

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 3 (687)  
Март 2016 г.

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

Главный редактор В.Г. Себешев,  
почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Игнатъев, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.  
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.  
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113  
Тел./факс +7 (383) 266 28 59  
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.03.16. Формат 70×108 1/16  
Усл. печ. л. 10,50+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 888

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

**Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В.** К оценке прочности, жесткости, момента образования трещин и их раскрытия в зоне чистого изгиба железобетонных балок с применением нелинейной деформационной модели ..... 5

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Яковлева Т.В., Крылова Е.Ю., Баженов В.Г., Крысько В.А.** Сложные колебания и контактное взаимодействие пластины, подкрепленной балкой с зазором между ними, в условиях экстремальных режимов нагружения ..... 13

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

**Кучерова Э.А., Сат Д.Х., Кара-сал Б.К.** Улучшение формуемости керамической массы из грубодисперсного глинистого сырья введением цеолитсодержащей породы ..... 24

**Лобачев Д.А., Абдрахимов В.З., Абдрахимов Е.С.** Использование отходов нефтедобычи

и межсланцевой глины в производстве теплоизоляционных материалов – приоритетное направление для развития «зеленой» экономики .....	32
<b>Логанина В.И., Рыжов А.Д.</b> Оценка прочности сцепления известково-перлитовой сухой строительной смеси с применением синтезированных алюмосиликатов .....	38

**ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.  
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

<b>Герасимов В.В., Исаков А.К., Сафарян Г.Б., Иванов С.В.</b> Управление эффективностью технико-экономических решений объектов строительства .....	43
--	----

**САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА**

<b>Самарин О.Д.</b> О новом подходе к поверочному расчету воздухоохладителей при учете конденсации водяных паров .....	50
--	----

**СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ**

<b>Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н.</b> Установление приоритетности между показателями надежности геотекстильных материалов для дорожного строительства .....	57
---	----

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ**

<b>Мальшева Ю.Э., Кварцхалая Т.Р., Дмитриев М.П., Абраменков Э.А.</b> Дроссели воздухораспределения в пневматических механизмах машин ударного действия .....	63
---	----

**НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ**

<b>Акимова М.И., Чечулина А.С.</b> Эволюция санитарно-эпидемиологических требований к многоэтажным жилым домам .....	70
--	----

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

<b>Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В.</b> Поверхностные гравитационные волны при вертикальных угловых колебаниях контейнера .....	77
<b>Высоцкий Л.И.</b> Эффективное использование новой модели строения турбулентных продольно-однородных потоков при анализе их параметров. Ч а с т ь III .....	83
<b>Кошелева О.Э., Логвиненко В.А.</b> Термический анализ древесины. Ч а с т ь II .....	95
<b>Уткин В.С., Соловьев С.А.</b> Определение несущей способности металлических балок на стадии эксплуатации с учетом жесткости опорных креплений .....	100

**В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ**

<b>Бехер С.А., Коломеец А.О.</b> Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации .....	110
--	-----

**НАШИ ЮБИЛЯРЫ**

<b>Выдающийся ученый в области теории железобетона (Валерию Михайловичу Митасову – 75 лет)</b> .....	119
--	-----

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
OF RUSSIAN FEDERATION  
INTERNATIONAL ASSOCIATION  
OF CONSTRUCTION  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
**NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL  
INSTITUTIONS**

# CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal  
Published since March 1958  
Monthly

No. 3 (687)  
March 2016

*Editor-in-Chief* V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,  
Honour. Mem. RAACS

*Editorial Board:*

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS  
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.  
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS  
Yu.P. Pravdivets, DSc (Eng), Prof.  
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS  
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.  
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

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 E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

## CONTENTS

### BUILDING CONSTRUCTIONS

**Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V.** To assess the strength, the stiffness, the formation of cracks and their disclosure in the zone of pure bending of the reinforced concrete beams with the application of a nonlinear deformation model ..... 5

### THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

**Yakovleva T.V., Krylova E.Yu., Bazhenov V.G., Krys'ko V.A.** Sophisticated fluctuations and contacting plate, supported by a beam with a gap between them, under extreme loading conditions ..... 13

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

**Kucherova E.A., Sat D.H., Kara-sal B.K.** The improvement of formability of ceramic mass made of course dispersed clay raw material by the inclusion of zeolite-containing rocks ..... 24

**Lobachev D.A., Abdрахimov V.Z., Abdрахimova E.S.** The use of waste oil production and interslate clay in manufacture of

thermal insulation materials – a priority for the development of a green economy .....	32
<b>Loganina V.I., Ryzhov A.D.</b> Evaluation of the bond strength of lime-perlite dry construction mixtures with synthetic aluminum silicates .....	38
<b>ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION. AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY</b>	
<b>Gerasimov V.V., Isakov A.K., Safaryan G.B., Ivanov S.V.</b> Performance management technical and economic solutions facilities construction .....	43
<b>SANITARY ENGINEERING</b>	
<b>Samarin O.D.</b> On a new approach to checking thermal calculation of air coolers taking account of water vapor sweating .....	50
<b>CONSTRUCTION OF MOTOR ROADS AND BRIDGES</b>	
<b>Fedosov S.V., Gruzintseva N.A., Lysova M.A., Gusev B.N.</b> Prioritization of reliability indicators for geomaterials used in road construction .....	57
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Malysheva Yu.E., Kvartskhalaya T.R., Dmitriev M.P., Abramnikov E.A.</b> Chokes air distribution to pneumatic mechanisms percussion machines .....	63
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Akimova M.I., Chechulina A.S.</b> Evolution of sanitary epidemiological regulations for residential building .....	70
<b>SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SECTION</b>	
<b>Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V.</b> The surface gravity waves at vertical angular oscillations of the container .....	77
<b>Vysotskiy L.I.</b> Efficient use a new model of turbulent structure of a longitudinally-uniform flow when analyzing their parameters. P a r t III .....	83
<b>Kosheleva O.E., Logvinenko V.A.</b> Thermal analysis of the wood. P a r t II .....	95
<b>Utkin V.S., Solov'ev S.A.</b> Calculation of steel beams load-bearing capacity on operation stage taking into account to rigidity of the supports .....	100
<b>IN HIGHER SCHOOL LABS</b>	
<b>Bekher S.A., Kolomeets A.O.</b> Development of methodology for determining the dynamic force by the strain gauge system .....	110
<b>JUBILEE'S ARTICLY</b>	
<b>Outstanding scientist in the field of the theory of reinforced concrete (Valery Mikhaylovich Mitasov – 75 years)</b> .....	119

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ



УДК 624.012.4+624.044 : 539.384

Н.И. КАРПЕНКО, Б.С. СОКОЛОВ, О.В. РАДАЙКИН

### К ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ, МОМЕНТА ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН И ИХ РАСКРЫТИЯ В ЗОНЕ ЧИСТОГО ИЗГИБА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Цель исследования – разработать предложения для создания единой методики расчета прочности, жесткости, момента образования нормальных трещин и ширины их раскрытия в изгибаемых железобетонных элементах. Для этого применена авторская нелинейная деформационная модель, основанная на диаграммах деформирования материалов, полученных академиком Н.И. Карпенко. Расчет ширины раскрытия трещин с применением данной модели выполнен впервые, а сравнение результатов расчета с экспериментом показало, что предложенная методика позволяет достоверно определять величину  $a_{crс}$ .

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** нелинейная деформационная модель, момент трещинообразования, ширина раскрытия трещин, прогиб.

Развитием метода предельных состояний явилось появление нелинейной деформационной модели [1], которая с 2003 г. включена в строительные нормы России (СНиП 52-01–2003, СП 63.13330.2012). Физическую основу модели составляют диаграммы состояния бетона и арматуры в процессе одноосного нагружения. Она позволяет определять прочность, деформативность и момент образования трещин конструкций на основе единого подхода, что дает возможность описывать напряженно-деформированное состояние на всех стадиях нагружения – от начала работы вплоть до разрушения – с учетом физической нелинейности материалов и развития трещин.

Разработкой и совершенствованием нелинейной деформационной модели в России занимались В.Н. Байков, В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, А.А. Гвоздев, Ю.П. Гуца, М.И. Додонов, А.А. Дыховичный, О.Ф. Ильин, Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, Д.Н. Лазовский, Л.Л. Леммыш, В.И. Мурашев, Т.А. Мухамедиев, Б.С. Расторгуев, М.А. Сапожников и др. В работах В.М. Митасова диаграммы деформирования материалов явились основой

энергетической теории сопротивления железобетона [2]. Среди зарубежных исследователей этим вопросом занимались Ф. Леонгард, L. Saennz, B. Sinha, P. Desayi, S. Krisnuan, K. Gerstle, L. Tulin, Kabeila и др. В 1992 г. модель вошла в европейские нормы по проектированию железобетона (Eurocod 2: Design of concrete structures).

В работах [3–5] авторами предложен алгоритм методики расчета прочности, жесткости и момента образования трещин для изгибаемых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели и трансформированных диаграмм состояния бетона, проведена проверка достоверности расчета путем сравнения с опытными данными и результатами по СНиП 2.03.01–84\*. Несмотря на возможность применения рассматриваемой модели на всех этапах работы железобетонных конструкций, расчет по ширине раскрытия трещин с ее использованием, как показывает анализ научной и нормативной литературы, пока не доведен до практической реализации. Поэтому в продолжение начатых исследований в данной работе ставилась цель восполнить этот пробел. При этом для расчета ширины раскрытия принята за основу формула (8.128) СП 63.13330.2012, которая принята в следующем виде:

$$a_{cre} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \frac{\sigma_s}{E_s^{sec}} \psi_s l_s. \quad (1)$$

В отличие от СП в формуле (1):

–  $\sigma_s$  – напряжения в продольной растянутой арматуре в сечении с трещиной, определяются с учетом работы растянутого бетона над трещиной, а также совместного влияния нелинейных свойств бетона и арматуры;

– вместо модуля упругости арматуры  $E_s$  принят секущий модуль деформаций  $E_s^{sec}$ , зависящий от текущих деформаций;

– при вычислении  $l_s$  – базового расстояния между трещинами высота растянутой зоны бетона рассчитывается с учетом его неупругих свойств;

– для  $\psi_s$  – коэффициента, учитывающего неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами, в выражении (8.161) СП:

$$\psi_s = 1 - \frac{1}{1 + 0,8 \frac{\varepsilon_{s, cre}}{\varepsilon_s}}, \quad (2)$$

вместо  $\varepsilon_s$  – «усредненных относительных деформаций растянутой арматуры, пересекающей трещины, в рассматриваемой стадии расчета» приняты относительные деформации арматуры в сечении с трещиной (т.е. без их осреднения вдоль пролета изгибаемого элемента);

деформации арматуры  $\varepsilon_{s, cre}$  определяются не после, а непосредственно до появления нормальных трещин. Их предлагается получать геометрически из подобия треугольников по эпюре, показанной на рис. 1.

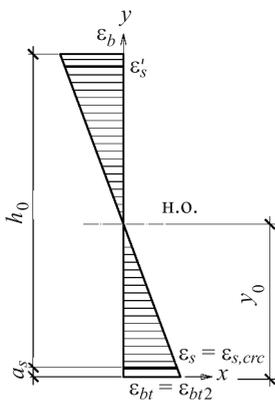


Рис. 1. К определению относительных деформаций арматуры в сечении с трещиной в момент перед образованием нормальных трещин (в стадии Ia)

Тогда формула для определения  $\varepsilon_{s,cre}$  будет иметь вид

$$\varepsilon_{s,cre} = \frac{\varepsilon_{bt2}(y_0 - a_s)}{y_0}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{bt2}$  – предельные относительные деформации бетона при растяжении;  $y_0$  – центр тяжести приведенного сечения, определяющий положение нейтральной оси;

$a_s$  – расстояние от нижней грани балки до центра тяжести растянутой арматуры.

В формуле (2) деформации  $\varepsilon_s$ , в отличие от нормативного подхода, определяются с учетом работы растянутого бетона над вершиной трещины (рис. 2), а напряжения в этой зоне вычисляются с применением диаграмм « $\sigma_{bt}-\varepsilon_{bt}$ » по предложенному в работах [3–5] алгоритму.

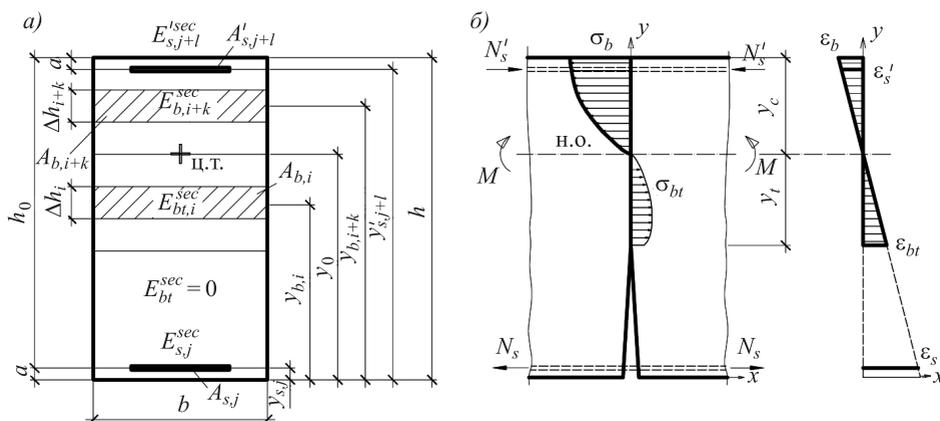


Рис. 2. Расчетные схемы сечения изгибаемого элемента в зоне чистого изгиба (а) и распределения напряжений и деформаций по сечению (б) после появления трещины

Далее в качестве примера рассмотрены однопролетные железобетонные балки с шарнирным опиранием серии БК-1, 2, 3 из [6]. Балки имеют следующие характеристики: длина  $l = 1,4$  м (расчетный пролет  $l_0 = 1,2$  м), высота и ширина прямоугольного сечения  $h = 0,14$  м,  $b = 0,12$  м, изготовлены из бетона класса В20 (кубиковая прочность составляла  $R = 19,87$  МПа, нормативная призмная –  $R_{bn} = 17,76$  МПа), с рабочим армированием у нижней грани  $2\text{Ø}10$  А400 – процент армирования  $\mu = 0,934$  %; расстояние от нижней грани бетона до центра тяжести арматуры  $a_s = 0,02$  м. Нагружение производилось двумя сосредоточенными силами, расположенными симметрично относительно середины пролета (в  $1/3$  пролета).

