was found that at the studied temperatures, the yield strength increases almost by an order. Increase significantly also elastic moduli. It is shown that with increasing time of hardening is significantly reduced, the plastic region and at the end of the studied interval (0... 67) at all temperatures the destruction of the samples is brittle. On of flow curve in the plastic region non-monotonic, there is a high density of fractures. The main characteristics of mechanical properties is yield strength.

**K e y w o r d s:** yield strength, ultimate strength, hardening, elastic deformation.

### **REFERENCES**

1. Berg O.Ya. Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona [Physical foundations of the theory of concrete and reinforced concrete strength]. Moscow, Gosstroyizdat, 1962. 96 p. (in Russian)
2. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. Vysokoprochnyy beton [High-strength concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1971. 208 p. (in Russian)
3. Akhverdov I.N. Osnovy fiziki betona [Basics of concrete physics]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 644 p. (in Russian)
4. Akimova T.N., Vasil'ev Yu.E. Tsementnyy beton: uchebnoe posobie [Cemented concrete]. Moscow, MADI (STU), 2007. 146 p. (in Russian)
5. Mironov S.A. Temperaturnyy faktor tverdeniya betonov [The temperature factor of hardening of concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1948. 46 p. (in Russian )
6. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Technology of concrete]. Moscow, Association of Construction Universities, 2007. 528 p. (in Russian)
7. Nevil' A.M. Svoystva betona [Properties of concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1972. 343 p. (in Russian)
8. Pashenko A.A., Myasnikova E.A., Gumenn V.S., Evsyutin Yu.R., Salgudey M.M., Sanitskiy M.A., Serbin V.P., Tokarchuk V.V., Udachkin I.B., Chistyakov V.V. Teoriya tsementa [Cement theory]. Kiev, Budivelnyk, 1991. 166 p. (in Russian)
9. Adamshevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. Ispol'zovanie kalorimetrii dlya prognozirovaniya rosta prochnosti tsementnykh sistem uskorenennogo tverdeniya [Use of a kalometriya for forecasting of growth of durability of cement systems of the accelerated curing]. Engineering and construction magazine. 2013. No. 3. Pp. 36–42. (in Russian)
10. Stepanova V.F. Dolgovechnost' betona: uchebnoe posobie dlya vuzov [Durability of concrete]. Moscow, Association of Construction Universities, 2014. 126 p. (in Russian)

УДК 691.42 : 666.31

А.Ю. СТОЛБОУШКИН, О.А. ФОМИНА, Д.В. АКСТ

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОМПРЕССИОННЫХ КРИВЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ\*

Показано, что метод полусухого прессования является перспективным для производства строительных керамических материалов из техногенного сырья и низкокачественных глин. Рассмотрены технологические факторы, влияющие на качество изделий, и выделены основные критерии, определяющие функциональную зависимость процесса прессования. Обозначены четыре стадии прессования керамических порошков, представляющих собой трехфазную систему. Приведены результаты использования метода по определению параметров прессования керамических изделий с применением установки для снятия компрессионных кривых. На примере умеренно-напластичного суглинка исследовано влияние влажности и давления прессования на осадку пресс-порошков и свойства изделий. Определены физико-механические свойства керамических образцов, отформованных при разном давлении, выбранном через небольшие равные промежутки. Выявлена зависимость их изменения от величины прикладываемого давления при различной формовочной влажности. Определены оптимальные значения параметров полусухого прессования керамического кирпича.

**Ключевые слова:** давление прессования, влажность пресс-порошка, низкокачественные глины и суглиники, компрессионные кривые, керамические строительные материалы.

**Актуальность исследования.** Керамические изделия строительного назначения обычно получают методом пластической экструзии. При этом необходимо использовать качественные пластичные глины. В XXI в. керамическое производство все чаще сталкивается с проблемой сокращения их запасов. В мировом масштабе на фоне ухудшения экологии актуальным является расширение сырьевой базы производства керамического кирпича за счет использования техногенных и низкокачественных природных месторождений [1–7]. В этом случае способ полусухого прессования изделий менее требователен к формовочным свойствам сырья и является перспективным [8–12].

Прессование керамического кирпича – одна из наиболее ответственных технологических операций и необходимо для получения высокоплотного спрессованного сырца с равномерной структурой, определяющей в конечном итоге прочность и морозостойкость изделий [13].

**Постановка проблемы.** Процесс прессования ( $K$ ) можно представить в виде функциональной зависимости ( $f$ ) с множеством переменных. В общем

---

\* Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта № 7.7285.2017/8.9 «Фундаментальные исследования в области строительных керамических композиционных материалов с матричной структурой на основе техногенного и природного сырья».

случае он зависит от вещественного состава и керамико-технологических свойств пресс-порошка ( $A$ ), его гранулометрического состава ( $G$ ), плотности ( $R$ ), влажности ( $W$ ), режимов прессования ( $L$ ), скорости сжатия ( $S$ ), способа приложения нагрузки ( $M$ ), источника создания прессующего усилия ( $T$ ), давления прессования ( $P$ ) и других факторов:

$$K = f(A, G, W, R, L, S, M, T, P). \quad (1)$$

Учесть одновременное влияние всех перечисленных факторов этого процесса достаточно сложно и, по мнению авторов, не является строго обязательным условием при определении параметров прессования изделий. Свойства сырья  $A, G, R$  будут оказывать влияние на всех этапах технологии, включая сушку и обжиг изделий. Влияние факторов  $L, S, M, T$  вполне однозначно и в принципе существенно не изменяет механизм действия всех переменных по отдельности или вместе взятых. Действительно, медленное многоступенчатое прессование мало чувствительных к сушке и спекающихся масс всегда улучшает качество прессовок и готовых изделий. Приняв это за аксиому, указанные факторы соответственно можно представить в виде повышающих или понижающих коэффициентов ( $a, g, r$ ) и ( $l, s, m, t$ ), определяемых экспериментально для конкретного вида керамического сырья, и выразить обобщающим критерием  $E$ .

Таким образом, процесс прессования будет представлен зависимостью

$$K = Ef(W, P),$$

где  $W$  – влажность пресс-порошка;

$P$  – давление прессования.

В зависимости от величины сжимающего усилия процесс прессования керамических порошков представлен четырьмя стадиями: механическое сближение частиц и удаление воздуха из системы; их пластическая необратимая деформация; стадия упругой деформации; хрупкое механическое разрушение [14]. Несмотря на разнообразие пресс-масс, они представляют собой трехфазную систему, состоящую из твердой минеральной части, жидкой фазы и воздуха. Для получения высокоплотного спрессованного полуфабриката прикладываемое давление должно обеспечивать полное устранение расположенных между частицами свободных промежутков за счет пластической деформации частиц [15, 16].

**Возможное решение проблемы.** Ранее проведенные исследования показали, что избежать недостаточную компрессию, как и перепрессовку керамических порошков, можно только при рациональном соотношении давления прессования и влажности пресс-массы. При повышении давления прессования с переходом в область давлений, где упругие деформации становятся преобладающими, возможно снижение прочности как полуфабриката, так и обожженных изделий, несмотря на то, что плотность продолжает несколько возрастать или стабилизируется.

С увеличением влажности возрастают интенсивность и величина осадки порошков при относительно низких давлениях прессования, однако избыточная влажность приводит к снижению плотности по сравнению с тем максимумом, который может быть достигнут при данном давлении. Кроме

того, избыток влажности приводит к появлению существенной воздушной усадки при сушке [17].

Очевидно, что для каждого вида керамического сырья существуют вполне определенные области значений влажности пресс-порошка ( $W$ ) и давления прессования ( $P$ ), при которых можно получить бездефектный сырец с плотной структурой, имеющий экстремальные значения механических свойств.

Определение оптимальных значений давления прессования в зависимости от влажности и вида сырья, обеспечивающих максимальные эксплуатационные характеристики керамики, очень трудоемко и требует изготовления в лабораторных условиях большого количества (часто достигающего десятков и сотен) керамических образцов.

Авторами была разработана методика определения процессов прессования керамических масс по компрессионным кривым [18] и по полученным результатам запатентован способ определения оптимальных параметров давления прессования и влажности пресс-порошка для получения керамических материалов [19].

**Цель и задачи исследования.** При разработке способа авторы исходили из того, что нецелесообразно прикладывать значительные прессовые усилия, приводящие к образованию трещин расслаивания в образце вследствие обратного последействия от упругих деформаций внутри трехфазной системы после снятия нагрузки. Использование прессовых давлений в области хрупкого разрушения частиц приводит к сильному уплотнению прессовки, повышению их средней плотности, что нежелательно для наружных стен, и повышенному износу заводского прессового оборудования. Таким образом, цель настоящей работы заключалась в определении оптимального давления прессования дисперсного материала с применением установки для снятия компрессионных кривых.

Основная задача сводилась к нахождению области прессового давления между второй и четвертой стадиями прессования. Оптимальные значения прессового усилия сугубо индивидуальны для каждого вида сырья и зависят, как уже отмечалось, прежде всего, от влажности порошка. При повышении влажности системы увеличивается площадь и толщина сольватных водных оболочек на поверхности глиняных частиц, обеспечивая более легкое их скольжение друг относительно друга при меньших значениях механической нагрузки на формовку. Вместе с тем излишнее переувлажнение также нежелательно, поскольку избыток влаги повышает открытую пористость, снижает после обжига прочность и морозостойкость изделий и приводит к возникновению технологических проблем при прессовании.

При проведении исследований в развитие способа проводилось определение физико-механических свойств керамических образцов, отформованных при разном давлении, выбранном через небольшие равные промежутки в интервале работы лабораторного гидравлического пресса.

**Объект исследования.** В качестве объекта исследования был выбран суглинок Новокузнецкого месторождения (Кемеровская обл.). Материал является типичным представителем пылеватого глинистого сырья, характерного для территории Западной Сибири и Дальнего Востока (Россия). Суглинок относится к умеренно-пластичному сырью с низким содержанием каменистых включений.

**Методика исследования.** При выполнении экспериментальной части работы использовалось лабораторное оборудование, включающее щековую дробилку, двухкатковые бегуны, стержневую мельницу, сушильный шкаф, турболопастной смеситель-гранулятор, гидравлический пресс и муфельную печь для обжига.

Приготовление керамических образцов проводилось по стандартной методике полусухого прессования. Глинистое сырье высушивалось в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянной массы. Высушенный материал подвергался грубому дроблению в лабораторной щековой дробилке до фракции – 10 мм и затем измельчался на бегунах в порошок до фракции – 1 мм. В высушенный измельченный суглинок добавлялась вода при температуре 20–22 °С из расчета формовочной влажности 6–12 %.

Для гомогенизации смеси увлажненный порошок перетирался через проволочное сито с размером ячейки 1,2 мм и далее для выравнивания влажности помещался в эксикатор, где выдерживался в течение 2–6 ч. Из полученного пресс-порошка на гидравлическом прессе формировались образцы-цилиндры диаметром 45 мм и высотой 40–50 мм. Сушка сырца проводилась ступенчато, по мягкому режиму при температуре 30–100 °С до остаточной влажности 1–2 %. Обжиг керамических образцов осуществлялся в течение 7 ч с часовой изотермической выдержкой при максимальной температуре 1000 °С.

При проведении исследований в соответствии с разработанной методикой были заданы три значения влажности пресс-порошка: 1 – 6–7 %; 2 – 9–10 %; 3 – 11–12 %. На запатентованной установке определена осадка порошка в форме и построены ее кривые в зависимости от влажности и прикладываемого давления (рис. 1).

Из полученных пресс-масс были отформованы три серии образцов. В процессе их изготовления в каждой серии последовательно менялось

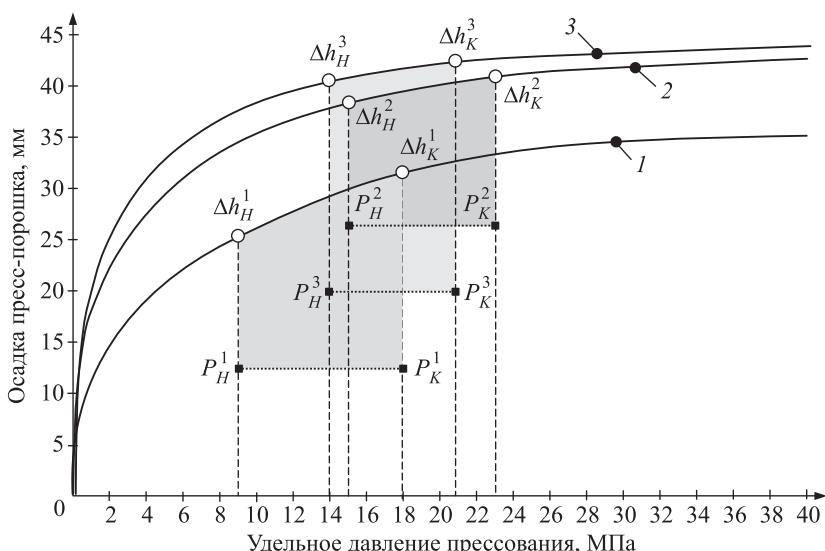
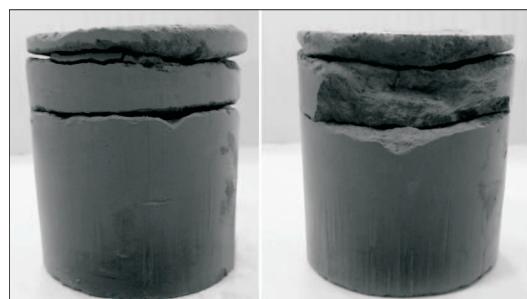


Рис. 1. Компрессионные кривые осадки керамических масс из суглинка с влажностью  
1 – 5,7 %; 2 – 9,6 %; 3 – 11,9 %

прессовое давление в интервале от 4 до 26 МПа с шагом 2 МПа. Для определения физико-механических свойств и снижения риска случайной ошибки эксперимента при выбранных параметрах прессовалось по пять образцов.

**Результаты исследования.** При изготовлении первой серии образцов влажностью 5,7 % наблюдалась неудовлетворительная формовка изделий, связанная с недостатком влаги в пресс-порошке: при прессовых давлениях

от 4 до 8 МПа происходило распыление образцов; при давлениях от 10 до 16 МПа образцы имели низкую сырцовую порочность, их приповерхностная зона со стороны матрицы выкрашивалась во время выпрессовки изделий; при давлениях более 18 МПа образовывались попечные трещины расслаивания, которые нарушили целостность формовки (рис. 2). Таким образом, провести сравнительный анализ физико-механических



*Рис. 2. Образцы-цилиндры полусухого прессования из суглинка с формовочной влажностью 5,7 %*

свойств и определение оптимального прессового давления для данной влажности не представлялось возможным.

При формировании образцов второй и третьей серий с влажностью соответственно 9,6 и 11,9 % проблем, отмеченных выше, не наблюдалось. Экспериментальные результаты имели схожий характер (см. таблицу).

#### **Физико-механические свойства керамических образцов из пресс-порошка**

№ п/п	Давление прессования, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент конструктивного качества
1	2	3	4	5	6
<i>Влажность 9,6 %</i>					
1	4	1500	28,5	6,3	4,2
2	6	1592	23,8	11,6	7,3
3	8	1650	20,7	20,0	12,1
4	10	1684	17,0	17,5	10,4
5	12	1749	16,6	28,1	16,0
6	14	1765	16,4	29,0	16,5
7	16	1728	16,0	29,1	16,3
8	18	1791	16,6	26,6	14,9
9	20	1791	16,8	30,5	17,0
10	22	1780	15,7	35,4	19,8
11	24	1811	16,7	25,0	14,0
12	26	1834	15,8	32,4	17,6

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6
Влажность 11,9 %					
1	4	1723	23,8	11,1	6,4
2	6	1777	20,6	12,5	7,1
3	8	1859	19,8	13,6	7,3
4	10	1902	17,3	25,3	13,3
5	12	1850	15,4	30,2	16,3
6	14	1943	15,1	38,9	20,0
7	16	1949	15,3	34,5	17,6
8	18	2031	13,7	31,1	15,6
9	20	2021	14,3	42,2	21,0
10	22	2053	10,9	46,2	23,1
11	24	2019	12,3	63,5	31,8
12	26	2049	11,8	77,6	38,8

Графическая интерпретация результатов оптимизации параметров прессования керамических образцов по значениям их физико-механических свойств представлена на рис. 3.

Анализируя изменение физико-механических свойств керамики из порошка влажностью 9,6 %, можно отметить, что в начальный период предел прочности при сжатии возрастает с ростом прессового давления и достигает экстремума при 16 МПа. В этом интервале происходит увеличение средней плотности и снижение водопоглощения образцов (рис. 3). Увеличение давления прессования в интервале 18–20 МПа приводит к ухудшению их физико-механических свойств, при этом наблюдается появление трещин расслаивания на поверхности образцов. Дальнейшее увеличение сжимающей нагрузки до 22 МПа приводит к росту прочности и падению водопоглощения керамического черепка.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при прессовом давлении 15–16 МПа заканчиваются пластические и начинаются упругие деформации зерен порошка, что соответствует переходу от второй к третьей стадии процесса прессования. На компрессионной кривой осадки керамических масс влажностью 9,6 % (см. рис. 1) в этой области прессового давления наблюдается «затухание» значительного приращения деформаций трехфазной системы в пресс-форме. Начиная с области давления 22–23 МПа, осадка компрессионной кривой резко замедляется, что соответствует точке касательной к этой кривой при переходе от третьей к четвертой стадии прессования. В соответствии с принятыми положениями оптимальное давление прессования для порошка данной влажности составляет 16 МПа.

Схожие зависимости изменения физико-механических свойств прослеживаются и для керамических образцов, отпрессованных из глиняного пресс-порошка влажностью 11,9 %. На рис. 1, 3 отмеченные выше

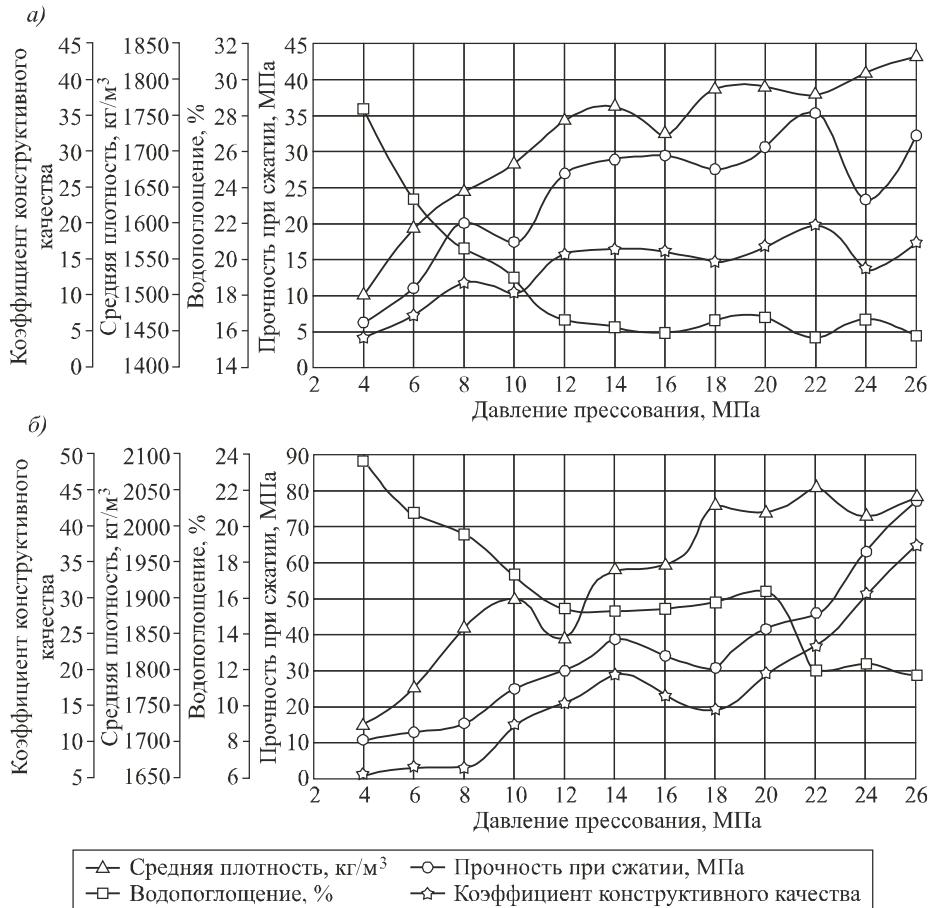


Рис. 3. Зависимость свойств керамических образцов из пресс-порошка влажностью 9,6 % (а) и 11,9 % (б) от давления прессования

процессы сдвигаются в область более низких давлений прессования. Если в первом случае экстремумы свойств наблюдаются при 15–16 МПа и 22–23 МПа, то во втором – соответственно при 14–15 МПа и 21–22 МПа. Незначительное смещение по прессовому давлению можно объяснить небольшой разницей в значениях формовочной влажности пресс-порошков (1–2 %).

**Обсуждение.** Использование метода определения параметров прессования керамических изделий с применением установки для снятия компрессионных кривых позволяет устанавливать значения прессового давления, при которых заканчиваются пластические и начинаются упругие деформации зерен глиняного порошка, и давления перехода от третьей к четвертой стадии прессования, характеризующейся разрушением их структуры.

Полученные зависимости осадки пресс-масс различной влажности от прикладываемого давления позволили значительно сократить количество экспериментальных исследований и установить оптимальные значения формования керамических изделий из шихты на основе умеренно-пластичных пылеватых суглинков. Давление прессования составляет 14–15 МПа при формовочной влажности 10–11 %.

**Заключение.** Практическое использование метода компрессионных кривых позволяет установить оптимальные значения прессования бездефектных изделий из различных керамических шихт с учетом индивидуальных особенностей слагающих их сырьевых материалов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайбулатов С.Ж. Ресурсосберегающая технология керамического кирпича на основе зол ТЭС. М.: Стройиздат, 1990. 248 с.
2. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З., Абдрахимов Д.В., Абдрахимова А.В. Глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд – сырье для производства керамических материалов // Огнеупоры и техн. керамика. 2005. № 5. С. 38–42.
3. Гурьев В.А., Прокофьева В.В. Строительная керамика на основе композиции техногенного серпентинитового сырья и низкосортных глин // Стройт. материалы. 2012. № 8. С. 20–21.
4. Stolboushkin A., Fomin A., Stolboushkina O. Formation of Ceramic Crock Structure Made of Technogenic Raw Materials with Vanadium Component // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. P. 250–256.
5. Котляр В.Д., Устинов А.В., Ковалев В.Ю., Терехина Ю.В., Котляр А.В. Керамические камни компрессионного формования на основе опок и отходов углеобогащения // Стройт. материалы. 2013. № 4. С. 44–48.
6. Столбушкин А.Ю., Карпачева А.А., Иванов А.И. Стеновые керамические изделия на основе отходов углеобогащения и железосодержащих добавок. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. 153 с.
7. Карасал Б.К., Котельников В.И., Сапелкина Т.В. Получение керамического стенового материала из вскрышных пород углеобогащения // Естеств. и техн. науки. 2015. № 80. С. 160–163.
8. Стороженко Г.И., Болдырев Г.В., Кузубов В.А. Механическая активация сырья как способ повышения эффективности метода полусухого прессования кирпича, керамических стеновых материалов // Стройт. материалы. 1997. № 8. С. 19–20.
9. Кондратенко В.А., Пешков В.Н., Следнев Д.В. Проблемы кирпичного производства и способы их решения // Стройт. материалы. 2002. № 3. С. 43–45.
10. Шлегель И.Ф. Проблемы полусухого прессования кирпича // Стройт. материалы. 2005. № 2. С. 18–19.
11. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Небежко Ю.И. Перспективы развития производства керамического кирпича полусухого прессования // Стройт. материалы. 2011. № 2. С. 6–7.
12. Ашмарин Г.Д., Ласточкин В.Г., Синянский В.И., Илюхин В.В., Курносов В.В. Сокращение цикла термической обработки в технологии керамического кирпича компрессионного формования // Стройт. материалы. 2013. № 4. С. 42–43.
13. Stolboushkin A., Fomina O., Fomin A. The investigation of the matrix structure of ceramic brick made from carbonaceous mudstone tailings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. P. 1–6.
14. Попильский Р.Я., Кондрашев Ф.В. Прессование керамических порошков. М.: Металлургия, 1968. 272 с.
15. Роговой М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1974. 315 с.

16. Stolboushkin A.Yu., Ivanov A.I., Fomina O.A., Fomin A.S., Storozhenko G.I. Principles of optimal structure formation of ceramic semi-dry pressed brick // Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering. 2016. P. 87–90.
17. Тарасевич В.П. Новые технологии производства керамического кирпича // Строит. материалы. 1992. № 5. С. 5–8.
18. Столбушкин А.Ю., Столбушкина О.А., Бердов Г.И. Оптимизация параметров прессования гранулированного техногенного и природного сырья для производства керамического кирпича // Строит. материалы. 2013. № 3. С. 76–78.
19. Пат. 2595879 РФ: МПК C1 G 01 N 33/38, G 01 N 3/08. Способ определения оптимальных параметров давления прессования и влажности пресс-порошка для получения стеновых керамических материалов / А.Ю. Столбушкин, А.С. Фомин, О.А. Фомина, Андреас Яр; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. индустр. ун-т. № 2015141394/15; заявл. 29.09.2015; опубл. 27.08.2016, Бюл. № 24. 7 с.

**Столбушкин Андрей Юрьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: stanyr@list.ru  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк  
**Фомина Оксана Андреевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: stoxan@gmail.com  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк  
**Акст Данил Викторович**, асп.; E-mail: daniel\_axt@mail.ru  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Получено 24.05.17

**Stolboushkin Andrey Yur'evich**, DSc, Professor; E-mail: stanyr@list.ru  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
**Fomina Oksana Andreevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: stoxan@gmail.com  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
**Akst Danil Viktorovich**, Post-graduate Student; E-mail: daniel\_axt@mail.ru  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

## **PRACTICAL USE OF THE COMPRESSION CURVES METHOD FOR PARAMETER DETERMINATION OF CERAMIC PRODUCTS COMPRESSION**

It is shown that the method of semidry pressing is one of the promising for the production of ceramic building materials based on technogenic raw materials and low-quality clays. The quality-relevant technological factors have been discussed and the basic criteria determining the functional dependence of the pressing process have been emphasized. Four stages of ceramic powders pressing have been found. The results of application of method on the determination of the pressing parameters of ceramic products using the mounting for curves readout have been shown. In the context of medium-moldable clay loam, the influence of moisture and compaction pressure on the sagging of press powders and properties of products has been investigated. Physical and mechanical properties of ceramic samples molded at different pressures selected by small regular intervals have been defined. It was found the dependence of its changes on the value of the applied pressure during the molding with different mixing moisture content. The optimal values of semidry pressing of a ceramic brick have been defined.

**К e y w o r d s:** compacting pressure, humidity of pressing powder, low-quality clays and loams, compression curves, ceramic building materials.

REFERENCES

1. S a y b u l a t o v S.J. Resursosberegayushchaya tekhnologiya keramicheskogo kirpicha na osnove zol TES [Resource-saving technology of ceramic bricks on the basis of ashes of TPP]. Moscow, Stroyizdat, 1990. 248 p. (in Russian)
2. A b d r a k h i m o v a E.S., A b d r a k h i m o v V.Z., A b d r a k h i m o v D.V., A b d r a k h i m o v a A.V. Glinistaya chast' «khvostov» gravitatsii tsirkon-il'menitovykh rud – syr'e dlya proizvodstva keramicheskikh materialov [Clay part of the «tails» of gravity zircon-ilmenite ores – raw materials for the production of ceramic materials]. Ogneuporu i tekhnicheskaya keramika [Refractories & technical ceramics]. 2005. No. 5. Pp. 38–42. (in Russian)
3. G u r ' e v a V.A., P r o k o f ' e v a V.V. Stroitel'naya keramika na osnove kompozitsii tekhnogenного serpentinitovogo syr'ya i nizkosortnykh glin [Building ceramics on the basis of a composition of man-made serpentinitic raw materials and low-grade clays]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2012. No. 8. Pp. 20–21. (in Russian)
4. S t o l b o u s h k i n A., F o m i n A., S t o l b o u s h k i n a O. Formation of Ceramic Crock Structure Made of Technogenic Raw Materials with Vanadium Component. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. Pp. 250–256.
5. K o t l y a r V.D., U s t i n o v A.V., K o v a l e v V.Yu., T e r e k h i n a Yu.V., K o t l y a r A.V. Keramicheskie kamni kompressionnogo formovaniya na osnove opok i otkhodov ugleobogashcheniya [Ceramic compression molding stones on the basis of flasks and coal-washing wastes]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2013. No. 4. Pp. 44–48. (in Russian)
6. S t o l b o u s h k i n A.Yu., K a r p a c h e v a A.A., I v a n o v A.I. Stenovye keramicheskie izdeliya na osnove otkhodov ugleobogashcheniya i zhelezosoderzhashchikh dobavok [Ceramic wall products based on coal wastes and iron-containing additives]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass, 2011. 153 p. (in Russian)
7. K a r a s a l B.K., K o t e l ' n i k o v V.I., S a p e l k i n a T.V. Polychenie keramicheskogo stenovogo materiala iz vskryshnykh porod ugleobogashcheniya [Obtaining ceramic wall material from overburden coal preparation]. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences]. 2015. No. 80. Pp. 160–163. (in Russian)
8. S t o r o z h e n k o G.I., B o l d y r e v G.V., K u z u b o v V.A. Mekhanicheskaya aktivatsiya syr'ya kak sposob povysheniya effektivnosti metoda polusukhogo pressovaniya kirpicha, keramicheskikh stenovykh materialov [Mechanical activation of raw materials as a way to improve the efficiency of the method of semi-dry pressing of bricks, ceramic wall materials]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 1997. No. 8. Pp. 19–20. (in Russian)
9. K o n d r a t e n k o V.A., P e s h k o v V.N., S l e d n e v D.V. Problemy kirpichnogo proizvodstva i sposoby ikh resheniya [Problems of brick production and ways to solve them]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2002. No. 3. Pp. 43–45. (in Russian)
10. S h l e g e l' I.F. Problemy polusukhogo pressovaniya kirpicha [Problems of semi-dry pressing of bricks]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2005. No. 2. Pp. 18–19. (in Russian)
11. K o t l y a r V.D., T e r e k h i n a Yu.V., N e b e z h k o Yu.I. Perspektivy razvitiya proizvodstva keramicheskogo kirpicha polusukhogo pressovaniya [Prospects for the development of the production of semi-dry ceramic bricks]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2011. No. 2. Pp. 6–7. (in Russian)
12. A s h m a r i n G.D., L a s t o c h k i n V.G., S i n y a n s k i y V.I., I l y u k h i n V.V., K u r n o s o v V.V. Sokrashchenie tsikla termicheskoy obrabotki v tekhnologii keramicheskogo kirpicha kompressionnogo formovaniya [Reduction of the cycle

- of heat treatment in the technology of ceramic bricks compression molding]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2013. No. 4. Pp. 42–43. (in Russian)
13. Stolboushkin A., Fomina O., Fomin A. The investigation of the matrix structure of ceramic brick made from carbonaceous mudstone tailings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. Pp. 1–6.
14. Popil'skiy R.Ya., Kondrashov F.V. Pressovanie keramicheskikh poroshkov [Pressing ceramic powders]. Moscow, Metallurgiya, 1968. 272 p. (in Russian)
15. Rogovoy M.I. Tekhnologiya iskusstvennykh poristykh zapolniteley i keramiki [Technology of artificial porous aggregates and ceramics]. Moscow, Stroyizdat, 1974. 315 p. (in Russian)
16. Stolboushkin A.Yu., Ivanov A.I., Fomina O.A., Fomin A.S., Storozhenko G.I. Principles of optimal structure formation of ceramic semi-dry pressed brick. Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering. 2016. Pp. 87–90.
17. Tarasevich V.P. Novye tekhnologii proizvodstva keramicheskogo kirkicha [New technologies for the production of ceramic bricks]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 1992. No. 5. Pp. 5–8. (in Russian)
18. Stolboushkin A.Yu., Stolboushkina O.A., Berdov G.I. Optimizatsiya parametrov pressovaniya granulirovannogo tekhnogenного i prirodnogo syr'ya dlya proizvodstva keramicheskogo kirkicha [Optimization of pressing parameters of granulated man-made and natural raw materials for the production of ceramic bricks]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2013. No. 3. Pp. 76–78. (in Russian)
19. Pat. 2595879 RF: IPC C1 G 01 N 33/38, G 01 N 3/08. Sposob opredeleniya optimal'nykh parametrov davleniya pressovaniya i vlazhnosti press-poroshka dlya polucheniya stenovyykh keramicheskikh materialov [A method for determining the optimum parameters of pressing pressure and humidity of a press powder for the production of wall ceramic materials]. A.Yu. Stolboushkin, A.S. Fomin, O.A. Fomina, Andreas Yar; claimer and patent holder Siberian State Industrial University. No. 2015141394/15; appl. 29.09.2015; publ. 27.08.2016, Bull. No. 24. 7 p. (in Russian)
-

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

УДК 697.922.26.001.24

А.М. ЗИГАНШИН, Л.Н. БАДЫКОВА

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРОФИЛИРОВАННОМ ВЕНТИЛЯЦИОННОМ ТРОЙНИКЕ НА СЛИЯНИЕ

В результате численного моделирования определены очертания вихревых зон, образующихся при срыве потока с внутренней кромки тройника на слияние. Приводятся зависимости координат характерных точек отрывной зоны от соотношения расходов в боковом ответвлении  $G_b$  и после слияния  $G_c$ . С использованием найденных очертаний построена модель энергоэффективного профилированного тройника; показано, что его сопротивление в три раза меньше, чем стандартного – «острого». В результате подробного исследования получена зависимость коэффициента местного сопротивления профилированного тройника от соотношения расходов  $G_b/G_c$  и очертаний профиля. Также определен «универсальный» профиль, использование которого приводит к минимальным потерям давления при любом соотношении расходов  $G_b/G_c$ .