Расчетом установлено, что теоретический момент образования трещин равен  $M_{cre} = 1,136$  кН·м; предельный момент –  $M_{ult} = 6,586$  кН·м. Экспериментальные значения этих моментов:  $M_{cre} = 1,28$  кН·м,  $M_{ult} = 8,1$  кН·м. Разница составляет соответственно +12,7 и +23,0 %.

На рис. 3, 4 приведены графики зависимости «изгибающий момент – прогиб» (« $M-f$ ») и «изгибающий момент – ширина раскрытия» (« $M-a_{cre}$ »).

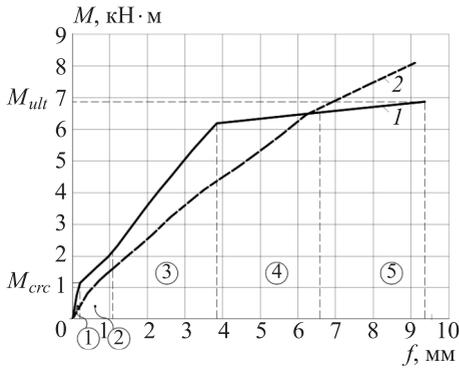


Рис. 3. График зависимости « $M-f$ »  
1 – расчет, 2 – опытные результаты [6]

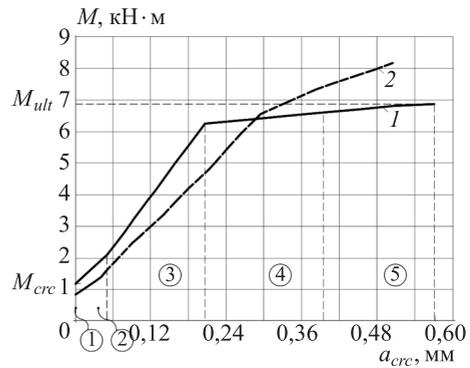


Рис. 4. График зависимости « $M-a_{crc}$ »  
1 – расчет, 2 – опытные результаты [6]

Из рис. 3, 4 нетрудно увидеть, что опытные значения прогибов и ширины раскрытия трещины до момента  $M < 0,8M_{ult}^{он} = 6,48 \text{ кН} \cdot \text{м}$  меньше расчетных, а на последующем участке перед разрушением  $0,8M_{ult}^{он} \leq M \leq M_{ult}^{он}$  картина меняется на противоположную. Однако в целом теоретические и опытные кривые рассматриваемых графиков геометрически близки. При этом можно выделить пять характерных стадий работы балки в зоне чистого изгиба: 1 – работа сечения до появления трещины ( $M \leq M_{crc}$ ) соответствует стадиям I и Ia по теории В.И. Мурашева; 2 – начальная стадия развития трещин ( $M_{crc} < M \leq 1,8M_{crc}$ ); 3 – стадия развития трещин; 4 – стадия начала текучести растянутой арматуры ( $\sigma_s = R_{sn}$ ); 5 – стадия перед разрушением ( $0,95M_{ult} < M \leq M_{ult}$ ). Отметим, что стадии 2–5 соответствуют стадии II по теории В.И. Мурашева.

Границам каждой из пяти стадий на рис. 3, 4 соответствуют конкретные числовые значения относительных деформаций в сжатом бетоне (на уровне крайнего волокна у верхней грани балки)  $\epsilon_b$  и в растянутой арматуре  $\epsilon_s$ , которые приведены в таблице. Отметим эти деформации на соответствующих диаграммах деформирования материалов (рис. 5, 6).

Полученные рис. 5, 6 позволяют описывать физический механизм деформирования конструкции на каждой стадии ее работы.

На рис. 7 зависимости « $f-M$ » и « $a_{crc}-M$ » построены в одной координатной плоскости. Это наглядно показывает, что зависимость прогибов и ширины раскрытия трещины имеет подобный характер изменения по мере

**Напряжения и относительные деформации в сжатом бетоне (в крайнем волокне) и растянутой арматуре на каждой стадии**

Стадия	Момент, кН · м	$-\epsilon_b \cdot 10^{-4}$	$-\sigma_b$ , МПа	$\epsilon_s \cdot 10^{-4}$	$\sigma_s$ , МПа
1	0–1,136	0–1,019	0–2,529	0–0,6695	0–13,391
2	2,06	3,07	6,503	5,127	102,54
3	6,18	11,99	14,032	18,44	368,81
4	6,383	12,99	14,206	19,59	391,867
5	6,586	22,91	14,317	25	400

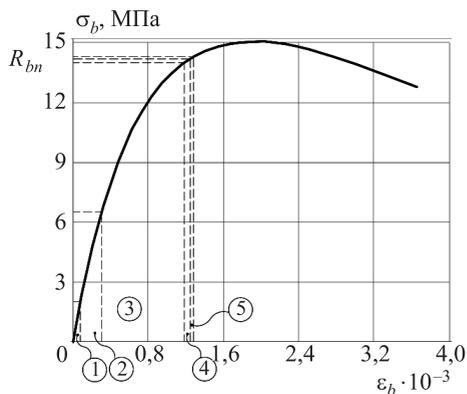


Рис. 5. Стадии работы железобетонной балки на диаграмме деформирования сжатого волокна у верхней грани

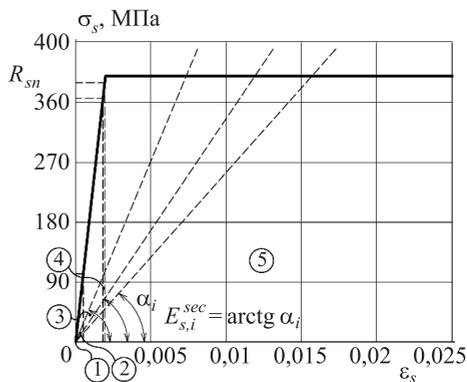


Рис. 6. Стадии работы железобетонной балки на диаграмме деформирования растянутой арматуры

роста нагрузки. Наиболее отчетливо это заметно, если построить график зависимости « $f$ – $a_{crc}$ » (рис. 8).

Практическое применение графиков, подобных изображенным на рис. 8, – это возможность в ходе технического обследования железобетонных конструкций оценивать их деформации по ширине раскрытия трещин, которую можно определить с помощью соответствующих приборов.

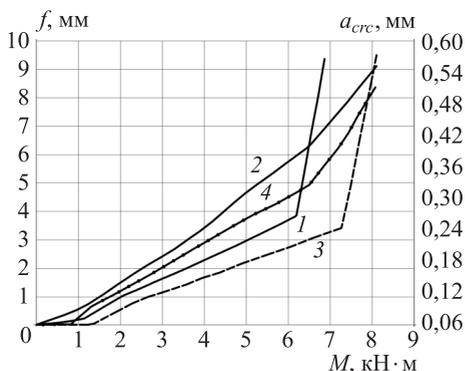


Рис. 7. Графики зависимости « $f$ – $M$ » (1 и 2) и « $a_{crc}$ – $M$ », построенные в одной координационной плоскости (3, 4) 1, 3 – расчет, 2, 4 – опытные результаты [6]

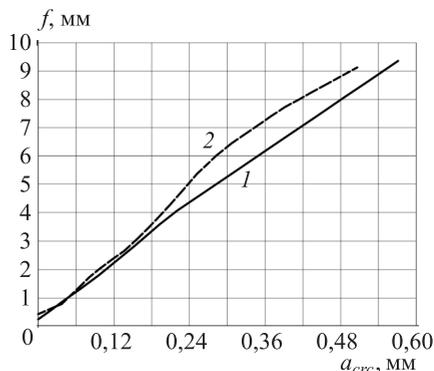


Рис. 8. График зависимости « $f$ – $a_{crc}$ » 1 – теоретический расчет, 2 – опытные результаты [6]

**Выводы.** 1. Для развития нормативного подхода к расчету изгибаемых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели впервые разработаны предложения по оценке ширины раскрытия нормальных трещин.

2. Предложенная методика расчета позволяет определять величину  $a_{crc}$  на всем интервале нагружения изгибаемого элемента после появления нормальных трещин, что подтверждает сравнение расчетных и экспериментальных данных (расхождение для рассмотренного примера не превысило 15 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграммы деформирования материалов // Совершенствование методов расчета статистически неопределимых железобетонных конструкций. М.: НИИЖБ, 1987. С. 4–24.
2. Митасов В.М., Адищев В.В. Основные предпосылки построения энергетической теории сопротивления железобетона // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 5. С. 3–9.
3. Соколов Б.С., Радайкин О.В. К построению единой методики расчета прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов с учетом совместного действия изгибающих моментов и перерезывающих сил с применением нелинейной деформационной модели // Труды РААСН. Курск: Деловая полиграфия, 2015. С. 589–599.
4. Карпенко Н.И., Радайкин О.В. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Строительство и реконструкция. Орел: Изд-во ОГТУ, 2012. № 3(41). С. 10–17.
5. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // Строительство и реконструкция. Орел: Изд-во ОГТУ, 2012. № 2. С.11–20.
6. Бабич Е.М., Довбенко В.С. Влияние полимерной композиции «Силор» на прочность, деформативность и трещиностойкость железобетонных балок при действии статических нагрузок // Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения: сб. науч. трудов. Ровно: Изд-во НУВХП, 2009. Вып. 18. С. 442–448.

**Карпенко Николай Иванович**, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: niisf\_lab9@mail.ru

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва

**Соколов Борис Сергеевич**, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sokolov@ksaba.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Радайкин Олег Валерьевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: oleg@radaikin.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 15.02.16

**Karpenko Nikolay Ivanovich**, Academician of RAASN, DSc, Professor;

E-mail: niisf\_lab9@mail.ru

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia

**Sokolov Boris Sergeevich**, Cor. Member of RAASN, DSc, Professor;

E-mail: sokolov@ksaba.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Radaykin Oleg Valer'evich**, PhD, Ass. Professor;

E-mail: oleg@radaikin.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**TO ASSESS THE STRENGTH, THE STIFFNESS,  
THE FORMATION OF CRACKS AND THEIR DISCLOSURE  
IN THE ZONE OF PURE BENDING OF THE REINFORCED  
CONCRETE BEAMS WITH THE APPLICATION  
OF A NONLINEAR DEFORMATION MODEL**

The aim of the study was to develop the proposals for the creation of unified methods of calculation of strength, stiffness, formation, normal cracks and width of their disclosure in the bending reinforced concrete elements. For this a author's nonlinear deformation model based on the diagrams of deformation of materials obtained by academician N. And. Karpenko was applied. The calculation of crack widths  $a_{crc}$  with the use of this model is made for the first time. The comparison of calculation results with experiment showed that the proposed method allows to reliably determine the value of the  $a_{crc}$  on the whole range of loading of the flexible element (the discrepancy for the considered example has not exceeded 15 %).

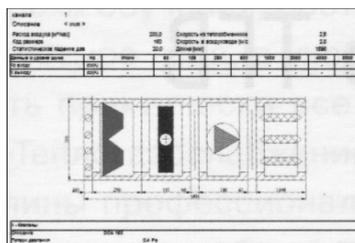
**Key words:** non-linear deformation model, the moment of cracking, crack widths, deflection.

**REFERENCES**

1. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Sapozhnikov M.A. K postroeniyu metodiki rascheta sterzhnevyykh elementov na osnove diagrammy deformirovaniya materialov [To the construction methods of calculation of rod elements based on the strain diagram of materials]. Sovershenstvovanie metodov rascheta statisticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsiy [Improvement of methods of calculation of statistically indeterminate reinforced concrete structures]. Moscow, NIIZHB, 1987. Pp. 4–24. (in Russia)
2. Mitasov V.M., Adishchev V.V. Osnovnye predposylki postroeniya energeticheskoy teorii soprotivleniya zhelezobetona [The Main foundations of high-energy theory of resistance of reinforced concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 5. Pp. 3–9. (in Russia)
3. Sokolov B.S., Radaykin O.V. K postroeniyu edinoy metodiki rascheta prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s uchetom sovместnogo deystviya izgibayushchikh momentov i pererezyvayushchikh sil s primeneniem nelineynoy deformatsionnoy modeli [To build a common methodology of calculation of strength, stiffness and crack resistance of bendable reinforced concrete elements taking into account the joint action of bending moments and shearing force with the use of nonlinear deformation models]. Trudy RAASN [Proceedings of RAASN]. Kursk, Business printing, 2015. Pp. 589–599. (in Russia)
4. Karpenko N.I., Radaykin O.V. K sovershenstvovaniyu diagram deformirovaniya betona dlya opredeleniya momenta treshchinoobrazovaniya i razrushayushchego momenta v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementakh [Improvement of the strain diagrams of concrete to determine the moment of cracking and damaging moment in bendable reinforced concrete elements]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. Orël, Publishing house the CDP, 2012. No. 3(41). Pp. 10–17. (in Russia)
5. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. K opredeleniyu deformatsiy izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s ispol'zovaniem diagram deformirovaniya betona i armatury [To the determination of the deformation of flexible reinforced concrete elements using strain diagrams of concrete and reinforcement steel].

- Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. Orël, Publishing house the CDP, 2012. No. 2. Pp. 11–20. (in Russia)
6. Babich E.M., Dovbenko V.S. Vliyanie polimernoy kompozitsii «Silor» na prochnost', deformativnost' i treshchinostoykost' zhelezobetonnykh balok pri deystvii staticheskikh nagruzok [Impact polymeric compositions «Silor» on the strength, deformability and crack resistance of reinforced concrete beams under static loads]. Resursoberegayushchie materialy, konstruksii, zdaniya i sooruzheniya: sbornik nauchnykh trudov [Resource-Saving materials, constructions, buildings and structures Proc. sci. works]. Rovno, Publishing house NUWMNRU, 2009. Fasc. 18. Pp. 442–448. (in Russia)
-

## ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ



УДК 539.3

Т.В. ЯКОВЛЕВА, Е.Ю. КРЫЛОВА, В.Г. БАЖЕНОВ, В.А. КРЫСЬКО

### СЛОЖНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАСТИНЫ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ БАЛКОЙ С ЗАЗОРОМ МЕЖДУ НИМИ, В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ\*

Предложен общий метод исследования математической модели пространственно-временного хаоса пластины, подкрепленной балкой, с учетом их контактного взаимодействия и внешнего белого шума. Выявлено, что форма колебаний существенно изменяется в зависимости от величины интенсивности шумового воздействия и от того, на какой элемент действует белый шум. Для решения и анализа этих конструктивно-нелинейных задач применяются методы качественной теории дифференциальных уравнений, в том числе и вейвлет-анализ, метод Фаэдо–Галеркина в высших приближениях, метод конечных разностей по пространственной координате с аппроксимацией  $O(h^2)$  и  $O(h^4)$ , методы Рунге–Кутты 4, 6, 8-го порядка точности, методы анализа знака старшего показателя Ляпунова. Решение поставленной задачи проводится несколькими методами, указанными выше, для того чтобы убедиться в достоверности получаемых результатов при анализе сложных нелинейных колебаний.