**Ключевые слова:** вентиляционный тройник на слиянии, численные расчеты, коэффициенты местного сопротивления, профилированный энергоэффективный тройник, снижение сопротивления, универсальный профиль.

Работа является продолжением серии исследований возможности снижения энергоемкости систем воздуховодов путем профилирования острых кромок их фасонных деталей [1, 2]. Здесь приводятся результаты численного моделирования фасонной детали вентиляционной системы в виде равностороннего профилированного тройника на слияние. Ранее в [3] авторами была разработана и подробно исследована компьютерная модель острого тройника на слияние, получено хорошее согласие с известными данными. С использованием этой компьютерной модели исследуется возможность снижения сопротивления тройника путем профилирования его внутренней острой кромки. Ясно, что при ее скруглении сопротивление тройника уменьшится, но наибольший эффект достигается профилированием по очертаниям вихревой зоны (ВЗ), которая образуется при срыве потока с острой кромки. Однако при этом необходимо еще решить проблемы, связанные с определением очертаний ВЗ и трудоемкостью изготовления фасонных деталей со сложными криволинейными поверхностями. Решение первой проблемы возможно численными методами, с помощью универсальных про-

граммных комплексов вычислительной гидродинамики, использование которых сейчас достаточно развито в инженерной практике. Вторую проблему можно существенно упростить путем помещения внутрь стандартного острого тройника специальной профилирующей вставки, аналогичной приведенной в [4].

Имеется достаточно большое количество работ, посвященных исследованию течений в тройниках, как методами численного моделирования, так и с использованием различных экспериментальных методик. Например, в работах [5, 6] приводятся результаты численного моделирования течения в тройниках, в том числе определяются структура и причины образования вихрей, а также изучается вопрос теплообмена смешивающихся потоков. При этом данных об очертаниях вихревых зон нет. В работе [7] также численным методом определены поля скоростей и линии тока в тройнике на разделение; приводятся и отрывочные данные о вихревой зоне, возникающей у внутреннего угла тройника. Имеются экспериментальные работы, где методом *PIV* исследуется движение потоков в тройнике с визуализацией слоя смешения [8], или структуры вихрей, образующихся при срыве с острой кромки [9, 10], но также не приведены конкретные очертания ВЗ и их зависимость от размеров тройника.

При численном моделировании большое внимание уделяется верификации получаемых результатов. В работах [11–14] проведено сравнительное исследование результатов, получаемых численным моделированием и экспериментально. Показаны профили скоростей, а также картины течения для тройников на слияние, указаны сочетания моделей, которые наиболее хорошо воспроизводят основные кинематические характеристики такого течения.

На рис. 1 приведены результаты определения очертаний ВЗ для пяти значений отношения расходов  $G_b/G_c = 0,236; 0,394; 0,511; 0,711; 0,860$ , полученные с использованием компьютерной модели «острого» непрофилированного тройника, подробно верифицированной в [3]. Также на рис. 1

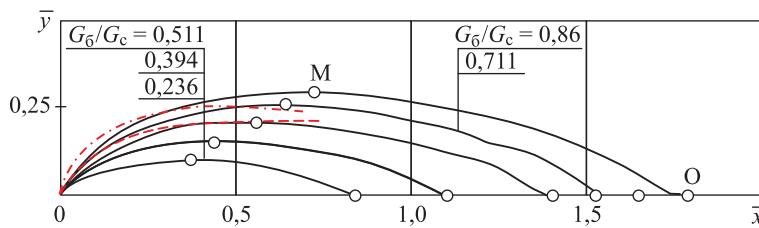


Рис. 1. Очертания вихревых зон в непрофилированном тройнике в зависимости от соотношения  $G_b/G_c$

показаны отрывные зоны для отношения  $G_b/G_c = 0,4$ , полученные в работе [12] экспериментально методом *PIV* (штрихпунктирная линия) и численным моделированием (штриховая линия). Видно достаточно хорошее согласование между результатами численного исследования и удовлетворительное – с экспериментом.

Наблюдается ожидаемое увеличение размеров ВЗ при увеличении расхода воздуха через боковое ответвление. Однако видно, что даже при большом расходе воздуха через боковое ответвление ( $G_b/G_c = 0,86$ ) вихревая зона

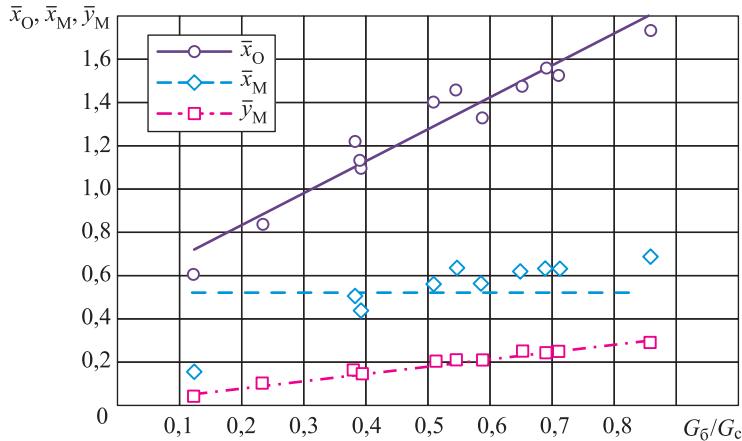


Рис. 2. Зависимость координат характерных точек ВЗ от отношения  $G_b/G_c$

по высоте занимает не более одной трети канала ( $0,288b$ ). Далее на рис. 2 показана зависимость координат характерных точек ВЗ от отношения  $G_b/G_c$ : точки М – максимального вылета ВЗ и точки О – замыкания ВЗ на стенку тройника (длины ВЗ).

Как видно из рис. 2, все зависимости достаточно хорошо аппроксимируются прямыми:

$$\bar{x}_O = 1,4794 \cdot G_b/G_c + 0,5325; \quad (1)$$

$$\bar{x}_M = 0,518; \quad (2)$$

$$\bar{y}_M = 0,3391 \cdot G_b/G_c + 0,02. \quad (3)$$

Далее для пяти указанных выше значений  $G_b/G_c$  были построены компьютерные модели энергоэффективных тройников, у которых внутренний острый угол профилировался по очертаниям найденных ВЗ. Геометрия расчетной области профилированного тройника для очертания, найденного при  $G_b/G_c = 0,511$  («профиль 0,511»), представлена на рис. 3. На выходной границе **CD** установлено граничное условие постоянной скорости  $u_x = 68$  м/с ( $Re = 4,5 \cdot 10^5$ ), а на входных границах **AB**, **FE** – условие постоянства полного избыточного давления, разные значения которого используются для моделирования течения в тройнике при разных соотношениях  $G_b/G_c$ . Ширина каналов  $b = 0,1$  м, длина канала на проходе до разветвления и в боковом

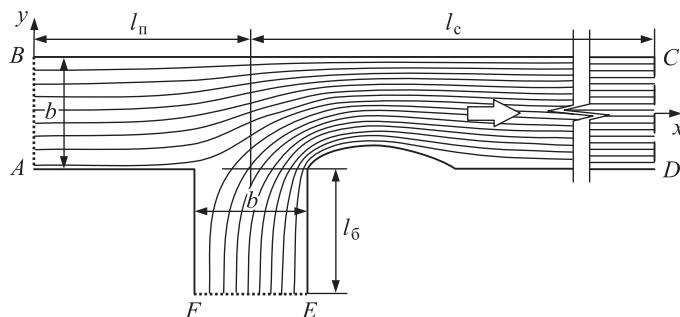


Рис. 3. Геометрия расчетной области профилированного тройника («профиль 0,511»)

ответвлении  $l_{\text{п}} = l_6 = 2$  м ( $20b$ ); длина канала после слияния потоков (ствол)  $l_c = 10$  м ( $100b$ ).

На первом этапе численного решения для каждой модели проводилось устранение «сеточной зависимости» – первоначальная «грубая» сетка (размер минимальной ячейки –  $3,3 \cdot 10^{-4}$  м, количество расчетных узлов – 15 730) измельчалась как во всей расчетной области, так и дополнительно вблизи твердых стенок. При моделировании течения вблизи твердых границ в вычислительном комплексе использовалось так называемое пристеночное моделирование. Для более грубого расчета могут использоваться «стандартные пристеночные функции» – *Standard Wall Functions (SWF)*, а более подробным считается «расширенное пристеночное моделирование» – *Enhanced Wall Treatments (EWT)*. Степень измельчения пристеночных ячеек характеризуется безразмерным расстоянием  $y^*$  для *SWF* и  $y^+$  для *EWT*. Согласно [15], при использовании модели *SWF* рекомендуется сетка с  $y^* \sim 30$ , а для *EWT* возможно получение корректных результатов и при более мелкой сетке, так что  $y^+$  может принимать значения  $\sim 1$ . С целью проверки влияния размеров ячеек расчетной сетки и использования разных способов пристеночного моделирования на получаемое численное решение для задачи «профиль 0,511» при  $G_6/G_c = 0,52$  была построена зависимость коэффициентов местного сопротивления (КМС) на проход  $\zeta_{\text{п}}$  и по боковому ответвлению  $\zeta_6$  (рис. 4). Значения КМС определялись по распределению полного давления, осредненного по поперечному сечению [3, 16].

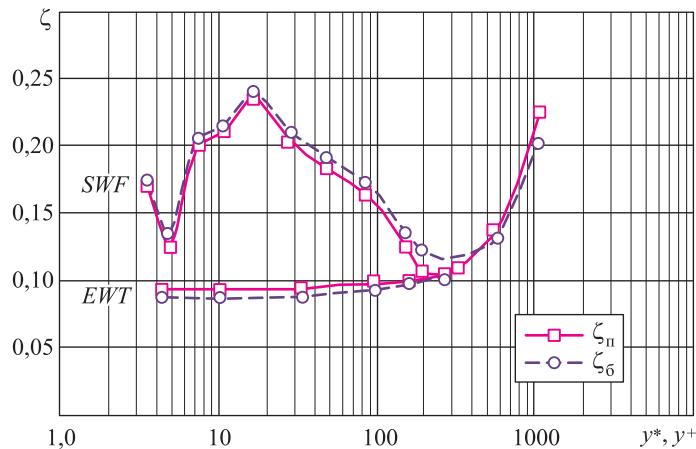


Рис. 4. Зависимость КМС от степени измельчения сетки ( $y^*$ ,  $y^+$ ) и вида пристеночных функций

Можно видеть, что для решаемой задачи при использовании *SWF* значения КМС существенно зависят от  $y^*$ , что означает зависимость решения от сетки. При использовании пристеночной модели *EWT* значения КМС перестают меняться уже при  $y^+ \sim 70$  и при дальнейшем измельчении ячеек сетки остаются практически неизменными, т. е. решение перестает зависеть от размеров ячеек расчетной сетки. Далее для численного исследования принята модель *EWT* и расчетная сетка с  $y^+ \sim 3$ , что для указанной задачи означало следующие параметры сетки: минимальный размер ячейки  $8,05 \cdot 10^{-8}$  м, количество расчетных узлов –  $46,9 \cdot 10^6$ .

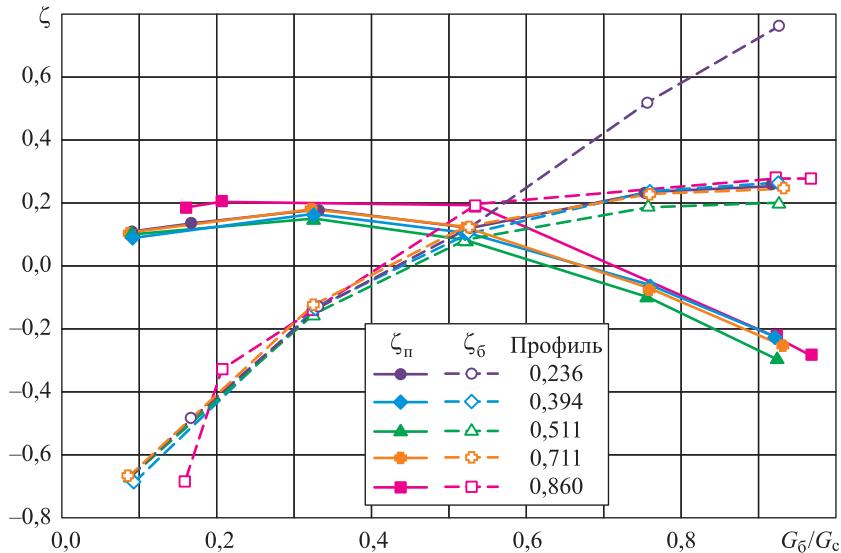


Рис. 5. Зависимость сопротивлений ( $\zeta_{\text{п}}$  и  $\zeta_{\text{б}}$ ) профилированного тройника от отношения расходов  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$ .

Далее для каждой модели тройника, спрофилированного по очертаниям ВЗ (см. рис. 1), определялось его сопротивление на проход в прямом направлении  $\zeta_{\text{п}}$  и по боковому ответвлению  $\zeta_{\text{б}}$ , при изменении  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$  в диапазоне от 0,1 до 0,9. Так как сопротивление тройника меняется при использовании разных профилей и при изменении  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$ , важным является определение «универсального профиля» – профилирования с наименьшими потерями давления на всем диапазоне изменения  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$ .

Использование такого «универсального» профиля весьма актуально для современных систем адаптивной вентиляции, характеризующихся постоянным изменением отношения расходов воздуха, проходящих по ветвям тройников. Подобное профилирование также имеет важное значение и для унификации фасонных деталей любых систем вентиляции как указанных выше адаптивных, так и классических с постоянным расходом воздуха.

На рис. 5 приведены результаты расчетов сопротивлений  $\zeta_{\text{п}}$  и  $\zeta_{\text{б}}$  для пяти компьютерных моделей энергоэффективных тройников («профилий 0,236; 0,394; 0,511; 0,711 и 0,860) со вставками во внутренних острых углах, спрофилированными по очертаниям найденных ВЗ при указанных выше значениях отношения  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$ .

Можно видеть, что на всем исследованном диапазоне изменения соотношения  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$  для всех профилей значения КМС очень близки между собой, но наименьшее сопротивление при течении как по боковому каналу, так и на проход наблюдается для «профиля 0,511».

**Выводы.** Определены очертания ВЗ и закономерности изменения координат характерных точек ВЗ от соотношения расходов. Для профилированного тройника найдена зависимость КМС на проход и на ответвление при пяти очертаниях профиля. Наиболее энергоэффективным «универсальным профилем», использование которого приводит к минимальному сопротивлению тройника при изменении отношения расходов  $G_{\text{б}}/G_{\text{c}}$  в диапазоне от

0,1 до 0,9, является «профиль 0,511». Коэффициенты местного сопротивления в таком тройнике при отношении расходов  $G_b/G_c = 0,52$  составляют  $\zeta_p = 0,11$  и  $\zeta_b = 0,12$ , что примерно в четыре раза меньше, чем в непрофилированном ( $\zeta_p = 0,54$  и  $\zeta_b = 0,45$  [17]).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зиганишин А.М. Снижение энергозатрат при движении потоков путем профилирования фасонных частей в коммуникациях энергоустановок // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 1. С. 63–68.
2. Зиганишин А.М., Беляева Е.Э., Соколов В.А. Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишей // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 1. С. 108–116.
3. Зиганишин А.М., Постохин В.Н., Бадыкова Л.Н., Гимадиева Г.А. Численное моделирование течения в двухмерном тройнике // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 5. С. 89–95.
4. Пат. 2604264 Рос. Федерация: МПК F16L 43/00, МПК F16L 25/14. Соединительный фасонный элемент с профилирующими вставками / А.М. Зиганишин, И.С. Алещенко, М.Г. Зиганишин и др.; заявитель и патентообладатель Казан. гос. арх.-строит. ун-т. № 2014137755/06; заявл. 17.09.14; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34. 13 с.
5. Timpere A. Conjugate heat transfer LES of thermal mixing in a T-junction // Nucl. Eng. Des. Elsevier B.V. 2014. Vol. 273. P. 483–496.
6. Sakowitz A., Mihalescu M., Fuchs L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by Large Eddy Simulations // Int. J. Heat Fluid Flow. Elsevier Inc. 2014. Vol. 45. No. 1. P. 135–146.
7. Beneš L. et al. Numerical simulations of flow through channels with T-junction // Appl. Math. Comput. 2013. Vol. 219. No. 13. P. 7225–7235.
8. Hirota M. et al. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction // Int. J. Heat Fluid Flow. Elsevier Inc. 2010. Vol. 31. No. 5. P. 776–784.
9. Hibara H. et al. Flows in T-Junction Piping System (1st Report, Flow Characteristics and Vortex Street Formed by Branch Pipe Flow) // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B. 2004. Vol. 70. No. 693. P. 1192–1200.
10. Muramatsu T. et al. Flows in T-Junction Piping System (2nd Report, Numerical Analysis of Vortex Street Formed by Branch Pipe Flow) // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B. 2004. Vol. 70. No. 698. P. 2551–2558.
11. Smith B.L., Mahaffy J.H., Angle K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction // Nucl. Eng. Des. Elsevier B.V. 2013. Vol. 264. P. 80–88.
12. Stigler J. et al. The Fluid Flow in the T-Junction. The Comparison of the Numerical Modeling and Piv Measurement // Procedia Eng. 2012. Vol. 39. P. 19–27.
13. Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T. Turbulent flow in a 90° pipe junction: P. 1: Decay of fluctuations upstream the flow bifurcation // Comput. Fluids. 2000. Vol. 29. No. 2. P. 197–213.
14. Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T. Turbulent flow in a 90° pipe junction. P. 2: Reverse flow at the branch exit // Comput. Fluids. 2000. Vol. 29. No. 2. P. 215–233.
15. Ansys Fluent 6.3 Documentation / 12.11.1 Near-Wall Mesh Guidelines. [Электронный ресурс]. URL:<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node518.htm#sec-guidelines-wf> (дата обращения: 15.06.2017).
16. Постохин В.Н., Зиганишин А.М., Мударисов Д.И. О протяженности зон влияния возмущающих элементов трубопроводных систем // Изв. КазГАСУ. 2014. № 2(28). С. 121–126.

17. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

**Зиганшин Арслан Маликович**, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: amziganshin@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Бадыкова Лейсан Наилевна**, магистр; E-mail: bagautdinovaleysun@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 25.05.17

**Ziganshin Arslan Malikovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: amziganshin@kgasu.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Badykova Leysan Nailevna**, MSc; E-mail: bagautdinovaleysun@gmail.com

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW IN PROFILED VENTILATION TEE AT JUNCTION**

Based on the results of numerical investigation outlines of vortex zones formed by separation of flow from inner edge of tee at junction determined. There are dependences of coordinates of characteristic points of separation zone on ratios of flows in side branch and after junction  $G_s/G_j$ . With using of founded outlines the model of profiled energy-efficient tee builds. It is shown, that its resistance three times smaller than resistance of prefabricated (usual) – «sharp» tee. As a result dependence of pressure loss coefficient of profiled tee on ratios  $G_s/G_j$  and outline of profile defined. Also «universal» profile determined – its using leads to minimal pressure losses with any ratios  $G_s/G_j$ .

**К e y w o r d s:** ventilation tee at junction, numerical calculations, pressure loss coefficients, profiled energy-efficient tee, reduction of resistance, universal profile.

## **REFERENCES**

1. Ziganshin A.M. Snizhenie energozatrat pri dvizhenii potokov putem profilirovaniya fasonnykh chastej v kommunikatsiyakh energoustanovok [Reducing the energy consumption of flows by profiling fittings in communications of power plants]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki [Reliability and safety of energy]. 2015. No. 1. Pp. 63–68. (in Russian)
2. Ziganshin A.M., Belyaeva E.E., Sokolov V.A. Snizhenie poter' davleniya pri profilirovaniyu ostrogo otvoda i otvoda s nishey [Pressure losses reduction with profiling of sharp elbow and elbow with dead-end]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 1. Pp. 108–116. (in Russian)
3. Ziganshin A.M., Posokhin V.N., Badykova L.N., Gimadieva G.A. Chislennoe modelirovaniye techeniya v dvukhmernom troynike [Numerical simulation of two-dimensional tee flow]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 5. Pp. 89–95. (in Russian)
4. Pat. 2604264 RF: IPC F 16L 43/00, IPC F16L 25/14. Soedinitel'nyy fasonnyy element s profilirovushchimi vstavkami [Shaped connecting element with profiling inserts]. A.M. Ziganshin, I.S. Aleshchenko, M.G. Ziganshin et. al.; applicant and patentee Kazan State University of Architecture and Engineering; No. 2014137755/06; appl. 17.09.14; publ. 10.12.16; Bull. No. 34. 13 p. (in Russian)
5. Timperi A. Conjugate heat transfer LES of thermal mixing in a T-junction. Nucl. Eng. Des. Elsevier B.V. 2014. Vol. 273. Pp. 483–496.

6. S a k o w i t z A., M i h a e s c u M., F u c h s L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by Large Eddy Simulations. *Int. J. Heat Fluid Flow*. Elsevier Inc. 2014. Vol. 45. No. 1. Pp. 135–146.
  7. B e n e š L. et al. Numerical simulations of flow through channels with T-junction. *Appl. Math. Comput.* 2013. Vol. 219. No. 13. Pp. 7225–7235.
  8. H i r o t a M. et al. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction. *Int. J. Heat Fluid Flow*. Elsevier Inc. 2010. Vol. 31. No. 5. Pp. 776–784.
  9. H i b a r a H. et al. Flows in T-Junction Piping System (1st Report, Flow Characteristics and Vortex Street Formed by Branch Pipe Flow). *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B*. 2004. Vol. 70. No. 693. Pp. 1192–1200.
  10. M u r a m a t s u T. et al. Flows in T-Junction Piping System (2nd Report, Numerical Analysis of Vortex Street Formed by Branch Pipe Flow). *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B*. 2004. Vol. 70. No. 698. Pp. 2551–2558.
  11. S m i t h B.L., M a h a f f y J.H., A n g e l e K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction. *Nucl. Eng. Des.* Elsevier B.V. 2013. Vol. 264. Pp. 80–88.
  12. Š t i g l e r J. et al. The Fluid Flow in the T-Junction. The Comparison of the Numerical Modeling and Piv Measurement. *Procedia Eng.* 2012. Vol. 39. Pp. 19–27.
  13. S i e r r a - E s p i n o s a F.Z., B a t e s C.J., O ' D o h e r t y T. Turbulent flow in a 90° pipe junction: P. 1: Decay of fluctuations upstream the flow bifurcation. *Comput. Fluids*. 2000. Vol. 29. No. 2. Pp. 197–213.
  14. S i e r r a - E s p i n o s a F.Z., B a t e s C.J., O ' D o h e r t y T. Turbulent flow in a 90°pipe junction. P. 2: Reverse flow at the branch exit. *Comput. Fluids*. 2000. Vol. 29. No. 2. Pp. 215–233.
  15. Ansys Fluent 6.3 Documentation / 12.11.1 Near-Wall Mesh Guidelines. URL: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node518.htm#sec-guidelines-wf> (date of access: 15.06.17)
  16. P o s o k h i n V.N., Z i g a n s h i n A.M., M u d a r i s o v D.I. O protyazhennosti zon vliyaniya vozmushchayushchikh elementov truboprovodnykh system [The influence zones of disturbing elements in pipeline systems]. *Izvestiya Kazanskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta* [News of Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2014. No. 2 (28). Pp. 121–126. (in Russian)
  17. I d e l ' c h i k I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance]. Ed. M.O. Shteynberg. 3rd revised and enlarged ed. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 672 p. (in Russian)
-

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

УДК 627.514.21.3 : 627.6

**[В.А. ШЛЫЧКОВ], В.В. ДЕГТЯРЕВ**

### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШУГОЗАЩИТНЫХ ДАМБ У РЕЧНЫХ ВОДОЗАБОРОВ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПЛАНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ\*

Рассматриваются вопросы, связанные с процессом образования шуги, что приводит к осложнению работы речных водозаборов. В случаях значительной густоты шугохода подача воды в аванкамеру блокируется и для механической очистки решеток приемных окон иногда приходится прибегать к водолазным работам, а порой останавливать насосы. Одним из способов предотвращения вероятной закупорки водоприемников при шугоходе является механический отвод водных масс с высоким содержанием внутриводного льда от оголовков путем возведения шугозащитной дамбы. При этом возникает проблема определения оптимальной формы и размеров сооружения. Эта и сопутствующие ей гидродинамическая и ледотермическая задачи решаются с помощью аппарата математического моделирования применительно к открытым потокам сложной плановой и высотной конфигурации.

**Ключевые слова:** речной водозабор, шуга, шугозащитная дамба, численные модели.

**Постановка задачи.** В период осеннего понижения температуры речной воды происходит образование шуги – внутриводного льда, под которым здесь понимается множество взвешенных и движущихся в потоке одиночных и агрегированных ледяных кристаллов. При высокой концентрации шувового материала он забивает решетки оголовка и ограничивает поступление воды в аванкамеру водозабора. Возникает опасность снижения производительности водозабора, а в случаях особенно значительной густоты шугохода – полного блокирования подачи воды и остановки насосов.

Шугообразование может наблюдаться систематически в осенне-зимний период, но не всегда это явление сопровождается критическими ситуациями на водозаборе. Последнее связано с тем, что в процессе образования льда важную роль имеет вертикальное перемешивание водных масс. При малых скоростях течения перемешивание практически отсутствует и переохлаждение воды, необходимое для образования льда, наблюдается только в поверхностном слое, где и происходит активный рост и смерзание кристаллов.

При больших осенних расходах скорости течения велики, активное турбулентное перемешивание обусловливает переохлаждение всей массы воды, и образование льда идет во всей толще потока [1]. Внутриводный лед, захватывающий всю глубину до дна, отжимается потоком к решеткам и, прилипая

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 05-05-98012.

к ним, образует плохопроницаемое для воды препятствие, нарушая нормальную работу оголовка.

Одним из способов предотвращения вероятного засорения водоприемников при шугоходе является механический отвод водных масс с высоким содержанием внутриводного льда от оголовка путем возведения защитной дамбы. При этом возникает проблема определения оптимальной плановой формы размеров защиты, обеспечивающей надежный отвод шуги от оголовка и не создающей возвратного течения, которое может подсасывать к окнам водоприемника ледянную суспензию с нижней зоны шугоносного потока. Одновременно следует также оценивать параметры отжимного течения, которое формируется под влиянием защитного сооружения.

Решение этих проблем может быть осуществлено с применением аппарата математического моделирования течений как эффективного инструмента воспроизведения скоростного и уровенного режимов, переноса субстанции в открытых водотоках сложной конфигурации.

**Математическая модель плановых течений.** Для расчета гидравлических параметров потока использовалась двумерная модель плановых течений [2]. В горизонтальной плоскости вводится декартовая система координат с осями  $x$ ,  $y$  так, чтобы осредненная плановая ориентация русла совпадала с направлением оси  $x$ . Поверхность руслового ложа задается уравнением вида  $z = \delta(x, y)$ , функцией, описывающей рельеф дна.

Уравнения плановых течений записывают в виде [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h u}{\partial x} + \frac{\partial h v}{\partial y} &= -g h \frac{\partial(h + \delta)}{\partial x} - \frac{g}{C_s^2} |\mathbf{u}| u, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h u}{\partial x} + \frac{\partial h v}{\partial y} &= -g h \frac{\partial(h + \delta)}{\partial y} - \frac{g}{C_s^2} |\mathbf{u}| v, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} &= -s_n q_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t$  – время;

$h$  – глубина потока;

$u$ ,  $v$  – компоненты скорости;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\mathbf{u} = (u, v)$ ,  $|\mathbf{u}| = \sqrt{u^2 + v^2}$  – модуль скорости течения;

$C_s$  – коэффициент Шези, определяемый с помощью формулы Маннинга;

$q_n$  – расход водозабора;

$s_n$  – пространственное распределение водоприемников в русле, причем  $\iint s_n dx dy = 1$ .

Краевые условия формируются следующим образом. На входном створе  $x = x_1$  считается известным удельный расход  $q_1$  воды

$$uh = q_1 \quad \text{при} \quad x = x_1. \quad (2)$$

Распределение удельного расхода  $q_1$  поперек русла формируется в предположении равновесного значения скоростей. Эти значения рассчитывались из уравнений импульса в системе (1), в которых пренебрегается инерционны-

ми слагаемыми, так что потери напора, обусловленные силами сопротивления, балансируются средним уклоном.

В поперечнике выходного створа  $x = x_2$  задается известный уровень свободной поверхности в виде распределения глубин

$$h = h_2 \quad \text{при} \quad x = x_2. \quad (3)$$

Постановку задачи замыкают начальные условия на компоненты скорости  $u$ ,  $v$  и пространственное распределение глубин  $h$  в момент  $t = 0$ . Расчет проводится с заданными полями глубин и скоростей, сформированных по краевым условиям (2), (3) при  $v = 0$ .

Методы решения задачи основаны на дискретизации исходных систем в сеточной области. Используются прямоугольные сетки с узлами, разнесеными по граням элементарного пространственного бокса. «Расщатанные» сетки позволяют строить консервативные разностные схемы, а применяемые неявные методы обеспечивают устойчивость метода при долгопериодном интегрировании и получении стационарных режимов.

Пространственная аппроксимация дифференциальных операторов основана на современных представлениях о монотонных схемах и схемах с невозрастанием полной вариации (Total Variation Diminishing, TVD). TVD-свойство гарантирует, в частности, неотрицательность численных полей, таких как толщина слоя воды или концентрация примеси. Базовый алгоритм расчета адвекции основан на обобщении схемы Ошера – Чакраварти на неявный способ аппроксимации согласно подходу Хартена [4]. Применяемые конечно-разностные схемы имеют 2-й порядок точности [5].

**Модель переноса шуги в русле.** Прежде чем формулировать математическую постановку задачи описания шугохода, следует остановиться на физической сути явления. С понижением температуры до  $0^{\circ}\text{C}$  и переохлаждением водных масс в потоке появляются отдельные кристаллы внутриводного льда. Число их быстро возрастает. Участвуя в турбулентном движении, отдельные частицы сталкиваются друг с другом и коагулируют в агрегаты большего размера. Крупные комья шуги уже не могут удерживаться турбулентными пульсациями в потоке и всплывают на поверхность. Образование шуги связано с интенсивным вертикальным перемешиванием, в результате которого переохлажденная вода вовлекается вглубь потока, где и происходит выделение льда.

Как уже было сказано, при малых скоростях течения вертикальное перемешивание невелико и переохлаждаются только поверхностные слои воды, где образуются шуговые венки и ковры [1]. Таким образом, характер процессов ледообразования определяется соотношением механизмов вертикального перемешивания воды и всплыивания внутриводного льда. Когда перемешанная ледяная супензия попадает в область медленных течений, создаваемых, например, защитным сооружением, силы,держивающие внутриводный лед во взвешенном состоянии, ослабевают, внутриводный лед начинает всплывать и основная толща воды очищается от шугового материала. Это обстоятельство может быть использовано при оценке параметров ковша, обеспечивающего понижение скоростей вблизи оголовка и очищения воды от льда. Интенсивность этих процессов зависит от гидравлической

крупности льда, интенсивности турбулентного перемешивания, пройденного расстояния и концентрации кристаллов.

Вводятся следующие обозначения:  $c$  – средняя по вертикали объемная концентрация шуги (отношение объема взвешенных кристаллов к общему объему смеси);  $c_i$  – частная концентрация отдельной фракции. При этом считается  $c = \sum_i c_i$ . Для описания перераспределения шугового материала по руслу применяется уравнение переноса и диффузии для примеси с плотностью, меньшей плотности воды. Шуга стилизуется в виде полидисперсной непрерывно распределенной субстанции. Уравнения переноса взвешенных фракций льда в речной воде формулируются в рамках плановой модели, описывающей динамику двумерного потока:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hv c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} hE_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hE_y \frac{\partial c}{\partial y} - w_g c - s_n q_n c + F_p, \quad (4)$$

где  $s_n q_n c$  – интенсивность поглощения примеси за счет забора воды в оголовке;

$w_g$  – гидравлическая крупность шуги;

$E_x, E_y$  – коэффициенты дисперсий;

$F_p$  – скорость генерации кристаллов внутриводного льда в единице объема за счет переохлаждения воды.