**Ключевые слова:** распределенные механические структуры, контактное взаимодействие, численные методы (метод Фаэдо–Галеркина, методы Рунге–Кутты 4, 6, 8-го порядка точности), качественный анализ нелинейной динамики, вейвлет-анализ, аддитивный белый шум, анализ знака старшего показателя Ляпунова, фазовая хаотическая синхронизация.

**Введение.** Одна из главных задач в строительстве, приборостроении, авиа- и судостроении – управление хаосом и выявление опасных и безопасных режимов работы конструкции. Пластина, подкрепленная ребром жесткости в виде балки, является составным элементом в различных строительных конструкциях и приборах. Для анализа напряженно-деформированного состояния пластины, подкрепленной локально расположенными балками, следует наиболее полно строить математические модели. Для этого необходимо учитывать возможные зазоры между элементами конструкции и изу-

\* Раздел 1 статьи выполнен в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А., раздел 2 статьи выполнен в научно-исследовательском институте механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10039).

чать их нелинейные колебания, а также влияние внешнего белого шума. Наличие зазора между пластиной и балкой обуславливает учитывание контактного взаимодействия между ними, т. е. решение конструктивно-нелинейной задачи по классификации П.А. Лукаша [1]. В этом случае наиболее перспективным решением является математическое моделирование и исследование хаотической динамики этих конструкций [2, 3] с учетом аддитивного белого шума и контактного взаимодействия [4]. Исследованию фазовых переходов, индуцируемых шумом, в науке и технике уделяется огромное внимание. Обобщение этих результатов приведено в монографии [5], где рассмотрено влияние шума в задачах физики, химии и биологии. В задачах радиопизики этому вопросу посвящены работы [6,7] и др. В [8] рассмотрена точность оценки параметров динамических систем, содержащих аддитивный источник шума. Авторами работы [9] экспериментально исследовано влияние внешнего источника шума на обобщенную синхронизацию хаотических колебаний. Однако работ, посвященных вопросам влияния внешнего шума на нелинейные колебания в многослойных механических структурах, применяемых в строительстве, в настоящее время в известной нам литературе найти не удалось.

**1. Постановка задачи.** В данной статье построена математическая модель сложных колебаний многослойного пакета, состоящего из пластины и балки с зазором между ними, на который действует внешняя нагрузка разных типов. Верхний слой представляет собой пластинку, НДС которой описывается уравнением типа Жермен–Лагранжа, а нижний слой – балка Эйлера–Бернулли. В уравнениях Жермен–Лагранжа и Эйлера–Бернулли учитывается масштаб длины, что позволяет рассматривать элементы как нанопластины и нанобалки. Контактное взаимодействие между элементами учитывается по модели Винклера. Пластина и балка изотропные, между ними имеется малый зазор, и соединены они через краевые условия. Математическая модель описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4} + \lambda^2 \frac{\partial^4 w_1}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w_1}{\partial t} - q_1(x, y, t) - q_k = 0, \\ \frac{1}{12} \frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w_2}{\partial t} - q_2(x, t) + q_k = 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

$$q_k = K(w_1 - w_2 - h_k) \Psi_1, \quad \Psi_1 = \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(w_1 - h_k - w_2)].$$

Соотношение  $q_k$  представляет собой контактное давление между слоями. В контактных задачах теории пластин и балок это соотношение и есть Винклерова связь между обжатием и контактным давлением.

$$\nabla_{\lambda}^4 = \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \lambda^2 \frac{\partial^4}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2};$$

$\Psi_1 = 1$ , если  $w_1 > w_2 + h_k$  – есть контакт между пластиной и балкой, иначе  $\Psi_1 = 0$ ;

$w_1, w_2$  – функции прогибов пластины и балки соответственно;

$K$  – коэффициент жесткости трансверсального обжатия структуры в зоне контакта;

$h_k$  – зазор между слоями.  $K = k \frac{E}{h}$  – балка и пластина имеют одинаковые

значения  $E$  и  $h$ . Если между пластинкой и балкой имеется прокладка, то ее учитывают, изменяя  $k$ . Появление зон сцепления маловероятно, поскольку контактное давление между слоями невелико. Условия контакта между слоями могут зависеть от координат и включать все виды несовершенного одно-стороннего контакта [10].

Система уравнений (1.1) приведена к безразмерному виду следующим образом:

$$x = a\bar{x}, \quad y = a\bar{y}; \quad q = \bar{q} \frac{E(2h)^4}{a^2 b^2}, \quad \bar{t} = \frac{t}{\tau}, \quad \tau = \frac{ab}{2h} \sqrt{\frac{\gamma}{Eg}}, \quad \lambda = \frac{a}{b} = 1, \quad h_k = 2h\bar{h}_k, \quad (1.2)$$

где  $a, b$  – размеры пластины по  $x$  и  $y$  соответственно;

$a$  – длина балки;

$t$  – время;

$\varepsilon$  – коэффициент затухания;

$w$  – функция прогиба;

$2h$  – толщина пластины;

$\mu = 0,3$  – коэффициент Пуассона для пластины и балки;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$E$  – модуль упругости;

$q_1(x, y, t)$  – поперечная нагрузка, действующая на пластинку;

$q_2(x, t)$  – поперечная нагрузка, действующая на балку;

$\gamma$  – удельный вес материала.

Толщина пластины и балки одинаковая. Материал балки и пластины упругий, изотропный одинаковый.

Для простоты записи черточки над безразмерными параметрами в системе уравнений (1.1) опущены.

На многослойный пакет могут действовать внешние поперечные нагрузки различных типов: без учета и с учетом аддитивного шума на пластину  $q_1(x, y, t)$  и на балку  $q_2(x, t)$ .

Поперечные нагрузки в общем виде представляют собой выражения:

$$q_1(x, y, t) = q_0 \sin(\omega_p t) + a_0 \times \left( \frac{2\text{rand}}{\text{rand\_max} + 1} - 1 \right); \quad (1.3)$$

$$q_2(x, t) = q_2^0 \sin(\omega_p t) + a_0 \times \left( \frac{2\text{rand}}{\text{rand\_max} + 1} - 1 \right). \quad (1.4)$$

Аддитивный шум представляет собой форму детерминированного входа, при этом шум используется только во внешней нагрузке и задается формулой

$$a_0 \times \left( \frac{2\text{rand}}{\text{rand\_max} + 1} - 1 \right),$$

где  $a_0$  – это интенсивность шумового воздействия;

функция `rand` – генератор случайных чисел некоторой случайной величины.

К исходным уравнениям следует присоединить граничные условия: шарнирное опирание по контуру для пластины, шарнирное опирание по концам для балки и нулевые начальные условия:

$$w_m = 0; w_m''|_x = 0 \text{ при } x = 0; 1; w_m = 0; w_m''|_y = 0 \text{ при } y = 0; 1; \quad (1.5)$$

$m = 1, 2$  – индекс, соответствующий пластине и балке,

$$w_1(x, y)|_{t=0} = 0, \quad w_2(x, y)|_{t=0} = 0, \quad \dot{w}_m|_t = 0, \quad m = 1, 2. \quad (1.6)$$

К этим условиям следует добавить условия непроникновения одной системы в тело другой. Полученные системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (1.1) сводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка методом Фаэдо–Галеркина [11]. Функции  $w_1$  и  $w_2$ , являющиеся решениями системы (1.1), приближенно аппроксимируем выражением в виде произведения функций, зависящих от времени и от координат:

$$w_1 = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{kj}(t) \varphi_{kj}(x, y), \quad w_2 = \sum_{k=1}^N A_k(t) \varphi_k(x). \quad (1.7)$$

Функции  $\varphi_{kj}(x, y)$  и  $\varphi_k(x)$  выбираем таким образом, чтобы они были линейно независимы, непрерывны вместе со своими частными производными до четвертого порядка включительно, удовлетворяли граничным условиям (1.5). С этой целью положим:

$$\varphi_{kj}(x, y) = \sin(k\pi x) \sin(j\pi y), \quad \varphi_k(x) = \sin(k\pi x). \quad (1.8)$$

Коэффициенты  $A_{kj}(t)$  и  $A_k(t)$  являются искомыми функциями времени. После применения метода Фаэдо–Галеркина получаем систему второго порядка относительно функций времени. Количество уравнений в системе зависит от количества балок и числа  $N$  в рядах (1.7). Систему уравнений второго порядка сводим к системе первого порядка с помощью метода замены переменной. Задачи Коши для нелинейной системы уравнений первого порядка решаются методами типа Рунге–Кутты по временной координате.

При решении задач, связанных с хаотическими колебаниями, встает вопрос о погрешности, поэтому необходимо применение разных численных методов для подтверждения достоверности результатов. С этой целью полученные дифференциальные уравнения сводились к задаче Коши методом конечных разностей с аппроксимацией  $0(h^2)$  и  $0(h^4)$  и методом Фаэдо–Галеркина в высших приближениях, исследовалась сходимость метода при разном числе членов ряда, при этом точность устанавливалась по правилу Рунге. Полученные обыкновенные дифференциальные уравнения после применения методов Фаэдо–Галеркина и конечных разностей  $0(h^2)$  и  $0(h^4)$  решались методами типа Рунге–Кутты 4, 6, 8-го порядка точности по временной координате, был проведен сравнительный анализ результатов. Так как система уравнений нелинейная в результате контактного взаимодействия между элементами, то решить ее аналитическим путем не представляется возможным.

На основании данного алгоритма создан программный комплекс. Анализ получаемых результатов осуществляется с помощью методов нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений: строятся для каждого слоя механической структуры сигналы, фазовые портреты, сечения Пуанкаре, Фурье-спектры, применяются вейвлет-преобразования и анализ знаков показателей Ляпунова [12]. Используются различные вейвлеты: Морле, мексиканская шляпа, Гаусса от 1-го до 32-го порядка включительно. Вейвлет Гаусс 32-го порядка и вейвлет Морле дают близкие результаты, тем не менее предпочтение отдаем вейвлету Морле, так как он обладает наилучшей способностью локализовать частоту во времени, т. е. является наиболее информативным [13, 14].

Для описания и анализа фазовой хаотической синхронизации механических динамических систем на базе вейвлет-анализа, как правило, вводится фаза хаотического сигнала. Фазовая хаотическая синхронизация означает, что происходит захват фаз хаотических сигналов, в то время как амплитуды этих сигналов остаются не связанными друг с другом и выглядят хаотическими. Захват фаз влечет за собой совпадение частот сигналов. Частота хаотического сигнала определяется как средняя скорость изменения фазы. В случае применения вейвлетных преобразований вейвлетная поверхность  $W(s, t_0) = \|W(s, t_0)\| \exp[j\varphi_s(t_0)]$  характеризует поведение системы на каждом временном масштабе  $s$  в любой момент времени  $t_0$ . Величина  $\|W(s, t_0)\|$  характеризует наличие и интенсивность соответствующего временного масштаба  $s$  в момент времени  $t_0$ . Вводится интегральное распределение энергии вейвлетного спектра по временным масштабам  $E(s) = \int \|W(s, t_0)\|^2 dt_0$ . Фаза определяется как  $\varphi_s(t_0) = \arg W(s, t)$  для каждого временного масштаба  $s$ , т. е. возможно характеризовать поведение каждого временного масштаба  $s$  с помощью ассоциированной с ним фазы  $\varphi_s(t)$ . Фазовая синхронизация ведет к появлению захвата фаз на синхронизированных временных масштабах  $s \|\varphi_{s_1}(t) - \varphi_{s_2}(t)\| < \text{const}$ .

**2. Численные результаты.** Изучим влияние белого шума на форму колебаний многослойной структуры. С этой целью рассмотрим случай, когда многослойный пакет состоит из пластины и балки, расположенной по центру пластины ( $y = 0,5$ ), зазор между пластиной и балкой равен  $h_k = 0,01$ . На верхнюю пластину действует внешняя распределенная поперечная нагрузка

$$q_1(x, y, t) = q_0 \sin(\omega_p t),$$

где  $q_0 = 0,07$ ,  $\omega_p = 5$  – частота, близкая к первой частоте собственных колебаний пластины  $\omega_0 = 4,22$ ;

$\varepsilon = 1$  – коэффициент диссипации среды.

Исследуем четыре задачи о колебаниях системы в зависимости от выбора элементов, на которые действует шум, и от интенсивности шума  $a_0$ :

– задача 1: система не подвержена шумовому воздействию, т.е.  $a_0 = 0$ ;

– задача 2: шум действует только на пластинку с разной интенсивностью:

$$a_0 = 1 \cdot 10^{-4}, a_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ и } a_0 = 1 \cdot 10^{-2};$$

– задача 3: шум действует только на балку с разной интенсивностью:

$$a_0 = 1 \cdot 10^{-4}, \quad a_0 = 1 \cdot 10^{-3} \quad \text{и} \quad a_0 = 1 \cdot 10^{-2};$$

– задача 4: шум действует и на пластину, и на балку с разной интенсивностью:

$$a_0 = 1 \cdot 10^{-4}, \quad a_0 = 1 \cdot 10^{-3} \quad \text{и} \quad a_0 = 1 \cdot 10^{-2}.$$

*Задача 1* (первый тип нагрузки): амплитуда поперечной знакопеременной нагрузки  $q_0 = 0,07$  и частота возбуждения  $\omega_p = 5$ , интенсивность шума  $a_0 = 0$ , т.е. без шума. В этом случае происходит контактное взаимодействие пластины и балки. На интервале времени  $t = [0; 800]$  – пластина и балка совершают хаотические симметричные колебания относительно оси симметрии  $y = 0,5$  при изменении переменного  $x$  на утроенный периода:  $\omega_p/3 = 1,6$ ,  $2\omega_p/3 = 3,3$ ,  $\omega_p = 5$ . Наличие синхронизации хаотических колебаний пластины и балки на данном отрезке времени подтверждают 2D-вейвлет Морле (рис. 1) и спектр мощности Фурье (рис. 2), а также сечение Пуанкаре с утроением орбит (рис. 3).