Величина  $F_p$  зависит от интенсивности теплоотдачи с поверхности воды, скорости ветра и температуры воздуха, притоков тепла от грунта, глубины потока, турбулентного перемешивания, скорости взаимного сближения и микрофизических процессов коагуляции и других факторов. Учесть все эти факторы в явном виде не представляется возможным хотя бы по причине, как правило, отсутствия данных натурных измерений и невозможности калибровки модели. В контексте рассматриваемой проблемы существенна зависимость  $F_p$  от интенсивности вертикального турбулентного обмена, которую, следя работе [6], можно задать в виде

$$F_p = u_* P(x, y, t), \quad (5)$$

где  $u_*$  – скорость трения, а безразмерная функция  $P(x, y, t)$  интегрально учитывает влияние перечисленных выше факторов. Вид этой функции априори неизвестен, и в данном подходе ее определение основано на гипотезе стационарности поля концентрации в пределах расчетной области. Считается, что на небольших характерных временах (часы) и расстояниях (метры) концентрация ледяных кристаллов в воде практически не меняется и система находится в состоянии динамического равновесия, т.е. количество всплывшего внутриводного льда компенсируется массой вновь образовавшихся кристаллов. Следствие этого предположения – соотношение

$$w_g c \approx u_* P(x, y), \quad (6)$$

которое служит основой для определения функции  $P(x, y)$  по заданному полю концентрации. Функции  $P_i(x, y)$  рассчитываются индивидуально для каждой фракции  $i$  и отражают влияние метеорологических, микрофизических и морфологических факторов, обеспечивая настройку модели к конкретным натуральным условиям. Следовательно, при фиксированной структуре функций  $P_i$  сценарные расчеты позволят оценить влияние поля скоростей за счет измене-

ния  $u_*$ , в рамках разных вариантов конструкции защитного сооружения, на характер перераспределения шугового материала в различных гидравлических условиях.

Для описания механизма гравитационной коагуляции необходимо задать скорость всплывания шуговых частиц. Величина  $w_g$  существенно зависит от диаметра частиц. Согласно обзору [1] для кристаллов шарообразной формы выражение для гидравлической крупности имеет вид

$$w_g = 1,96 \times 10^6 v d_s^{0,69}, \quad (7)$$

где  $v$  – кинематический коэффициент вязкости воды при 0 °C в м<sup>2</sup>/с;  $d_s$  – диаметр кристалла, м.

Систематические исследования по вопросу распределения размеров ледяных кристаллов по фракциям в литературе отсутствуют, поэтому следует опираться на описание дисперсного состава на качественном уровне, воспользовавшись результатами работы [7], верифицированными данными измерений. Построенную в виде графика в упомянутой работе [7] теоретическую зависимость счетной концентрации кристаллов как функцию глубины и размера ледяных частиц на высоте 1,8 м от дна можно аппроксимировать параболой вида

$$\lg f_c = 0,0165 r_s^2 - 0,725 r_s + p_c, \quad (8)$$

где  $f_c$  – функция распределения (1/м<sup>3</sup>);

$r_s = d_s/2$  – радиус частицы (м);

$p_c$  – плотность шуги. Графически зависимость (8) представлена на рис. 1 кривой 1. Для коэффициента захвата  $\varphi = 0,1$  значение  $p_c$  принято равным 7,4. Связь счетной и объемной концентрации (в предположении шарообразности частиц) выражается формулой

$$c = \frac{4}{3} \pi r_s^3 f_c(r_s). \quad (9)$$

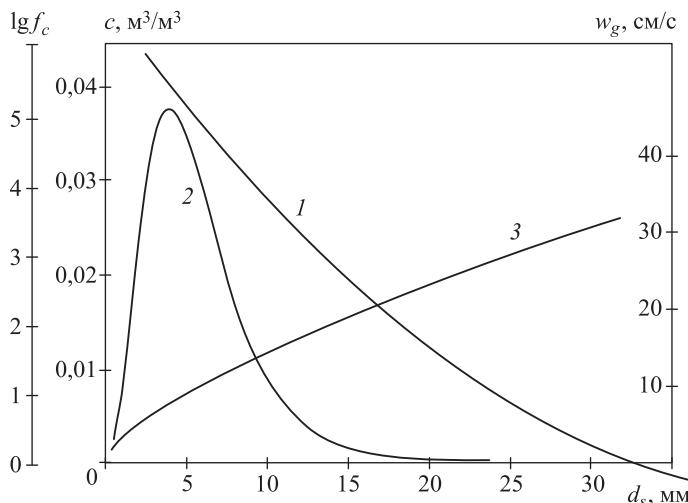


Рис. 1. Распределение параметров шугового материала в зависимости от диаметра ледяных частиц

1 – логарифм счетной концентрации; 2 – объемная концентрация;  
3 – гидравлическая крупность фракций (шкала справа)

Анализ фракционного распределения объемной концентрации  $c(r_s)$  (рис. 1, кривая 2) показывает, что максимальное содержание внутриводного льда приходится на диаметр кристаллов  $d_s = 5$  мм. Это близко к данным наблюдений [8], согласно которым характерное значение размеров шуговых частиц составляет 2–8 мм.

В качестве начальных условий задается постоянное значение плотности шуги, равномерно распределенной по акватории водотока. В работе рассматривалась полидисперсная смесь, состоящая из 6 фракций ледяных кристаллов размером 2, 3, 5, 7, 10, 15 мм с парциальными концентрациями, рассчитанными по формуле (8). Размеры фракций выбраны из соображений оптимального описания спектрального пика, представленного на рис. 1. Числовые значения параметров приведены в таблице.

**Параметры компонентов водно-ледяной смеси**

$d_s$ , мм	2	3	5	7	10	15
$c_i$	0,0020	0,031	0,0321	0,0208	0,0080	0,00013
$w_g$ , м/с	0,048	0,044	0,091	0,11	0,14	0,19

Суммарная плотность шуги в данной спектральной реализации, вычисленная по формуле  $c = \sum_i c_i$ , составляет 0,114, т.е. в 1 м<sup>3</sup> водно-ледяной суспензии содержится 0,114 м<sup>3</sup> льда.

**Подготовка исходной информации и параметры модели.** При задании исходных данных для получения цифровой модели рельефа, представляющей прямоугольную матрицу высот в каждой точке сеточной области, необходимо использовать материалы русской съемки.

Локальная система координат в горизонтальной плоскости вводится таким образом, чтобы ось  $x$  была ориентирована вдоль русла, а ось  $y$  – вдоль поперечника входного створа. Ориентация координаты  $y$  по нормали к динамической оси потока необходима для корректного задания вектора граничных расходов с отсутствием касательного (косого) компонента на границе. Принятое пространственное разрешение при численном решении задачи составляет  $\Delta x = 2,5$  м вдоль оси  $x$  и  $\Delta y = 2$  м по  $y$ , что соответствует сеточной структуре, содержащей более 33 тыс. элементарных боксов в расчетной области.

Интенсивность отвода воды насосами из аванкамеры составляет  $q_n = 2,2$  м<sup>3</sup>/с. В соответствии с конструкцией оголовка функция  $s_n$  задается в виде равномерно распределенных значений в сеточных узлах, попадающих на 12-метровую нитку водоприемных труб и ориентированных вдоль потока.

**Результаты расчетов.** Расчеты проводились по следующей схеме. На первом этапе путем интегрирования уравнений (1) до момента установления определяются искомые поля скоростей и уровней в бытовом режиме. На основе принятых предположений о постоянстве расхода внутриводного льда и с учетом пространственного распределения динамической скорости из (6) рассчитываются функции  $P_i(x, y)$ , которые являются основным результатом этапа 1 и далее считаются известными.

Второй этап решения заключается в изучении влияния шугоотводящего сооружения. Расчетными методами определяются новые гидравлические параметры потока, обусловленные влиянием сооружения, которые служат базой для интегрирования уравнения переноса шуги (4) с подготовленными функциями  $P_i$ . Результирующие поля концентрации используются для сопоставительного анализа эффективности различных вариантов плановой конфигурации защитного сооружения.

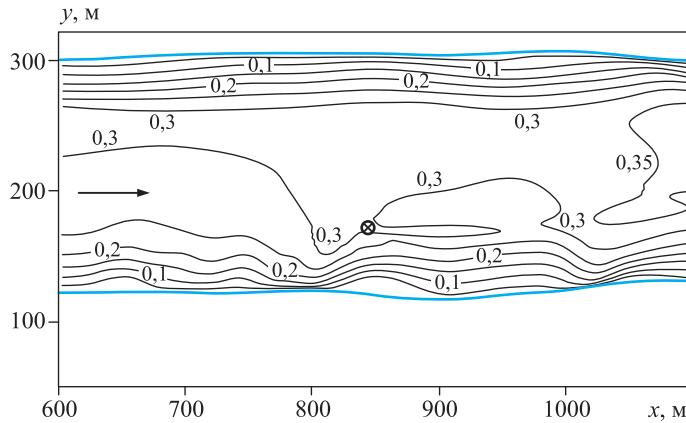


Рис. 2. Изотахи ( $м/с$ ) продольной скорости в бытовых условиях. Символом  $\otimes$  обозначено местоположение оголовка

Рис. 2 дает представление о плановой структуре поля продольной скорости в бытовых условиях (здесь и далее изотахи построены с шагом  $0,05$  м/с). Направление течения показано стрелкой. Положение оголовка отмечено символом  $\otimes$  вблизи правого берега в центре области. Среднее значение  $u$  не превышает  $0,35$  м/с.

В качестве основного варианта струеотводящего сооружения рассматривалась сплошная конструкция, берущая начало на правом берегу и охватывающая оголовок со стороны натекающего потока по периметру на расстоянии  $20$  м от водоприемников. Дамба схематизирована в виде 2-звенной ломаной линии, причем длина внешнего борта (со стороны реки)  $l_d$  варьировалась в пределах  $30$ – $150$  м. Высота насыпи над меженным уровнем свободной поверхности задавалась равной  $1,6$  м.

Рис. 3 иллюстрирует влияние дамбы на поле  $u$  при  $l_d = 30$  м. Сопоставительный анализ (см. рис. 2, 3) указывает на эффект торможения потока перед фронтальным сегментом дамбы с отжимом течения к левому берегу. Максимум скорости, равный  $0,5$  м/с, расположен вблизи углового сочленения элементов дамбы, причем увеличение скорости за счет стеснения потока составляет в среднем в районе дамбы  $0,14$  м/с, а в максимуме  $0,2$  м/с. При обтекании выступа дамбы развиваются заметные амплитуды поперечной скорости с экстремальными значениями до  $0,25$  м/с, так что максимум модуля скорости  $|u|$  как векторной величины фактически составляет  $0,52$  м/с.

В тыловой части дамбы образуется зона гидродинамической тени, где скорости течения падают до нуля — здесь начинает сказываться эффект подсоса массы за счет собственного расхода оголовка водозабора. Появляются наведенные отрицательные скорости с характерным значением  $u = -0,1$  м/с

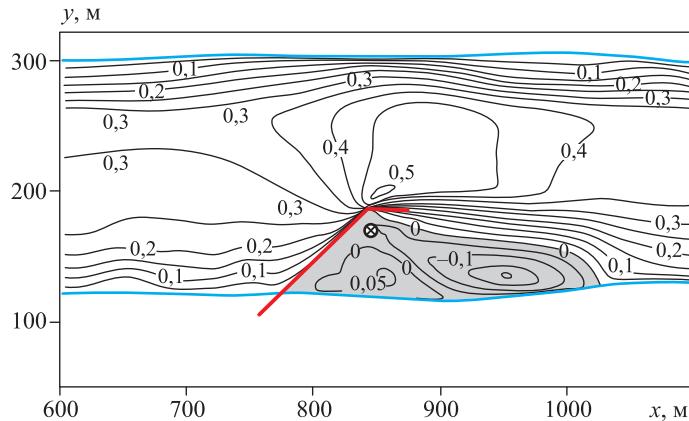


Рис. 3. Изотахи ( $\text{м}/\text{с}$ ) продольной скорости при возведении шугозащиты с  $l_d = 30 \text{ м}$

(экстремальные значения  $u$  составляют  $-0,2 \text{ м}/\text{с}$ ), направленные против вектора основного потока к водоприемным отверстиям. Область  $u < 0$  обозначена на рис. 3 контрастной заливкой.

Увеличение внешнего борта дамбы до 100 м и более обуславливает спокойный характер течения вблизи оголовка. Этот вывод является важным при разработке инженерных решений, так как малые скорости течения в ковше обуславливают увеличение времени нахождения шугового материала в спокойной воде. Это обстоятельство наряду с ослаблением турбулентного перемешивания способствует всплытию основной массы шуги на поверхность, очищению внутриводного пространства при подходе потока к оголовку и формированию ледового покрова в ковше.

В качестве альтернативного варианта конструкции ковша предусматривалось сооружение подковообразного экрана перед оголовком, не примыкающего к берегу и открытого снизу по течению. Анализ структуры течения показывает, что данный вариант менее эффективен, чем рассмотренные выше. Это связано с тем, что возвратное течение в окрестности оголовка достигает в 2–2,5 раза больших значений и может привести к быстрому транспорту шуги к водоприемникам. В области боковых частей ограждения также развиваются большие амплитуды скорости (у внешнего борта 0,66 м/с против 0,51 м/с на рис. 3), что связано с риском размыва левого берега. Часть потока перенаправляется к правобережному урезу воды, где за счет сужения русла формируется локальное усиление скорости до 0,32 м/с. В силу этих причин подковообразный вариант является гидродинамически невыгодным, а следовательно, практически неприемлемым.

Рассматривая результаты расчета шугохода в случае возведения дамбы, можно отметить следующее: защитное сооружение формирует новую гидравлическую структуру потока, что приводит к перераспределению концентрации льда. Расчеты проводились для всех рассмотренных размеров борта дамбы  $l_d$ . На рис. 4 представлено поле концентрации внутриводного льда с минимальным  $l_d = 30 \text{ м}$ . На входном створе концентрация близка к исходному равновесному значению  $c = 0,114$ , ниже по течению поле с плотностью шуги с деформируется вследствие динамической неоднородности, создаваемой дамбой. В основном русле в районе дамбы и ниже концентрация возрас-

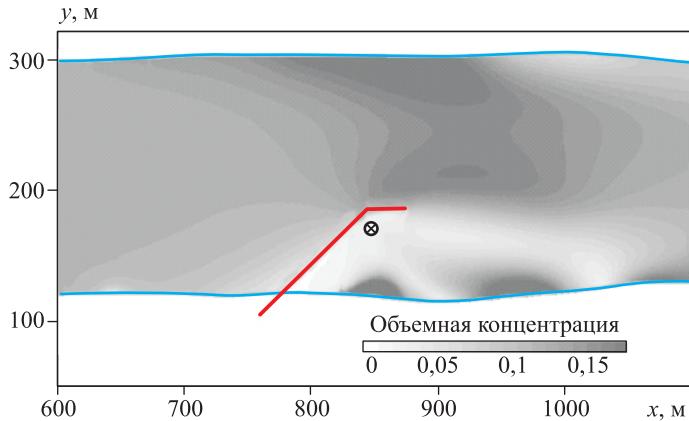


Рис. 4. Поле объемной концентрации внутриводного льда при возведении шугозащиты с  $l_d = 30$  м

тает до величины 0,18. Это, очевидно, происходит в результате отвода массы льда от берега за счет поперечного сегмента защиты. На внутреннем пространстве дамбы вблизи водоприемных устройств концентрация уменьшилась более чем в 5 раз по сравнению с равновесной и стала 0,02. Следовательно, предложенная конструкция оправдывает свое функциональное предназначение как средство ослабления динамических процессов в водотоке и отвода шуги.

Дисперсный анализ показывает, что ослабление концентрации наиболее заметно в «несущих» фракциях с  $d_s = 3\text{--}7$  мм, которые и определяют 5-кратное уменьшение  $c$ . Локальные повышения концентрации до значений  $c = 0,16$  наблюдаются в береговой зоне на акватории ковша (рис. 4). Это связано с известным феноменом аккумуляции пассивной субстанции любой природы в застойных зонах с малыми скоростями обмена, обычно располагающимися на мелководье. Механизм аккумуляции в данном случае доминирует над механизмом очищения воды за счет всплыивания льда, что и приводит к формированию береговых максимумов. Однако вследствие малых глубин у берегов суммарное содержание шуги в слое воды невелико и не оказывает серьезного влияния на ее содержание непосредственно у оголовка. Накопление всплывающего шугового материала на поверхности может привести к образованию ледяной корки. Ледяной покров с большой вероятностью сформируется и в тыловой части ковша от оголовка до окончности борта, а на берегах и ниже зоны влияния дамбы.

**Выводы.** Задача поставлена на основе двумерных плановых уравнений, описывающих средние по вертикали гидравлические параметры потока в русле и процессы формирования и переноса внутриводного льда. Модель ориентирована на воспроизведение шугохода экстремальной плотности с риском обледенения и закупорки решеток водоприемных устройств оголовка.

Рассмотрены два варианта конструкции защитной дамбы: 1) сооружение, берущее начало на правом берегу и охватывающее оголовок косым фронтальным и продольным бортами; 2) изолированное от берега сооружение подковообразной формы перед оголовком. Последний вариант признан неприемлемым по причине развития значительных скоростей отжима потока и формирования сильных течений вблизи берегов. Более рациональным

является вариант 1, в рамках которого проведена серия численных экспериментов по изучению влияния размера продольного борта на эффективность очищающей способности ковша. Показано, что с увеличением длины борта от 30 до 150 м защитные свойства дамбы монотонно возрастают, приводя к уменьшению концентрации внутриводного льда в районе водоприемников в 3–5 раз и более.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донченко Р.В. Физические свойства внутриводного льда (шуги) // Тр. ГГИ. 1956. Вып. 55. С. 5–40.
2. Шлычков В.А. Математическая модель динамики водотоков в областях со сложной геометрией: материалы конф. «Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов». Иркутск : Изд-во Института географии СО РАН, 2005. С. 248–250.
3. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. Математическая теория с приложениями. М.: ИЛ, 1959. 617 с.
4. Harten A. On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes // SIAM Journal of Numerical analysis. 1984. Vol. 21. No. 1. P. 1–23.
5. Shlychkov V.A. Numerical research currents channel with the help of flat plain model // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. ICM MG Publisher. Novosibirsk, 2005. Issue 11. P. 15–19.
6. Рымша В.А. Распределение тепла кристаллизации переохлажденной воды по глубине в потоках и водоемах // Тр. ГГИ. 1962. Вып. 93. С. 3–23.
7. Абраменков Н.М. Моделирование процесса замерзания шугоносных рек // Тр. САНИИ им. В.А. Бугаева. М.: Гидрометеоиздат, 1984. Вып. 101 (182). С. 3–100.
8. Clark S., Doering J.C. A laboratory study of frazil ice size distributions // 17-th International Symposium on Ice. SPb., 2004. Vol. 1. P. 291–297.

**Шлычков Вячеслав Александрович**, д-р физ.-мат. наук

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Новосибирск

**Дегтярев Владимир Владимирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 19.05.17

**Shlychkov Vyacheslav Alexandrovich**, DSc

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Degtyarev Vladimir Vladimirovich**, DSc, Professor; E-mail: gts@sibstrin.ru

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

## THE RATIONALE OF PARAMETERS OF FRAZIL ICE PROOF DAMS AT RIVER WATER INTAKE USING A NUMERAL MODEL OF PLANNED STREAMS

In the article the questions related to frazil ice formation leading to river water intake work complications are considered. In cases of extremely density of frazil ice, a water supply to avancamera could be blocked that requires mechanical cleaning of receiving windows grates, sometimes diving work and even pumps stop. Mechanical diversion of water masses with a high content of frazil ice through an ice proof dam is one of methods to prevent possible plugging of water receivers. This raises the problem of determining the optimal shape and size of the structure. This and accompanying hydrodynamic and ice-thermal

tasks are solved with the use of mathematical modeling applied to open streams of complex planned and altitude configuration.

**K e y w o r d s:** river water intake, frazil ice, ice proof dam, numeral model.

## REFERENCES

1. D o n c h e n k o R.V. Fizicheskie svoystva vnutrivodnogo l'da (shugi) [Physical purposes of ice water (frazil ice)]. Trudy GGI [Proceedings SHI]. 1956. Issue 55. Pp. 5–40. (in Russian)
  2. S h l y c h k o v V.A. Matematicheskaya model' dinamiki vodotokov v oblastyakh so slozhnoy geometriey: materialy konferentsii «Fundamental'nye problemy izucheniya i ispol'zovaniya vody i vodnykh resursov» [Mathematical model of watercourses dynamics in areas with complex geometry: the proceedings of the conference «Fundamental problems of studying and using water and water resources»]. Irkutsk, Publishing house of Institute of Geography SB RAS, 2005. Pp. 248–250. (in Russian)
  3. S t o k e r J.J. Volny na vode. Matematicheskaya teoriya s prilozheniyami [Waves on water. Mathematical theory and applications]. Moscow, Foreign literature, 1959. 617 p. (in Russian)
  4. H a r t e n A. On a class of high resolution total variation stable finite difference schemes. SIAM Journal of Numerical analysis. 1984. Vol. 21. No. 1. Pp. 1–23.
  5. S h l y c h k o v V.A. Numerical research currents channels with help of flat plain model. Bulletin of Novosibirsk Computing Center. ICM MG Publisher. Novosibirsk, 2005. Issue 11. Pp. 15–19.
  6. R y m s h a V.A. Raspredelenie tepla kristallizatsii perekhlazhdennoy vody po glubine v potokakh i vodoemakh [The heat spreading of overchilled water crystallization on depth in streams and reservoirs]. Trudy GGI [Proceedings SHI]. 1962. Issue 93. Pp. 3–23. (in Russian)
  7. A b r a m e n k o v N.M. Modelirovaniye protsessov zamerzaniya shugonosnykh rek [Modeling of frazil ice rivers freezing]. Trudy SANII by V.A. Bugaeva [Proceedings CASII by V.A. Bugaeva]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1984. Issue 101 (182). Pp. 3–100. (in Russian)
  8. C l a r k S., D o e r i n g J.C. A laboratory study of frazil ice size distributions. 17<sup>th</sup> International Symposium on Ice. Saint Petersburg, 2004. Vol. 1. Pp. 291–297.
-

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

УДК 728.71(571.651):697.112

А.В. МОЛОДИН

### К ВОПРОСУ КОМФОРТНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАДИЦИОННОГО ЧУКОТСКОГО ЖИЛИЩА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

#### Часть 1

Приводится описание особенностей строительного опыта и системы отопления коренных народов Чукотского автономного округа. Описываются конструктивные и объемно-пространственные характеристики переносных каркасных сооружений (яранга). Уделяется внимание организации внутреннего пространства жилища и традициям ее эксплуатации. Описываются принципы отопления и создания благоприятных климатических условий внутри жилища. Приводятся результаты лабораторных исследований теплозащитного сопротивления ограждающих конструкций яранги и экспериментальных исследований внутренней температуры воздуха в условиях нормальной эксплуатации сооружения. На основе полученных экспериментальных данных проводится теоретический расчет теплопотерь сооружения, который доказывает энергетическую эффективность двухступенчатой системы отопления яранги. Автор предлагает использовать подобную схему в практике проектирования современных жилых поселков промышленников Крайнего Севера.

**Ключевые слова:** яранга, архитектура, каркасные сооружения, переносные сооружения, температура.

**Введение.** Открытие новых месторождений полезных ископаемых и как следствие промышленное освоение районов с экстремальными температурными характеристиками окружающего воздуха ставит перед современными архитекторами ряд задач по проектированию комфортного жилья для заполярных поселков Сибири, Дальнего Востока, Аляски и Канады. Применение современных строительных материалов и технологий – важный, но не единственный аспект при проектировании современных жилых сооружений в условиях Крайнего Севера. Немаловажным является использование накопленного строительного опыта коренных народов этого региона. Именно изучение и переосмысление такого опыта поможет эффективнее использовать ресурсы и создать действительно комфортные и экономичные условия жизни и работы современных промышленников.

Мировой энергетический кризис XX в. привел, в частности, к появлению нового научно-экспериментального направления в строительстве, связанного с понятием «здание с эффективным использованием энергии».

Первое такое здание было построено в 1974 г. в г. Манчестере (штат Нью-Хэмпшир, США). В настоящей статье сделана попытка измерить, описать и проанализировать многовековой опыт энергоэффективного жилищного строительства коренных народов Чукотского автономного округа с целью возможного применения в жилищном строительстве в современной практике проектирования и сохранения энергоресурсов во время эксплуатации.

Известно, что район проживания чукчей не богат лесами, которые можно с достатком использовать для поддержания комфортной температуры внутри помещения. Ограниченные энергоресурсы заставляли чукчей искать эффективные пути энергосбережения и эволюционировать собственное жилище с учетом этих ограничений. Именно поэтому их ценный накопленный опыт был выбран объектом настоящего исследования.

В рамках статьи будут описаны конструктивные и объемно-пространственные характеристики яранги – традиционного каркасного жилища чукчей, проведены лабораторные испытания теплового сопротивления материалов ограждающих конструкций, экспериментальные исследования внутренних температурных характеристик сооружения в условиях ее нормальной эксплуатации в зимний период, проанализированы теплотехнические свойства яранги теоретическими методами. Такой комплексный подход к изучению накопленного опыта может сформировать практические рекомендации для современной практики проектирования и дать новые идеи и подходы в объемно-пространственную организацию эффективных энергосберегающих сооружений.

**1. Степень изученности проблемы.** Фундаментальные исследования народной архитектуры коренных жителей Северной Америки были выполнены в конце XX в. [1]. М. Ли и Г. Реингхард в 2003 г. опубликовали научный труд, посвященный архитектуре эскимосов. Вопросами изучения строительного опыта коренного населения Сибири в это же время занимались многие российские ученые – К.Д. Басаева, С.И. Вайнштейн, Г.Н. Грачева, Н.Н. Гуцол, Б.О. Долгих, А.П. Пинт, Э.А. Саар, В.Д. Славин, Е.М. Тощакова и др. Фундаментальным исследованием жилых построек коренных жителей Сибири, объединившим многие антропологические и культурологические исследования, стала работа З.П. Соколовой [2]. Однако большинство из вышеперечисленных исследований касались главным образом типологических вопросов и отчасти архитектурных аспектов сооружений. Климатологические вопросы в этих исследованиях либо рассматривались поверхностно, либо не рассматривались вовсе.

В начале XXI в. общими исследованиями проблемы поддержания комфорtnого климата внутри помещений народной архитектуры занялись A. Foruzanmehr, M. Vellinga [3], P. Oliver [4] and N. Vural [5]. Важное для климатологии народной архитектуры исследование, посвященное эффективному использованию энергии, было выполнено в Колорадском университете в Боулдере учеными Z. John Zhai and J.M. Previtali [6]. Следует отметить значимое для темы исследование по традиционной азиатской архитектуре, проведенное H.B. Rijal и его командой в 2010–2013 гг. [7, 8]. Специфическими

вопросами традиций сохранения тепла в народной архитектуре территорий с холодным климатом занимались Üllar Alev [9] и R. Cantin [10].

Важными для вопросов климатологии народной архитектуры являются вопросы сохранения комфортных условий внутри помещений экстремально жаркого климата. Такими исследованиями в южной Европе занимался J. Fernandes [11–13], а I. Cañas and S. Martin рассматривали вопросы климатологии испанской народной архитектуры как комплексную модель биоклиматической архитектуры [14]. Архитектуру местного населения региона экваториальной Южной Америки исследовала M. Machado [15], климатологию индийской архитектуры изучали Shanti Priya [16] и M.K. Singh [17].

Следует отметить исследование параметров качества среды внутри помещений, проведенное в 2014 г. V.V. Sakhare и R.V. Ralegaonkar [18], в котором предлагается методология измерений, применимая к исследованиям народной архитектуры.

Интересным является исследование по внедрению практики народной архитектуры в современные методы проектирования, проведенное K. Kimura [19]. Полученный опыт может масштабироваться в исследованиях строительных традиций коренных народов мира.

Все перечисленные работы заложили основу климатологического изучения комфортной температуры внутри традиционных жилых построек коренного населения, однако подобных исследований на территории севера Азиатской России не проводилось.

**2. География Чукотского полуострова.** Особенности климата Чукотки обусловлены ее расположением на крайней северо-восточной оконечности Евразии – в зоне влияния двух океанов, со сложной атмосферной циркуляцией, существенно различающейся в теплое и холодное время года.

В зимний период Чукотку покрывает область повышенного давления, с которой сталкиваются циклоны европейско-азиатского фронта, арктические антициклоны и южные циклоны. Это приводит к тому, что погода на Чукотке резко меняется даже в короткие промежутки времени: мороз с умеренными и сильными северными ветрами внезапно сменяется сырой, относительно теплой погодой с сильным снегопадом или пургой. В летние месяцы над относительно прогретой сушей преобладают области пониженного давления, над Тихим океаном – антициклоны, над побережьем Северного Ледовитого океана – циклоны европейско-азиатского фронта и холодные массы арктического воздуха. В результате взаимодействия этих циркуляционных факторов также происходит частая смена погоды: теплой на холодную, иногда с заморозками. В любом летнем месяце может начаться снегопад.

В короткий промежуток времени здесь ветры северных румбов сменяются на южные, при этом средняя скорость ветра составляет 5–12 м/с, а при порывах достигает 40 м/с. Почти ежегодно отмечаются единичные порывы ветра скоростью 50–60 м/с.

Среднегодовая температура воздуха на Чукотке повсеместно глубоко отрицательная: от  $-4,1^{\circ}\text{C}$  (мыс Наварин) до  $-14^{\circ}\text{C}$  на побережье Восточ-

но-Сибирского моря (Рауча). Однако от восточной вершины чукотского «клина» на запад континентальность климата быстро растет и на сравнительно небольшой территории Чукотки средние температуры июля варьируются от +4 до +14 °C, января – от –18 до –42 °C.

Экстремальность климата, как известно, нарастает в Евразии в целом с юга на север и с запада на восток, достигая, таким образом, своего максимума на крайней северо-восточной оконечности континента – Чукотке, что сказалось на формировании культуры северо-восточного оленеводства.

Таким образом, коренные жители Чукотки были вынуждены приспособливать свои жилища, транспорт и одежду к условиям внешней среды. Для чукчей это были низкие температуры и постоянные ураганные ветра. Из ландшафтных особенностей следует указать на горный рельеф Чукотки, что ограничивает районы кочевания межгорными долинами и прибрежными тундрами.

### **3. Конструктивные и объемно-пространственные особенности строительства коренных жителей Чукотки**

*3.1. Описание предмета исследования.* Яранга – переносное каркасное жилое сооружение коренных народов Северо-Востока Азии (Чукотский автономный округ, Магаданская область). Наиболее широкое распространение такой тип жилища получил у чукчей с тундровым (оленеводы) и береговым (морские зверобои) характером расселения. Яранги также строят северные народы – коряки, эвенки, юкагиры.

Планировка поселений-стойбищ кочевых чукчей представляет собой до десяти переносных сооружений, расположенных вдоль одной линии с запада на восток. Оседлые и полуоседлые чукчи, чаще берегового характера расселения, живут в более крупных поселениях из стационарных яранг количеством до 20 единиц [20, р. 913].

Яранга представляет собой каркасный нерешетчатый тип жилища, имеющий цилиндроконическую форму высотой в центре от 3,5 до 4,7 м и диаметром от 5,7 до 7–8 м [21, р. 88]. Основа каркаса переносных сооружений – вертикальные шесты-стойки, расположенные по кругу (рис. 1). В варианте переносного исполнения шесты выполняются в виде треног, связанных ремнями числом от 8 до 12. В стационарных ярангах вертикальные шесты установлены поодиночке, часто соединены попарно диагональными связями. По верху вертикальных шестов-стоек закрепляют горизонтальные связи, которые образовывают замкнутый периметр сооружения на уровне человеческой груди (1,4–1,6 м). Основа верхней, конической, части каркаса – три длинных шеста, связанных в вершине, образующих треногу в переносном варианте, или центральная вертикальная колонна в стационарном варианте. Вспомогательные жерди каркаса коническо-купольного покрытия образуют основу для покрышки и опираются на горизонтальные связи снизу и центральную колонну или треногу сверху (рис. 2).

Для сооружения каркаса применяют длинные деревянные шесты-жерди, однако береговые народности используют и кости морских животных. Нередки случаи применения в качестве основного строительного материала каркаса китовых ребер [2, р. 77].



*Рис. 1. Яранга*

Ярангу делают асимметричной. Центр яранги смещают к северу на 1/4–1/6 радиуса в плане. Такая практика связана с улучшением аэродинамических свойств сооружения в условиях сильных ветров. Помимо этого в асимметричном плане на большей его половине удобнее располагать специальное спальное помещение – полог.

Поверх жесткого каркаса сооружение обтягивается покрышкой из оленевых или реже моржовых шкур. Для строительства одной яранги требуется 45–50 оленевых шкур среднего размера. Края шкур накладывают один



*Рис. 2. Каркас яранги*

на другой и скрепляют пришитыми к ним ремнями. Покрышки обычно делают двухслойными. Мех нередко остригают для улучшения эксплуатационных качеств шкур. Покрышку меняют один раз в год, в то время как каркас может служить хозяину десятилетиями в стационарном варианте. После смены покрышки старая используется для утепления настила внутри полога. В современных условиях летом в качестве материала покрышки используют брезент, в прошлом использовали парусину или старые покрышки в один слой.

Снаружи ярангу обвязывают ремнями. Свободные концы ремней в нижней части привязывают к нартам или тяжелым камням, что обеспечивает покрытию неподвижность. Нижнюю часть покрышки прижимают камнями и обкладывают дерном для предотвращения задувания ветра снизу.

Входное отверстие устраивается сбоку и прикрывается куском шкуры. Во время буранов вход усиливается дощатой дверью.

Яранга легко разбирается, занимает немного места при кочевке и относительно быстро собирается. Возведение яранги занимает несколько часов и обычно не превышает продолжительности светового дня.

*3.2. Организация комфортных климатических условий.* Суровые климатические условия Крайнего Севера вынуждали строителей реализовывать нестандартные подходы к организации жилища. Один из путей достижения комфортной для жизни температуры внутреннего воздуха – реализация многоступенчатой системы утепления. Яранга состоит из двух частей – собственно основного купола – холодной части жилища (*чоттагина*) и полога (*иоронга*). Полог – теплый шатер, отапливаемый и освещаемый жировой лампой *ээк*<sup>1</sup>, которая не требовала устройства дымоотвода и горела эффективно, отапливая внутреннее пространство. Полог служит спальным помещением, в котором температура не опускается ниже +15 – +10 °C даже в самые холодные периоды зимы (рис. 3). Он располагается у одной из стенок яранги напротив двери. Вход в *иоронгу* устраивается с противоположной стороны от входа в *чоттагин* – так меньше задувает сквозняков. Полог представляет собой прямоугольный каркас деревянных шестов или переплет из легких строганых драночек, изнутри которого подвешен мешок из выделанных оленых шкур. Полог обычно делают в один слой мехом внутрь. Форма его поддерживается благодаря шестам каркаса, пропущенным через множество петель, пришитых к шкурам. Средний размер 1,5 м в высоту, 2,5 м в ширину и около 4 м в длину. Пол покрывают старыми прошлогодними покрышками.

---

<sup>1</sup> Ээк – жировая лампа, предназначенная для освещения, отопления и в редких случаях для приготовления еды внутри спальной камеры яранги – *иоронги*. Мощность лампы составляет в среднем 300 Вт. Ээк представляет собой сосуд, вырезанный из камня или выполненный из обожженной глины. Прибрежные народы Севера применяли в качестве горючего топленое сало нерпы, кита и других промысловых зверей. Вместо фитиля использовали сухой мох, особым образом выложенный в лампе, или полоску меха. Ежечасно хозяйка снимает огарки особой каменной палочкой – *пеныня*, добавляет свежего мха, подливает сала или наклоняет лампу так, чтобы горючее из одной половинки перелилось в другую к фитилю. Огонь от такой лампы горит ровный, без копоти и поэтому не требует дополнительных дымовых отверстий в *иоронге*.

Тундровые оленеводы жир обычно приобретают у береговых жителей в обмен на шкуры и оленину или используют менее эффективный олений жир. Обычно в пологе загигают одну жировую лампу.



Рис. 3. Полог внутри яранги

*3.3. Организация внутреннего пространства.* Постельное изголовье – мешки, набитые обрезками шкур, располагаются у входа в полог. Укрываются одеялом, сшитым из нескольких оленевых шкур. Для изготовления полога требуется 12–15, для постелей около 10 больших оленевых шкур. В качестве внутреннего убранства яранги используют оленьи рога, они же служат и стульями. Едят в пологе, сидя вокруг столика на низких ножках или непосредственно вокруг блюда.

В крупных ярангах, рассчитанных на две и более семей, устраивают несколько пологов, по числу семей, проживающих в сооружении. В этом случае очаг становится общим. Помимо иоронга, подобным образом устраиваются и меньшие по размеру кладовые. Так, внутри шатра яранги может располагаться до шести независимых камер различного назначения – жилых и хозяйственных.

За пологами хранят различные вещи, необходимые в хозяйстве, вдоль иоронга, в непосредственной близости к очагу – продукты питания. Пространство между входом в ярангу и очагом оставляют свободным и используют для хозяйственных нужд и приема гостей.

Очаг яранги, который используется для приготовления еды и отопления чоттагина – внешнего температурного контура, располагается в центре. В качестве топлива используют веточки тундрового кустарника и плетеобразные корневища, выкопанные в тундре и заранее заготовленные. Между шестами треноги – опоры купола закрепляются горизонтальные перекладины, за которые подвешивается посуда для приготовления еды. Пол чоттагина иногда покрывается хворостом и соломой, поверх которых выстилаются старые покрышки.

#### **4. Теплозащитное сопротивление ограждающих конструкций яранги**

*4.1. Описание методологии исследования.* Для целей теоретического расчета удельной тепловой характеристики исследуемого типа сооружения были определены значения теплозащитных свойств ограждающих конструкций экспериментальным путем. Результаты лабораторного исследования

Таблица 1. Тепловое сопротивление материала ограждающих конструкций.  
Лабораторные измерения

Вид испытуемого материала	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м · °C	Термическое сопротивление материала, ориентация волосом к нагревателю $R$ , м <sup>2</sup> · °C/Вт	Термическое сопротивление материала, ориентация кожевой тканью к нагревателю $R$ , м <sup>2</sup> · °C/Вт	Термическое сопротивление материала, среднее значение $R$ , м <sup>2</sup> · °C/Вт
Оленя шкура, стриженная на 2/3 длины ворса	0,018	0,785	0,829	0,807
Оленя шкура, стриженная на 1/3 длины ворса	0,016	1,301	1,349	1,325
Оленя шкура нестриженная	0,012	1,630	1,666	1,648

П р и м е ч а н и е. Результаты испытаний не содержат влияния обдува воздухом.

приведены в табл. 1. Были протестированы три типа материала – неостриженные; остриженные на 1/3 длины ворса; остриженные на 2/3 длины ворса.

4.2. *Эксплуатационные характеристики материала.* Традиционно в зимнем варианте использования яранга покрывается двумя слоями покрышек, сшитых из оленевых шкур с подстриженной (на 2/3 длины ворса) шерстью. Внутренние покрышки укладываются шерстью внутрь яранги, верхние – шерстью наружу. Покрышки шиваются из крупных зимних шкур взрослого оленя, реже тюленя нитками из сухожилий животного.

Для улучшения эксплуатационных характеристик ограждающего материала мех коротко подстригают, чтобы он не накапливал влагу, не собирал снег, который подтаивает и образует тонкую ледяную корку. Наастая, лед утяжеляет ограждающую покрышку, оказывая излишнюю нагрузку на каркас яранги. Ледяная корка перекрывает свободную миграцию влаги и воздуха через шкуру, в результате внутренняя сторона покрышки отсыревает, размокает, провисает, а если она долго эксплуатируется или плохо прокопчена, то приходит в негодность, а в самом жилище нарушается комфортный для эксплуатации влажностный и температурный режим.

4.3. *Методика измерения и результаты.* Методика измерения теплотехнических свойств покрышки заключалась в использовании жидкокристаллического термоиндикатора, наносимого на поверхность исследуемого образца. В этом случае значение температуры поверхности меха, а также среды и тепловыравнивающей пластины позволяет рассчитать указанные в табл. 1 параметры.

Из приведенных результатов эксперимента видно, что все три типа образца изменяют теплотехнические свойства нелинейно по отношению к доли остригаемого ворса, что говорит о некритическом изменении термического сопротивления покрышки при ее остригании. Одновременно уменьшение длины ворса приводит к значительным улучшениям эксплуатационных свойств ограждающих материалов и продлению срока их службы (см. п. 4.1).

Таким образом, для теоретических расчетов удельной тепловой характеристики яранги были приняты следующие значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ : для остриженной на 2/3 шкуры – 0,018 Вт/м · °C; для неостриженной – 0,012 Вт/м · °C.

4.4. Расчет фактического общего сопротивления теплопередаче ограждения  $R$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт. Результаты практических испытаний термического сопротивления материалов ограждающей покрышки могут быть подтверждены теоретическими расчетами [22].

Для расчета используем формулу

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/( $\text{м} \cdot \text{°C}$ ) (см. табл. 1);

$\delta$  – толщина слоя ограждающих конструкций, м.

Таким образом, значения:

1) для наружной покрышки в два слоя остиженной оленьей шкуры толщиной  $\delta = 14$  мм, общее сопротивление теплопередаче ограждения  $R = \frac{0,028}{0,018} = 1,56$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт;

2) для внутренней покрышки полога в один слой неостриженной оленьей шкуры толщиной  $\delta = 20$  мм, общее сопротивление теплопередаче ограждения  $R = \frac{0,02}{0,012} = 1,67$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт.

Исходя из этого общее сопротивление теплопередачи между температурной точкой снаружи сооружения и внутри полога составит  $R = 3,23$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, что представляется достаточно эффективно даже для современных нормативных требований к сопротивлению теплопередачи ограждающих конструкций рассматриваемого региона.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nabokov P., Easton R. Native American Architecture. Oxford University Press, 1989.
2. Соколова З.П. Жилище народов Сибири: опыт типологии. М.: ИПА «Три Л», 1998. 228 с.
3. Foruzanmehr A., Vellinga M. Vernacular architecture: questions of comfort and practicability. Building Research & Information. 2011. 39 (3). P. 274–285.
4. Oliver P. Built to Meet Needs: Cultural Issues in Vernacular Architecture. Oxford: Architectural Press, Elsevier, 2006.
5. Vural N., Vural S., Engin N., R. Sümerkan M. Eastern Black Sea Region—A sample of modular design in the vernacular architecture. Building and Environment. 2007. 42 (7). P. 2746–2761.
6. Zhai Z. (John), Previtali J.M. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. Energy and Buildings. 2010. 42 (3). P. 357–365.
7. Rijal H.B., Yoshida H., Umemiya N. Seasonal and Regional Differences in Neutral Temperatures in Nepalese Traditional Vernacular Houses. Building and Environment. 2010. 45 (12) (Dec). P. 2743–2753.
8. Rijal H.B., Miho Honjo, Ryota Kobayashi, Takashi Nakaya. Investigation of Comfort Temperature, Adaptive Model and the Window-Opening Behaviour in Japanese Houses. Architectural Science Review. 2013. 56(1) (Feb). P. 54–69.
9. Alej Üllar, Targo Kalamees, Endrik Arumägi. Indoor Climate and Humidity Loads in Old Rural Houses with Different Usage Profiles. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, edited by J Vinha, J Piironen, and K Salminen, 1103–1110. Tampere.

10. Cantin R., Burgholzer J., Guerracino G., Moujalled B., Tameli-kcht S., Royet B.G. Field Assessment of Thermal Behaviour of Historical Dwellings in France. *Building and Environment*. 2010. 45 (2) (Feb). P. 473–484. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.010.
11. Fernandes J., Correia da Silva J. Passive cooling in Évora's traditional architecture. M., 2007.
12. Fernandes J. E. P., Mateus R. Energy efficiency principles in Portuguese vernacular architecture. Greenlines Institute for Sustainable Development, 2012.
13. Fernandes J.E., Mateus R., Braganca L., Correia da Silva J.J. Portuguese vernacular architecture: the contribution of vernacular materials and design approaches for sustainable construction. *Architectural Science Review*. 2014. 11.
14. Cañas I., Martín S. Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture. *Building and Environment*. 2004. 39 (12). P. 1477–1495.
15. Machado M.V., La Roche P.M., Mustieles F., De Oteiza I. The fourth house: the design of a bioclimatic house in Venezuela. *Building Research & Information*. 2000. 28 (3). P. 196–211.
16. Shanthi Priya R., Sundarraja M.C., Radhakrishnan S., Vijayalakshmi L. Solar passive techniques in the vernacular buildings of coastal regions in Nagapattinam, TamilNadu-India – a qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*. 2012. 49 (null). P. 50–61.
17. Singh M.K., Mahapatra S., Atreya S.K., Givoni B. Thermal monitoring and indoor temperature modeling in vernacular buildings of North-East India. *Energy and Buildings*. 2010. 42 (10). P. 1610–1618.
18. Sakhare V.V., Ralegaonkar R.V. Indoor Environmental Quality: Review of Parameters and Assessment Models. *Architectural Science Review*. 2014. 57 (2) (Feb 7). P. 147–154. doi:10.1080/00038628.2013.862609.
19. Kimura K. Vernacular technologies applied to modern architecture. *Renewable Energy*. 1994. 5 (5-8). P. 900–907.
20. Левин М.Г., Потапов Л.П. Народы Сибири. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1956. 1084 с.
21. Галкин Н.В. В земле полуночного солнца. М.: Мол. гвардия, 1929. 219 с.
22. Каменев П.Н., Сканави А.Н., Богословский В.Н. и др. Отопление и вентиляция: учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 1. Отопление. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 483 с.

**Молодин Александр Владимирович**, канд. архитектуры, доц.;

E-mail: avmolodin@gmail.com

Университет Джорджа Вашингтона, Колумбийский колледж искусств и наук, США

Получено 15.05.17

**Molodin Alexandre Vladimirovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: avmolodin@gmail.com  
The George Washington University, Columbian College of Arts & Sciences, USA

## **TO THE ISSUE OF COMFORT TEMPERATURE CONDITIONS IN TRADITIONAL CHUKOTKA'S HOUSES IN FAR NORTH REGIONS**

### **Part 1**

The article gives a description of the typical features of construction experience and the system of heating for the indigenous people of the Chukotka Administrative District (A.D.), Russia. Construction and dimensional-spatial characteristics of portable framework structures (*yarangas*) are described. Attention is given to the organization of the indoor

space of the dwelling and traditional use of the space. The article describes the principles of heating and creating favorable climatic conditions inside the dwelling. The author gives the results of laboratory tests of the thermal shield resistance of insulation walling of *a yaranga* and the results of experimental studies on the indoor temperature of the air in the conditions of normal use of the structure. Based on the experimental data received, a theoretical calculation of heat losses of the structure is performed that proves the energy effectiveness of the two-step system of heating of a *yaranga*, suggesting using a similar scheme in the practice of designing modern residential settlements of the Far North.

**Key words:** yaranga, architecture, frame construction, portable buildings, temperature.

## REFERENCES

1. Nabokov P., Easton R. Native American Architecture. Oxford University Press, 1989.
2. Sokolova Z.P. Zhilishche narodov Sibiri (opyt tipologii) [Dwelling people of Siberia experience typology]. Moscow, IPA «Tri L», 1998. 228 p. (in Russian)
3. Foruzanmehr A., Vellinga M. Vernacular architecture: questions of comfort and practicability. Building Research & Information. 2011. 39 (3). Pp. 274–285.
4. Oliver P. Built to Meet Needs: Cultural Issues in Vernacular Architecture. Oxford: Architectural Press, Elsevier, 2006.
5. Vural N., Vural S., Engin N., R. Sümerkan M. Eastern Black Sea Region—A sample of modular design in the vernacular architecture. Building and Environment. 2007. 42 (7). Pp. 2746–2761.
6. Zhai Z. (John), Previtali J.M. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. Energy and Buildings. 2010. 42 (3). Pp. 357–365.
7. Rijal H.B., Yoshida H., Umemiya N. Seasonal and Regional Differences in Neutral Temperatures in Nepalese Traditional Vernacular Houses. Building and Environment. 2010. 45 (12) (Dec). Pp. 2743–2753.
8. Rijal H.B., Miho Honjo, Ryota Kobayashi, Takashi Nakaya. Investigation of Comfort Temperature, Adaptive Model and the Window-Opening Behaviour in Japanese Houses. Architectural Science Review. 2013. 56 (1) (Feb). Pp. 54–69.
9. Alev Üllar, Targo Kalamees, Endrik Arumägi. Indoor Climate and Humidity Loads in Old Rural Houses with Different Usage Profiles. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, edited by J Vinha, J Piironen, and K Salminen, 1103–1110. Tampere.
10. Cantin R., Burgholzer J., Guerracino G., Moujalled B., Tamelikcht S., Royet B.G. Field Assessment of Thermal Behaviour of Historical Dwellings in France. Building and Environment. 2010. 45 (2) (Feb). Pp. 473–484. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.010.
11. Fernandes J., Correia da Silva J. Passive cooling in Évora's traditional architecture. M., 2007.
12. Fernandes J. E. P., Mateus R. Energy efficiency principles in Portuguese vernacular architecture. Greenlines Institute for Sustainable Development, 2012.
13. Fernandes J.E., Mateus R., Braganca L., Correia da Silva J.J. Portuguese vernacular architecture: the contribution of vernacular materials and design approaches for sustainable construction. Architectural Science Review. 2014. 11.
14. Cañas I., Martín S. Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture. Building and Environment. 2004. 39 (12). Pp. 1477–1495.

15. Machado M.V., La Roche P.M., Mustieles F., De Oteiza I. The fourth house: the design of a bioclimatic house in Venezuela. *Building Research & Information*. 2000. 28 (3). Pp. 196–211.
  16. Shanthi Priya R., Sundarraja M.C., Radhakrishnan S., Vijayalakshmi L. Solar passive techniques in the vernacular buildings of coastal regions in Nagapattinam, TamilNadu-India – a qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*. 2012. 49 (null). Pp. 50–61.
  17. Singh M.K., Mahapatra S., Atreya S.K., Givoni B. Thermal monitoring and indoor temperature modeling in vernacular buildings of North-East India. *Energy and Buildings*. 2010. 42 (10). Pp. 1610–1618.
  18. Sakhare V.V., Ralegaonkar R.V. Indoor Environmental Quality: Review of Parameters and Assessment Models. *Architectural Science Review*. 2014. 57 (2) (Feb 7). Pp. 147–154. doi:10.1080/00038628.2013.862609.
  19. Kimura K. Vernacular technologies applied to modern architecture. *Renewable Energy*. 1994. 5 (5-8). Pp. 900–907.
  20. Levin M.G., Potapov L.P. Narody Sibiri [The people of Siberia]. Moscow, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1956. 1084 p. (in Russian)
  21. Gal'kin N.V. V zemle polunochnogo solntsa [In the land of the midnight sun]. Moscow, Molodaya gvardiya, 1929. 219 p. (in Russian)
  22. Kamenev P.N., Skanavi A.N., Bogoslovskiy V.N. et al. Otoplenie i ventilyatsiya: uchebnik dlya vuzov. V 2 ch. Ch. 1. Otoplenie [Heating and ventilation]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 483 p. (in Russian)
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.172.21

С.И. ГЕРАСИМОВ, В.Б. ЗИНОВЬЕВ, А.М. ПОПОВ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД УЧЕТА НАГРЕВА ТЕНЗОДАТЧИКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

С использованием методов конечных элементов и голографической интерферометрии исследовано влияние нагрева тензодатчика омического сопротивления на деформации элемента конструкции, изготовленного из металла и композиционного материала. Установлено, что при протекании электрического тока по решетке тензодатчика образец нагревается – это приводит к появлению температурных деформаций исследуемого элемента; характер деформации исследуемого изделия зависит от типа материала, типа тензодатчика и его местоположения. Согласно результатам проведенного исследования при тензометрировании элементов конструкций, изготовленных из материалов с малым коэффициентом теплопроводности, следует учитывать погрешность, вносимую нагревом тензодатчика, так как она ощутимо влияет на результаты измерения.

Ключевые слова: метод конечных элементов, голографическая интерферометрия, тензодатчики.

**Введение.** При измерении деформаций элементов конструкций с использованием тензодатчиков омического сопротивления принимаемая идеализация свойств преобразователь – объект исследования и в особенности граничных условий зачастую не позволяет уверенно считать результаты, полученные при испытаниях, соответствующими реальному процессу [1–3]. В связи с этим важная роль принадлежит расчетно-экспериментальным исследованиям, в процессе проведения которых удается реализовать натурные граничные условия и получить информацию о перемещениях изучаемых участков поверхности реальных изделий. Трудности аналитического решения задачи об учете нагрева тензодатчика очевидны, так как они представляют собой весьма сложные миниатюрные конструкции из материалов с резко отличающимися физико-механическими свойствами. До сих пор мало изучен вопрос о передаче тепла от решетки тензодатчика основному материалу через слой вязкоупругого связующего.

К настоящему времени накоплен значительный опыт по исследованию тензодатчиков: изучалось влияние объемной деформации на изменение сопротивления решетки, описаны изменения температурной зависимости сопротивления в результате термообработки, разработаны приемы изготовления термокомпенсированных тензодатчиков, оценивалось влияние напряженного состояния и конструктивных факторов на тензочувствительность [4]. Однако очень мало внимания уделялось исследованию погрешностей,

обусловленных деформацией изделия при его нагреве в результате протекания тока по тензодатчику. Особенно остро эти вопросы возникают при исследовании деформированного состояния элементов конструкции, изготовленных из композиционных материалов с низким коэффициентом теплопроводности.

В данной работе сделана попытка оценить погрешности, возникающие при использовании тензометрии для анализа НДС плоских объектов из различных конструкционных материалов.

**1. Расчетная модель.** Использовали расчетный пакет COSMOS/M, реализующий метод конечных элементов [5]. Модель представляла собой квадратную пластину со стороной 20 см, находящуюся в условиях плоского напряженного состояния (рис. 1). Прямоугольная система координат  $XOY$

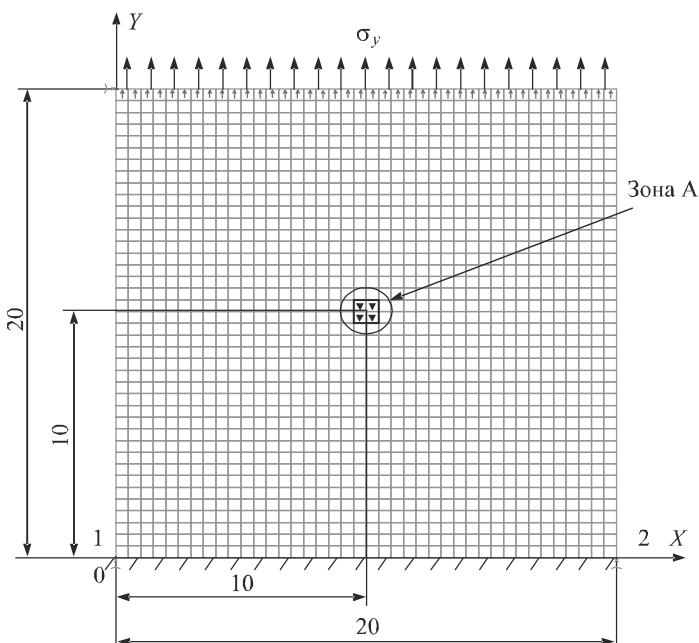


Рис. 1. Расчетная схема

связана с пластиной, начало отсчета в узле 1. При построении координатной плоскости была выполнена сетка с шагом 5 мм. Для обеспечения плоского напряженного состояния пластины были определены граничные условия: по прямой 1–2 действует запрет на перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Использованы плоские элементы PLANE2D.

Для исследования были выбраны два конструкционных материала: высокопрочный алюминиевый сплав Al3003 (аналог сплава АМЦ) и стеклопластик АГ-4С [6]. Выбор материалов объясняется значительным отличием механических характеристик.

Выбор типа тензорезисторов зависит, прежде всего, от особенностей объекта исследований, его геометрических размеров, конфигурации, характера измеряемой деформации, градиента напряжений в пределах исследуемого участка [7]. Поэтому для исследования погрешности, вносимой нагревом тензодатчика, были выбраны следующие типы: проволочный датчик

КФ5П1-10-200А-12 квадратной формы, прямоугольный фольговый датчик ПНФ-С-15-5 и цепочка, составленная из двух датчиков ПНФ-С-15-5, расположенных перпендикулярно на расстоянии 1 см друг от друга. Для оценки максимальной погрешности было принято, что тензодатчики питаются от источника постоянного тока.

Габаритные размеры выбранных тензодатчиков и рассчитанные значения излучаемой мощности и теплового потока приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Значения излучаемой мощности и теплового потока для выбранных типов тензодатчиков

Тип тензодатчика	Длина, м	Ширина, м	Площадь $S$ , $\text{м}^2$	Питающий ток $I$ , А	Сопротивление $R$ , Ом	Мощность $P$ , Вт	Тепловой поток $j$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$
КФ5П1-10-200А-12	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$50 \cdot 10^{-3}$	200	0,4	$4,0 \cdot 10^3$
ПНФ-С-15-5	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$30 \cdot 10^{-3}$	150	0,108	$1,44 \cdot 10^3$

Тепловой поток, излучаемый цепочкой тензодатчиков, равен тепловому потоку от тензорезистора ПНФ-С-15-5.

В центре пластины имитировался участок, который нагревался решеткой тензодатчика (зона А) в течение 1 ч. При расчетах предполагалось, что за 1 ч завершаются переходные процессы и устанавливается устойчивое состояние, когда количество подводимого тепла равняется количеству рассеянного тепла. Температура окружающей среды принималась равной  $20^\circ\text{C}$ , также была учтена конвекция окружающего воздуха.

**2. Результаты расчета.** Численный эксперимент проводился в три этапа: вначале выполнялся расчет в опции *Static Analysis*, учитывающий только влияние распределенной нагрузки на образец, далее выполнялся температурный расчет воздействия нагрева тензодатчика в опции *Termal Analysis*, затем проводился окончательный расчет, учитывающий совместное влияние силовой и температурной нагрузки.

Для выполнения расчета к верхней грани пластины прикладывалось растягивающее напряжение по оси  $OY$ . Значения приложенной нагрузки различны для каждого типа материала: для А13003  $\sigma_y = 100$  МПа, для АГ-4С  $\sigma_y = 20$  МПа. Получены следующие значения перемещений  $V$  зоны А: для А13003  $V = 0,14$  мм, для АГ-4С  $V = 0,147$  мм.

В центре пластины помещался тензодатчик, излучающий тепло. Рассчитывались поля распределения температуры. На модели из алюминиевого сплава наблюдался незначительный локальный нагрев, обусловленный хорошим распределением тепловой энергии по всей площади поверхности образца. В случае с образцом из стеклопластика имело место значительное локальное повышение температуры до  $40,3^\circ\text{C}$  вследствие низкой теплопроводности стеклопластика.

Исследовалось совместное действие на образец температуры и растягивающей нагрузки, были рассчитаны соответствующие значения  $\sigma_y$  и получена картина перемещений  $V(x, y)$ , выполнялось сравнение перемещений в сечениях, содержащих тензодатчик (сечение, перпендикулярное оси  $OY$  и содержащее зону А) и вычислялась абсолютная погрешность.

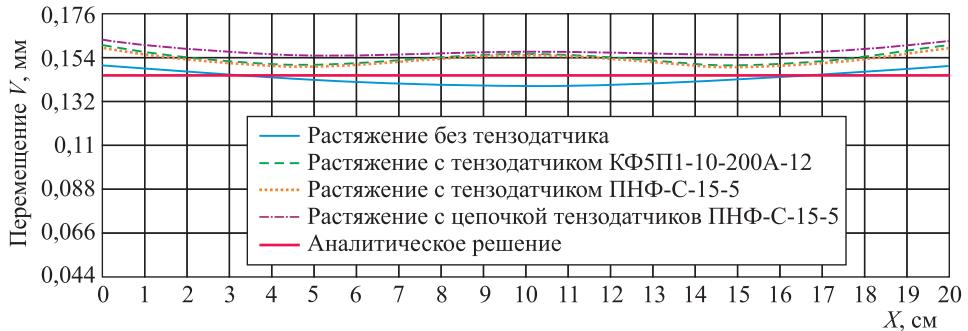


Рис. 2. Перемещения  $V(x, y)$  в сечении зоны А для алюминиевого сплава

Для оценки точности определения напряженно-деформированного состояния образца с помощью метода конечных элементов были сопоставлены данные аналитического и экспериментального решений. Аналитическое решение выполнялось исходя из закона Гука:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA}, \quad (1)$$

где  $N$  – продольная сила на участке пластины длиной  $l$ , Н;

$A$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$E$  – модуль упругости, Па.

По расчетным данным построены графики зависимости перемещений  $V(x, y)$  для каждого вида материала (рис. 2, 3).

На рис. 2 наблюдается некоторое отличие перемещений  $V(x, y)$  при растяжении с использованием тензодатчика и без него, очевидно влияние граничных условий. Величина абсолютной погрешности  $\Delta = 0,016\text{--}0,017$  мм, относительная погрешность  $\delta$ , вносимая в измерения, равна примерно 11 %. Наибольшее отклонение наблюдается при использовании цепочки тензодатчиков. На основании этого можно сделать вывод, что погрешность при тензометрировании алюминиевого образца зависит как от мощности, выделяемой тензодатчиком, так и от взаимного расположения и числа тензодатчиков.

На графике перемещений для стеклопластика АГ-4С (рис. 3) наблюдается значительное отличие в значениях деформаций при растяжении с использо-

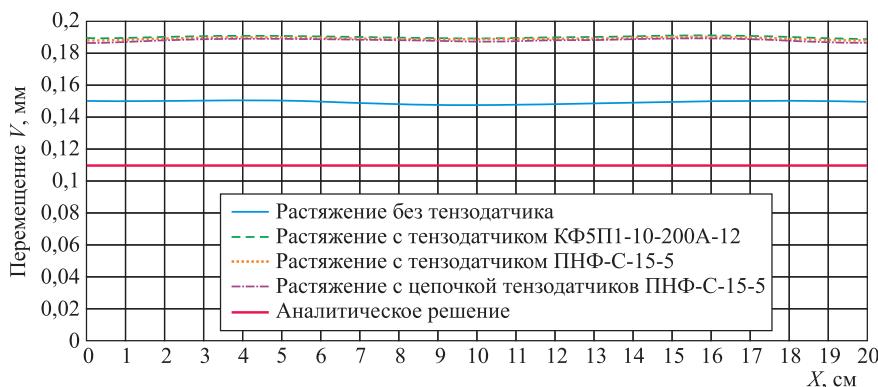


Рис. 3. Перемещения  $V(x, y)$  в сечении зоны А для стеклопластика АГ-4С

зованием тензодатчика и без него. Величина абсолютной погрешности  $\Delta = 0,041\text{--}0,042$  мм, величина вычисленной относительной погрешности  $\delta = 28\%$ . Близость на рис. 3 графиков перемещений с использованием тензодатчиков говорит о том, что в случае с образцом из стеклопластика не имеет особого значения тип и количество применяемых датчиков. Это объясняется низкими теплопроводящими и высокими теплоемкостными свойствами стеклопластика. Значительный «отрыв» графиков перемещений при использовании тензодатчиков указывает на значительную погрешность метода тензометрии без специального учета эффекта нагрева.

Результаты численных экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты численного эксперимента в зоне А

Материал	Тип тензодатчика	Перемещения зоны А		Температура в зоне А $T$ , °C	Абсолютная погрешность $\Delta$ , мм
		до нагрева	после нагрева		
		$V$ , мм	$V$ , мм		
Al3003	КФ5П1-10-200А-12	0,140	0,156	20,4	0,016
Al3003	ПНФ-С-15-5	0,140	0,156	20,4	0,016
Al3003	Цепочка ПНФ-С-15-5	0,140	0,157	20,2	0,017
АГ-4С	КФ5П1-10-200А-12	0,147	0,189	40,3	0,042
АГ-4С	ПНФ-С-15-5	0,147	0,188	26,1	0,041
АГ-4С	Цепочка ПНФ-С-15-5	0,147	0,188	26,4	0,041

**3. Результаты физического эксперимента.** Результаты численного моделирования были сопоставлены с данными физического эксперимента. Влияние локального нагрева тензодатчиком материала исследуемого образца изучалось методом голографической интерферометрии с использованием голограмм сфокусированных изображений [8, 9]. На рис. 4 приведены картины интерференционных полос, полученные на недеформированных образцах, изготовленных из материалов: сталь (рис. 4, а) и АГ-4С (рис. 4, б).

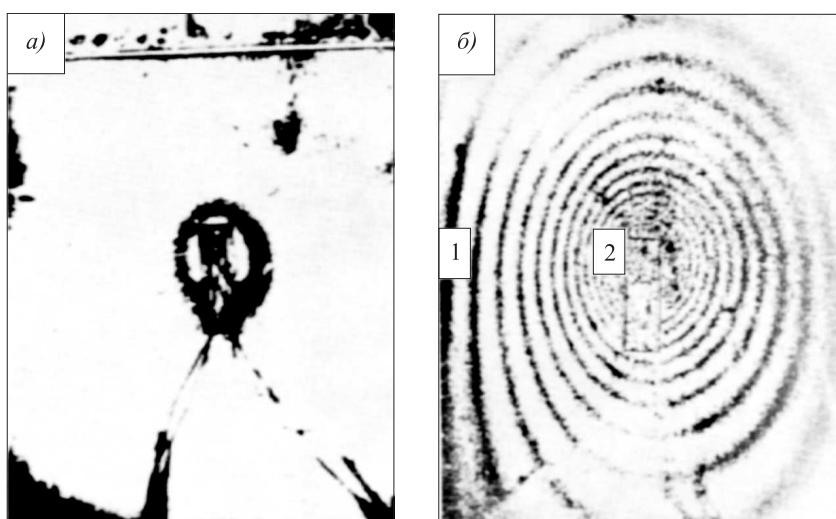


Рис. 4. Фотографии интерферограмм при нагреве тензодатчиков, нанесенных на образцы из стали (а) и стеклопластика АГ-4С (б)

На массивный стальной образец наклеивали kleem «Циакрин ЭО» по стандартной технологии тензодатчик 2ПКБ-5-100В. Первая экспозиция фотоматериала выполнялась до включения датчика, а вторая через 30 мин после включения его в электрическую цепь. На рис. 4, *a* приведена картина интерференционных полос, полученная при протекании тока 160 мА по решетке тензодатчика. Видна только одна интерференционная полоса, вдоль которой перемещения  $W(x, y)$  по нормали к поверхности образца постоянны и равны  $\lambda/2 = 0,32$  мкм, где  $\lambda$  – длина волны излучения  $He-Ne$  лазера [10, 11]. Следовательно, для материалов с высокой теплопроводностью влиянием локального нагрева тензодатчика на его показания, связанные с формоизменением поверхности образца, можно пренебречь. Рис. 4, *б* соответствует прогреву тензодатчика 2ПКБ-5-100В током 50 мА в течение 25 мин; тензодатчик наклеен на массивный образец из стеклопластика АГ-4С вдоль главной оси упругости, для которой значение модуля упругости максимально. Из сопоставления картин интерференционных полос, приведенных на рис. 4, следует, что при исследовании деформированного состояния образцов с малым коэффициентом теплопроводности локальный нагрев приводит к значительным изменениям температуры и формы поверхности образца, что может повлиять на величину показаний тензодатчика.