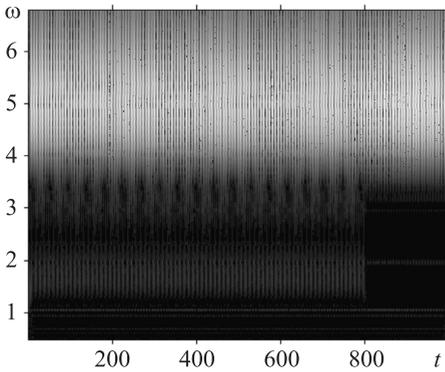


Рис. 1. Вейвлет Морле для пластины при отсутствии шума  $a_0 = 0$

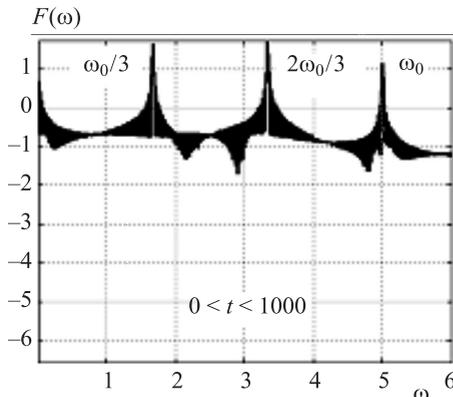
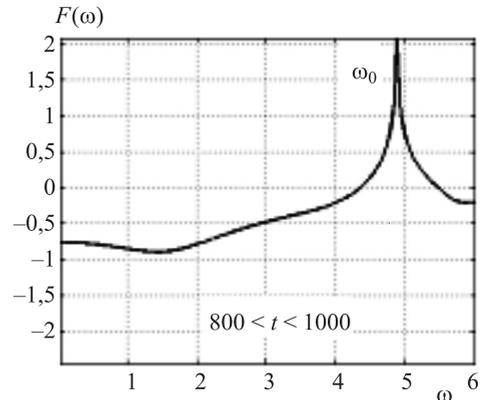
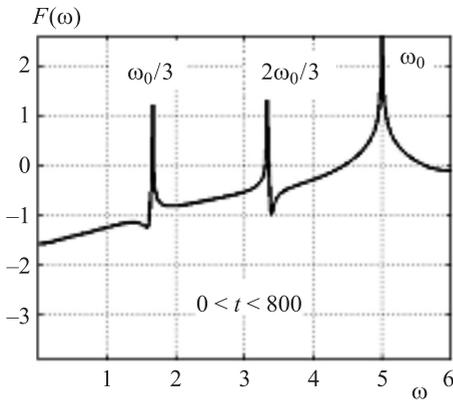


Рис. 2. Спектры мощности Фурье для пластины при отсутствии шума

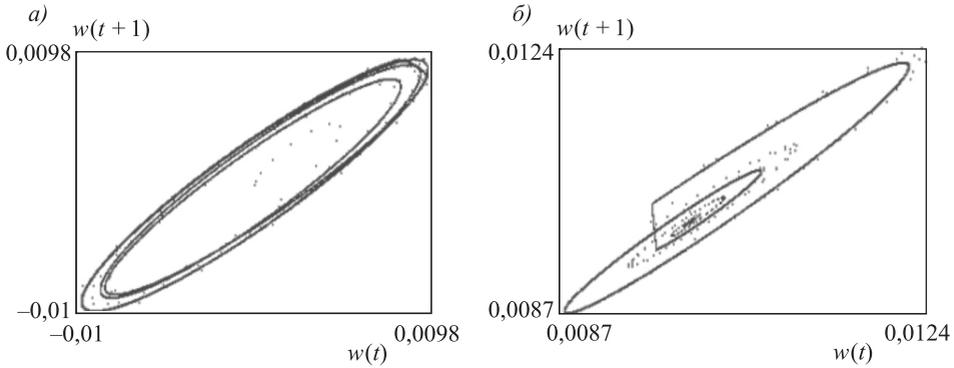


Рис. 3. Сечение Пуанкаре для пластины и балки при отсутствии шума  
 а – пластина, б – балка

Далее по времени ( $t > 800$ ) колебания балки затухают в результате диссипации среды  $\varepsilon = 1$ , и пластина совершает гармонические колебания на частоте  $\omega_p = 5$ . Проводя сравнение результатов вейвлет-анализа и Фурье-анализа, приходим к выводу, что вейвлет Морле позволяет выявить состояние системы на каждом конкретном интервале времени, в то время как спектр мощности Фурье дает суммарный результат о частотном состоянии системы на общем интервале времени (см. рис. 1, 2). Именно поэтому основным показателем, который демонстрирует затухания колебаний, перестройку системы и контактное взаимодействие, является вейвлет-анализ.

О хаотическом состоянии пластины и балки во время контактного взаимодействия также свидетельствует старший показатель Ляпунова: для пластины равен  $0,42480 > 0$ , балки  $0,35802 > 0$ , т.е. колебания пластины и балки хаотические и симметричные.

*Задача 2* (второй тип нагрузки): шум действует только на пластинку. При воздействии внешнего белого шума интенсивностью  $a_0 = 1 \cdot 10^{-4}$  только на пластинку происходит контакт пластины с балкой на интервале времени  $t = [0; 500]$ , при интенсивности  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  – на отрезке  $t = [0; 130]$  (рис. 4), при величине шумового воздействия  $a_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  – на интервале времени  $t = [0; 800]$ . Во время контактного взаимодействия пластина и балка совер-

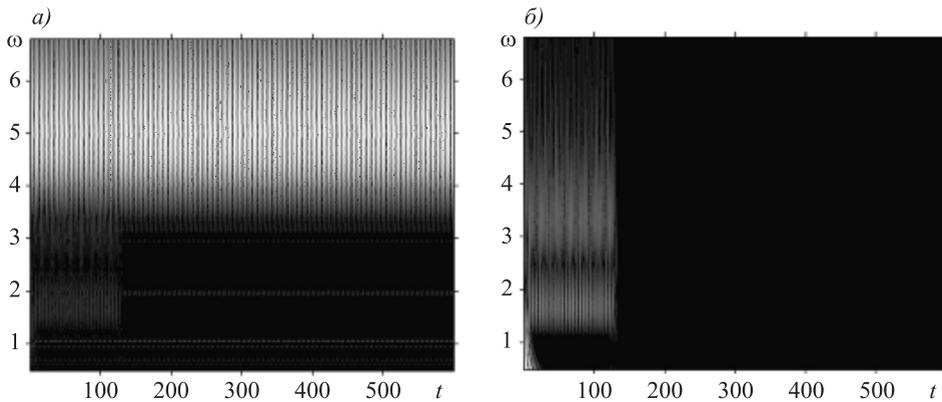


Рис. 4. Вейвлет Морле для пластины (а) и балки (б) при действии шума  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  на пластину

шают хаотические колебания на утроении периода:  $\omega_p/3 = 1,6$ ,  $2\omega_p/3 = 3,3$ ,  $\omega_p = 5$ . На временных интервалах, когда касание пластины и балки отсутствует, пластина совершает одночастотные гармонические колебания на частоте  $\omega_p = 5$ , а балка переходит в состояние покоя. При интенсивности шумового воздействия  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  колебания балки затухают раньше, чем при  $a_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ , и раньше, чем при отсутствии шума.

Старший показатель Ляпунова при  $a_0 = 1 \cdot 10^{-4}$  для пластины равен  $0,40691 > 0$ , балки  $0,10084 > 0$ ; при  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  для пластины и балки равен  $0,49494 > 0$ ; при  $a_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  для пластины равен  $0,62874 > 0$ , балки  $0,13583 > 0$ . Таким образом, колебания хаотические, но присутствуют элементы несимметрии в разных точках пластины.

*Задача 3* (третий тип нагрузки): шум действует только на балку. При воздействии внешнего белого шума  $a_0 = 1 \cdot 10^{-4}$  только на балку происходит контакт пластины с балкой на интервале времени  $t = [0; 600]$ , при интенсивности  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  – на отрезке  $t = [0; 600]$ , при величине  $a_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  – на интервале времени  $t = [0; 1000]$ . Во время контактного взаимодействия пластина и балка совершают хаотические колебания на утроении периода:  $\omega_p/3 = 1,6$ ,  $2\omega_p/3 = 3,3$ ,  $\omega_p = 5$ . Качественно характер колебаний многослойной системы изменяется как и при втором типе нагрузке, но на других интервалах времени. При отсутствии контактного взаимодействия пластина совершает гармонические колебания на частоте  $\omega_p = 5$ .

*Задача 4* (четвертый тип нагрузки): шум действует и на пластину, и на балку. При воздействии внешнего белого шума  $a_0 = 1 \cdot 10^{-4}$  на пластину и на балку происходит контакт пластины с балкой на интервале времени  $t = [0; 400]$ , при величине шума  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  – на отрезке  $t = [0; 1000]$ , при интенсивности  $a_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  – на интервале времени  $t = [0; 500]$ . Во время контактного взаимодействия пластина и балка совершают хаотические колебания на утроении периода:  $\omega_p/3 = 1,6$ ,  $2\omega_p/3 = 3,3$ ,  $\omega_p = 5$ .

**Заключение.** Таким образом, при исследовании влияния аддитивного внешнего белого шума на сложные колебания многослойных балочно-пластинчатых механических конструкций, соединенных только через краевые условия, выявлено, что величина интенсивности шумового воздействия существенно влияет на форму колебаний и временной интервал контактного взаимодействия. Также в зависимости от того, на какой элемент действует белый шум, форма колебаний меняется, т. е. появляются элементы несимметрии колебаний относительно оси симметрии. При контактном взаимодействии пластина и балка совершают хаотические колебания на утроении периода частот. Начиная с некоторого момента времени, в результате диссипации колебания балки затухают, касания балки с пластиной уже нет, и пластина совершает гармонические колебания на собственной частоте  $\omega_p = 5$ . При наличии шумового воздействия старший показатель Ляпунова уменьшается, но остается положительным. При этом возможны случаи, когда показатели Ляпунова пластины и балки равны между собой, что свидетельствует о наличии фазовой хаотической синхронизации элементов многослойной конструкции.

Также установлено, что основным показателем, который демонстрирует затухания колебаний, перестройку системы и контактное взаимодействие, является вейвлет-анализ с применением вейвлета Морле.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. М.: Стройиздат, 1978. 204 с.
2. Awrejcewicz J., Kryśko A.V., Yakovleva T.V., Zelenchuk D.S., Kryśko V.A. Chaotic synchronization of vibrations of a coupled mechanical system consisting of a plate and beams // Latin american journal of solids and structures. 2013. 10(1). Pp.161–172.
3. Awrejcewicz J., Kryśko A.V., Kryśko V.A., Papkova I.V. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part 1: Mathematical models and solution methods // Chaos. Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena. 2012. 45. 22 p.
4. Yakovleva T.V., Bazhenov V.G., Kryśko V.A., Krylova C.Yu. Contact interaction plates, reinforced by ribs, with gaps under the influence of white noise. PNRPU Mechanics Bulletin. 2015. No. 4. Pp. 259–272.
5. Horsthemke W., Lefever R. Noise-Induced Transitions: Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.
6. Lynch J.J., Nagele R.G. Flicker noise effects in noise adding radiometers // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 2011. Vol. 59. Pp. 196–205.
7. Borloz B., Xerri B. Subspace SNR maximization: The constrained stochastic matched filter // IEEE Trans. Signal Process. 2011. Vol. 59. Pp. 1346–1355.
8. Маляев В.С., Вадивасова Т.Е. Оценка параметров зашумленных динамических систем // Нелинейная динамика. 2010. Т. 6. № 2. С. 267–276.
9. Овчинников А.А., Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. Экспериментальное исследование обобщенной синхронизации хаотических колебаний в присутствии шума // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 4. С. 1–7.
10. Кантор Б.Я. Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения. Киев: Наук. думка, 1990. С. 100.
11. Faedo S. Un nuovo metodo per l'analisi esistenziale e quantitative dei problemi di propagazione // Ann. Scuola Norm. Pisa, 1949. Pp. 1–40.
12. Awrejcewicz J., Kryśko A.V., Kryśko V.A., Papkova I.V. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part 3: The Lyapunov exponents, hyper, hyper-hyper and spatial-temporal chaos. // Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena. 2012. 45. 16 p.
13. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica. 1985. Vol. D16. P. 285–317.
14. Kryśko V.A., Yakovleva T.V., Dobriyan V.V., Papkova I.V. Wavelet-Analysis-Based Chaotic Synchronization of Vibrations of Multilayer Mechanical Structures // International Applied Mechanics. 2014. Vol. 50. No. 6, November. Pp. 706–720.

**Яковлева Татьяна Владимировна**, канд. физ.-мат. наук;

E-mail: yan-tan1987@mail.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**Крылова Екатерина Юрьевна**, канд. физ.-мат. наук;

E-mail: kat.krylova@bk.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**Баженов Валентин Георгиевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.;

E-mail: bazhenov@mech.unn.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
**Крысько Вадим Анатольевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: tak@san.ru  
Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

Получено после доработки 25.02.16

**Yakovleva Tat'yana Vladimirovna**, PhD; E-mail: yan-tan1987@mail.ru

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia

**Krylova Ekaterina Yur'evna**, PhD; E-mail: kat.krylova@bk.ru

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia

**Bazhenov Valentin Georgievich**, DSc, Professor;

E-mail: bazhenov@mech.unn.ru

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia

**Krys'ko Vadim Anatol'evich**, DSc, Professor; E-mail: tak@san.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

## **SOPHISTICATED FLUCTUATIONS AND CONTACTING PLATE, SUPPORTED BY A BEAM WITH A GAP BETWEEN THEM, UNDER EXTREME LOADING CONDITIONS**

In this paper, a general method for studying mathematical model of spatiotemporal chaos plate, supported by a beam, in view of their contact interaction and external white noise. It was revealed that the waveform changes significantly depending on the intensity of the noise exposure and on which element acts on the white noise. For solutions and analysis of structural and non-linear problems are applied methods of the qualitative theory of differential equations, including the wavelet – analysis method of Faedo-Galerkin in higher approximations, finite difference method for the spatial coordinate with the approximation  $O(h^2)$  and  $O(h^4)$ , Runge-Kutta 4th, 6th, 8th-order accurate methods of analysis mark the highest Lyapunov exponent. The solution of the problem is carried out by several methods mentioned above in order to ensure the reliability of the results obtained in the analysis of complex nonlinear oscillations.