Для анализа изменения температуры поверхности образца вблизи тензодатчика, включенного в измерительную схему тензостанции, был проведен следующий эксперимент. На поверхность образца из материала АГ-4С (рис. 5, *а*) наклеивался тензорезистор 2ПКБ-5-100В и затем по нему пропускался ток. Для измерения температуры поверхности образца вдоль оси  $X$  (рис. 5, *б*) в шести точках закреплялись термопары АПХ-66А, одна из которых обеспечивала температурную компенсацию.

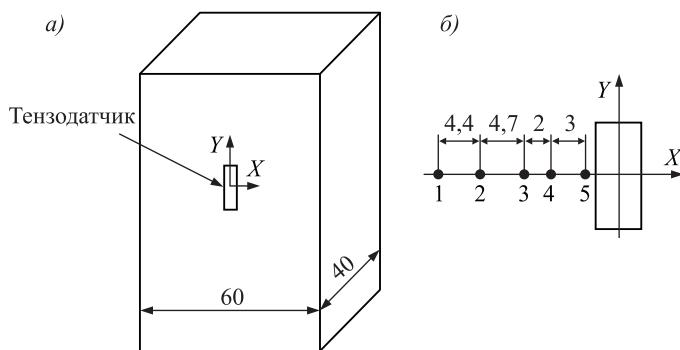


Рис. 5. Внешний вид образца и расположение тензодатчика

Графики изменения температур в пяти точках 1, 2, 3, 4, 5 образца приведены на рис. 6.

При сопоставлении графиков изменений температур (рис. 6) в численном и физическом эксперименте было замечено расхождение температуры  $\Delta T = 9-13$  °C. Тогда для уточнения параметров численной модели был введен поправочный коэффициент  $K_p = 0,8$ , учитывающий рассеивание тепла kleевой прослойкой между тензодатчиком и материалом образца. С введением поправочного коэффициента уменьшилось значение излучаемой мощности тензодатчика, что позволило оптимизировать модель.

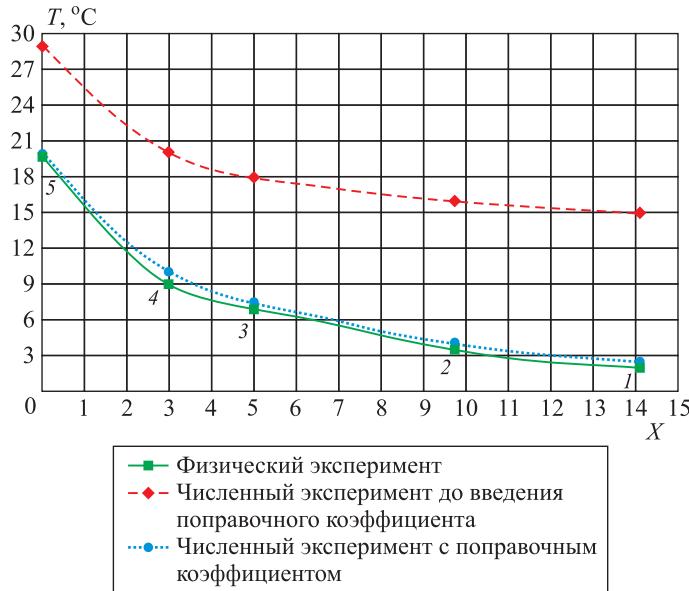


Рис. 6. Графики изменения температур

**Выводы.** При протекании электрического тока по решетке тензодатчика образец нагревается, что приводит к появлению температурных деформаций исследуемого элемента.

Характер деформации исследуемого изделия зависит от типа материала, типа тензодатчика, его местоположения и взаимной ориентации главных осей упругости.

Материалы с малым коэффициентом теплопроводности хуже отводят тепло, что приводит к появлению локального нагрева.

При тензометрировании элементов конструкций, изготовленных из металла или стеклопластика, следует учитывать погрешность, вносимую нагревом тензодатчика, так как она ощутимо влияет на результаты измерения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справ. пособие. Киев, 1981. 584 с.
2. Анкудинов Д.Т., Мамаев К.Н. Малобазные тензодатчики сопротивления. М., 1968. 168 с.
3. Козлов И.А., Баженов В.Г., Матвеев В.В., Лещенко В.М. Исследование прочности деталей машин при помощи тензодатчиков сопротивления. Киев, 1967. 204 с.
4. Макаров Р.А. Тензометрия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
5. COSMOSM User Guide. Vol. 4: Advanced Modules. P. 1. NSTAR – Santa Monica (CA) Structural Research and Analysis Corporation, 2007. 328 р.
6. Хрулев В.М. Технология и свойства композиционных материалов для строительства. Уфа: Изд-во ТАУ, 2001. 156 с.
7. Ерыгин Б.А., Михайленко А.В. Основы научных исследований. Тензодатчики. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2003. 85 с.
8. Жилкин В.А., Зиновьев В.Б. Взаимодействие тензодатчика омического сопротивления с поверхностью изучаемого объекта // Механика композитных материалов. 1986. № 2. С. 343–348.

9. Cloud G. Optical methods of engineering analysis. Cambridge University Press, 2008. 520 p.
10. Герасимов С.И., Жилкин В.А., Власов Г.М., Островенский П.И. Оценка точности определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций с использованием накладного голографического интерферометра // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 110–120.
11. Герасимов С.И., Жилкин В.А., Островенский П.И. Изучение процесса накопления деформаций при повторном нагружении с использованием накладного голографического интерферометра // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 11–12. С. 97–103.

**Герасимов Сергей Иванович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: 912267@gmail.com

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Зиновьев Владимир Борисович**, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: vbgzinoviev@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 после доработки 05.05.17

**Gerasimov Sergey Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: 912267@gmail.com

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Zinov'ev Vladimir Borisovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: vbgzinoviev@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Popov Anatoliy Mikhaylovich**, DSc, Professor; E-mail: 47604@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **EVALUATION OF STRAIN-MEASUREMENT ERROR CAUSED BY HEATING OF STRAIN GAUGE**

Using the finite element methods and holographic interferometry, the effect of heating the resistance-type strain gauge on the deformation of a structural element made of metal and composite material was investigated. It is established that when a current flows through the grid of the strain gage, the sample is heated, which leads to the appearance of temperature deformations of the element under investigation. The nature of the deformation of the test article depends on the type of material, the type of the load cell and its location. According to the results of the research carried out with tensometry of structural elements made of materials with a low coefficient of thermal conductivity, it is necessary to take into account the error introduced by heating the load cell, since it has a noticeable effect on the measurement results.

**Key words:** finite elements method, holographic interferometry, strain gauges.

## **REFERENCES**

1. Eksperimental'nye metody issledovaniya deformatsiy i napryazheniy: spravochnoe posobie [Experimentsal methods for studying deformations and stresses]. Kiev, 1981. 584 p. (in Russian)
2. Ankudinov D.T., Mamaev K.N. Malobaznye tenzodatchiki soprotivleniya [Lowcapacity strain gauges of resistance]. Moscow, 1968. 168 p. (in Russian)
3. Koziol I.A., Bazinev V.G., Matveev V.V., Leshchenko V.M. Issledovanie prochnosti detaley mashin pri pomoshchi tenzodatchikov soprotivleniya [Investigation of the strength of machine parts by means of strain gauges of resistance]. Kiev, 1967. 204 p. (in Russian)

4. Makarov R.A. Tenzometriya v mashinostroenii [Strain measurements in Mechanical Engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 288 p. (in Russian)
  5. COSMOSM User Guide. Vol. 4: Advanced Modules. P. 1. NSTAR – Santa Monica (CA) Structural Research and Analysis Corporation, 2007. 328 p.
  6. Khrulev V.M. Tekhnologiya i svoystva kompozitsionnykh materialov dlya stroitel'stva [Technology and properties of composite materials in Civil Engineering]. Ufa, Publishing house of TAU, 2001. 156 p. (in Russian)
  7. Erygin B.A., Mikhaleenko A.V. Osnovy nauchnykh issledovaniy. Tenzodatchiki [Basic of scientific researches. Strain gages]. Krasnoyarsk, Publishing house of SibGTU, 2003. 85 p. (in Russian)
  8. Zhilkin V.A., Zinov'ev V.B. Vzaimodeystvie tenzodatchika omicheskogo soprotivleniya s poverkhnost'yu izuchаемого ob'ekta [Interaction between a resistance-type strain gauge and the surface of the article being tested]. Mekhanika kompozitnykh materialov [Mechanics of Composite Materials]. 1986. No. 2. Pp. 343–348. (in Russian)
  9. Cloud G. Optical methods of engineering analysis. Cambridge Universiyy Press, 2008. 520 p.
  10. Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Vlasov G.M., Ostremenskiy P.I. Otsenka tochnosti opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktsiy s ispol'zovaniem nakladnogo holograficheskogo interferometra [Evaluation of strain-stress determination accuracy of structural elements by a superposed holographic interferometer]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 10. Pp. 110–120. (in Russian)
  11. Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Ostremenskiy P.I. Izuchenie protsessa nakopleniya deformatsiy pri povtornom nagruzhenii s ispol'zovaniem nakladnogo holograficheskogo interferometra [Study of deformation accumulation reloading problem by a superposed holographic interferometer]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 11-12. Pp. 97–103. (in Russian)
-

УДК 624.011.1

Г.И. ГРЕБЕНЮК, В.В. ПУРТОВ, А.В. ПАВЛИК, Н.И. КУЛЕШОВА

**РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК  
НА ОДНОСРЕЗНЫЕ НАГЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ  
РАСТЯНУТЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕШЕНИЙ ФОРМИРУЕМЫХ  
УСЛОВНО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ**

Рассмотрены варианты предельного состояния односрезного нагельного соединения растянутых деревянных элементов с использованием моделей жесткого и нежесткого нагеля. Разработан пошаговый алгоритм выявления истинной схемы предельного состояния соединения. С позиции статической теоремы предельного равновесия показано, что при реализации схемы с жестким нагелем задача определения предельной нагрузки должна ставиться и решаться как условно экстремальная задача нелинейного математического программирования. Для случаев реализации схем предельного равновесия с образованием пластических шарниров изгиба в нагеле разработан алгоритм определения предельной нагрузки на соединение на основе численного решения формируемой системы уравнений. Выполнен обширный численный эксперимент и проведен анализ результатов расчетов соединений с использованием цилиндрических стальных нагелей и наклеенных на древесину шайб. Выявлены особенности работы рассматриваемого вида соединения и приведены сравнительные результаты расчетов других авторов.

**Ключевые слова:** деревянные элементы, соединения деревянных элементов, растяжение, нагель, наклеенная на древесину шайба, односрезное соединение, смятие, пластические шарниры, предельная нагрузка, условный экстремум, математическое программирование.

**Введение.** Нагельные соединения элементов деревянных конструкций достаточно широко используются в строительной практике. Теория расчета нагельных соединений [1–4 и др.], как правило, основывается на методе предельного равновесия [5] и включает разработку и анализ различных расчетных схем предельного равновесия конкретных видов соединений. В ряде случаев такие соединения усиливаются стальными или пластмассовыми [1, 6] плоскими шайбами, наклеенными на древесину, зубчатыми шайбами, запрессованными в древесину [7], а также штампованными металлическими зубчатыми пластинаами (МЗП) [8–10].

В данной работе для создания общего подхода к расчету односрезных нагельных соединений деревянных элементов, работающих на растяжение, используются положения статической теоремы предельного равновесия, согласно которым истинная схема предельного равновесия должна быть статически возможной и соответствовать максимуму предельной нагрузки. В связи с этим задача поиска такой схемы может быть поставлена и решена как задача нелинейного математического программирования [11].

**1. Односрезное соединение с жестким нагелем, усиленное наклеенными на древесину шайбами.** Расчетная схема деформации рассматриваемого соединения представлена на рис. 1, а. Эпюра напряжений смятия в древесине и шайбах показана на рис. 1, б. Величины  $X_1$ ,  $X_2$  характеризуют в данном случае степень полезного использования нагельного гнезда в предельном состоянии.

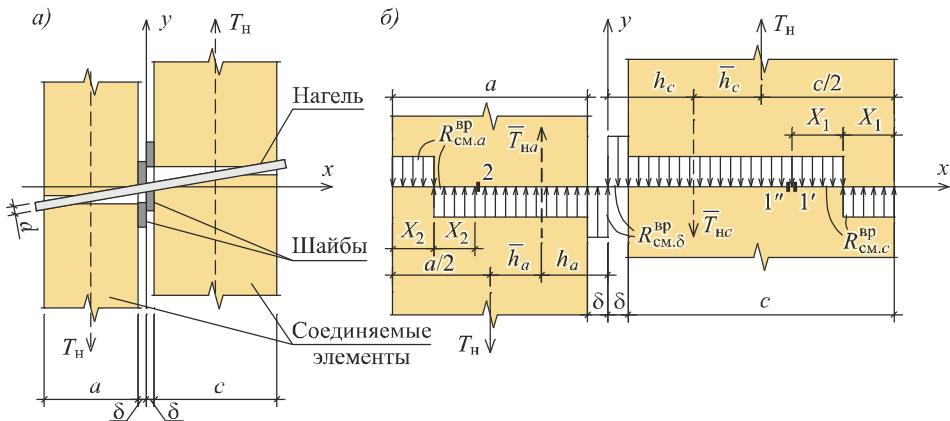


Рис. 1. Расчетная схема предельного состояния односрезного соединения с жестким нагелем, усиленного наклеенными на древесину шайбами  
а – схема деформации соединения; б – расчетная схема нагружения древесины и шайб в нагельном гнезде

Следует заметить, что принятая расчетная схема (рис. 1) предполагает фиксированное положение продольных осей соединяемых элементов в составе всей конструкции. Это объясняется тем, что пара с моментом  $T_h \left( \frac{a}{2} + \frac{c}{2} + 2\delta \right)$  уравновешивается парой с моментом  $R_{op}l$  (рис. 2).

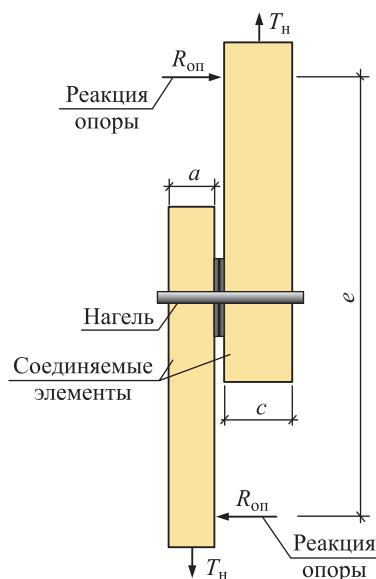


Рис. 2. Расчетная схема нагружения соединяемых элементов

Из условия уравновешенности сил  $\bar{T}_{hc}$ ,  $\bar{T}_{ha}$ , составляющих внутреннюю пару, в проекции на ось  $y$  получим

$$\begin{aligned} T_{hc} &= (c - 2X_1)R_{cm.c}^{bp} = \\ &= (a - 2X_2)R_{cm.a}^{bp} = T_{ha}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_{cm.c}^{bp}$ ,  $R_{cm.a}^{bp}$  – временные сопротивления по смятию материалов соединяемых элементов.

Мысленно удаляем в предельном состоянии нагель и прикладываем к древесине и шайбе силы давления от нагеля на древесину и шайбы. Из условия равновесия сил, действующих на каждый из элементов, в проекции на ось  $y$  получим

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ha} &= R_{cm.c}^{bp}(a - 2X_2)d + R_{cm.\delta}^{bp}d\delta = \\ &= \bar{T}_{hc} = R_{cm.c}^{bp}(c - 2X_1)d + R_{cm.\delta}^{bp}d\delta = T_h, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_h$  – несущая способность соединения.

Величины  $h_c$ ,  $h_a$  (расстояния от равнодействующих  $\bar{T}_{hc}$ ,  $\bar{T}_{ha}$  до оси  $y$ ) определяются из соотношений:

$$h_c = \frac{0,5R_{cm,\delta}^{bp}\delta^2 + R_{cm,c}^{bp}(c-2X_1)[0,5(c-2X_1)+\delta] - R_{cm,c}^{bp}X_1^2}{R_{cm,c}^{bp}(c-2X_1) + R_{cm,\delta}^{bp}\delta}; \quad (3)$$

$$h_a = \frac{0,5R_{cm,\delta}^{bp}\delta^2 + R_{cm,a}^{bp}(a-2X_2)[0,5(a-2X_2)+\delta] - R_{cm,a}^{bp}X_2^2}{R_{cm,a}^{bp}(a-2X_2) + R_{cm,\delta}^{bp}\delta}. \quad (4)$$

Система уравнений (1), (2), описывающая в данном случае предельное состояние соединения по модели жесткого нагеля, содержит три неизвестных  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $T_h$  и не позволяет получить единственное решение. Для получения такого решения предлагается, исходя из статической теоремы предельного равновесия, задачу поиска предельной нагрузки  $T_h$  поставить и решить как задачу нелинейного математического программирования:

$$\text{требуется найти } \max T_h(X_1, X_2) \left( \text{или } \min f(X_1, X_2) = \frac{1}{T_h(X_1, X_2)} \right) \quad (5)$$

при соблюдении ограничения-равенства (1), ограничений на величины изгибающих моментов в опасных сечениях 1, 2 нагеля (см. рис. 1, б)

$$R_{cm,c}^{bp}dX_1^2 \leq M_{\text{пред}}; \quad R_{cm,a}^{bp}dX_2^2 \leq M_{\text{пред}} \quad (6)$$

и параметрических ограничений на величины  $X_1$ ,  $X_2$ . В соотношении (6)  $M_{\text{пред}}$  – предельный изгибающий момент, соответствующий возникновению пластического шарнира в сечении нагеля. Для нагелей круглого сечения, выполненных из стали:

$$M_{\text{пред}} = R_t W_{\text{пл}} = \frac{R_t d^3}{6}, \quad (7)$$

где  $R_t$  – предел текучести материала нагеля;

$W_{\text{пл}}$  – пластический момент сопротивления;

$d$  – диаметр нагеля.

В случае использования нагелей из стеклопластика АГ-4С возникновение условного пластического шарнира при кратковременной нагрузке соответствует величине предельного изгибающего момента [1]

$$M_{\text{пред}} = R_i^{bp} W_{\text{уп}} = \frac{R_i^{bp} \pi d^3}{32} = 0,098d^3 R_i^{bp},$$

где  $R_i^{bp}$  – временная несущая способность нагеля при изгибе;

$W_{\text{уп}}$  – осевой момент сопротивления круглого сечения;

$d$  – диаметр нагеля.

Дополнительные изгибающие моменты, связанные с деформацией соединения в предельном состоянии, равны

$$R_{cm,c}^{bp}dX_1^2, \quad R_{cm,a}^{bp}dX_2^2, \quad T_h \bar{h}_c, \quad T_h \bar{h}_a,$$

$$\text{где } \bar{h}_a = \frac{a}{2} + \delta - h_a; \quad \bar{h}_c = \frac{c}{2} + \delta - h_c. \quad (8)$$

Влиянием дополнительных нормальных напряжений изгиба в сечениях элементов будем в дальнейшем пренебречь в силу их малости.

**2. Односрезное соединение с нежестким нагелем, усиленное наклеенными на древесину шайбами, при образовании одного пластического шарнира.** В случае односрезного соединения с нежестким нагелем возможны две схемы предельного равновесия, с возникновением одного (рис. 3) или двух (рис. 4) пластических шарниров в нагеле. Рассмотрим случай предельного состояния соединения с образованием одного пластического шарнира в нагеле.

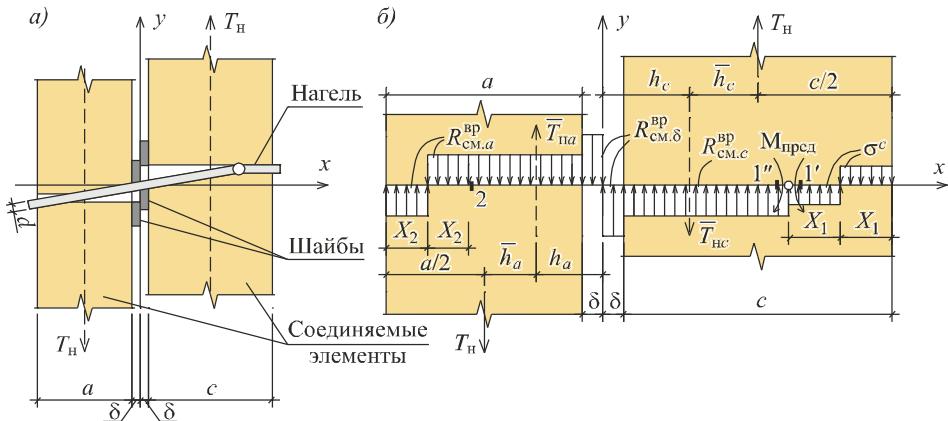


Рис. 3. Расчетная схема предельного состояния соединения по модели нежесткого нагеля с одним пластическим шарниром  
а – схема деформации соединения; б – расчетная схема нагружения нагеля

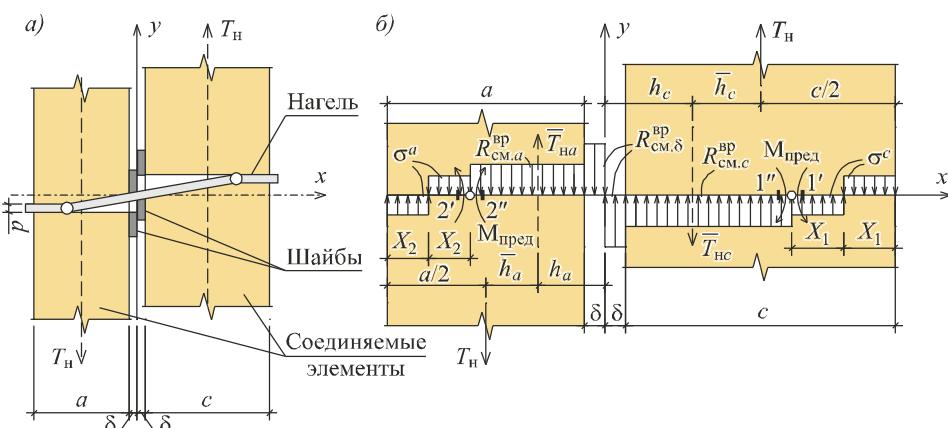


Рис. 4. Расчетная схема предельного состояния соединения по модели нежесткого нагеля с двумя пластическими шарнирами  
а – схема деформации соединения; б – расчетная схема нагружения нагеля

Так как расположение пластического шарнира заранее не известно, необходимо рассматривать две возможности его расположения (как в правой, так и в левой частях нагеля) и выбирать статически допустимое решение, соответствующее максимуму предельной нагрузки.

Согласно схеме, приведенной на рис. 3, предполагается, что  $c > a$ , древесина соединяемых элементов одинакова и пластический шарнир образуется

в правой, более длинной части нагеля. В рассматриваемом на рис. 3 случае правый конец нагеля считается защемленным в сечении I'. Искомыми параметрами предельного состояния являются величины  $X_1, X_2, \sigma^C = X_3$ , причем  $\sigma^C \leq R_{\text{см.с}}^{\text{bp}}$ . Условие равновесия нагеля в проекции на ось у представлено соотношением (1). Условие возникновения пластического шарнира в сечении I' имеет вид

$$X_3 dX_1^2 = M_{\text{пред}} = \frac{R_t d^3}{6}. \quad (9)$$

Вырезая левую от сечения I' часть нагеля (сечение I''), получим условие возникновения пластического шарнира в виде

$$\begin{aligned} & R_{\text{см.а}}^{\text{bp}} d(a - 2X_2)(0,5(a - 2X_2) + 2\delta + c - 2X_1) + R_{\text{см.δ}}^{\text{bp}} d\delta^2 - \\ & - R_{\text{см.с}}^{\text{bp}} d0,5(c - 2X_1)^2 - R_{\text{см.а}}^{\text{bp}} dX_2^2 = M_{\text{пред}} = \frac{R_t d^3}{6}. \end{aligned} \quad (10)$$

Составляющие  $\bar{T}_{\text{на}}, \bar{T}_{\text{нс}}$  внутренней пары представлены соотношениями (2). Величина  $h_a$ , как и ранее, задается выражением (4), а выражение для величины  $h_c$  записывается в виде

$$h_c = \frac{0,5R_{\text{см.δ}}^{\text{bp}}\delta^2 + R_{\text{см.с}}^{\text{bp}}(c - 2X_1)(0,5(c - 2X_1) + \delta)}{R_{\text{см.с}}^{\text{bp}}(c - 2X_1) + R_{\text{см.δ}}^{\text{bp}}}. \quad (11)$$

Величины  $\bar{h}_a, \bar{h}_c$  определяются из соотношений (8). Величины  $X_1, X_2, X_3$  можно в данном случае находить из решения системы уравнений (1), (9), (10), а далее из условия (2) вычислять  $T_h$ . При этом необходимо проверять полученное решение на допустимость по параметру  $X_3$  ( $X_3 \leq R_{\text{см.с}}^{\text{bp}}$ ) и по изгибающему моменту в сечении 2:  $M_2 = R_{\text{см.а}}^{\text{bp}} dX_2^2 \leq M_{\text{пред}}$ .

В рамках предложенной общей методики можно определять искомое предельное состояние соединения на основе решения следующей задачи математического программирования:

требуется найти  $\min f(X_1, X_2, X_3) = \frac{1}{T_h(X_1, X_2, X_3)}$  при соблюдении ограничений-равенств (1), (9), (10), ограничения  $R_{\text{см.а}}^{\text{bp}} dX_2^2 \leq M_{\text{пред}}$  и параметрических ограничений:

$$\frac{X_i}{X_{i\max}} - 1 \leq 0; \quad \frac{X_{i\min}}{X_i} - 1 \leq 0; \quad i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

Дополнительные изгибающие моменты в деревянных элементах, связанные с деформацией соединения в предельном состоянии, равны

$$R_{\text{см.а}}^{\text{bp}} dX_2^2, \quad T_h \bar{h}_c, \quad T_h \bar{h}_a,$$

где  $\bar{h}_a = \frac{a}{2} + \delta - h_a$ ;  $\bar{h}_c = \frac{c}{2} + \delta - h_c$ . Как было отмечено ранее, влиянием их на предельное состояние соединения можно пренебречь.

**3. Односрезное соединение с нежестким нагелем, усиленное наклеенными на древесину шайбами, при образовании двух пластических шарниров.** В случае возникновения двух пластических шарниров в нагеле (см. рис. 4) искомыми характеристиками предельного состояния являются  $X_1, X_2, X_3 = \sigma^c, X_4 = \sigma^a$ , причем  $\sigma^c \leq R_{\text{см.}c}^{\text{вр}}$ ,  $\sigma^a \leq R_{\text{см.}a}^{\text{вр}}$ . Условия возникновения пластических шарниров в сечениях 1, 2 имеют вид

$$\sigma^c dX_1^2 = X_3 dX_1^2 = \sigma^a dX_2^2 = X_4 dX_2^2 = M_{\text{пред}} = \frac{R_t d^3}{6}. \quad (13)$$

Согласно данной схеме предельного равновесия правый и левый концы нагеля считаются защемленными в сечениях 1, 2. Условие равновесия нагеля в проекции на ось у описывается соотношением (1). Рассматривая равновесие части 1–2, получим дополнительно условие по отношению к внутренней паре  $\bar{T}_{\text{на}}, \bar{T}_{\text{нс}}$ :

$$\bar{T}_{\text{на}} h_a + \bar{T}_{\text{нс}} h_c = 2M_{\text{пред}}, \quad (14)$$

где  $\bar{T}_{\text{на}} = \bar{T}_{\text{нс}}$  заданы соотношением (2), а величины  $h_a, h_c$  определяются по аналогии с (11). Отметим, что на рис. 3, 4 штриховыми линиями показаны равнодействующие сил давления нагеля на древесину.

Величины  $X_1, X_2, X_3, X_4$  можно в данном случае находить из решения системы уравнений (1), (13), (14), а далее из условия уравновешенности в проекции на ось у находится  $T_h = \bar{T}_{\text{на}}$  (или  $\bar{T}_{\text{нс}}$ ). Дополнительные изгибающие моменты в сечениях соединяемых деревянных элементов, связанные с деформацией соединения, в данном случае равны  $T_h \bar{h}_a, T_h \bar{h}_c$ , где  $\bar{h}_a = a/2 + \delta - h_a, \bar{h}_c = c/2 + \delta - h_c$ .

В рамках предложенной общей методики можно определять искомое предельное состояние соединения на основе решения следующей задачи математического программирования:

$$\text{требуется найти } \min f(X_1, X_2, X_3, X_4) = \frac{1}{T_h(X_1, X_2, X_3, X_4)}$$

при выполнении ограничений-равенств (1), (13), (14) и параметрических ограничений вида (12).

Вычислительные эксперименты показали, что задачи поиска предельной нагрузки в случае возникновения пластических шарниров в нагеле нерационально решать в форме условно-экстремальных задач математического программирования, вследствие роста числа строгих ограничений-равенств и плохой сходимости процедуры поиска условного экстремума. Кроме того, определенные трудности связаны с выбором схемы предельного равновесия соединения. В связи с этим был разработан алгоритм выявления истинной схемы предельного равновесия. При  $R_{\text{см.}a}^{\text{вр}} \leq R_{\text{см.}c}^{\text{вр}}$ ,  $a < c$  отправной точкой этого алгоритма явилось предположение о возникновении пластического шарнира в нагеле со стороны более широкого элемента  $c$  при напряжениях смятия  $\sigma^c = R_{\text{см.}c}^{\text{вр}}$ . Тогда

$$X_1 = \sqrt{\frac{M_{\text{пред}}}{R_{\text{см.}c}^{\text{вр}} d}}; \quad X_2 = 0,5 \left( a - \frac{R_{\text{см.}c}^{\text{вр}}}{R_{\text{см.}a}^{\text{вр}}} (c - 2X_1) \right).$$

Одна из ветвей этого алгоритма, выводящая на схему жесткого нагеля, соответствует следующим условиям:  $X_2 > 0$ ;  $M_2 = R_{\text{см},a}^{\text{bp}} d X_2^2 < M_{\text{пред}}$ ;  $M_{1''}$  (находится из рассмотрения части 1"-2)  $< M_{\text{пред}}$ . При  $X_2 < 0$  (что недопустимо) организуется пересчет  $X_1 = X_1 + \Delta$  ( $\Delta$  – малая величина, например,  $\Delta = 0,000001$ ), а также пересчет соответствующих значений  $X_2$ , вплоть до достижения значения  $X_2 = 0$ . Это соответствует одностороннему смятию на левом конце нагеля и позволяет проверить условия реализации схем предельного равновесия с одним или двумя пластическими шарнирами в нагеле.

Блок-схема алгоритма выявления действительной схемы предельного равновесия соединения приведена на рис. 5.

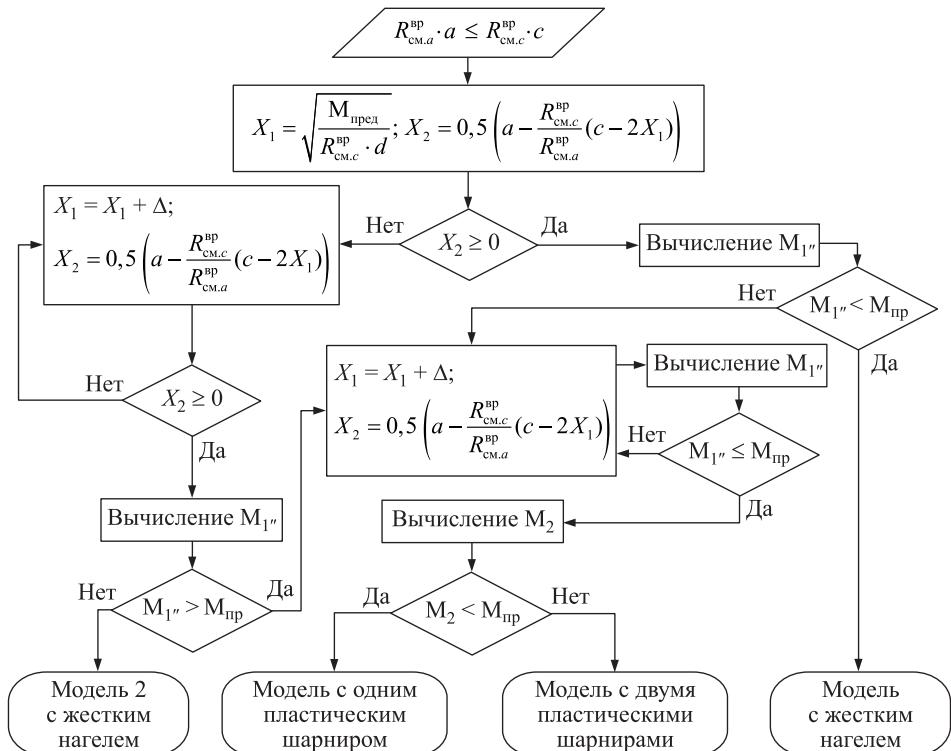


Рис. 5. Алгоритм выявления истинной схемы предельного равновесия

**Примеры расчетов.** В качестве примеров использования разработанной методики определения предельной нагрузки односрезного нагельного соединения рассмотрены соединения растянутых деревянных элементов из сосны с различными толщинами  $a$ ,  $c$ . Шайбы и цилиндрический нагель принятые выполненные из стеклопластика АГ-4С (подобные образцы рассмотрены в [1, 6]). При заданных размерах  $a$ ,  $c$ ,  $\delta$  варьировался диаметр нагеля  $d$ , а следовательно, свойства материалов древесины и шайб (временные сопротивления смятию материалов древесины в нагельном гнезде и временное сопротивление материала шайбы при смятии в отверстии). Толщина шайб принималась равной  $\approx 1/20$  от толщины более тонкого из соединяемых деревянных элементов. Величины  $R_{\text{см},a}^{\text{bp}}$ ,  $R_{\text{см},c}^{\text{bp}}$  считались равными. Они зависят от диаметра нагеля и способа формирования нагельного гнезда. Эти зависимости подробно описаны формулами, приведенными в [4].

Таблица 1. Результаты расчетов соединений растянутых деревянных элементов из сосновы с различными толщинами  $a$ ,  $c$  на цилиндрических нагелях из стеклонаполнителя АГ-4С

Отношение толщин соединяемых элементов $\frac{a, \text{мм}}{c, \text{мм}}$	Диаметр нагеля $d$ , мм	Толщина шайбы $\delta$ , мм	Временное сопротивление материала шайбы при смятии в отверстии $R_{\text{см},a}^{\text{вр}} = R_{\text{см},c}^{\text{вр}}$ , МПа	Временное сопротивление материала шайбы при смятии в отверстии $R_{\text{см},\delta}^{\text{вр}}$ , МПа	Расстояние при нагелях при изгибе $R_{\text{вр}}^{\text{изг}}$ , МПа	Расстояние $X_1$ , мм	Расстояние $X_2$ , мм	Напряжение $X_3$ , МПа	Напряжение $X_4$ , МПа	Расчетная модель Ж/III/2Ш	Несущая способность соединения по методике П.А. Дмитриева $T_h$ , кН	Несущая способность соединения по методике П.А. Дмитриева $T_h$ , кН	Несущая способность соединения по методике П.А. Дмитриева $T_h$ , кН	Расходжение, %
$\frac{30}{50}$	12	2	37,4	244	622	17,7	7,74	—	—	III	12,4	12,4	0	0
	18	2	34,85	217	622	14,1	4,10	—	—	Ж	21,5	21,5	0	0
$\frac{25}{30}$	25	2	31,88	201	622	10,0	0	—	—	Ж	34,0	30,2	11,2	0
	12	5	37,4	244	622	68,4	43,0	1,9	4,6	IIШ	20,6	20,6	0	0
$\frac{100}{150}$	18	5	34,85	217	622	61,6	36,6	5,21	14,7	IIШ	36,3	36,3	0	0
	25	5	31,88	201	622	55,3	30,3	12,5	—	III	56,6	56,6	0	0
$\frac{150}{200}$	12	8	37,4	244	622	98,6	73,6	0,9	1,62	IIШ	24,7	24,7	0	0
	18	8	34,85	217	622	89,8	64,8	2,45	4,70	IIШ	44,0	44,0	0	0
	25	8	31,88	201	622	81,3	56,3	5,7	12,0	IIШ	70,0	70,0	0	0

Примечание. В табл. 1–3: Ж – расчетная модель предельного состояния с жестким нагелем; III – расчетная модель предельного состояния соединения с одним пластическим шарниром в нагеле; IIШ – расчетная модель предельного состояния соединения с двумя пластическими шарнирами в нагеле.

**Расчет предельных нагрузок на односрезные нагельные соединения...**

**Таблица 2. Анализ влияния величины размеров  $a = c$  соединяемых элементов**

Отношение толщин соединяемых элементов $\frac{a}{c}$ , мм		Диаметр нагеля $d$ , мм	Толщина шайбы $\delta$ , мм	Временное сопротивление древесины при снятии в отверстии $R_{\text{вр},a}^{\text{бр}} = R_{\text{см},c}^{\text{бр}}$ , МПа	Временное сопротивление материала шайбы при смятии в отверстии $R_{\text{см},\delta}^{\text{бр}}$ , МПа	Временное сопротивление материала шайбы при изгибе $R_{\text{и}}^{\text{бр}}$ , МПа	Расстояние $X_1$ , мм	Расстояние $X_2$ , мм	Напряжение $X_3$ , МПа	Напряжение $X_4$ , МПа	Расчетная молдель Ж/Ш/2Ш	Несущая способность соединения $T_{\text{н}}$ , кН	Несущая способность соединения по методике П.А. Дмитриева $T_{\text{н}}$ , кН	Расхождение, %
$\frac{30}{30}$	$\frac{50}{50}$													
$\frac{75}{75}$	$\frac{90}{90}$	18	5	34,85	217	622	6,57	6,57	—	—	Ж	30,1	30,1	0
$\frac{100}{100}$	$\frac{150}{150}$						14,7	14,7	—	—	Ж	32,4	32,4	0
$\frac{200}{200}$	$\frac{200}{200}$						24,1	24,1	33,9	33,9	2Ш	36,3	36,3	0
$\frac{30}{30}$	$\frac{50}{50}$						31,6	31,6	19,8	19,8	2Ш	36,3	36,3	0
$\frac{75}{75}$	$\frac{90}{90}$						36,6	36,6	14,7	14,7	2Ш	36,3	36,3	0
$\frac{100}{100}$	$\frac{150}{150}$						61,6	61,6	5,2	5,2	2Ш	36,3	36,3	0
$\frac{200}{200}$	$\frac{200}{200}$						86,6	86,6	2,64	2,64	2Ш	36,3	36,3	0
$\frac{30}{30}$	$\frac{50}{50}$													

**Таблица 3. Анализ влияния толщины шайб**

Отношение толщин соединяемых элементов $\frac{a}{c}$ , мм		Диаметр нагеля $d$ , мм	Толщина шайбы $\delta$ , мм	Временное сопротивление древесины при смятии в отверстии $R_{\text{вр},a}^{\text{бр}} = R_{\text{см},c}^{\text{бр}}$ , МПа	Временное сопротивление материала шайбы при смятии в отверстии $R_{\text{см},\delta}^{\text{бр}}$ , МПа	Временное сопротивление материала шайбы при изгибе $R_{\text{и}}^{\text{бр}}$ , МПа	Расстояние $X_1$ , мм	Расстояние $X_2$ , мм	Напряжение $X_3$ , МПа	Напряжение $X_4$ , МПа	Расчетная молдель Ж/1Ш/2Ш	Несущая способность соединения $T_{\text{н}}$ , кН	Несущая способность соединения по методике П.А. Дмитриева $T_{\text{н}}$ , кН	Расхождение, %
$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$													
12	37,4	244	622	39,7	39,7	5,58	5,58	2Ш	12,2	12,2	0	12,2	12,2	0
				40,4	40,4	5,38	5,38	2Ш	14,5	14,5	0	14,5	14,5	0
				41,2	41,2	5,17	5,17	2Ш	16,6	16,6	0	16,6	16,6	0
				43,4	43,4	4,67	4,67	2Ш	20,6	20,6	0	20,6	20,6	0
				48,6	48,6	3,72	3,72	2Ш	24,7	24,7	0	24,7	24,7	0

В табл. 1 приведены результаты расчетов предельной нагрузки на односрезное нагельное соединение, усиленное пластмассовыми шайбами при варировании размеров  $a$ ,  $c$  соединяемых элементов, диаметра нагеля  $d$  и толщины шайб  $\delta$ . Напряжения от изгиба, соответствующие возникновению пластического шарнира в нагеле, приняты равными  $R_t^{bp} = 622$  МПа. В табл. 2 для случая  $\delta = 5$  мм,  $d = 18$  мм,  $R_t^{bp} = 622$  МПа,  $a = c$  приведены результаты определения  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $T_h$  при последовательном увеличении размеров соединяемых элементов.

В табл. 3 анализируется влияние толщины шайбы ( $\delta = 1, 2, 3, 5, 8$  мм) на несущую способность в образце с нагелем диаметром  $d = 12$  мм и характеристиками материалов  $R_t^{bp} = 622$  МПа,  $R_{cm,\delta}^{bp} = 244$  МПа,  $a = c = 100$  мм,  $R_{cm,a}^{bp} = R_{cm,c}^{bp} = 37,4$  МПа. Представлены результаты определения  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $T_h$  при последовательном увеличении толщины шайбы.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, 2, свидетельствуют о корректной работе предложенного алгоритма и разработанной на его основе программы. Так, при реализации расчетной модели жесткого нагеля получены значения  $X_2 = 0$  (табл. 1), либо  $X_1 = X_2 = 0$  (табл. 2), что свидетельствует о выполнении положения статической теоремы предельного равновесия.

**Заключение.** 1. Предложенный подход и разработанное на его основе математическое и программное обеспечение позволяют корректно решать задачи определения предельной нагрузки на односрезное нагельное соединение в случаях реализации различных расчетных моделей нагеля (жесткая, с одним и двумя пластическими шарнирами).

2. Несущая способность нагельного соединения (в рамках рассмотренных схем его предельного состояния) определяется параметрами  $X_1$ ,  $X_2$ , характеризующими полезную работу нагельных гнезд соединяемых элементов, и равна составляющим  $\bar{T}_{ha} = \bar{T}_{hc} = T_h$ .

3. Определение величин  $X_1$ ,  $X_2$  в случае жесткого нагеля возможно только на основе решения сформулированной задачи нелинейного математического программирования.

4. Решение задачи поиска истинной схемы предельного равновесия удобно проводить на основе разработанного численного алгоритма, блок-схема которого показана на рис. 5. При этом либо происходит переход к решению задачи МР (жесткий нагель), либо численно решается система нелинейных уравнений.

5. Анализ результатов расчетов (табл. 1–3) позволил выявить следующее:

– при  $d = \text{const}$ ,  $\delta = \text{const}$  наблюдается рост  $T_h$  с увеличением длины нагеля (см. табл. 2) до определенного значения  $\bar{l}_h$ , а при  $l_h > \bar{l}_h$  реализуется схема предельного равновесия с 2Ш и несущая способность соединения не изменяется;

– величина  $T_h$  существенно вырастает с ростом толщины шайбы  $\delta$ , но при этом согласно принятой модели деформирования соединения требуется неподвижное прикрепление шайб к древесине.

6. Численные расчеты несущей способности соединений показали хорошую сходимость с результатами других авторов, в частности, с результатами расчета по методике П.А. Дмитриева [1].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Д м и т р и е в П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруговязких и пластических деформаций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск: НИСИ, 1975. 67 с.
2. К о ч е н о в В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. М., 1953. 320 с.
3. И н ж у т о в И.С., Д м и т р и е в П.А., Ш а п о ш н и к о в В.Н. Пространственные совмещенные фермы покрытий. Пространственные конструкции в Красноярском крае. Красноярск: КПИ, 1985. С. 164–168.
4. П у р т о в В.В., П а в л и к А.В. Работа древесины на смятие в отверстиях малых диаметров // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 5. С. 106–110.
5. Г в о з д е в А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Вып. 1. М.: Стройиздат, 1949. 280 с.
6. С т р и ж а к о в а Л.К. Исследование работы и расчет соединений деревянных элементов на kleепластмассовых шайбах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НИСИ, 1974. 20 с.
7. Г р е б е н ю к Г.И., П у р т о в В.В., П а в л и к А.В., К у л е ш о в а Н.И. Экспериментальные исследования соединений деревянных элементов на металлических пластинах и дюбелях, усиленных штампованными зубчатыми шайбами при действии кратковременных нагрузок // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 4. С. 92–109.
8. ANSI/TPI 1-2014: National design standard for metal plate connected wood truss construction. Truss Plate Institute, 2014. 112 p.
9. B l a s s H a n s J., S c h m i d M., L i t z e H., W a g n e r B. Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners // World Conference on Timber Engineering 2000. Whistler, British Columbia, Canada. Proceedings. P. 8.6.4-1–8.6.4-8.
10. С ю й Ю н ь. Повышение несущей способности соединений деревянных конструкций на металлических накладках с использованием металлической зубчатой пластины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 27 с.
11. Г р е б е н ю к Г.И., Б е з д е л е в В.В., П о п о в Б.Н. Минимизация в задачах оптимизации строительных конструкций // Изв. вузов. Строительство и архитектура. Деп. во ВНИИСС, 11.04.84, 14937-84.

**Гребенюк Григорий Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Greb@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Пуртов Вячеслав Васильевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: nsksert@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Павлик Андрей Владимирович**, ст. препод.; E-mail: APsert@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Кулемшова Надежда Ильинична**, магистр; E-mail: nadya.kuleshova.93@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 22.05.17

**Grebenyuk Grigoriy Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: Greb@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Purtov Vyacheslav Vasil'evich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: nsksert@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Pavlik Andrey Vladimirovich**, Senior Lecturer; E-mail: APsert@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kuleshova Nadezhda Il'inichna**, MSc; E-mail: nadya.kuleshova.93@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **CALCULATION OF LIMIT LOADS ON SINGLE SHEAR DOWEL CONNECTION COMPOUNDS OF TENSION WOODEN ELEMENTS USING SOLUTIONS OF FORMABLE CONDITION-EXTREME PROBLEMS**

The variants of the limiting state of a single shear dowel connection of stretched wooden elements with the use of models of rigid and non-rigid dowel are considered. A step-by-step algorithm for revealing the true scheme of the limiting state of the connection was developed. From the standpoint of the static limit equilibrium theorem, it is shown that when implementing a scheme with a rigid dowel, the tasks of determining the ultimate load should be posed and solved as a conditionally extremal problem of non-linear mathematical programming, with the definition of the ultimate load. For cases of realizing the schemes of limiting equilibrium with the formation of plastic hinges of bending in dowel, an algorithm for determining the ultimate load on the connection is developed on the basis of a numerical solution of the system of equations being formed. An extensive numerical experiment was performed and an analysis of the results of calculations of joints with the use of cylindrical steel nails and glued on wood washers was carried out. The peculiarities of the work of the considered type of connection are revealed and comparative results of calculations of other authors are given.

**К e y w o r d s:** wooden elements, timber-to-timber connections, tension, dowel, glued on wood washer, single shear joint, crushing, plastic hinges, ultimate load, conditional extremum, mathematical programming.

### **REFERENCES**

1. Dmitriev P.A. Ekspertimental'nye issledovaniya soedineniy elementov derevyannikh konstruktsiy na metallicheskikh i plastmassovyxkh nagelyakh i teoriya ikh rascheta s uchetom uprugovyazkikh i plasticheskikh deformatsiy: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Experimental studies of connections of elements of wooden designs on metal and plastic dowels and the theory of their calculation taking into account elastic and viscous and plastic deformations: senior doctorate abstract]. Novosibirsk, NISI, 1975. 67 p. (in Russian)
2. Kochenov V.M. Nesushchaya sposobnost' elementov i soedineniy derevyannikh konstruktsiy [Bearing capacity of elements and joints of wooden structures]. Moscow, 1953. 320 p. (in Russian)
3. Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Shaposhnikov V.N. Prostranstvennye sovmeshchennye fermy pokrytiy. Prostranstvennye konstruktsii v Krasnoyarskom krae [Spatial overlapping trusses of coverings. Spatial structures in the Krasnoyarsk Territory]. Krasnoyarsk, KPI, 1985. Pp. 164–168. (in Russian)
4. Purto V.V., Pavlik A.V. Rabota drevesiny na smyatie v otverstiyakh malykh diametrov [Work on wood crushing in the small-diameter holes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005. No. 5. Pp. 106–110. (in Russian)
5. Gvozdев A.A. Raschet nesushchey sposobnosti konstruktsiy po metodu predel'nogo ravnovesiya. Vypusk 1 [Calculation of load-bearing capacity of structures by the method of limiting equilibrium. Issue 1]. Moscow, Stroyizdat, 1949. 280 p. (in Russian)
6. Strizhakova L.K. Issledovanie raboty i raschet soedineniy derevyannikh elementov na kleeplastmassovyxkh shaybakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of work and calculation of joints of wooden elements on glueplastic washers: PhD abstract]. Novosibirsk, NISI, 1974. 20 p. (in Russian)

7. Grebenyuk G.I., Purtov V.V., Pavlik A.V., Kuleshova N.I. Eksperimental'nye issledovaniya soedineniy derevyannykh elementov na metallicheskikh plastinakh i dyubelyakh, usilennykh shtampovannymi zubchatymi shaybami pri deystvii kratkovremennykh nagruzok [Experimental investigation of wooden elements joints on metal plates and dowel teeth, strengthened with stamped gear washers under a short load action]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 4. Pp. 92–109. (in Russian)
8. ANSI/TPI 1–2014: National design standard for the metal plate connected wood truss construction. Truss Plate Institute, 2014. 112 p.
9. Blaas Hans J., Schmidt M., Litze H., Wagner B. Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners. World Conference on Timber Engineering 2000. Whistler, British Columbia, Canada. Proceedings. Pp. 8.6.4-1–8.6.4-8.
10. Syuy Yu'n'. Povyshenie nesushchey sposobnosti soedineniy derevyanых konstruktsiy na metallicheskikh nakladkakh s ispol'zovaniem metallicheskoy zubchatoy plastiny: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Increase of the load-carrying capacity of connections of elements of wooden constructions on metal slips with the use of a metal nail plate: PhD abstract]. Saint Petersburg, 2015. 27 p. (in Russian)
11. Grebenyuk G.I., Bezdelev V.V., Popov B.N. Minimizatsiya v zadachakh optimizatsii stroitel'nykh konstruktsiy [Minimization of optimization problems in building structures.]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. Dep. in VNIIIS 11.04.84, 14937-84. (in Russian)

УДК 69.003 : 658.012.22

Ю.Б. КАЛУГИН, М.С. КЛЫКОВ, Р.Ю. ТУПИЦЫН

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВОЙСТВЕННОГО ГРАФА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО РАЗРЕЗА СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Изложена сущность определения минимального разреза сетевой модели с помощью двойственного графа. Представлено влияние неплоских графов на оптимальное решение. Впервые установлено, что фиктивная работа, совпадающая с основным направлением работ, не должна входить в минимальный разрез. Проиллюстрировано, что величиной шага «сжатия» графика, обеспечивающей оптимальный вариант, является единица времени. В противном случае оптимальный вариант может быть упущен. Реализация предлагаемых подходов позволит определить работы, подлежащие оптимизации, рассчитать величину сокращения их продолжительности и число привлекаемых ресурсов.

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

Строительство объекта – это сложный процесс, включающий большое количество разнообразных работ, выполняемых различными исполнителями и отображаемый календарными графиками. Очень часто на стадии формирования календарных планов и графиков возникает задача сокращения общей продолжительности. Кроме того, при оперативном управлении ходом работ необходимо также корректировать календарный график по срокам.

Сокращение плановых сроков календарных графиков до директивных (сжатие) предполагает в первую очередь интенсификацию работ критического пути (путей). Очевидно, что в первую очередь должны сокращаться критические работы, требующие минимального числа привлекаемых ресурсов для такого сжатия [1–3].

Для поиска таких критических работ сетевой модели обычно используется алгоритм Форда–Фалкерсона о максимальном потоке (минимальном разрезе) и его разновидности [4]. Использование потоковых алгоритмов предполагает целочисленные значения потоков и многошаговые итерационные процедуры [5–11].

Простым и достаточно эффективным методом поиска минимального разреза в сети критических работ сетевого графика является метод, основанный на использовании двойственного графа [12, 13].

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

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

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

Рассмотрим сетевой график, представленный на рис. 1 [12]. Все пути этого графика критические. Над дугами (работами графика, изображенными сплошными линиями) записаны числа, показывающие число привлекаемых ресурсов для сокращения соответствующей работы на единицу времени. Дуги двойственного графа (графика) изображены пунктирными линиями. При движении по дуге двойственного графика в направлении стрелки дуги первичного графика должна пересекать дугу двойственного графика справа налево.

Вершины 1 и 5 двойственного графика лежат на гранях первичного 1-2-4-6 и 1-3-5-6. Вершины 1 и 6 удалены в бесконечность [13].

Решение, найденное в соответствии с примером [12], показывает, что минимальные пути двойственного графика (1-3-5 и 1-4-5) проходят через дуги первичного 1-2, 3-4 и 4-6, 2-5 соответственно. Величины этих путей составляют 4. Это означает, что искомый разрез должен проходить через дуги 1-2, 3-4 или 4-6, 2-5 первичного графика. При сокращении работ 1-2 и 3-4 (4-6 и 2-5) на единицу времени сокращаются критические пути 1-2-4-6, 1-3-4-6 и 1-2-5-6.

Представленный первичный график, хотя и является планарным, представлен не в плоской укладке. После взаимной замены вершин 4 и 5 граф приобретает следующий вид (рис. 2).

Минимальный путь двойственного графика через вершины 1-2-3-4 составит 2 (по дуге 2-3 движение осуществлялось против ее ориентации), т.е. во втором случае величина минимального разреза, проходящего через дуги 1-2 и 4-6 первичного графика, равняется 2.

Таким образом, решение, полученное во втором случае, является оптимальным. И действительно, конфигурация первичного графика ясно показывает, что сокращение работ 1-2 и 4-6 на единицу времени обеспечит сокращение работ критических путей 1-2-5-6, 1-2-4-6 и 1-3-4-6 на ту же величину.

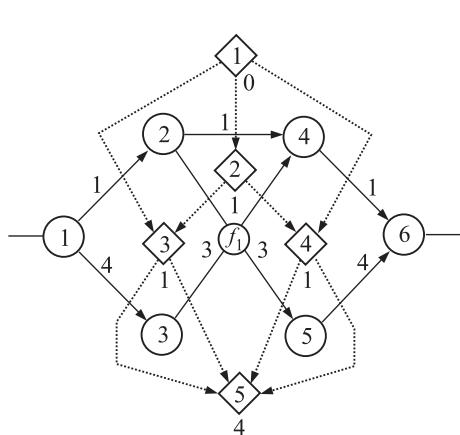


Рис. 1. Первичный и двойственный графики

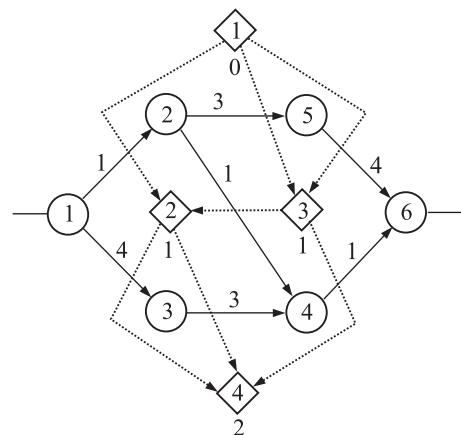


Рис. 2. Первичный график в плоской укладке и двойственный график

Рассмотренные примеры ясно показывают, что корректное использование двойственных графиков для поиска минимальных разрезов возможно только в случае плоской укладки первичных сетевых графиков.

Помимо изложенного условия планарности существует и особенность, связанная с прохождением искомого разреза (сечения) через фиктивные работы (зависимости).

Пусть сеть критических работ имеет следующий вид (рис. 3). Над стрелками проставлены затраты ресурсов для сокращения соответствующей работы на единицу времени.

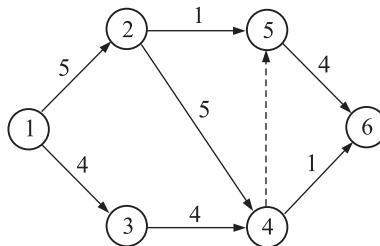


Рис. 3. Критическая сеть прямой ориентации работы 4-5

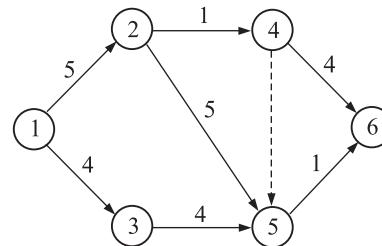


Рис. 4. Критическая сеть с обратной ориентацией работы 4-5

Минимальный разрез (без учета фиктивной работы 4-5) проходит через работы 2-5 и 4-6.

Однако сокращение работ 2-5 и 4-6 не обеспечит сокращения общей продолжительности. Два критических пути 1-2-4-5-6 и 1-3-4-5-6 (включающие фиктивную работу 4-5) остались с прежними параметрами. Поэтому если фиктивная работа, попадающая в разрез, пересекает дугу двойственного графика справа налево, такой разрез исключается (цена сокращения фиктивной работы принимается 1000).

В том же случае если фиктивная работа имеет обратную ориентацию (рис. 4), цена ее сокращения равна 0.

В этом случае единичное сокращение работ 2-4 и 5-6 сократит общую продолжительность.

Кроме того, общая особенность заключается в поиске рациональной стратегии и шага «сжатия» календарного графика (оптимизации по срокам) за счет перераспределения ресурсов на критические работы.

В работе [12] представлен пример такой оптимизации, при которой исходный график (рис. 5) «сжимается» до конечного варианта (рис. 6).

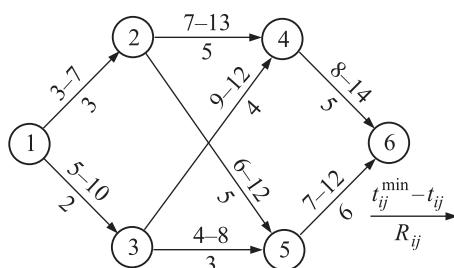


Рис. 5. Первоначальный сетевой график

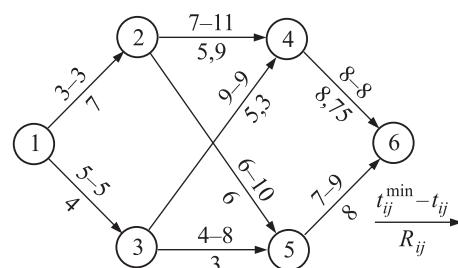


Рис. 6. Итоговый вариант графика

Сокращение критического пути с 36 до 22 дней проводилось за 7 этапов. При этом на некоторых этапах приоритетная для «сжатия» работа сокращается сразу на 2-3 дня.

Представляется, что такой подход не вполне оправдан.

Установлено [14], что величиной шага «сжатия» графика, обеспечивающей оптимальный вариант, является единица времени. После единичного «сжатия» графика производится его перерасчет. В противном случае оптимальный вариант может быть упущен. Так и получилось в представленном примере [12]. В окончательном варианте число привлекаемых ресурсов составило 14,98.

Оптимизация графика в течение 14 этапов при единичном «сжатии» на каждом этапе выявила действительно оптимальный вариант (рис. 7).

Он обеспечивает требуемую величину критического пути (22 дня), но при этом число привлекаемых ресурсов сократилось до 14,5.

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

2. Простым и достаточно эффективным методом поиска минимального разреза в сети критических работ сетевого графика является метод, основанный на использовании двойственного графа. Вместе с тем корректное использование двойственных графиков для поиска минимальных разрезов возможно только в случае плоской укладки первичных сетевых графиков.

3. Существенной особенностью является особенность, связанная с прохождением искомого разреза (сечения) через фиктивные работы (зависимости). Установлено, что фиктивная работа, совпадающая с основным направлением работ, не должна входить в минимальный разрез. Если фиктивная работа имеет обратную ориентацию, цена ее сокращения равна 0.

4. Важной особенностью является выбор поиска рационального шага «сжатия» и соответствующей стратегии оптимизации за счет перераспределения ресурсов на критические работы. Установлено, что величиной шага «сжатия» графика, обеспечивающей оптимальный вариант, является единица времени. После единичного «сжатия» производится перерасчет графика.

5. Реализация изложенных подходов позволит корректно использовать различные методы поиска минимальных разрезов в сетевых графиках (в том числе и с использованием двойственных графов), что в свою очередь будет способствовать поиску оптимальных вариантов «сжатия» календарных графиков и как следствие сокращению планируемой продолжительности строительства.

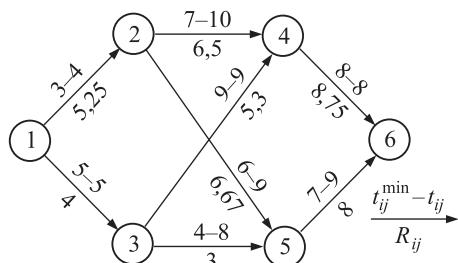


Рис. 7. Оптимальный вариант «сжатия»

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А в д е е в Ю.А. Выработка и анализ плановых решений в сложных проектах. М.: Экономика, 1971. 96 с.
2. Б а р к а л о в П.С., Б у р к о в а И.В., Г л а г о л е в А.В., К о л п а ч е в В.Н. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами. М.: ИПУ РАН, 2002. 65 с.
3. М а л ь ц е в Ю.А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений. М.: Академия, 2010. 320 с.
4. М а й н и к а Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981. 326 с.
5. E l m a b r o u k O m a r M. Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012.
6. H a g a W a y n e A., O ’k e e f e T i m. Crashing PERT networks: a simulation approach. Paper presented at the 4th International conference of the Academy of Business and Administrative Sciences Conference Quebec City, Canada July 12–14, 2001.
7. M u b a r a k S a l e h. Construction Project Scheduling and Control Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2010. 437 p.
8. K o l i s h R., H a r t m a n n S. Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Project Scheduling—Recent Models, Algorithms and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 147–178.
9. N a j i b G., N a b i l S., R i z k J. Crash: an automated tool for schedule crashing // International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 374–394.
10. P e r e r a S. Linear Programming Solution to Network Compression // Journal of the Construction Division. Proceedings of the ASCE. 1980. Vol.106. No. 3. P. 315–316.
11. S a h u K., S a h u M. Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. International Review of Applied Engineering Research. ISSN 2248-9967. 2014. Vol. 4. No. 5. P. 403–412.
12. К л ы к о в М.С., Д е м е н е в а Е.А. Выбор вариантов интенсификации строительства малых водопропускных сооружений железной дороги // Архитектура и строительство России. 2012. № 3. С. 2–12.
13. М а л ы ш е в Б.С. Двойственный сетевой график // Проблемы разработки и внедрения АСУ на машиностроительных предприятиях. Новосибирск, 1972. 164 с.
14. К а л у г и н Ю.Б., Т у п и цы н Р.Ю. Выбор работ для «сжатия» критического пути календарного графика // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 2. С. 29–38.

**Калугин Юрий Борисович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru  
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург  
**Клыков Михаил Степанович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: ms1947@inbox.ru  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
**Тупицын Руслан Юрьевич**, подполковник; E-mail: typisin77@mail.ru  
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург

Получено 12.05.17

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

**Klykov Mikhail Stepanovich**, DSc, Professor; E-mail: ms1947@inbox.ru  
Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia

**Tupitsyn Ruslan Yur'evich**, Lieutenant colonel; E-mail: typisin77@mail.ru  
Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

## **FEATURES USE THE DUAL GRAPH TO DETERMINE THE MINIMUM CUT OF THE NETWORK SCHEDULE**

Set out the essence of the determination of the minimum cut of the network model by using the dual graph. Described the influence of non-planar graphs on the optimal solution. It was first established that the fictitious work, coinciding with the main direction of work should not be included in the minimum cut. Illustrated step value of «compression» of the schedule, providing the best option is a time unit. Otherwise the best option might be missed. Implementation of the proposed approaches will allow to determining the operation to be optimized, calculate the amount of shortening and the number of resources involved.