**Key words:** distributed mechanical structure, contact interaction, numerical methods (method of Faedo–Galerkin, method Runge–Kutty 4th, 6th, 8th order of accuracy), a qualitative analysis of nonlinear dynamics, wavelet analysis, additive white noise, the analysis of the sign of the older Lyapunov exponent, phase chaotic synchronization.

### REFERENCES

1. L u k a s h P.A. Osnovy nelineynoy stroitel'noy mekhaniki [Fundamentals of nonlinear structural mechanics]. Moscow, Stroyizdat, 1978. 204 p. (in Russia)
2. A w r e j c e w i c z J., K r y s ' k o A.V., Y a k o v l e v a T.V., Z e l e n c h u k D.S., K r y s ' k o V.A. Chaotic synchronization of vibrations of a coupled mechanical system consisting of a plate and beams. Latin american journal of solids and structures. 2013. 10(1). Pp. 161–172.
3. A w r e j c e w i c z J., K r y s ' k o A.V., K r y s ' k o V.A., P a p k o v a I.V. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part I: Mathematical models and solution methods. Chaos. Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena. 2012. 45. 22 p.
4. Y a k o v l e v a T.V., B a z h e n o v V.G., K r y s ' k o V.A., K r y l o v a C.Yu. Contact interaction plates, reinforced by ribs, with gaps under the influence of white noise. PNRPU Mechanics Bulletin. 2015. No. 4. Pp. 259–272.
5. H o r s t h e m k e W., L e f e v e r R. Noise-Induced Transitions: Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.

6. Lynch J.J., Nagele R.G. Flicker noise effects in noise adding radiometers. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.* 2011. Vol. 59. Pp. 196–205.
7. Borloz B., Xerri B. Subspace SNR maximization: The constrained stochastic matched filter. *IEEE Trans. Signal Process.* 2011. Vol. 59. Pp.1346–1355.
8. Malyaev V.S., Vадivasova T.E. Otsenka parametrov zashumlennykh dinamicheskikh system [Parameter estimation of noisy dynamic systems] [*Nonlinear Dynamics*]. 2010. Vol. 6. No. 2. Pp. 267–276. (in Russia)
9. Ovchinnikov A.A., Moskalenko O.I., Koronovskiy A.A., Khranov A.E. Eksperimental'noe issledovanie obobshchennoy sinkhronizatsii haoticheskikh kolebaniy v prisutstvii shuma [Experimental study of generalized synchronization of chaotic oscillations in the presence of noise]. *Pis'ma v ZhTF* [*Technical Physics Letters*]. 2010. Vol. 36. No. 4. Pp. 1–7 (in Russia)
10. Kantor B.Ya. Kontaktnye zadachi nelineinoy teorii obolochek vrashcheniya [Contact problems of the nonlinear theory of shells of revolution]. Ukrainian Academy of Sciences. Institute of Mechanical Engineering Problems. Kiev, 1990. 100 p. (in Russia)
11. Faedo S. Un nuovo metodo per l'analisi esistenziale e quantitative dei problemi di propagazione. *Ann. Scuola Norm. sup. Pisa*, 1949. Pp. 1–40.
12. Awrejcewicz J., Krysko A.V., Krysko V.A., Papkova I.V. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part 3: The Lyapunov exponents, hyper, hyper-hyper and spatial-temporal chaos. *Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena.* 2012. 45. 16 p.
13. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica.* 1985. Vol. D16. Pp. 285–317.
14. Krysko V.A., Yakovleva T.V., Dobriyan V.V., Papkova I.V. Wavelet-Analysis-Based Chaotic Synchronization of Vibrations of Multilayer Mechanical Structures // *International Applied Mechanics.* 2014. Vol. 50. No. 6, November. Pp. 706–720.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.42:666.31

Э.А. КУЧЕРОВА, Д.Х. САТ, Б.К. КАРА-САЛ

### УЛУЧШЕНИЕ ФОРМУЕМОСТИ КЕРАМИЧЕСКОЙ МАССЫ ИЗ ГРУБОДИСПЕРСНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ ВВЕДЕНИЕМ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДЫ

Показано, что особенности химико-минералогических составов и изменение структуры и фазового состава породообразующих минералов цеолитсодержащей породы при измельчении и увлажнении позволяют улучшить пластичность и формуемость керамической массы на основе грубодисперсного суглинка.

**Ключевые слова:** цеолитсодержащая порода, измельчение, гранулометрический состав, пластичность, формование.

В условиях рыночной экономики приоритетным является производство конкурентоспособных керамических стеновых материалов, что требует применения качественного сырья. Технологические свойства керамических масс и эксплуатационные характеристики обожженных изделий также зависят от качества используемого сырья.

Практика показывает, что при производстве изделий строительной керамики из пластической массы их эксплуатационные свойства зависят от качества формования, так как большинство дефектов закладывается именно на этом этапе, а затем лишь раскрывается при сушке и обжиге [1].

При использовании грубодисперсных (содержание глинистых частиц менее 15 %) и малопластичных глинистых пород в производстве керамических стеновых материалов актуальной проблемой является повышение формуемости массы, для решения которой в состав шихты вводят высокопластичные глины.

Однако из-за уменьшения запасов и отсутствия высококачественных глин для регулирования формуемости керамических масс применяют нетрадиционные природные и техногенные алюмосиликатные материалы, которые по химико-минералогическим составам и структурно-механическим свойствам пригодны как пластифицирующие добавки.

Цель данной работы – улучшение формуемости грубодисперсного и малопластичного глинистого сырья с введением цеолитсодержащей породы (ЦСП), которая ранее не применялась в производстве керамических изделий.

© Кучерова Э.А., Сат Д.Х., Кара-сал Б.К., 2016

Объектом исследования принята глинистая порода месторождения Бий-Хемское, которая является сырьем кирпичного завода г. Кызыла (Республика Тыва). Данная глинистая порода грубодисперсная и малопластичная, содержание глинистых частиц колеблется в пределах 10–15 %, классифицируется как легкий суглинок. Из-за недостаточного содержания глинистых частиц при формовании изделий пластическим способом наблюдается разрыв граней и образование трещин в глиняном бруске. Установлено, что дефекты в сырцах при формовании составляют 7–10 %, а после сушки доля брака достигает 6–8 %. Низкое качество исходного суглинка подтверждается тем, что после обжига при температуре 940–960 °С прочность кирпича при сжатии равна 8,4–10,7 МПа.

В бий-хемском суглинке наряду с главным породообразующим минералом – монтмориллонитом присутствуют кварц, ортоклаз, гетит и карбонаты.

Химический состав глинистого сырья отличается высоким содержанием железистых элементов и щелочно-земельных оксидов (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов

Материал	Массовое содержание оксидов, %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	П.п.п
Бий-хемский суглинок	61,08	14,08	0,24	6,71	2,84	2,93	1,03	0,55	9,56
Цеолитсодержащая порода	60,43	11,64	0,40	6,62	4,15	2,62	2,49	2,59	10,47

Целесообразность применения цеолитсодержащей породы в качестве пластифицирующей добавки связана с особенностями структуры цеолитов – каркасных алюмосиликатов, которые отличаются ионообменными, сорбционными и каталитическими способностями [2], свидетельствующими о многофункциональном их действии на керамические шихты.

Местная цеолитсодержащая порода – отход производства искусственных заполнителей для дорожной засыпки, имеет красно-коричневый цвет, структура мелкокристаллическая. Средняя насыпная масса песчаной фракции (до 3 мм) составляет 1540–1560 кг/м<sup>3</sup>.

Анализ химического состава цеолитсодержащей породы (см. табл. 1) показывает, что наряду с высоким содержанием железистых соединений, щелочно-земельных элементов (CaO и MgO более 6 %) в значительном количестве присутствуют щелочные оксиды (K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O), что очень важно для спекания керамической массы.

Минеральный состав цеолитсодержащей породы по данным рентгенофазового анализа представлен кварцем (22–26 %), альбитом (38–42 %), клиноптилолитом (18–22 %) (распространенный цеолитовый минерал), гидроксидом железа (7–8 %), монтмориллонитом (7–9 %) и вулканическим стеклом (4–6 %). По результатам микроскопического исследования выявлено прочное воссоединение клиноптилолитовых частиц с вулканическим составляющим породы. Следует отметить, что от чистых цеолитов, где содержание главных породообразующих минералов более 50 %, рассматриваемая порода отличается низким содержанием клиноптилолита и наличием глинистого минерала, а также вулканического стекла.

При выполнении работы цеолитсодержащая порода в виде отсева размером частиц до 3 мм измельчалась в шаровой мельнице в сухом состоянии в течение 4–7 ч с последующим определением гранулометрического состава, числа пластичности и формовочных свойств. Подготовленная масса в состав шихты вводилась в количестве 10, 20 и 30 %. Из пластической массы формовались опытные образцы-кирпичики размерами 60×30×15 мм в специальном лабораторном прессе и образцы-цилиндрики диаметром и высотой 35 мм, которые сначала сушились на воздухе, затем в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С.

Определение технологических свойств массы и физико-механических характеристик обожженных изделий выполнялось согласно ГОСТ 21216.1–93, 1960.20–89 и 21216–93.

При изучении формуемости массы из чистого бий-хемского суглинка выявлено существование взаимосвязи между минеральным и гранулометрическим составом глинистой породы. Вид и содержание глинистых минералов определяет дисперсность, гранулометрический состав, водопотребность, пластичность и реологические свойства глинистой породы.

В исходном бий-хемском суглинке главный породообразующий глинистый минерал – монтмориллонит отличается тонкодисперсностью, где размеры частиц колеблются от 1 до 30 мкм [2]. Содержание глинистых частиц (менее 0,005 мм) в исходном суглинке колеблется в пределах 10–16 %, при значительном присутствии песчаных и пылеватых частиц (до 90 %; табл. 2), что недостаточно для получения пластической глиняной массы и формования изделий без разрыва граней и трещин. По данным микроскопических исследований, глинистые субстанции точечно распределены, среди пылеватых и песчаных частиц почти незаметны (рис. 1, а).

Таблица 2. Гранулометрический состав сырьевых материалов (ситовый анализ)

Материал	Остатки на ситах с размерами ячеек в мм, %							
	0,310	0,140	0,100	0,080	0,063	0,050	0,040	менее 0,040
Бий-хемский суглинок	8,4	24,5	18,2	16,7	6,8	8,5	8,7	9,2
Цеолитсодержащая порода (6 ч)	–	–	4,4	5,4	7,6	19,2	33,1	30,3

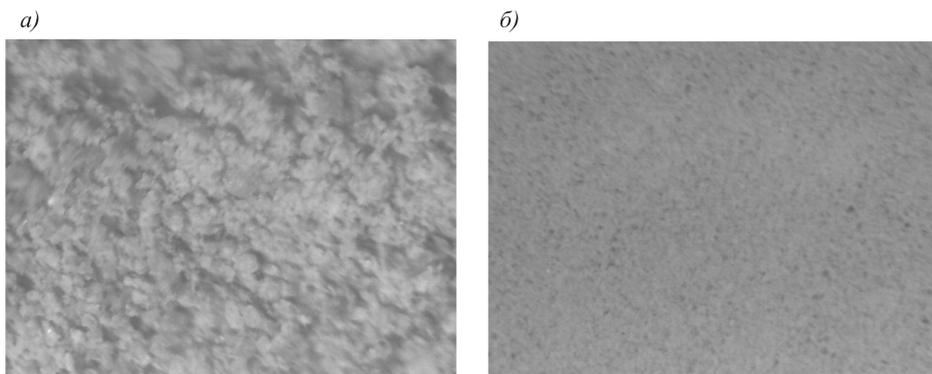


Рис. 1. Микроструктура чистого бий-хемского суглинка (а) и измельченной цеолитсодержащей породы (б) (× 60)

Из-за низкого содержания глинистых частиц пластичность суглинка равна 6,1 при формовочной влажности 17,5 %. Образование дефектов при формовании изделий на основе бий-хемского суглинка свидетельствует о недостаточном количестве тонкой фракции, представленной частицами глинистых минералов, которые при взаимодействии с водой и в результате протекания коллоидно-химических процессов превращаются в глиняное пластическое вещество, частично заполняющее пустоты грубодисперсного каркаса и необеспечивающее взаимную перегруппировку твердых частиц. Из-за недостаточного содержания пластической глиняной связки формовочное усилие воспринимается жестким каркасом массы, состоящим преимущественно из песчаных частиц и неспособного к уплотнению.

Учитывая то, что цеолитсодержащая порода вводится в состав шихты в тонкоизмельченном состоянии, выявлена оптимальная продолжительность помола с определением гранулометрического состава и фазового состояния механоактивированного материала, что влияет на пластичность общей массы.

Гранулометрический состав тонкоизмельченной ЦСП при различной продолжительности определен прямым ситовым анализом и методом лазерной дифракции на установке HELOS&RODOS, где выявляется дисперсность материала в сухом состоянии.

Изучение размолоспособности цеолитсодержащей породы после 4–7-часовой механообработки показало, что оптимальная продолжительность измельчения составляет 6 ч, так как при дальнейшем помоле наблюдается прилипание частиц к корпусу мельницы.

После 6-часовой механообработки содержание частиц размером менее 50 мкм в измельченной массе является максимальным и составляет более 63,4 % согласно данным ситового анализа (см. табл. 2). Методом В.Г. Рутковского установлено, что доля частиц размерами менее 5 мкм (относящихся к глинистым) в порошке после измельчения в течение 6 ч составляет 15,1 %.