**K e y w o r d s:** scheduling and project management, critical path method, optimization of schedules on time.

### **REFERENCES**

1. Avdeev Yu. A. Vyrabotka i analiz planovykh resheniy v slozhnykh proektakh [Development and the analysis of planned decisions in complex projects]. Moscow, Economy, 1971. 96 p. (in Russian)
2. Barkalov P.S., Burkova I.V., Glagolev A.V., Kolpachev V.N. Zadachi raspredeleniya resursov v upravlenii proektami [Problems of distribution of resources in project management]. Moscow, IPU RAN, 2002. 65 p. (in Russian)
3. Mal'tsev Yu. A. Economiko-matematicheskie metody proektirovaniya transportnykh sooruzheniy [Economic-mathematical methods of design of transport objects]. Moscow, Academia, 2010. 320 p. (in Russian)
4. Maynica E. Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh [Optimizations algorithms for networks and graphs]. Moscow, Mir, 1981. 326 p. (in Russian)
5. Elmabrouk Omer M. Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012.
6. Haga Wayne A., O'keefe Tim. Crashing PERT networks: a simulation approach. Paper presented at the 4th International conference of the Academy of Business and Administrative Sciences Conference Quebec City, Canada July 12–14, 2001.
7. Mubarak Saleh. Construction Project Scheduling and Control Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2010. 437 p.
8. Kolish R., Hartmann S. Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Project Scheduling—Recent Models, Algorithms and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. Pp.147–178.
9. Najib G., Nabil S., Rizk J. Crash: an automated tool for schedule crashing. International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No. 2. Pp. 374 – 394.
10. Perera S. Linear Programming Solution to Network Compression. Journal of the Construction Division. Proceedings of the ASCE. 1980. Vol.106. No. 3. Pp. 315–316.
11. Sahu K., Sahu M. Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. International Review of Applied Engineering Research. ISSN 2248-9967. 2014. Vol. 4. No. 5. Pp. 403–412.
12. Klykov M.S., Demeneva E.A. Vybor variantov intensifitsirovaniya stroitel'stva malykh vodopropusknikh sooruzheniy zheleznoy dorogi [Choice of options of an intensification of construction of small artificial constructions of the railroad]. Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii [Architecture and construction of Russia]. 2012. No. 3. Pp. 2–12. (in Russian)

13. M a l y s h e v B.S. Dvoystvennyy setevoy grafik [Dual network schedule]. Problemy razrabotki i vnedreniya ASU na mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh [Problems of development and deployment of ACS at machine-building enterprises]. Novosibirsk, 1972. 164 p. (in Russian)
  14. K a l u g i n Yu.B., T u p i t s y n R.Yu. Vybor rabot dlya «sshatiya» kriticheskogo puti kalendarnogo grafika [Choice of activities for crashing the critical path of the network schedule]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 2. Pp. 29–38. (in Russian)
-

УДК 624.131

Л.В. НУЖДИН, К.В. ПАВЛЮК

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ ГРУНТА ПРИ РАСЧЕТЕ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ

Приведен усовершенствованный метод расчета деформаций грунтового основания, сложенного анизотропными грунтами. В основу положен стандартный метод расчета осадок фундаментов согласно действующей нормативной документации СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\*. Напряженно-деформируемое состояние анизотропных грунтов исследовалось в результате численных экспериментов методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS. Учет анизотропных свойств осуществляется путем введения дополнительного коэффициента  $\alpha_a$ , который зависит от степени анизотропии грунтового основания  $k_a$  и геометрических размеров фундамента. Применение данной методики позволяет наиболее достоверно оценить напряженно-деформируемое состояние анизотропного грунтового основания и повысить точность прогнозирования осадок фундаментов.

**Ключевые слова:** деформационная анизотропия, напряженно-деформируемое состояние грунта, анизотропное грунтовое основание, осадки фундамента.

При проектировании оснований фундаментов нормативная литература рекомендует учитывать пространственную работу конструкций, геометрическую и физическую нелинейность, анизотропию, пластические и реологические свойства материалов и грунтов, развитие областей пластических деформаций под фундаментом. Несмотря на то, что практически все нескользящие грунты в той или иной степени обладают анизотропными свойствами, действующие нормы проектирования не учитывают деформационную анизотропию грунтов. Поскольку общепринятые методы прогнозирования деформаций грунтовых оснований и осадок фундаментов [1, 2] не позволяют в должной степени оценить поведение массива грунта при наличии у него анизотропных свойств, повышение точности расчета представляется актуальным.

Учитывая вышесказанное, предлагается корректировка метода расчета осадок фундаментов для учета деформационной анизотропии грунтового основания при использовании схемы линейно-деформируемого полупространства по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\*.

Предлагаемый подход основан на результатах анализа фактических деформаций основания, сложенного анизотропными грунтами, и численных экспериментов по изучению напряженно-деформируемого состояния (НДС) анизотропных грунтов методом конечных элементов. НДС изотропного полупространства было детально проанализировано по результатам расчетов в программном комплексе ANSYS с использованием модели упругой (линейно-деформированной) среды. Деформационные свойства грунтов характеризовались модулем деформации  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ . Степень деформационной анизотропии оценивалась по данным расширенных стан-

дартных инженерно-геологических изысканий, исходя из соотношения модулей деформации грунтов в вертикальном  $E_z$  и горизонтальном  $E_x$  направлениях. Учитывая результаты многолетних экспериментальных исследований, проводимых на кафедре инженерной геологии, оснований и фундаментов Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) [3–6], а также другими исследователями [7], диапазон наиболее вероятного показателя анизотропии  $k_a = E_z/E_x$  принимался равным от 0,5 до 2,0.

Модуль деформации грунта определялся экспериментально известными лабораторными и полевыми методами, рекомендованными СП 22.13330.2011. Значения коэффициентов Пуассона принимались согласно ГОСТ 202276–85 и были равны для песков – 0,27; супесей – 0,30; суглинков – 0,35 и глин – 0,40.

При проведении численных экспериментов (моделировании в программной среде ANSYS) модуль сдвига  $G$  задавался по формуле [8]:

$$G_{xz} = \frac{E_x E_z}{E_x (1 + \mu_z) + E_z (1 + \mu_x)}, \quad (1)$$

где  $E_z$ ,  $E_x$  – модули деформации в вертикальном и горизонтальном направлениях;

$\mu_z$  и  $\mu_x$  – коэффициенты Пуассона грунта соответственно.

В результате численных экспериментов [9] были проанализированы трансверсально-изотропные среды с различными коэффициентами деформационной анизотропии. Для грунтов с коэффициентами анизотропии  $k_a = 0,5$ ; 0,75; 1,33 и 2,0 были получены схемы распределения напряжений по глубине основания как для ленточных фундаментов, так и для квадратных, прямоугольных и круглых в плане. На рис. 1 приведены примеры распределения напряжений в изотропном  $k_a = 1$  и анизотропных  $k_a \neq 1$  грунтовых основаниях столбчатых фундаментов.

На основе обработки многочисленных результатов были получены поправочные коэффициенты  $\alpha_a$  для определения нормальных напряжений от внешней нагрузки в анизотропном грунтовом основании с учетом разной деформируемости грунта в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Коэффициенты  $\alpha_a$  определялись в зависимости от относительной глубины рассматриваемого слоя  $\xi$ , равной  $2z/b$ , с учетом возможности разбивания сжимаемой толщи основания на расчетные слои толщиной не более  $0,4b$ . Значения поправочных коэффициентов  $\alpha_a$  для определения вертикальных напряжений были получены в результате численных экспериментов в программе ANSYS путем соотношения напряжений при коэффициентах анизотропии  $k_a = 1$  и  $k_a \neq 1$ .

Полученные значения поправочных коэффициентов, рекомендуемых для расчета напряжений в основании фундаментов, сложенном анизотропными грунтами, приведены в табл. 1–4. Промежуточные значения коэффициентов рекомендуется определять интерполяцией по аналогии с подходом, принятым в СП 22.13330.2011 для вычисления напряжений в изотропном грунтовом основании.

Расчет деформаций анизотропного грунтового основания фундамента (осадки фундамента) предлагается выполнять в строгом соответствии с СП 22.13330.2011 при среднем давлении под подошвой фундамента  $p$ , не превышающем расчетное сопротивление грунта  $R$ . Согласно СП 22.13330.2011

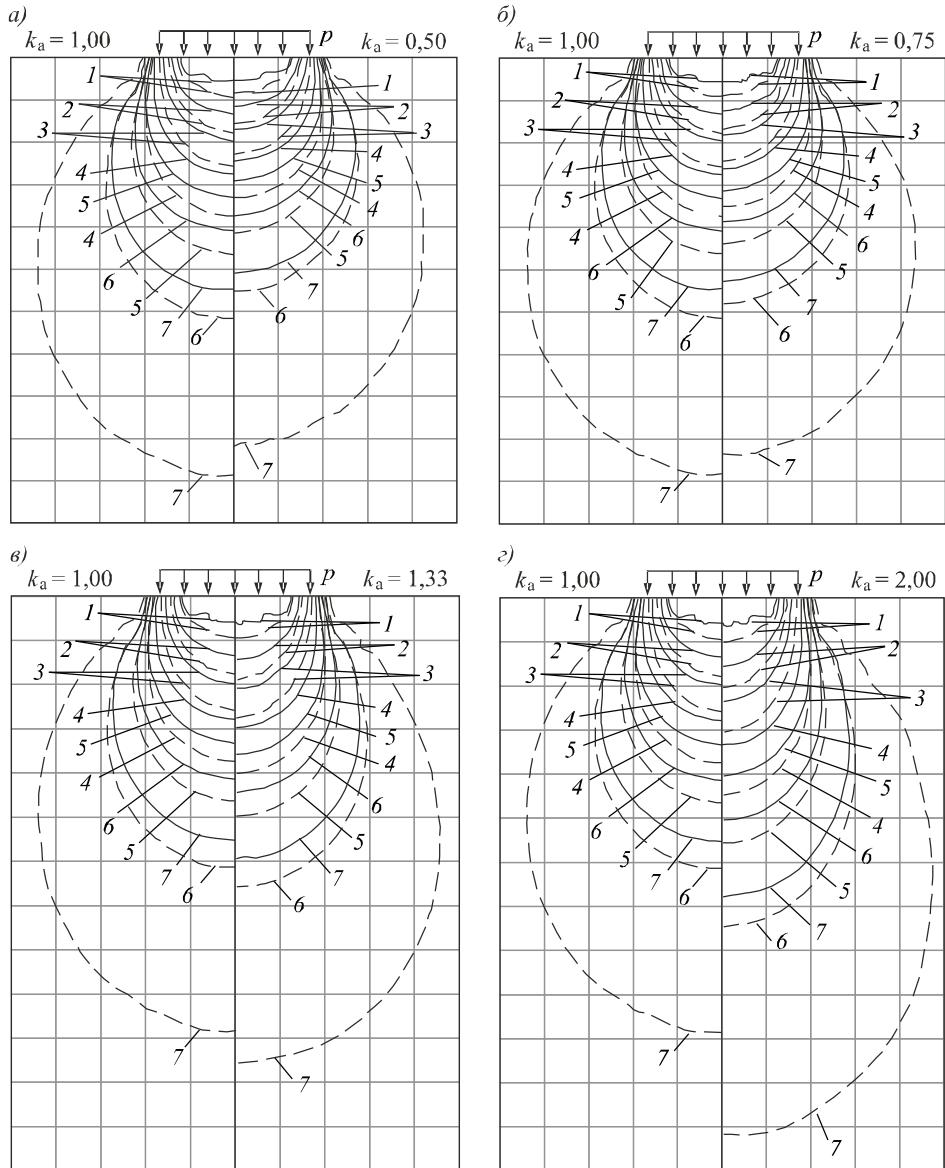


Рис. 1. Распределение дополнительных напряжений ( $\sigma_{zp}$  и  $\sigma_{zp,\alpha}$ ) под подошвой квадратного ( $3 \times 3$  м, сплошная линия) и прямоугольного ( $3 \times 4,2$  м, пунктирная линия) фундаментов в изотропном (слева,  $k_a = 1,00$ ) и анизотропном (справа) грунтах при коэффициенте анизотропии  $k_a = 0,50$ ( $a$ );  $k_a = 0,75$  ( $b$ );  $k_a = 1,33$  ( $c$ );  $k_a = 2,00$  ( $d$ )

1 –  $0,9p$ ; 2 –  $0,8p$ ; 3 –  $0,5p$ ; 4 –  $0,4p$ ; 5 –  $0,35p$ ; 6 –  $0,25p$ ; 7 –  $0,15p$

рекомендуется использовать расчетную схему основания в виде линейно-деформируемого полупространства с условным ограничением глубины сжимаемой толщи грунта  $H_c$ . Нижняя граница сжимаемой толщи основания назначается исходя из определенного соотношения между средними значениями вертикальных напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_{zp}$  под центром подошвы фундамента и от собственного веса грунта  $\sigma_{zg}$ . В качестве границы сжимаемой толщи  $H_c$  рассматривается глубина  $z$ , где выполняется условие равенства  $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$  или для слабых грунтов (при  $E \leq 7$  МПа)  $\sigma_{zp} = 0,2 \sigma_{zg}$ .

Таблица 1. Поправочные коэффициенты  $\alpha_a$  для корректировки вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент $\alpha_a$ при коэффициенте анизотропии $k_a$ , равный							
	для круглых фундаментов				для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,894	0,918	1,015	1,023	0,926	0,948	1,015	1,021
0,8	0,873	0,923	1,034	1,054	0,881	0,928	1,028	1,043
1,2	0,834	0,912	1,055	1,172	0,843	0,917	1,043	1,139
1,6	0,800	0,890	1,074	1,246	0,808	0,895	1,062	1,209
2,0	0,796	0,895	1,109	1,323	0,804	0,899	1,098	1,286
2,4	0,785	0,883	1,117	1,364	0,790	0,887	1,109	1,331
2,8	0,764	0,861	1,109	1,382	0,766	0,866	1,100	1,353
3,2	0,769	0,869	1,123	1,415	0,769	0,869	1,119	1,388
3,6	0,764	0,858	1,123	1,425	0,763	0,863	1,115	1,405
4,0	0,759	0,851	1,115	1,437	0,759	0,852	1,120	1,426
4,4	0,753	0,849	1,110	1,438	0,758	0,846	1,110	1,429
4,8	0,758	0,839	1,113	1,452	0,766	0,844	1,117	1,442
5,2	0,755	0,849	1,113	1,453	0,746	0,836	1,104	1,433
5,6	0,761	0,826	1,109	1,457	0,759	0,828	1,103	1,448
6,0	0,775	0,850	1,125	1,475	0,765	0,824	1,098	1,451
6,4	0,750	0,833	1,083	1,444	0,778	0,822	1,111	1,467
6,8	0,806	0,839	1,129	1,516	0,775	0,825	1,100	1,475
7,2	0,786	0,857	1,107	1,500	0,778	0,833	1,083	1,472
7,6	0,833	0,875	1,167	1,583	0,813	0,844	1,125	1,500
8,0	0,864	0,864	1,182	1,591	0,828	0,862	1,103	1,517
8,4	0,810	0,857	1,095	1,524	0,846	0,846	1,115	1,538
8,8	0,842	0,842	1,105	1,526	0,833	0,875	1,125	1,542
9,2	0,882	0,882	1,176	1,588	0,864	0,864	1,136	1,545
9,6	0,875	0,875	1,125	1,563	0,850	0,900	1,150	1,600
10,0	0,867	0,867	1,133	1,533	0,842	0,842	1,105	1,579
10,4	0,857	0,857	1,143	1,571	0,882	0,882	1,176	1,647
10,8	0,846	0,846	1,154	1,615	0,875	0,875	1,188	1,625
11,2	0,917	0,833	1,167	1,583	0,867	0,867	1,133	1,667
11,6	0,909	0,909	1,182	1,636	0,929	0,857	1,143	1,643
12,0	0,900	0,900	1,200	1,700	0,923	0,923	1,154	1,692

**Учет влияния деформационной анизотропии грунта при расчете осадок фундаментов**

**Таблица 2. Поправочные коэффициенты  $\alpha_a$  для корректировки вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта**

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент $\alpha_a$ при коэффициенте анизотропии $k_a$ , равный							
	для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,4$				для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,8$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,938	0,953	0,972	1,009	0,954	0,964	1,005	1,008
0,8	0,908	0,940	0,988	1,020	0,924	0,948	1,010	1,015
1,2	0,877	0,931	1,022	1,088	0,901	0,943	1,015	1,068
1,6	0,842	0,910	1,039	1,145	0,869	0,924	1,028	1,111
2,0	0,831	0,908	1,070	1,208	0,857	0,920	1,052	1,162
2,4	0,812	0,898	1,086	1,258	0,834	0,906	1,064	1,201
2,8	0,788	0,877	1,081	1,285	0,809	0,888	1,066	1,234
3,2	0,786	0,876	1,100	1,329	0,801	0,884	1,076	1,267
3,6	0,780	0,873	1,104	1,353	0,794	0,876	1,086	1,297
4,0	0,772	0,862	1,097	1,366	0,784	0,869	1,091	1,318
4,4	0,764	0,846	1,098	1,374	0,780	0,860	1,087	1,340
4,8	0,762	0,848	1,105	1,400	0,777	0,854	1,085	1,354
5,2	0,758	0,835	1,099	1,407	0,770	0,841	1,080	1,363
5,6	0,772	0,835	1,101	1,418	0,768	0,838	1,081	1,374
6,0	0,771	0,829	1,086	1,414	0,782	0,839	1,092	1,391
6,4	0,774	0,839	1,097	1,435	0,792	0,844	1,091	1,416
6,8	0,782	0,836	1,091	1,436	0,783	0,841	1,087	1,420
7,2	0,796	0,837	1,102	1,469	0,790	0,839	1,097	1,435
7,6	0,818	0,841	1,114	1,477	0,804	0,839	1,089	1,446
8,0	0,825	0,850	1,100	1,500	0,824	0,843	1,098	1,451
8,4	0,811	0,838	1,081	1,486	0,826	0,848	1,109	1,478
8,8	0,848	0,879	1,121	1,545	0,857	0,857	1,119	1,500
9,2	0,839	0,839	1,097	1,516	0,846	0,846	1,103	1,513
9,6	0,857	0,857	1,143	1,571	0,861	0,861	1,111	1,528
10,0	0,885	0,885	1,115	1,577	0,879	0,879	1,121	1,545
10,4	0,875	0,875	1,167	1,583	0,871	0,871	1,129	1,548
10,8	0,909	0,909	1,182	1,636	0,862	0,862	1,138	1,586
11,2	0,905	0,857	1,143	1,619	0,889	0,852	1,148	1,593
11,6	0,900	0,850	1,150	1,600	0,880	0,880	1,160	1,640
12,0	0,944	0,889	1,167	1,722	0,913	0,913	1,174	1,696

Таблица 3. Поправочные коэффициенты  $\alpha_a$  для корректировки вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент $\alpha_a$ при коэффициенте анизотропии $k_a$ , равный							
	для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 2,4$				для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 3,2$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,955	0,964	0,978	0,987	0,961	0,969	1,002	1,006
0,8	0,933	0,952	0,985	1,009	0,942	0,958	1,005	1,011
1,2	0,922	0,950	1,009	1,055	0,933	0,956	1,008	1,051
1,6	0,897	0,936	1,018	1,085	0,917	0,944	1,014	1,073
2,0	0,885	0,933	1,036	1,123	0,908	0,942	1,025	1,098
2,4	0,864	0,921	1,043	1,150	0,891	0,931	1,029	1,119
2,8	0,842	0,903	1,046	1,175	0,869	0,916	1,029	1,133
3,2	0,830	0,898	1,058	1,204	0,857	0,909	1,036	1,155
3,6	0,816	0,888	1,060	1,232	0,846	0,898	1,039	1,172
4,0	0,804	0,874	1,065	1,252	0,831	0,887	1,040	1,190
4,4	0,795	0,865	1,065	1,270	0,821	0,876	1,037	1,202
4,8	0,789	0,857	1,068	1,292	0,813	0,870	1,042	1,224
5,2	0,787	0,851	1,071	1,305	0,812	0,865	1,047	1,241
5,6	0,790	0,847	1,073	1,323	0,803	0,855	1,039	1,250
6,0	0,791	0,845	1,073	1,345	0,809	0,853	1,044	1,272
6,4	0,788	0,838	1,071	1,354	0,811	0,852	1,049	1,295
6,8	0,807	0,841	1,080	1,375	0,818	0,845	1,055	1,309
7,2	0,800	0,838	1,075	1,375	0,820	0,850	1,060	1,330
7,6	0,819	0,847	1,081	1,403	0,824	0,846	1,066	1,352
8,0	0,818	0,848	1,076	1,409	0,821	0,845	1,060	1,357
8,4	0,833	0,850	1,083	1,433	0,831	0,844	1,065	1,377
8,8	0,836	0,855	1,091	1,455	0,845	0,845	1,070	1,394
9,2	0,843	0,863	1,098	1,471	0,862	0,862	1,077	1,431
9,6	0,851	0,851	1,106	1,489	0,867	0,867	1,100	1,450
10,0	0,884	0,884	1,116	1,535	0,875	0,857	1,089	1,464
10,4	0,875	0,875	1,125	1,550	0,885	0,865	1,096	1,500
10,8	0,892	0,892	1,135	1,595	0,878	0,857	1,102	1,510
11,2	0,886	0,886	1,143	1,571	0,889	0,867	1,133	1,556
11,6	0,879	0,879	1,121	1,606	0,905	0,881	1,143	1,571
12,0	0,903	0,871	1,129	1,613	0,900	0,875	1,125	1,575

**Учет влияния деформационной анизотропии грунта при расчете осадок фундаментов**

**Таблица 4. Поправочные коэффициенты  $\alpha_a$  для корректировки вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта**

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент $\alpha_a$ при коэффициенте анизотропии $k_a$ , равный							
	для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 5$				для ленточных фундаментов			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,962	0,969	1,001	1,004	0,962	0,969	1,002	1,006
0,8	0,944	0,958	1,003	1,010	0,947	0,959	1,004	1,010
1,2	0,939	0,958	1,005	1,046	0,942	0,959	1,005	1,046
1,6	0,930	0,948	1,009	1,064	0,933	0,950	1,008	1,064
2,0	0,927	0,947	1,017	1,084	0,935	0,951	1,016	1,080
2,4	0,917	0,938	1,017	1,094	0,931	0,945	1,015	1,088
2,8	0,900	0,924	1,010	1,095	0,919	0,933	1,007	1,086
3,2	0,894	0,919	1,011	1,106	0,914	0,928	1,005	1,088
3,6	0,884	0,909	1,009	1,113	0,905	0,920	1,000	1,089
4,0	0,870	0,898	1,004	1,116	0,895	0,908	0,990	1,085
4,4	0,863	0,886	1,004	1,125	0,886	0,896	0,982	1,082
4,8	0,852	0,878	1,004	1,135	0,876	0,888	0,977	1,081
5,2	0,846	0,870	1,000	1,144	0,866	0,879	0,971	1,079
5,6	0,841	0,862	1,000	1,153	0,857	0,865	0,960	1,072
6,0	0,832	0,855	0,994	1,162	0,846	0,856	0,952	1,077
6,4	0,835	0,848	1,000	1,177	0,837	0,842	0,944	1,071
6,8	0,834	0,841	1,000	1,186	0,822	0,832	0,935	1,065
7,2	0,835	0,842	1,000	1,203	0,811	0,817	0,926	1,069
7,6	0,837	0,837	1,000	1,220	0,807	0,807	0,922	1,066
8,0	0,841	0,841	1,018	1,248	0,791	0,797	0,911	1,063
8,4	0,838	0,838	1,010	1,257	0,787	0,787	0,907	1,073
8,8	0,837	0,837	1,010	1,276	0,776	0,783	0,902	1,077
9,2	0,846	0,835	1,022	1,297	0,766	0,774	0,898	1,073
9,6	0,847	0,835	1,024	1,318	0,758	0,758	0,886	1,076
10,0	0,848	0,835	1,038	1,342	0,754	0,746	0,889	1,079
10,4	0,851	0,838	1,041	1,365	0,738	0,738	0,877	1,082
10,8	0,870	0,841	1,058	1,406	0,735	0,726	0,872	1,085
11,2	0,862	0,831	1,062	1,415	0,726	0,717	0,867	1,088
11,6	0,869	0,836	1,066	1,443	0,716	0,706	0,862	1,092
12,0	0,862	0,828	1,069	1,466	0,698	0,689	0,849	1,094

Осадка основания фундамента  $S$ , сложенного анизотропными грунтами, с использованием расчетной схемы линейно-деформируемого полупространства определяется методом послойного суммирования:

$$S = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zpa,i} - \sigma_{z\gamma,i})h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z\gamma,i} h_i}{E_{e,i}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

$\sigma_{zpa,i}$  – среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в  $i$ -м слое анизотропного грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта, принимаемая не более 0,4 ширины подошвы фундамента;

$E_i$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви первичного загружения;

$\sigma_{z\gamma,i}$  – среднее значение вертикального напряжения в  $i$ -м слое грунта по

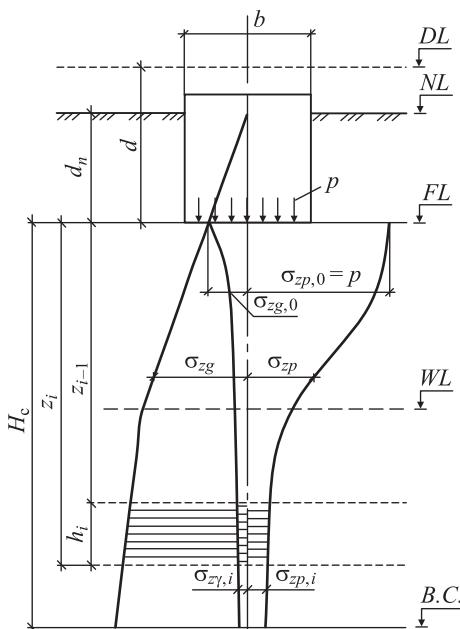


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений в линейно-деформируемом полупространстве  $DL$  – отметка планировки;  $NL$  – отметка поверхности природного рельефа;  $FL$  – отметка подошвы фундамента;  $WL$  – уровень подземных вод;  $B.C.$  – нижняя граница сжимаемой толщи;  $d, d_n$  – глубина заложения фундамента соответственно от уровня планировки и поверхности природного рельефа;  $b$  – ширина фундамента;  $p$  – среднее давление под подошвой фундамента;  $\sigma_{zp}, \sigma_{zp,0}$  – вертикальное напряжение от внешней нагрузки на глубине  $z$  от подошвы фундамента и на уровне подошвы;  $\sigma_{zg}, \sigma_{zg,0}$  – вертикальное напряжение от собственного веса грунта на глубине  $z$  от подошвы фундамента и на уровне подошвы;  $\sigma_{z\gamma,i}$  – вертикальное напряжение от собственного веса вынутого в котловане грунта в середине  $i$ -го слоя на глубине  $z$  от подошвы фундамента;  $H_c$  – глубина сжимаемой толщи

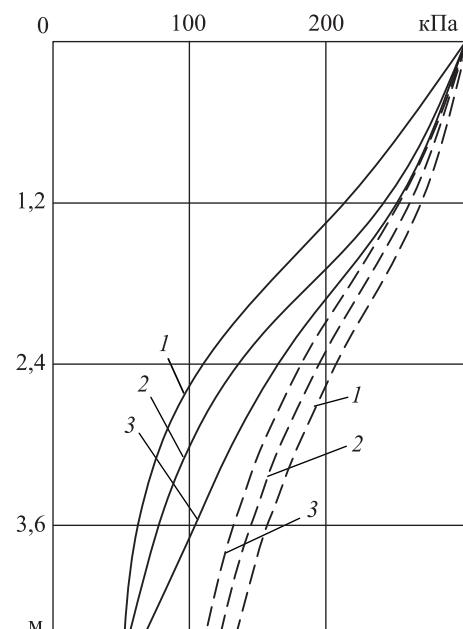


Рис. 3. Распределение дополнительных напряжений ( $\sigma_{zpa}$ ) под подошвой квадратного ( $3 \times 3$  м, сплошная линия) и ленточного ( $3 \times 30$  м, пунктирная линия) фундаментов в анизотропных грунтах

$$1 - k_a = 0,50; 2 - k_a = 1,00; 3 - k_a = 2,00$$

вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса грунта, выбранного при отрывке котлована для фундамента;

$E_{e,i}$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви вторичного загружения.

Согласно ранее проведенным исследованиям [10] при наличии соответствующих достоверных данных определения модулей деформации грунтов толщину расчетных слоев рекомендуется уменьшать (при использовании материалов полевых исследований расклинивающим дилатометром принимать равным 0,2 м).

При этом распределение вертикальных напряжений по глубине основания принимается в соответствии со схемой на рис. 2.

Вертикальные напряжения от внешней нагрузки  $\sigma_{zpa,i}$ , как известно, зависят от размеров, формы и глубины заложения фундамента, распределения давления на грунт по его подошве и анизотропных свойств грунтов основания. Для прямоугольных, круглых и ленточных фундаментов значения  $\sigma_{zpa,i}$  на глубине  $z$  от подошвы фундамента по вертикали, проходящей через центр подошвы, определяются по формуле

$$\sigma_{zpa,i} = \alpha \times \alpha_a \times p, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, принимаемый по таблице 5.8 СП 22.13330.2011;

$\alpha_a$  – поправочный коэффициент, учитывающий деформационную анизотропию грунта, приведенный в табл. 1–4;

$p$  – среднее давление под подошвой фундамента.

Вертикальное напряжение от собственного веса грунта на отметке подошвы фундамента и на глубине  $z$  от подошвы прямоугольных (квадратных, круглых и ленточных) фундаментов определяется по формуле:

$$\sigma_{zg,i} = \alpha \times \sigma_{zg,0}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – то же, что в формуле (3);

$\sigma_{zg,0}$  – вертикальное напряжение от собственного веса грунта на отметке подошвы фундамента.

В качестве примера применения предложенной методики приведены результаты расчета осадок столбчатых фундаментов с размерами в плане  $b \times l = 3 \times 3$  м и ленточных – с шириной подошвы  $b = 3$  м. Среднее давление под подошвой фундаментов составляло  $p = 303$  кПа. При этом было рассмотрено однородное грунтовое основание, сложенное супесью пылеватой твердой с модулем вертикальной деформации  $E_z = 11,5$  МПа и условно принятой степенью деформационной анизотропии  $k_a = 0,5; 1,0$  и  $2,0$  (т.е. модуль горизонтальной деформации был соответственно равен  $E_x = 23, 11,5$  и  $5,75$  МПа). Толщина расчетных слоев в данных расчетах принималась  $h_i = 0,4b = 1,2$  м.

Полученные результаты расчета деформаций изотропного и анизотропного грунтовых оснований фундаментов приведены в табл. 5. На рис. 3 показаны графики распределения напряжений от внешней дополнительной нагрузки для столбчатого фундамента при залегании в основании изотропного или анизотропных грунтов с коэффициентами деформационной анизотропии  $k_a = 0,5$  и  $2,0$ .

Анализ полученных данных свидетельствует о существенном влиянии анизотропных свойств грунтов на результаты расчета деформаций грунтового основания. Для столбчатых фундаментов расчетные значения осадок фун-

Таблица 5. Значения осадок столбчатого и ленточного фундаментов с учетом деформационной анизотропии грунтового основания

Тип фундамента	Осадка $S$ , см, и глубина сжимаемой толщи $H_c$ , м, при степени анизотропии $k_a$ , равной		
	$k_a = 0,5$	$k_a = 1$	$k_a = 2$
Столбчатый	3,86 (4,00)	4,58 (4,40)	5,47 (5,10)
Ленточный	6,7 (6,60)	7,48 (7,20)	8,05 (7,50)

даментов с учетом деформационной анизотропии могут отличаться до 19–20 % по сравнению с изотропной средой и до 42 % между собой при разной степени анизотропии грунтов, для ленточных фундаментов различие может составлять 7–12 % по сравнению с изотропной средой и более 20 % между собой. Наряду с численными расчетами выполнялись натурные наблюдения за осадками фундаментов, которые свидетельствуют о достаточно хорошей сходимости полученных результатов с реальными деформациями грунтового основания.

**Выводы.** Полученные результаты исследований подтверждают вывод о том, что анизотропные свойства грунтов могут оказывать значительное влияние на напряженно-деформируемое состояние грунтового основания и учет этого фактора предлагаемым методом позволяет более обоснованно подходить к прогнозированию осадок фундаментов. При коэффициенте деформационной анизотропии  $k_a < 1$  наблюдается некоторое уменьшение осадок фундаментов, а при  $k_a > 1$  деформации грунтового основания возрастают.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тер-Мартirosyan Z.G. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 552 с.
2. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с.
3. Нуждин Л.В., Коробова О.А., Нуждин М.Л. Практический метод расчета осадок фундаментов с учетом деформационной анизотропии грунтов основания // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та «Строительство и архитектура». 2014. № 4. С. 245–263.
4. Коробова О.А., Бирюкова О.А. Методологические подходы к вопросу учета деформационной анизотропии в расчетах грунтовых оснований // Актуальные вопросы строительства: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014. С. 11–16.
5. Коробова О.А. Напряженно-деформированное состояние анизотропных слоев различной мощности под жесткими штампами и фундаментами и его особенности // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1995. № 5-6. С. 35–40.
6. Криворотов А.П., Коробова О.А. Влияние мощности анизотропного слоя на его напряженно-деформированное состояние // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1987. № 12. С. 104–108.
7. Швейцов Г.И., Коробова О.А. Исследование деформационной анизотропии лессовых просадочных грунтов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1997. № 9. С. 93–97.
8. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982. 320 с.
9. Nuzhdin L.V., Pavlyuk K.V. Analysis of stress-strain state of anisotropic soil basement // Challenges and Innovations in Geotechnics: Proc. of the 8th Asian young geotechnical engineers conference. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. P. 277–282.

10. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozmin ykh K.V. Pazdan parçalayan dilatometrə çöl şəraitində quruntuların tədqiqat üsulu və bünövrələrin çöküntüsünün hesablanması // İnşaat və Memarlıqda elmi-texniki tərəqqi: Beynəlxalq elmi-texniki konfransın materialları. Azərbaycan, Bakı: Şərq-Qərb, 2014. P. 182–188.

**Нуждин Леонид Викторович**, канд. техн. наук, проф.; E-mail: nuzhdin\_ml@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
**Павлюк Ксения Вячеславовна**, асп.; E-mail: xenia0822@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 18.05.17

**Nuzhdin Leonid Viktorovich**, PhD, Professor; E-mail: nuzhdin\_ml@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)  
Perm National Research Polytechnic University, Russia  
**Pavlyuk Kseniya Vyacheslavovna**, Post-graduate Student; E-mail: xenia0822@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **INFLUENCE DEFORMATION ANISOTROPY IN THE CALCULATION OF SETTLEMENTS OF FOUNDATION**

The paper presents the improved calculation method of the deformations of soil basement folded by anisotropic soils. It is based on the standard calculation method of foundations settlements according to current regulatory documents SP 22.13330.2011 «Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNiP 2.02.01–83 \*». The stress-strain state of anisotropic soils was studied as a result of numerical experiment by the finite element method using the software complex ANSYS. Accounting anisotropic properties is carried out by introducing in calculation an additional coefficient  $a_a$ , which depends on soil anisotropy index of the soil basement  $k_a$  and geometrical dimensions of the foundation. The application of this technique allows the most reliable estimate of the stress-strain state of an anisotropic ground base and improve the accuracy of calculating of the settlement of foundations.

**К e y w o r d s:** deformation anisotropy, stress-strain state of soil, anisotropic soil foundation, settling of the foundation.

### **REFERENCES**

1. Ter-Martirosyan Z.G. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Moscow, ASV, 2009. 552 p. (in Russian)
2. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1966. 708 p. (in Russian)
3. Nuzhdin L.V., Korobova O.A., Nuzhdin M.L. Prakticheskiy metod rascheta osadok fundamentov s uchetom deformatsionnoy anizotropii gruntov osnovaniya [The practical calculation method of foundation settlements with regard strain anisotropy of the soil basement]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta «Stroitel'stvo i arkhitektura» [PNRPU Bulletin. Construction and Architecture]. 2014. No. 4. Pp. 245–263. (in Russian)
4. Korobova O.A., Biryukova O.A. Metodologicheskie podkhody k voprosu ucheta deformatsionnoy anizotropii v raschetakh gruntuoviyh osnovaniy [Methodological approaches to the problem of taking into account deformation anisotropy in calculations of soil bases]. Aktual'nye voprosy stroitel'stva: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Topical issues of construction: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2014. Pp. 11–16. (in Russian)

5. Korobova O.A. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie anizotropnykh sloev razlichnoy moshchnosti pod zhestkimi shtampami i fundamentami i ego osobennosti [Stress-strain state of anisotropic layers of different power under rigid stamp and basements and its features]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [Proceedings of universities. Construction and architecture]. 1995. No. 5–6. Pp. 35–40. (in Russian)
  6. Krivorotov A.P., Korobova O.A. Vliyanie moshchnosti anizotropnogo sloya na ego napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie [Effect of the power of an anisotropic layer on its stress-strain state]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [Proceedings of universities. Construction and architecture]. 1987. No. 12. Pp. 104–108. (in Russian)
  7. Shvetsov G.I., Korobova O.A. Issledovanie deformatsionnoy anizotropii lessovykh prosadochnykh gruntov [Investigation of the deformation anisotropy of loess subsidence soils]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [Proceedings of universities. Construction and architecture]. 1997. No. 9. Pp. 93–97. (in Russian)
  8. Ambartsymyan S.A. Raznomodul'naya teoriya uprugosti [Multimodulus theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1982. 320 p. (in Russian)
  9. Nuzhdin L.V., Pavlyuk K.V. Analysis of stress-strain state of anisotropic soil basement. Challenges and Innovations in Geotechnics: Proc. of the 8th Asian young geotechnical engineers conference. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. Pp. 277–282.
  10. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozminykh K.V. The calculation of foundation settlements on the result of field soil tests by WD-100 relaxation method. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Azerbaijan, Baku: Šarq-Qərb, 2014. Pp. 182–188.
-

УДК 624.131.6

Ю.П. СМОЛИН, А.М. КАРАУЛОВ, К.В. ВОСТРИКОВ

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСАДКИ ВОДОНАСЫЩЕННОГО АНИЗОТРОПНОГО ГРУНТА, УПЛОТНЯЕМОГО В УСЛОВИЯХ КОМПРЕССИИ

Строительство зданий и сооружений на водонасыщенных глинистых грунтах сопряжено с рядом сложностей, вызванных длительно протекающими процессами отжатия воды из пор грунта и переупаковки частиц в процессе уплотнения. Пренебрежение либо неправильный учет параметров фильтрационной (первичной) консолидации и ползучести (вторичной консолидации) скелета глинистых грунтов может привести к существенному увеличению периода стабилизации осадок основания во времени, а также к потере устойчивости основания при интенсивном возведении сооружения. В случае, если основание сложено грунтами с неоднородным изменением свойств в пространстве, расчет параметров консолидации существенно усложняется. Даётся решение задачи об определении осадки водонасыщенного анизотропного грунта во времени с учетом фильтрационной консолидации и ползучести скелета грунта. Для численной оценки полученных теоретических результатов были экспериментальным путем исследованы следующие необходимые параметры опытного грунта: физические характеристики, параметры меры ползучести, поровое давление, коэффициент мгновенной сжимаемости, коэффициент фильтрации и другие требуемые для расчета параметры. Для определения порового давления в водонасыщенном грунте авторами был изготовлен датчик на основе кремниевых тензорезисторов. Приведены экспериментальные и теоретические значения изменения порового давления и осадки грунта во времени. На основании полученных данных разработан метод, позволяющий с высокой точностью прогнозировать осадку анизотропного водонасыщенного грунта при одномерном уплотнении.

**Ключевые слова:** анизотропия, компрессионный прибор, мера ползучести, датчик порового давления, фильтрационная консолидация, коэффициент фильтрации, мгновенная деформация, кремниевый тензорезистор, осадка грунта во времени.

Как известно, процесс уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов протекает во времени, при этом деформирование происходит за счет перераспределения общих напряжений между скелетом грунта и поровой водой. Длительность этого процесса зависит от таких факторов, как коэффициент фильтрации, сжимаемость скелета и поровой воды, ползучесть грунта, свойства анизотропной среды и др.

Упрощением реального строения грунта является представление его в виде изотропного тела, т. е. тела, у которого физико-механические свойства по любому направлению одинаковые. Однако это условие применимо не ко всем разновидностям грунтов. Например, ленточные глины, заторфованные и заилованные массивы грунтов обладают выраженной анизотропией, т.е. имеют различные физико-механические свойства в разных направлениях.

Расчет деформаций основания при проектировании ответственных сооружений на водонасыщенных анизотропных грунтах требует применения механики анизотропных сред.

Решение задачи об уплотнении водонасыщенного изотропного грунта с учетом фильтрационной консолидации и ползучести скелета было выполнено проф. В.А. Флориным [1]. К менее изученному направлению можно отнести фильтрационное уплотнение анизотропного грунта, так как результаты исследований в этом направлении представлены в немногочисленных работах. Таким образом, исследование процесса деформирования анизотропного грунта является актуальной задачей.

В этой связи авторы поставили цель: разработать метод расчета осадки анизотропного водонасыщенного грунта при одномерном уплотнении. Представленное решение задачи относится к некоторой идеализированной расчетной схеме, но эта схема соответствует реальным условиям консолидации анизотропного грунта при компрессии.

Как известно, уплотнение грунта при компрессии основывается на изменении плотности грунта от нагрузки в условиях невозможности бокового расширения. В общем случае уравнения обобщенного закона Гука при анизотропии имеют вид шести линейных однородных зависимостей. В этих уравнениях имеются 36 независимых коэффициентов. Если структура грунта обладает симметрией, уравнение обобщенного закона Гука упрощается, так как некоторые независимые коэффициенты при напряжениях и деформациях равны нулю или зависят от других коэффициентов. Формирование структуры грунта таково, что направление силы тяжести совпадает с осью симметрии и в этой плоскости имеется одно главное направление и бесконечное множество главных направлений в плоскости, нормальной к первому, т.е. грунт обладает трансверсальной изотропией [2]. Закон Гука для такого анизотропного грунта запишется в виде:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z, \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{23}\sigma_z, \\ \varepsilon_z &= a_{13}(\sigma_x + \sigma_y) + a_{33}\sigma_z.\end{aligned}\tag{1}$$

Поскольку грунт в направлениях  $x$  и  $y$  имеет одинаковые физические и механические характеристики, то  $a_{11} = a_{22}$ , поэтому уравнения (1) имеют всего четыре независимых коэффициента.

В случае компрессии запишем относительные деформации грунта:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= a_{13}(\sigma_x + \sigma_y) + a_{33}\sigma_z, \\ \varepsilon_x &= \varepsilon_y = 0,\end{aligned}\tag{2}$$

где  $a_{13} = a_{33}$  – коэффициенты, определяемые опытным путем.

Обозначим  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{\text{бок}}$  и  $\sigma_z = \sigma_{\text{ос}}$ .

Соотношение боковых  $\sigma_{\text{бок}}$  и осевых  $\sigma_{\text{ос}}$  давлений при компрессии будет равно  $\sigma_{\text{бок}} = \xi\sigma_{\text{ос}}$ , где  $\xi$  – коэффициент бокового давления.

Определим осевую продольную деформацию

$$\varepsilon_z = 2a_{13}\xi\sigma_{\text{ос}} + a_{33}\sigma_{\text{ос}}.\tag{3}$$

Учитывая (1), находим  $\xi$  из условия  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ :

$$\xi = \frac{a_{13}}{a_{11} + a_{12}}. \quad (4)$$

Тогда относительные деформации анизотропного грунта при компрессии

$$\varepsilon_z = \frac{2a_{13}^2 + a_{33} \cdot (a_{11} + a_{12})}{a_{11} + a_{12}} \cdot \sigma_{oc}. \quad (5)$$

Выражение для полной деформации от постоянно нарастающих нагрузок во времени от  $\tau$  до  $t$  записывается:

$$\varepsilon_z(t, \tau) = \sigma(\tau)a_0 - \int_{\tau}^t \sigma(\tau) \frac{\partial e(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (6)$$

где  $\partial e(t, \tau)$  – деформация от единичной нагрузки, которая складывается из мгновенной относительной деформации  $\varepsilon'$  и деформации ползучести (меры ползучести)  $\varepsilon''$  [3, 4];

$a_0$  – параметр мгновенной деформации грунта.

$$\varepsilon_z(t, \tau) = \varepsilon' + \varepsilon''. \quad (7)$$

Для математического описания меры ползучести скелета грунта при одномерном уплотнении В.А. Флориным [1, 5] была принята экспоненциальная функция вида

$$\varepsilon(t, \tau) = a_1 \left( 1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)} \right), \quad (8)$$

где  $a_1, \gamma_1$  – параметры меры ползучести, определяемые из опыта.

Найдем полную деформацию грунта при единичной нагрузке, приложенной в момент  $t$ :

$$\varepsilon(t, \tau) = a_0 + a_1 \left( 1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)} \right). \quad (9)$$

Параметр мгновенной деформации  $a_0$  для анизотропного грунта будет равен:

$$a_0 = \frac{E_1(1 - v_1) - 2v_2^2 E_2}{E_1 E_2 (1 - v_1 - v_2)}, \quad (10)$$

где  $E_1, E_2$  – модули деформации грунта в поперечном и продольном направлениях соответственно;

$v_1, v_2$  – коэффициенты бокового расширения, характеризующие поперечные и продольные деформации соответственно.

Деформацию при одномерном уплотнении можно выразить через изменение коэффициента пористости

$$\varepsilon_z(t, \tau) = \frac{e_0 - e(t, \tau)}{1 + e_{cp}}, \quad (11)$$

где  $e_0$  – начальный коэффициент пористости грунта;

$e(t, \tau)$  – коэффициент пористости за период времени;

$e_{cp}$  – средний коэффициент пористости грунта в рассматриваемом диапазоне уплотнения.

Приравнивая деформации (6) и (11), выражаем изменение коэффициента пористости во времени. Затем это выражение дважды дифферентируем по  $t$  и получим

$$\begin{aligned} \gamma_1 \frac{\partial e(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial^2 e(t, \tau)}{\partial t^2} = \\ = -(1+e_{cp}) \cdot \left[ a_0 \gamma_1 \frac{\partial \sigma(t, \tau)}{\partial t} + a_0 \frac{\partial^2 \sigma(t, \tau)}{\partial t^2} - a_1 \gamma_1 \frac{\partial \sigma(t, \tau)}{\partial t} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Основное уравнение фильтрационной консолидации для одномерного уплотнения –

$$\frac{\partial e(t, \tau)}{\partial t} = (1+e_{cp}) \frac{\partial}{\partial z} k_\phi \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (13)$$

где  $k_\phi$  – коэффициент фильтрации грунта;

$H$  – давление в поровой воде.

Дифферентируем (13) по  $t$ :

$$\frac{\partial^2 e(t, \tau)}{\partial t^2} = (1+e_{cp}) \frac{\partial}{\partial z} k_\phi \frac{\partial^2 H}{\partial z \partial t}. \quad (14)$$

Учитывая (13) и (14), преобразуем уравнение (12)

$$\gamma_1 a_0 \frac{\partial \sigma(t, \tau)}{\partial t} + a_0 \frac{\partial^2 \sigma(t, \tau)}{\partial t^2} + a_1 \gamma_1 \frac{\partial \sigma(t, \tau)}{\partial t} = \gamma k_\phi \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + k_\phi \frac{\partial^3 H}{\partial z^2 \partial t}. \quad (15)$$

Уравнение равновесия для любого момента времени имеет вид

$$q = \sigma + u, \quad (16)$$

где  $q$  – внешняя нагрузка;

$\sigma$  – давление в скелете грунта;

$u$  – давление в поровой воде.

Если не учитывать собственный вес воды, заполняющей поры грунта, напор будет равен  $H = u/\gamma$ .

Из уравнения равновесия (16) имеем

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\frac{\partial P_u}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (17)$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды.

Учитывая (17) и подставляя в уравнение (15), получим основное уравнение уплотнения водонасыщенного грунта с учетом линейной ползучести скелета грунта при принятом виде меры ползучести

$$\gamma \gamma_1 (a_0 + a_1) \frac{\partial H}{\partial t} + \gamma_1 a_0 \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = k_\phi \left( \gamma_1 \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{\partial^3 H}{\partial z^2 \partial t} \right). \quad (18)$$

Решая это уравнение методом Фурье, определим напор в поровой воде к моменту времени  $t$ :

$$H = \frac{4q}{\gamma\pi} \cdot \sum_{1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i} [C_i e^{\beta'_i(t-\tau)} - D_i e^{\beta''_i(t-\tau)}] \cdot \sin \frac{i\pi z}{h}, \quad (19)$$

где  $h$  – высота слоя грунта.

Напряжения в скелете грунта:

$$\sigma(t, \tau) = q - \gamma H = q \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i} [C_i e^{\beta'_i(t-\tau)} - D_i e^{\beta''_i(t-\tau)}] \right\} \cdot \sin \frac{i\pi z}{h}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (6), определяется продольная деформация образца:

$$\varepsilon_z(t, \tau) = qa_0 - a_1 \gamma_1 \int_{\tau}^t \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i} [C_i e^{\beta'_i(t-\tau)} - D_i e^{\beta''_i(t-\tau)}] \cdot \sin \frac{i\pi z}{h} \right\} e^{-\gamma_1(t-\tau)} dt, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} C_i &= \frac{A_i + \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{k_\phi}{\gamma a_0}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}}, \quad D_i = \frac{A_i - \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{k_\phi}{\gamma a_0}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}}, \\ A_i &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\gamma_1}{a_0} (a_0 + a_1) + \frac{k_\phi}{\gamma a_0} \right], \quad B_i = \frac{k_\phi \gamma_1}{\gamma a_0}, \\ \beta'_i &= -\left( A_i - \sqrt{A_i^2 - B_i} \right), \quad \beta''_i = -\left( A_i + \sqrt{A_i^2 - B_i} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Осадка грунта при одномерном уплотнении может быть представлена в виде

$$s(t, \tau) = \int_0^h \varepsilon_z(t, \tau) dz. \quad (23)$$

Подставляя выражение для продольной деформации (21) в (23), получаем выражение для осадки анизотропного водонасыщенного грунта при одномерном уплотнении

$$s(t, \tau) = qh \left\{ a_0 - a_1 \gamma_1 \int_{\tau}^t \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^2} (C_i e^{\beta'_i(t-\tau)} - D_i e^{\beta''_i(t-\tau)}) e^{-\gamma_1(t-\tau)} \right] dt \right\}. \quad (24)$$

Для вычисления осадки грунта по формуле (24) необходимо знать параметры водонасыщенного анизотропного глинистого грунта. К таким параметрам относятся: мгновенные коэффициенты сжимаемости, средний коэффициент пористости в рассматриваемом диапазоне изменения напряжений, коэффициент сжимаемости, параметры меры ползучести, характеристики грунта, коэффициенты фильтрации, коэффициенты поперечного расширения грунта и др.

Для установления этих расчетных параметров авторами были выполнены эксперименты с использованием анизотропного слоистого ленточного тяжелого суглинка. В табл. 1 приведены физические характеристики опытного грунта.

Таблица 1. Физические характеристики опытного грунта

$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$\gamma_s$ , кН/м <sup>3</sup>	$\gamma_d$ , кН/м <sup>3</sup>	$w$	$w_L$	$w_p$	$I_p$	$I_L$	$e_0$
20,1	27,3	16,4	0,21	0,39	0,22	16	0	0,690

При определении мгновенных коэффициентов сжимаемости в опытах была использована методика видеосъемки при ступенчатом нагружении, описанная в [6, 7].

Параметры меры ползучести скелета грунта находились по методике испытания различных высот образцов грунта при компрессии. Сущность методики состояла в следующем: в компрессионном приборе испытывались образцы с одной и той же площадью и при одном давлении, но с различной высотой образцов (10, 20, 30 мм). Определялись относительные деформации этих образцов во времени. Зная относительную деформацию этих образцов  $\varepsilon-h$ , с помощью экстраполяции находилась относительная деформация грунта при толщине  $h \rightarrow 0$ .

Экспериментальные исследования порового давления и осадок при консолидации осуществлялись в компрессионном приборе с площадью кольца 60 см<sup>2</sup> и высотой 2,5 см. Образец предварительно обжимался нагрузкой 25 кПа, а затем дальнейшие опыты проводились при давлении  $\sigma_z = 150$  кПа.

В табл. 2 приведены необходимые данные для теоретической оценки уплотнения опытного грунта.

Таблица 2. Параметры опытного грунта в интервале нагрузок 0–150 кПа

Коэффициент фильтрации $k_f$ , см/с	Средний коэффициент пористости $e_{cp}$	Коэффициент мгновенной деформации $a_0$	Параметры ползучести		Коэффициент поперечного расширения	
			$a_1$	$\gamma_1$	$v_1$	$v_2$
$8 \cdot 10^{-7}$	0,690	0,04	0,038	0,051	0,40	0,37

Использование кремниевых тензорезисторов позволило создать несколько типов мембранных высокочувствительных датчиков порового давления [8]. Один из таких датчиков состоял из приемника давления с иглой, мембраны, тензорезисторов и крышки с выводными проводами (рис. 1).

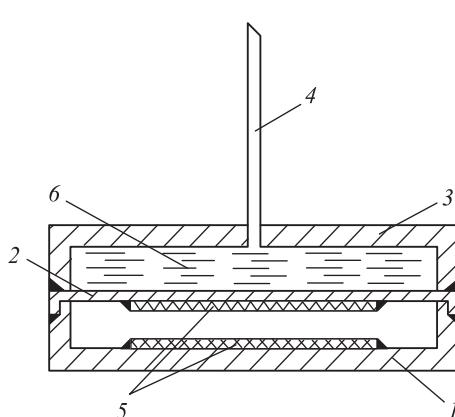


Рис. 1. Схема датчика порового давления с иглой

1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – крышка; 4 – игла; 5 – тензорезисторы; 6 – вода

Перед опытами грунт насыпался водой. Датчик с иглой перед опытом также наполнялся водой и игла вставлялась в грунт на любую высоту образца через специально просверленное отверстие в кольце. При приложении нагрузки поровая вода давит на воду в приемник датчика, мембрана прогибается и на гальванометре появляется сигнал, пропорционально этому давлению.

Чувствительность датчиков позволяла замерять поровое давление величиной до 1 кПа (рис. 2).

Экспериментальные и теоретические значения изменения осадок грунта (*a*) и порового давления (*б*) во времени при испытании грунта в компрессионном приборе показаны на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что деформации грунта и напоры в поровой воде, вычисленные по фильтрационной теории консолидации с учетом ползучести скелета грунта, не в полной мере совпадают с опытными данными.

Таким образом, можно утверждать, что авторы разработали довольно точный метод расчета осадки анизотропного водонасыщенного грунта при одномерном уплотнении. И если в решении задачи дополнительно учесть сжимаемость поровой жидкости, начальный гидравлический градиент

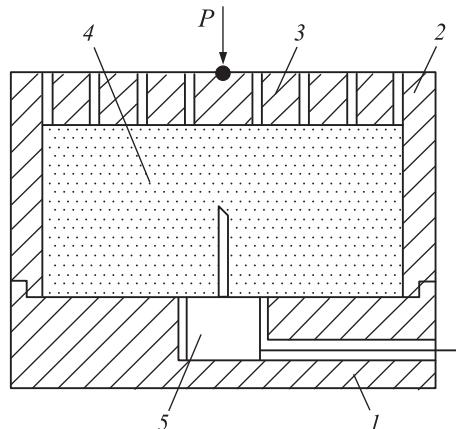


Рис. 2. Схема расположения датчика в компрессионном приборе  
1 – корпус; 2 – кольцо; 3 – поршень; 4 – образец грунта; 5 – датчик порового давления

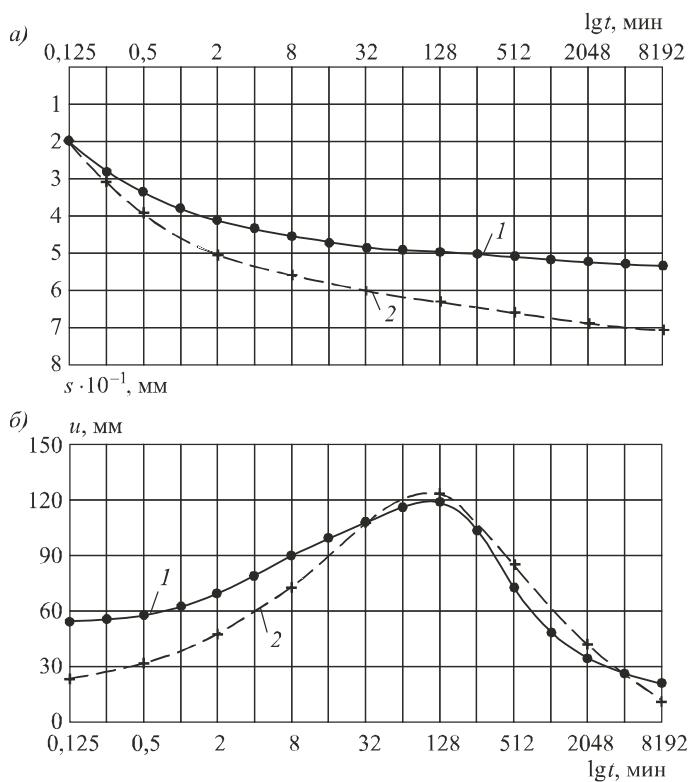


Рис. 3. График изменения во времени осадки грунта *s* (*а*) и порового давления *u* (*б*) в компрессионном приборе при вертикальном давлении  $\sigma_z = 150$  кПа

1 – данные, полученные опытным путем; 2 – данные, вычисленные по формулам автора

и структурную прочность грунта [9], то следует ожидать лучшего совпадения опытных и теоретических данных. Однако решение задачи в таком случае слишком усложняется.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Флорин В.А. Основы механики грунтов Л.: Госстройиздат, 1959. Т. 1. 357 с.
2. Писаненко В.П. Об анизотропии деформационных свойств глинистых грунтов Новосибирского Приобья // Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения при транспортном строительстве в условиях Сибири / Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1977. Вып. 180. С. 80–83.
3. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. М.: Недра, 1985. 342 с.
4. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1952. 323 с.
5. Маслов Н.Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства. М.: Стройиздат, 1984. 176 с.
6. Смолин Ю.П., Корчуганов Д.Ю. К методике определения мгновенного модуля деформации грунтов // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 8. С. 109–112.
7. Смолин Ю.П., Соловьев Ю.И. К методике определения мгновенных и длительных модулей деформации ползучих грунтов // Вопросы инженерной геологии, оснований и фундаментов / Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1971. Вып. 123. С. 137–146.
8. Самолетов Э.А., Смолин Ю.П. Кремниевые преобразователи для исследования механических характеристик грунтов // Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения в Сибири / Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1974. Вып. 152. С. 155–159.
9. Ляшенко П.А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. Краснодар: КубГАУ, 2014. 161 с.

**Смолин Юрий Петрович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: yuriy.smolin@bk.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Караполов Александр Михайлович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: karaulov@stu.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Востриков Константин Владимирович**, канд. техн. наук; E-mail: koctas\_V@mail.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 04.05.17

**Smolin Jurij Petrovich**, DSc, Professor; E-mail: yuriy.smolin@bk.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Karaulov Alexander Mikhaylovich**, DSc, Professor; E-mail: karaulov@stu.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Vostrikov Konstantin Vladimirovich**, PhD; E-mail: koctas\_V@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

#### **CONSOLIDATION PROCESS OF SATURATED ANISOTROPIC CLAY SOIL DURING ODOMETRIC TESTING**

The paper gives a solution to the problem of determining the sedimentation of water-saturated soil in time, taking into account the filtration consolidation and creep of the soil skeleton. For the numerical analysis of the obtained theoretical results, the following

parameters of the experimental soil were investigated experimentally: physical characteristics, creep parameters, pore pressure, instantaneous compressibility factor, filtration coefficient and other parameters required for calculation. To determine the pore pressure in the water-saturated ground, the authors made a sensor based on silicon strain gauges. The experimental and theoretical values of the change in pore pressure and soil sediment in time.

**K e y w o r d s:** anisotropy, oedometer, creep measure, pore pressure sensor, consolidation, permeability coefficient, instantaneous deformation, silicon tensometric resistor, soil settlement in time.

## REFERENCES

1. Florin V.A. Osnovy mekhaniki gruntov [Fundamentals of soil mechanics]. Leningrad, Gosstroyizdat, 1959. Vol. 1. 357 p. (in Russian)
2. Pisankov V.P. Ob anizotropii deformatsionnykh svoystv glinstykh gruntov Novosibirskogo Priob'ya [On the anisotropy of the deformation properties of clay soils of Novosibirsk Ob River]. Inzhenerno-geologicheskie usloviya i osobennosti fundamentostroeniya pri transportnom stroitel'stve v usloviyah Sibiri. Trudy NIIZhTa [Engineering-geological conditions and features of foundation engineering for transport construction in Siberia. Proceedings of the Novosibirsk Institute of Railway Engineers]. Novosibirsk, 1977. Issue 180. Pp. 80–83. (in Russian)
3. M eschan S.R. Eksperimental'naya reologiya glinstykh gruntov [Experimental rheology of clay soils]. Moscow, Nedra, 1985. 342 p. (in Russian)
4. Arutyunyan N.Kh. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti [Some questions of the theory of creep]. Moscow; Leningrad, Gostekhoretizdat, 1952. 323 p. (in Russian)
5. Maslov N.N. Fiziko-tehnicheskaya teoriya polzuchesti glinstykh gruntov v praktike stroitel'stva [The physical and technical theory of creep of clay soils in the practice of construction]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 176 p. (in Russian)
6. Smolin Yu.P., Korchuganova D.Yu. K metodike opredeleniya mgnovenennogo modulya deformatsii gruntov [To the technique for determining the instantaneous modulus of soil deformation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005. No. 8. Pp. 109–112. (in Russian)
7. Smolin Yu.P., Solov'yev Yu.I. K metodike opredeleniya mgnovenennykh i dlitel'nykh moduley deformatsii polzuchikh gruntov [To the technique for determining the instantaneous and long moduli of deformation of creeping soils]. Voprosy inzhenernoy geologii, osnovaniy i fundamentov. Trudy NIIZhTa [Questions of engineering geology, foundations and foundations. Proceedings of the Novosibirsk Institute of Railway Engineers]. Novosibirsk, 1971. Issue 123. Pp. 137–146. (in Russian)
8. Samoletov E.A., Smolin Yu.P. Kremnievyye preobrazovateli dlya issledovaniya mekhanicheskikh kharakteristik gruntov [Silicon converters for studying the mechanical characteristics of soils]. Inzhenerno-geologicheskie usloviya i osobennosti fundamentostroeniya v Sibiri. Trudy NIIZhTa [Engineering-geological conditions and features of foundation engineering in Siberia. Proceedings of the Novosibirsk Institute of Railway Engineers]. Novosibirsk, 1974. Issue 152. Pp. 155–159. (in Russian)
9. Lashenko P.A. Soprotivlenie i deformatsii glinstogo grunta [Resistance and deformation of clay soil]. Krasnodar, KubSAU, 2014. 161 p. (in Russian)

## ПАМЯТИ ДМИТРИЯ ГЕОРГИЕВИЧА КОПАНИЦЫ, ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЕНОГО И ПЕДАГОГА



23 апреля 2017 г. на 65-м году ушел из жизни профессор Томского государственного архитектурно-строительного университета, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, член редакционной коллегии журнала «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» Дмитрий Георгиевич Копаница.

Дмитрий Георгиевич Копаница – известный ученый, уважаемый педагог, много сил отдавший подготовке молодых специалистов. Он родился 25 июля 1952 г. в г. Петропавловске-Казахском. После окончания школы поступил в Томский инженерно-строительный институт, в 1979 г. окончил его, а в 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Московском инженерно-строительном институте. С 1985 г. Дмитрий Георгиевич Копаница начал работать в Томском инженерно-строительном институте (ныне ТГАСУ) в должностях старшего научного сотрудника, старшего преподавателя, доцента, заведующего кафедрой металлических и деревянных конструкций. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию. Благодаря энергичным и целенаправленным усилиям и лидерству Дмитрия Георгиевича на кафедре была создана научная школа по исследованиям напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, разработаны и предложены для внедрения в производство уникальные инновационные конструкции, приобретено уникальнейшее оборудование, которое позволит коллективу еще долгие годы вести научные исследования в указанном направлении.

Он участвовал в качестве руководителя экспертной группы в расследовании причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС. Его научная и педагогическая деятельность неоднократно отмечалась высокими наградами ТГАСУ, г. Томска, Томской области, Министерства образования и науки Российской Федерации. За вклад в науку и образование был награжден золотой медалью НИУ МГСУ.

Научное сообщество высоко оценило вклад Дмитрия Георгиевича в строительную науку, он был избран членом-корреспондентом РААСН, членом экспертного совета ВАК РФ по строительству и архитектуре.

Дмитрий Георгиевич – автор более 170 научных трудов в области строительных конструкций и сооружений, 5 монографий и 6 учебных пособий, в том числе монографии «Рекомендации по анализу жизненного цикла зданий и сооружений повышенной ответственности на основе процессного подхода и методов расчета строительных конструкций»; и учебного пособия «Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов».

Под его руководством защитили кандидатские диссертации 5 аспирантов, подготовлены 3 докторские диссертации.

Он был ученым, горячо преданным науке и профессии, отзывчивым и внимательным коллегой, честным, интеллигентным человеком.

Добрая и светлая память о Дмитрии Георгиевиче Копанице навеки сохранится в сердцах всех тех, кто его знал!

**И.С. Инжутов** – директор ИСИ СФУ, д-р техн. наук, профессор, советник РААСН, акад. РАН

**Г.И. Гребенюк** – зав. кафедрой СМ, НГАСУ (Сибстрин), д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. СО МАН ВШ

**В.М. Митасов** – зав. кафедрой ЖБК, НГАСУ (Сибстрин), д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. СО АН ВШ, Почетный строитель России

**С.В. Деордиев** – зав. кафедрой СКиУС ИСИ СФУ, канд. техн. наук, доцент, чл.-кор. РАН

**В.В. Пуртов** – доцент кафедры МДК, НГАСУ (Сибстрин), канд. техн. наук, Почетный строитель России

## **РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ СТРОИТЕЛЬСТВА**

**В НГАСУ (Сибстрин), на кафедре железобетонных конструкций разработан и реализован на практике сталежелезобетонный сборно-монолитный беззигельный каркас для строительства многоэтажных зданий с пониженным расходом стали.**



### **ПРЕИМУЩЕСТВА ТАКОГО КАРКАСА:**

- стены любой конструкции в сочетании с утеплителями;
- стоимость коробки ниже традиционной на 34–35 %;
- нагрузка на фундамент снижается на 17–18 %;
- нормативный срок строительства коробки сопоставим с монтажом КПД;
- свободная планировка внутренних помещений в пределах этажа.

Предложен шаг колонн  $6 \times 7,5$  м (может быть переменным, с «плавающей» стойкой).

Схема позволяет решить проблему неравномерных температурных деформаций, тормозящих развитие каркасного строительства, и может быть реализована в любых сейсмических регионах.

По данным разработки схемы возводился 12-этажный дом (г. Новосибирск, ул. Урицкого, см. фото).

Ведутся дальнейшие исследования по усовершенствованию сборно-монолитного беззигельного каркаса с применением предварительного напряжения.

**Разработчики: Митасов Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф.;**

**Добрачев Валерий Михайлович, канд. техн. наук, доц.**

**630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).**

**E-mail: patent@sibstrin.ru**

**Internet: www.sibstrin.ru/innovation**

**Тел. +7(383) 266-42-81**



**УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!**

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация и место работы. Электронная версия обязательна.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 6 (702) 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 28.06.17. Формат 70×108 1/16  
Усл. печ. л. 10,85+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 5570

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