Результаты лазерного анализа распределения частиц показывают (рис. 2), что в измельченном материале преобладают частицы размером 20 мкм (до 33 %), а содержание частиц размером менее 5 мкм (соответствующие глинистым) составляет 17 %, что свидетельствует о сходимости полученных данных разными методами.

Гранулометрический состав измельченной цеолитсодержащей породы в течение всего времени (6 ч) механоактивации изменяется существенно и размер частиц смещается в область меньших показателей (менее 5 мкм) с равномерным распределением частиц по всему объему (см. рис. 1, б).

Измельченная цеолитсодержащая порода отличается полиминеральным составом с наличием аморфного составляющего (вулканический туф). Присутствие аморфной фазы в исходной породе является главным факто-

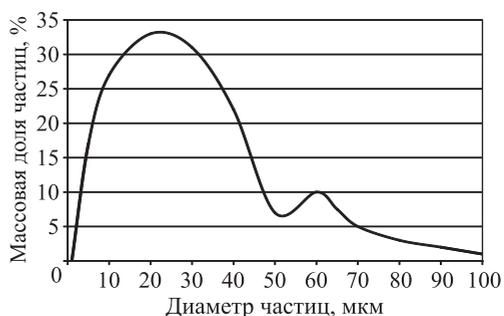


Рис. 2. Гранулометрический состав измельченного в течение 6 ч ЦСП

ром изменения фазового состава материала при механоактивации и определяющим энергетическое состояние частиц и их реакционную способность в последующих физико-химических процессах [3].

Установлено, что в результате механоактивации цеолитсодержащей породы в течение 6 ч содержание аморфной базы повысилось с 6 до 18 % в результате разрушения и аморфизации части цеолитовых, глинистых и кварцевых частиц. Частичная аморфизация указанных природных минералов при помоле сопровождается развитием в них дефектов, энергия которых обуславливает в дальнейшем образование новых агрегированных частиц. Частичная аморфизация зерен и их количество, как показали дальнейшие исследования, существенно влияют на изменение технологических свойств керамической массы на основе грубодисперсного бий-хемского суглинка и ЦСП.

Установлено, что введение тонкомолотой цеолитсодержащей породы в состав шихты из малопластичного и грубодисперсного суглинка влияет на пластичность массы и формовочную способность. Эффективность добавки на изменение концентрации пластической глиняной связки и регулирование ее коллоидно-химических свойств для улучшения формуемости массы зависит от технологических факторов и структурно-фазовых изменений основных компонентов.

Как показали результаты исследования, чем больше содержание цеолитсодержащей добавки, тем выше пластичность массы. При добавке 10 % тонкомолотой в течение 6 ч сухой цеолитсодержащей породы в массу число пластичности повышается с 6,1 до 8,0 и до 11,7 при увеличении доли добавки до 30 % (табл. 3). Это позволяет исходную малопластичную массу считать умеренно пластичной. Повышение пластичности массы с увеличением содержания добавки связано с увеличением содержания глинистых частиц за счет дополнительных монтмориллонитовых минералов цеолитсодержащей породы и цеолитовых частиц. Цеолитовые минералы после механоактивации характеризуются определенными пластическими свойствами [4]. Их псевдопластические свойства обеспечиваются микрокристалличностью цеолитовых кристаллов и аморфизацией при механической обработке.

Таблица 3. Технологические свойства масс и сырца

Номер составов	Состав масс	Число пластичности	Формовочная влажность, %	Воздушная усадка, %	Предел прочности при сжатии, МПа
1	Суглинок – 100 %	17,5	6,4	2,2	1,5
2	Суглинок – 90 %, ЦСП – 10 %	18,5	8,0	1,8	2,0
3	Суглинок – 80 %, ЦСП – 20 %	20,0	9,6	1,3	2,6
4	Суглинок – 70 %, ЦСП – 30%	21,5	11,7	0,8	3,3

Вследствие повышения пластичности формовочная влажность массы при введении 30 % ЦСП увеличивается с 17,5 до 21,5 %, что обусловлено повышением содержания монтмориллонитовых и клиноптилолитовых минералов, которые являются водоудерживающими компонентами шихты.

В результате введения механоактивированной ЦСП в количестве до 30 % в состав шихты на основе грубодисперсного суглинка получается умеренно пластичная масса с улучшенной формуемостью за счет образования дополнительной пластичной глиняно-цеолитовой связки, которая заполняет межзерновое пространство твердых песчаных частиц, тем самым обеспечивая их скольжение при уплотнении массы. Решающее влияние на процесс уплотнения керамической массы при формовании сырца оказывает количественное соотношение грубодисперсных частиц и пластичной глиняно-цеолитовой связки, которая выполняет роль пластификатора в массе.

Выявлено, что в исследуемой пластичной массе соотношение между грубо- (более 50 мкм) и тонкодисперсными (менее 50 мкм) частицами колеблется в пределах 4-5. Формуемость массы регулируется изменением концентрации глиняной связки и ее коллоидно-химических свойств.

Введение ЦСП в состав шихты на основе грубодисперсного суглинка не только повышает пластичность массы, но и регулирует поведение сырца при сушке. Установлено, что за счет каркасной структуры цеолитов при сушке образцов, содержащих добавку, наблюдается постепенное уменьшение воздушной усадки с 2,2 до 0,8 % (см. табл. 3). Это свидетельствует об отошающей функции ЦСП и возможности регулирования чувствительности к сушке, что положительно сказывается на трещиностойкости сырца при сушке.

Улучшение формуемости и уменьшение чувствительности керамических масс, содержащих цеолиты, происходит за счет перевода части свободной воды в связанное состояние путем переноса ее в каркасное пространство цеолита [2].

Повышение пластичности и формуемости керамической шихты на основе грубодисперсного суглинка при введении тонкомолотой ЦСП до 30 % положительно влияет на связность массы, о чем свидетельствует предел прочности при сжатии высушенных образцов-сырцов. В результате 6 ч механоактивации ЦСП предел прочности сырцов при сжатии увеличивается с 1,5 до 3,3 МПа.

Повышение прочности образцов и связности между компонентами массы зависит от повышения концентрации пластичной глиняно-цеолитовой связки и ее заполнения межзерновых пустот песчаных частиц. Соответственно при сушке изделий наблюдается бездефектный перевод коагуляционной структуры в конденсационную с формированием при этом плотной, однородной и прочной структуры сырца.

Следовательно, формуемость керамической массы зависит от состава и свойств структурного каркаса и пластичной глиняной связки, где их соотношение должно обеспечить минимальную плотную упаковку твердых частиц при формовании.

Таким образом, для улучшения формуемости керамической массы на основе грубодисперсного суглинка дополнительно в состав пластичной связки введены монтмориллонитовые и клиноптилолитовые частицы коллоидной степени дисперсности цеолитсодержащей породы, что повышает уровень когезионно-адгезионного взаимодействия между основными компонентами массы при формовании и сушке.

Промышленные испытания, проведенные на базе ООО «Стройгруппа» (измельчение цеолитсодержащей породы) и на кирпичном заводе ООО «Адарон» (формование кирпичей-сырцов, сушка и обжиг), подтвердили результаты лабораторных исследований. При добавке 30 % измельченной ЦСП к бий-хемскому суглинку получена умеренно пластичная масса с формовочной влажностью 22 % и отформованные кирпичи-сырцы не имели дефектов после формования и сушки. Величина воздушной усадки сырца 1,0 %, а предел прочности при сжатии 3,1 МПа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Столбоушкин А.Ю. Теоретические основы формирования керамических матричных композитов на основе техногенного и природного сырья // *Строительные материалы*. 2011. № 2. С. 10–13.
2. Овчаренко Г.И., Свиридов В.Л., Казанцева Л.К. Цеолиты в строительных материалах. Барнаул: АлтГТУ, 2000. 320 с.
3. Фомина Е.В., Кожухова Н.И., Пальшина Ю.В., Строкова В.В., Фомин А.Е. Влияние механоактивации на размерные параметры алюмосиликатных пород // *Строительные материалы*. 2014. № 10. С. 28–31.
4. Казанцева Л.Г., Паукштис Е.А., Завадский В.Ф., Овчаренко Г.И. Роль воды при вспучивании глин и цеолитсодержащих пород // *Изв. вузов. Строительство*. 2000. № 4. С. 49–56.

**Кучерова Элла Алексеевна**, канд. техн. наук, проф.; E-mail: maskin@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Сат Дмитрий Хураган-оолович**, ст. препод.; E-mail: silikat-tgu@mail.ru  
Тувинский государственный университет, г. Кызыл

**Кара-сал Борис Комбуй-оолович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: silikat-tgu@mail.ru  
Тувинский государственный университет, г. Кызыл

Получено 08.02.16

**Kucherova Ella Alexeevna**, PhD, Professor; E-mail: maskin@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Sat Dmitriy Huragan-oolovich**, Senior Lecturer; E-mail: silikat-tgu@mail.ru  
Tuvan State University, Kyzyl, Russia

**Kara-sal Boris Kombuy-oolovich**, DSc, Professor; E-mail: silikat-tgu@mail.ru  
Tuvan State University, Kyzyl, Russia

#### THE IMPROVEMENT OF FORMABILITY OF CERAMIC MASS MADE OF COARSE DISPERSED CLAY RAW MATERIAL BY THE INCLUSION OF ZEOLITE-CONTAINING ROCKS

It is shown that the characteristics of the chemical and mineralogical composition and changes in the structure and phase composition of rock-forming minerals of zeolite-containing rocks at crushing and moisturizing allow improving the plasticity and the formability of ceramic mass on the basis of the coarse loam.

**Keywords:** zeolite-containing rocks, crushing, the granulometric composition, plasticity, formability.

REFERENCES

1. Stolboushkin A.Yu. Teoreticheskie osnovy formirovaniya keramicheskikh matrichnykh kompozitov na osnove tekhnogenogo i prirodnogo syr'ya [The theoretical basis for the formation of ceramic matrix composites based on natural and technogenic raw materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2011. No. 2. Pp. 10–13. (in Russia)
  2. Ovcharenko G.I., Sviridov V.L., Kazantseva L.K. Tseolity v stroitel'nykh materialakh [Zeolites in building materials]. Barnaul: Altai State Technical University, 2000. 320 p. (in Russia)
  3. Fomina E.V., Kozhukhova N.I., Pal'shina Yu.V., Strokova V.V., Fomin A.E. Vliyaniye mekhanoaktivatsii na razmernye parametry alyumosilikatnykh porod [The influence of mechanical activation on the dimensional parameters of alumino-silicate rocks]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2014. No. 10. Pp. 28–31. (in Russia)
  4. Kazantseva L.G., Paukshtis E.A., Zavadzkiy V.F., Ovcharenko G.I. Rol' vody pri vspuchivanii glin i tseolitsoderzhashchikh porod [The role of water in swelling clays and zeolite-containing rocks]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2000. No. 4. Pp. 49–56. (in Russia)
-

УДК 691 : 699.86.002.3

Д.А. ЛОБАЧЕВ, В.З. АБДРАХИМОВ, Е.С. АБДРАХИМОВА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫЧИ И МЕЖСЛАНЦЕВОЙ ГЛИНЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ – ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ РАЗВИТИЯ «ЗЕЛеной» ЭКОНОМИКИ\***

Использование отходов нефтедобычи в производстве теплоизоляционных материалов на основе межсланцевой глины без применения природных традиционных материалов позволит значительно утилизировать промышленные отходы, сэкономить дефицитные традиционные природные материалы, расширить сырьевую базу строительных материалов и внесет значительный вклад в охрану окружающей среды, что способствует переходу к «зеленой» экономике и позволит увеличить благосостояние населения, а также снизит риски негативного влияния на окружающую среду.

**Ключевые слова:** отходы производства, «зеленая» экономика, отходы нефтедобычи, межсланцевая глина, теплоизоляционные материалы.

**Введение.** Добыча нефти и газа порождает широкий спектр экологических проблем, оказывающих разрушительное воздействие, порой уже необратимое, на рельеф, флору и фауну регионов. Только в ХМАО (Ханты-Мансийский автономный округ) на 2002 г. накоплено свыше 4 млн т отходов бурения [1], а на территории Тюменской области количество уже сейчас исчисляется десятками миллионов тонн. Накопление негативных изменений в природе может в будущем привести к последствиям масштаба значительно большего всех антропогенных влияний нашего времени. Наиболее остро стоит проблема загрязнения поверхностных вод и самое главное источников питьевой воды [2] – важнейшего элемента существования человечества.

Следует отметить, что на нефтеперерабатывающих заводах России уже накоплено более 95 млн т таких отходов [3]. Под их размещение изымаются земельные площади, уничтожается флора и фауна вокруг хранилищ. Независимо от способа хранения отходов токсины, содержащиеся в шламах, смываются в грунт атмосферными осадками, далее подземными водами выносятся в реки.

Нефтяные шламы образуются при проведении таких производственных процессов, как переработка, добыча и транспортировка нефти. Данный тип

\* Работа выполнена по гранту на тему «Физико-химические процессы и процессы горения при синтезе керамических композиционных теплоизоляционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса» в рамках «Фундаментальные научные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства».

отходов представляет большую опасность для окружающей среды и подлежит захоронению или переработке.

Цель работы: получение теплоизоляционных материалов на основе отходов нефтедобычи и межсланцевой глины без применения природных традиционных материалов.

**«Зеленая» экономика.** Под «зеленой» экономикой подразумевается производство различного рода очистного оборудования, утилизация вторичных ресурсов и отходов, оказание экологических услуг и пр. [4]. В этом случае «зеленая» экономика оказывается лишь частью «большой» экономики. Очевидно, что вряд ли возможно «мирное» сосуществование «зеленой» экономики и природно-ресурсной («коричневой») экономики. При обобщении опыта реализации концепции устойчивого развития международные организации вынуждены были отметить, что угроза нехватки природных ресурсов и негативных последствий активности человека для будущих поколений становится актуальной уже сегодня<sup>1</sup>. Резкое уменьшение коэффициента гумификации в загрязненной нефтью почве свидетельствует о преобладании процессов окисления гумусовых веществ над процессами превращения органических соединений в компоненты гумуса, что снижает плодородие почвы.

«Зеленая» экономика определяется структурами ООН как экономика, которая повышает благосостояние людей, обеспечивает социальную справедливость и при этом существенно снижает риски для окружающей среды и ее деградации. Важными чертами такой экономики являются: эффективное использование природных ресурсов; сохранение и увеличение природного капитала; уменьшение загрязнения; низкие углеродные выбросы; предотвращение утраты экосистемных услуг и биоразнообразия. Например, в докладе ООН приводятся данные о том, что переход к «зеленой» экономике позволит увеличить благосостояние населения, а также снизит риски негативного влияния на окружающую среду.

**Сырьевые материалы.** Для получения легковесного кирпича в качестве глинистого компонента использовалась межсланцевая глина<sup>2</sup>. Межсланцевая глина образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) и является отходом горючих сланцев. По числу пластичности межсланцевая глина относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27–32) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см<sup>3</sup>. Химические составы: оксидного и поэлементного межсланцевой глины представлены в табл. 1, 2, фракционный состав в табл. 3, а технологические в табл. 4.

Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюда, монтморилло-

<sup>1</sup> Никулина Е.Ю., Плаксина И.А., Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С., Лобачев Д.А. Использование отходов топливно-энергетического комплекса – перспективное направление для «зеленой» экономики и оценка экономической эффективности производства керамических теплоизоляционных материалов // Экологические системы и приборы. 2015. № 10. С. 30–38.

<sup>2</sup> Колпаков А.В., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Рошупкина И.Ю. Использование нефтяного шлама в производстве теплоизоляционных материалов на основе межсланцевой глины // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 6. С. 21–25.

Таблица 1. Оксидный химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	П.п.п.
1. Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20
2. Буровой шлам Оренбургской области	26–28	4–5	5–6	28–30	1–2	0,5–1	33–35

Таблица 2. Поэлементный анализ компонентов

Компонент	Элементы									
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	S	K	Ca	Fe
1. Межсланцевая глина	5,73	51,06	0,46	1,04	7,20	18,66	1,83	1,75	10,53	3,35
2. Буровой шлам Оренбургской области	17,08	37,92	0,94	0,83	6,18	10,38	1,87	0,92	19,08	4,08

Таблица 3. Фракционный состав компонентов

Компонент	Содержание фракций, %, размер частиц, мм				
	> 0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,0001
1. Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
2. Буровой шлам Оренбургской области	12,1	12,8	15,1	21,3	38,7

Таблица 4. Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1. Межсланцевая глина	1100	1260	1290	1320
2. Буровой шлам Оренбургской области	3500	1800	1240	1270

нита и кальцита<sup>3,4</sup>. Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюда.

В качестве отощителя для сокращения времени сушки кирпича сырца использовался буровой шлам. Буровой шлам — водная суспензия, твердая часть которой состоит из продуктов разрушения горных пород забоя и стенок скважины, продуктов истирания бурового снаряда и обсадных труб, глинистых минералов (при промывке глинистым раствором).

Из табл. 4 видно, что буровой шлам имеет повышенную теплотворную способность, поэтому данный компонент целесообразно использовать в качестве выгорающей добавки. К группе выгорающих добавок относятся различные виды твердого топлива, в частности антрацит, коксовая мелочь и др. Их вводят в состав шихты до 3 % по объему, т.е. до 60–80 % от общей потребности топлива на обжиг изделий. Назначение их — интенсифицировать

<sup>3</sup> Абдрахимов В.З., Денисов Д.Ю. Исследование фазовых превращений на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой глины // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 34–42.

<sup>4</sup> Пат. 2440312 РФ, МПК С 1, С 04 В 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Е.С. Абдрахимова, И.Ю. Рошупкина, В.З. Абдрахимов, В.А. Куликов; заяв. 31.05.2010; опублик. 20.01.2012, Бюл. 2.

процесс обжига, улучшить спекаемость массы и тем самым повысить прочность изделий.

За счет повышенного содержания в буровом шламе п.п.п. (см. табл. 1) и содержания углерода (см. табл. 2), которые выгорают при обжиге, в керамическом материале создается пористость, в результате чего получается пористый легковесный кирпич (теплоизоляционный) с низкой плотностью.

**Экспериментальная часть.** Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 18–22 %, из которой формовали кирпичи размером 250×120×65 мм. Высушенные кирпичи до остаточной влажности не более 5 % обжигались при температуре 1000 °С (конечная температура обжига на Кротовском кирпичном заводе). В табл. 5 приведены составы керамических масс, а в табл. 6 – физико-механические и химические свойства клинкерных кирпичей при конечной температуре обжига.

**Таблица 5. Составы керамических масс**

Компонент	Содержание компонентов, мас. %		
	1	2	3
1. Межсланцевая глина	80	70	60
2. Буровой шлак Оренбургской области	20	30	40

**Таблица 6. Физико-механические показатели кирпича**

Показатели	Составы		
	1	2	3
Предел прочности при сжатии, МПа	10,6	10,1	8,0
Предел прочности при изгибе, МПа	2,4	2,3	1,9
Морозостойкость, циклы	30	21	15
Усадка, %	7,6	7,0	6,8
Термостойкость, теплосмены	2	5	4
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1400	1050	980
Теплопроводность, Вт/(м · °С)	0,21	0,19	0,17

При содержании органики 20–30 % положительный эффект достигается добавкой в шихту не более 30 % нефтяного шлама. В этих случаях буровой шлак способен заменить вводимый в шихту уголь, создавать восстановительную среду в толще обжигаемого материала и при достаточном количестве в глинистом сырье оксидов железа (более 3–5 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) перевести их в закисные соединения и интенсифицировать процесс обжига<sup>5, 6</sup>. Наименьшую плотность имеет легковесный кирпич состава № 3 (см. табл. 6). Буровой шлак не только повышает пористость керамических

<sup>5</sup> Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Структурные превращения соединений железа в глинистых материалах по данным мессбауэровской спектроскопии // Журнал физической химии. 2006. Т 80. № 7. С. 1–8.

<sup>6</sup> Абдрахимов В.З., Долгий В.П., Абдрахимова Е.С. Влияние железосодержащего шлака на структуру пористости керамического кирпича // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 1. С. 36–39.

изделий, но также способствует равномерному спеканию керамического черепка. При выгорании органической добавки выделяется небольшое количество сопутствующих газов, что приводит к уплотнению стенок вокруг каждой частички, а в итоге повышает прочность всего изделия.

**Выводы.** 1. Исследования показали, что полученный из отходов нефтедобычи и энергетики без применения природных традиционных материалов легковесный кирпич имеет средний коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,17-0,21$  Вт/(м · °С).

2. Использование бурового шлама и межсланцевой глины способствует рациональному природопользованию за счет вовлечения отходов в производство керамических материалов; созданию энерго- и ресурсосберегающих технологий по производству теплоизоляционных материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевелева Т.Н., Рамзова С.А. Отходы производства // Информационный бюллетень «О состоянии окружающей среды ХМАО». Ханты-Мансийск: НПВ Мониторинг, 2003. 85 с.
2. Рядинский В.Ю., Скипин Л.Н., Богданова О.Г. Методы очистки нефтезагрязненных вод // Горные ведомости. 2005. № 10. С. 24–32.
3. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В., Вдовин К.М. Буровой шлам в производстве изделий строительной керамики // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 75–77.
4. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К. Использование отходов золоторудного месторождения, нефтехимии и энергетики в производстве керамических материалов перспективное направление для «зеленой» экономики // Экология и промышленность России. 2015. № 5. С. 37–41.

**Лобачев Дмитрий Анатольевич**, ст. препод.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

**Абдрахимов Владимир Закирович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: 3375892@mail.ru

Самарский государственный экономический университет

**Абдрахимова Елена Сергеевна**, канд. техн. наук, доц.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Получено после доработки 25.02.16

**Lobachev Dmitriy Anatol'evich**, Senior Lecturer

Samara State University of Architecture, Building and Civil Engineering, Russia

**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, DSc, Professor;

E-mail: 3375892@mail.ru

Samara State University of Economics, Russia

**Abdrakhimova Elena Sergeevna**, PhD, Ass. Professor

Samara State Aerospace University, Russia

#### **THE USE OF WASTE OIL PRODUCTION AND INTERSLATE CLAY IN MANUFACTURE OF THERMAL INSULATION MATERIALS – A PRIORITY FOR THE DEVELOPMENT OF A GREEN ECONOMY**

The use of waste oil in the manufacture of insulating materials based on interslate clay without the use of traditional natural materials will significantly dispose of industrial waste,

saving of scarce traditional natural materials, to expand the resource base of construction materials and will make a significant contribution to environmental protection, which contributes to the transition to a green economy and will increase the welfare of the population, and reduce the risk of negative impact on the environment.

**Key words:** production waste, green economy, waste oil, mislava clay, thermal insulation materials.

#### REFERENCES

1. Sheveleva T.N., Ramzova S.A. Otkhody proizvodstva [Production waste]. Informatsionnyy byulleten' «O sostoyanii okruzhayushchey sredy KhMAO» [Information Bulletin «On the state of the environment of the Khanty-Mansiysk Autonomous district»]. Khanty-Mansiysk: LEL Monitoring, 2003. 85 p. (in Russia)
2. Ryadinskiy V.Yu., Skipin L.N., Bogdanova O.G. Metody ochistki neftezagryaznennykh vod [Methods for cleaning oil polluted water]. Gornye vedomosti [Mountain Gazette]. 2005. No. 10. Pp. 24–32. (in Russia)
3. Gur'eva V.A., Dubinetskiy V.V., Vdovin K.M. Burovoy shlam v proizvodstve izdeliy stroitel'noy keramiki [Drill cuttings in the manufacture of products of building ceramics]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2015. No. 4. Pp. 75–77. (in Russia)
4. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S., Kayrakbaev A.K. Ispol'zovanie otkhodov zolotorudnogo mestorozhdeniya, neftekhimii i energetiki v proizvodstve keramicheskikh materialov perspektivnoe napravlenie dlya «zelenoy» ekonomiki [The Use of waste gold deposit, petrochemicals and energy in the production of ceramic materials is a promising direction for green economy]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]. 2015. No. 5. Pp. 37–41. (in Russia)

УДК 691.554 : 666. 92

В.И. ЛОГАНИНА, А.Д. РЫЖОВ

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ  
ИЗВЕСТКОВО-ПЕРЛИТОВОЙ СУХОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНТЕЗИРОВАННЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ**

Приведены сведения о методике оценки прочности сцепления на срез отделочного растворного слоя. Описана методика испытаний на срез отделочного слоя относительно подложки. Представлены результаты испытаний на сдвиг отделочного растворного слоя на основе разработанной рецептуры известково-перлитового отделочного состава с улучшенными теплоизоляционными свойствами. Проведена статистическая обработка полученных данных. Указаны значения упругих и пластических деформаций, возникающих в растворном слое. Показан модуль сдвига в зависимости от состояния испытанного образца. Выявлено влияние состояния образца на его прочностные характеристики.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** сухие строительные смеси, прочность сцепления, методика, сдвиг растворного слоя.

Строительство и поддержание рабочего состояния зданий и сооружений требуют большого количества отделочных составов, которые образуют на поверхностях строительных конструкций (чаще всего бетонных и штукатурке) покрытия, выполняющие защитные, декоративные и специальные функции.

Учитывая, что объем отделочных работ по трудозатратам составляет около 30 % всех трудозатрат при строительстве, актуальным является разработка отделочных составов, покрытия, на основе которых обладают повышенными эксплуатационными свойствами.

Отделочные составы наносятся на жесткие подложки (поверхности бетонных, кирпичных стен, оштукатуренные поверхности). Поэтому твердение покрытия происходит при наличии адгезионной связи между покрытием и жесткой подложкой. В процессе отверждения отделочные составы претерпевают усадочные деформации вследствие испарения воды, протекания химических реакций и процессов структурообразования. Монолитность отделки будет зависеть от разности усадочных (или температурных) деформаций основания ( $\epsilon_2$ ) и отделочного слоя ( $\epsilon_1$ ) [1, 2]. Для оценки стойкости покрытий к отслаиванию и растрескиванию необходимо знать распределение сдвигающих и растягивающих напряжений по протяженности контакта отделочного слоя и его толщине. Полученные значения напряжений сравнивают с показателями прочности на растяжение и сцепления покрытий с подложкой.

Значение прочности сцепления в основном определяют методом отрыва. Однако растворный слой в процессе эксплуатации испытывает также и сдвиговые нагрузки относительно подложки. В связи с этим необходимо проводить испытания также и на сдвиг.

© Логанина В.И., Рыжов А.Д., 2016

Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что существует методика определения прочности сцепления на срез полимерных клеев и пластмасс [3]. Однако такая методика не учитывает влияние масштабного фактора и не позволяет определять прочность отделочного растворного слоя на сдвиг. В работах [4, 5] предложена методика испытания на прочность касательного сцепления кладочных растворов. Однако условия твердения отделочного слоя отличаются от схемы испытаний, предложенной авторами.

В работе [6] дана методика определения сопротивления при сдвиге с помощью прибора ГТ 2.2.3 производства ООО НПП «Геотек» [7].

Испытание образцов проходит по схеме, представленной на рис. 1.

Принцип работы прибора ГТ 2.2.3 заключается в создании в испытательной установке горизонтальной сдвигающей нагрузки на образец на основе исследуемого состава (см. рис. 1).

Указанная методика и прибор ГТ 2.2.3 использовались для определения прочности сцепления на сдвиг растворного слоя на основе разрабатываемой известково-перлитовой штукатурки с улучшенными теплоизоляционными свойствами [8, 9]. Для испытаний применялась рецептура сухой строительной смеси (ССС), включающая следующие компоненты: белый цемент, известь-пушонка, алюмосиликатная добавка, пластификатор Melflux 1641 f, редиспергируемый порошок Vinnapas 8031N, перлитовый песок.

Для проведения испытаний предварительно изготовлены подложки на цементно-песчаной основе цилиндрической формы, геометрические размеры которых составляют 71,4×15 мм. После твердения на подложку наносили исследуемый отделочный состав толщиной, равной 10 мм. Испытываемый образец помещался в каретку прибора таким образом, чтобы подложка находилась в малом срезном кольце 2, а исследуемый состав – в большом срезном кольце 3 (см. рис. 1). Оставшийся объем большого срезного кольца заполнялся гипсовым тестом для обеспечения лучшей фиксации образца и равномерного распределения нагрузки на него. Технологический зазор размером 1 мм образует область среза. В процессе испытаний при увеличении касательной нагрузки, применяемой к нижнему срезному кольцу, фиксировалось значение деформаций сдвига исследуемого состава относительно подложки.

После отверждения образцы испытывались в сухом и увлажненном состоянии. Кроме того, часть образцов в увлажненном состоянии перед испытаниями выдерживалась в морозильной камере в течение 12 ч. Выбрана оптимальная скорость сдвига растворного слоя, равная 0,01 мм/мин. В процессе проведения эксперимента проводились замеры прочности на сдвиг растворного слоя. Результаты испытания представлены в таблице и на рис. 2.

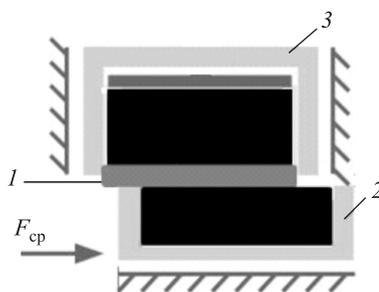


Рис. 1. Схема работы прибора ГТ 2.2.3

1 – растворный слой; 2 – малое срезное кольцо; 3 – большое срезное кольцо

## Деформативные характеристики покрытий

Образец	Прочность при сдвиге, МПа	Модуль сдвига, МПа	$\epsilon_{уп}$ , мм/мм	$\epsilon_{пл}$ , мм/мм	$\epsilon_{об}$ , мм/мм
Сухой	0,2	59	0,00084	0,0048	0,00564
Замороженный	0,23	83	0,00057	0,0044	0,00497
Влажный	0,18	41	0,00042	0,0075	0,00792

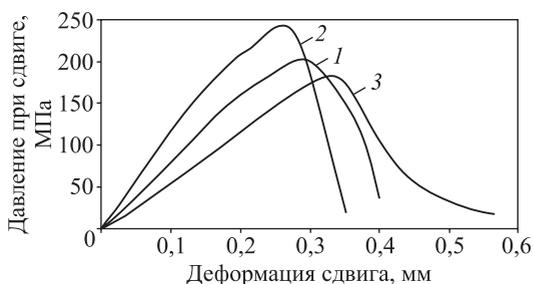


Рис. 2. График зависимости давления сдвига от деформаций сдвига

1 – образец, испытанный в сухом состоянии при температуре 20 °С; 2 – образец, испытанный в увлажненном состоянии с последующим замораживанием при температуре –20 °С; 3 – образец, испытанный в увлажненном состоянии при температуре 20 °С

Для характеристики однородности данных, полученных при проведении эксперимента с помощью предлагаемой методики, был определен коэффициент вариации. Для расчета использовались значения прочности при сдвиге, полученные в ходе испытаний серии образцов. Среднеквадратическое отклонение при испытании серии образцов составляет  $\sigma = 3-6$  кПа. Полученный коэффициент вариации равен  $v = 1,5-2,6$  %, следовательно, изменчивость вариативного ряда можно считать незначительной. Погрешность измерений самого прибора составляет 0,5 % от диапазона измерений.

Проведенные исследования, данные статистической обработки, результаты измерений позволяют рекомендовать прибор и методику для оценки прочности сцепления на сдвиг растворного отделочного слоя.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона. М.: Стройиздат, 1965. 190 с.
2. Горчаков Г.И., Орентлихер Л.П., Лифанов И.И., Мурадов Э.Г. Повышение трещиностойкости и водостойкости легких бетонов для ограждающих конструкций. М.: Стройиздат, 1971. 158 с.
3. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974.
4. Деркач В.Н. Прочность касательного сцепления цементных растворов в каменной кладке // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 3. С. 19–28.
5. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7(25). С. 3–10.

6. Жегера К.В., Пышкина И.С., Рыжов А.Д., Живаев А.А. Методика оценки прочности сцепления растворного слоя на основе сухих строительных смесей // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 3. С. 64–67.
7. Пат. 2132545 Российская Федерация, МПК G01N3/24, E02D1/00. Сдвиговый прибор / Г.Г. Болдырев, О.В. Хрянина; заявитель и патентообладатель Пензен. гос. архит.-строит. ин-т; заявл. 22.07.1996; опубл. 27.06.1999. 4 с.
8. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates // Case Studies in Construction Materials. 2015. Pp. 132–136 DOI information: 10.1016/j.cscm.2015.10.005
9. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Properties of Lime Composites with the Addition Aluminosilicates // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8. No. 10, 409-413 NIKARI Ltd, www.m-hikari.com <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5237>

**Логанина Валентина Ивановна**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: [loganin@mail.ru](mailto:loganin@mail.ru)  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
**Рыжов Антон Дмитриевич**, асп.; E-mail: [penza48@yandex.ru](mailto:penza48@yandex.ru)  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено после доработки 26.02.16

**Loganina Valentina Ivanovna**, DSc, Professor; E-mail: [loganin@mail.ru](mailto:loganin@mail.ru)  
Penza State University of Architecture and Construction, Russia  
**Ryzhov Anton Dmitrievich**, Post-graduate Student; E-mail: [penza48@yandex.ru](mailto:penza48@yandex.ru)  
Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **EVALUATION OF THE BOND STRENGTH OF LIME- PERLITE DRY CONSTRUCTION MIXTURES WITH SYNTHETIC ALUMINUM SILICATES**

Data on method of evaluating the adhesion shear layer mortar. A technique for testing shear mortar layer relative to the substrate with respect to wall finishing materials, in particular lime finishing compositions. The results of testing the shear layer of mortar on the basis of the developed recipes lime-perlite finishing composition with improved thermal insulation properties. Statistical analysis of the data obtained. The shown values of the elastic and plastic deformations resulting in a solution layer. Showed the shear modulus as a function of the sample tested state. The influence of the state of the sample on its strength characteristics.

**Key words:** dry mortar, adhesive strength, technique, shifting the mortar layer.

### REFERENCES

1. Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtaev B.G. Povyshenie morozostoykosti betona [Increasing the frost resistance of concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1965. 190 p. (in Russia)
2. Gorchakov G.I., Orentlikher L.P., Lifanov I.I., Muradov E.G. Povyshenie treshchinostoykosti i vodostoykosti legkikh betonov dlya ograzhdayushchikh konstruksiy [Increased crack resistance and water resistance for lightweight concrete walling]. Moscow, Stroyizdat, 1971. 158 p. (in Russia)
3. Berlin A.A., Basin V.E. Osnovy adgezii polimerov [Fundamentals of polymer adhesion]. Moscow, Chemistry, 1974. (in Russia)
4. Derkach V.N. Prochnost' kasatel'nogo stsepleniya tsementnykh rastvorov v kamennoy kladke [The strength of shear adhesion of cement mortars in masonry].

- Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of civil engineering]. 2012. No. 3. Pp.19–28. (in Russia)
5. Orlovich R.B., Derkach V.N. Otsenka prochnosti kladochnykh rastvorov pri obsledovanii kamennykh zdaniy [Evaluation of the strength of mortars when examining stone buildings]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of civil engineering]. 2011. No. 7 (25). Pp. 3–10. (in Russia)
  6. Zhegera K.V., Pyshkina I.S., Ryzhov A.D., Zhivayev A.A. Metodika otsenki prochnosti stsepleniya rastvornogo sloya na osnove sukhikh stroitel'nykh smesey [Methods of assessing the adhesion layer of mortar on the basis of dry mixes]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. 2015. No. 3. Pp. 64–67. (in Russia)
  7. Pat. 2132545 Russian Federation, IPC G 01N 3/24, E 02 D 1/00. Sdvigovyy pribor [Box shear device]. G.G. Boldyrev, O.V. Khryanina; claimer and patent holder Penza State University of Architecture and Construction; appl. 22.07.1996; publ. 27.06.1999. 4 p. (in Russia)
  8. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates Case Studies in Construction Materials. 2015. Pp. 132–136 DOI information: 10.1016/j.cscm.2015.10.005
  9. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Properties of Limy Composites with the Addition Aluminosilicates Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8. No. 10, 409-413HIKARI Ltd, www.m-hikari.com <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5237>
-

## **ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**



УДК 69.003 : 698.012.12

**В.В. ГЕРАСИМОВ, А.К. ИСАКОВ, Г.Б. САФАРЯН, С.В. ИВАНОВ**

### **УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Эффективность решений является важным критерием оценки уровня использования ресурсов. Из-за сложности параметрирования ситуаций, обусловленной необходимостью использования качественных и количественных оценок, уровень достоверности решений еще не соответствует требованиям, предъявляемым к строительным документам – проектам, планам, программам. Качественные оценки обусловлены необходимостью связывания различных оценок в области инженерных и экономических решений. Инженерными решениями отображаются градостроительные и типологические особенности застройки объектов территории, объемно-планировочные и конструктивные решения объектов, а также организационно-технологические решения. Экономическими решениями отображаются особенности формирования затрат ресурсов и организации денежных потоков.

Особенность оценки этих решений обусловлена необходимостью использования принципов инженерного менеджмента, которыми предусматривается использование интегрированных возможностей всех видов ресурсов на основе оптимизации параметров объектов.

Ниже предложен методический подход разработки технико-экономических решений как многопараметрического комплекса строительных объектов, на основе которого осуществляется проектирование, планирование и управление динамикой процессов, проектов и программ строительного комплекса с оценкой, ориентированной на рост производительности производства.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** эффективность, технико-экономические решения, строительство, методика, производительность.

Технико-экономические решения (ТЭР) в строительном производстве являются системообразующими установками, по которым осуществляются проектирование, планирование и управление. Технические решения характеризуются параметрами градостроительно-типологических и конструктивно-планировочных решений, а организационно-технологические – типологией ресурсных потоков объектов. Эффективность этих решений зависит от уровня согласования затрат процессов и функциональных качеств пространственной и типологической организации объектов. При этом техническими

© Герасимов В.В., Исаков А.К., Сафарян Г.Б., Иванов С.В., 2016

решениями формируются активы в составе основных фондов, которыми определяются экономические выгоды.

Экономические решения представляются финансово-экономическими параметрами, в которых реализуются технические решения. Этими решениями создается пространство факторов, в которых оптимизируются параметры экономических решений. К таким параметрам относятся уровни ставок за инвестиции, налоги, инфляция, риски и др.

Опыт показывает, что разработка ТЭР осуществляется в соответствии со следующими принципами:

- выбор эффективных технических решений ориентирован на принятие в качестве базы сравнения уже существующего варианта решения;
- оптимизация параметров решения осуществляется по критерию максимизации денежного эффекта;
- при принятии эффективных решений не учитывается фактор инфраструктурных решений по сопряженным капитальным вложениям в производственную базу строительства.

Приведенные положения не соответствуют современным требованиям научно-технического прогресса, которыми должно предусматриваться достижение не столько денежных результатов, сколько результатов роста производительности производства. Вместе с этим такие решения не предусмотрены в рамках специализированного менеджмента [1, 2]. Практика показывает, что решение этой задачи должно осуществляться в трех сферах: в проектировании – оптимизация технических параметров, в строительстве – оптимизация с учетом факторов риска, в эксплуатации объектов – оптимизация в условиях неопределенности. Это реализуется в строительных документах и имеет важное практическое значение. Отсутствие единой методической основы оценки решений, ориентированной на рост производительности производства, снижает достоверность решения проектных, плановых и прогнозных задач.

Исходя из приведенного выше следует, что в рамках ТЭР выполняются следующие функции формирования производительности потенциала организации: объемно-планировочными и конструктивными решениями – функции базы данных; организационно-технологическими решениями (ОТР) – функциональные модели производительности; финансово-экономическими решениями (ФЭР) – функции обеспечения реализации решений производительности. Анализ показывает, что разработка сквозной интегрированной модели оценки ТЭР, ориентированной на производительность потенциала, представляет важную задачу.

Для решения этой задачи проведены исследования проектных материалов и исполнительских документов строительных организаций и установлено следующее:

- проектные стандарты организационно-технологических решений разрабатываются для детерминированных условий, а оптимизация динамики ресурсов оценивается экономическими результатами вариантов решений;
- методические инструкции проектных стандартов не ориентированы на оптимизацию ОТР по этапам динамики жизненного цикла проектов и работ;

– ОТР слабо ориентированы на механизм взаимодействия с внешней средой и реакции на внутренние производственные факторы;

– критерии качества ОТР в проектном и плановом процессе реализации объектов строительства не имеют соответствующей методической поддержки [3].

В работе приняты положения теории информационного управления, при котором решение основано на формировании сетевых структур параметров, отображающих правила решения проблем и задач. При этом ТЭР могут быть представлены двумя блоками ОТР и ФЭР, взаимодействие параметров которых определяет базу данных параметров и оценок для выбора решений. При этом модельный комплекс системы решений включает модели, методы и инструменты, ориентированные на оценку потенциала производительности объекта. Основной задачей моделирования является изменение архитектуры параметров и показателей оценки решений в направлении формирования алгоритма по выбору решений в рамках принятого подхода.

Логико-информационный модельный комплекс оценки методом относительных оценок потенциала объектов для ОТР имеет вид [4, 5]:

$$Эз = \{Зо/(Змт + Зтр + Змх)\} = (1; >1; <1), \quad (1)$$

$$(+ \Delta Zi) \Rightarrow Зomin, \quad (2)$$

$$Эк = \{Ко/(Кмт + Ктр + Кмх)\} = (1; >1; <1), \quad (3)$$

$$(+ \Delta Ki) \Rightarrow Komin, \quad (4)$$

$$Ээз = \{Эо/(Экр + Этр + Эвв)\} = (1; >1; <1), \quad (5)$$

$$(+ \Delta Эi) \Rightarrow Эomin, \quad (6)$$

$$По = Vо/(Змт, Зтр, Змх)_i \Rightarrow \max, \quad (7)$$

$$Вр: \{(-\Delta Змт) \vee (-\Delta Змт) \vee (-\Delta Змх) \vee (+\Delta V) \vee (+\Delta К + \Delta Э)\}, \quad (8)$$

$$Вб: \{+\Delta По > +\Delta ПЗ\}, \quad (9)$$

где Эз – эффективность затрат, ориентированная в области оценок, – на уровне норматива, выше и ниже норматива;

Зо – затраты объекта;

Змт, Зтр, Змх – соответственно затраты материалов, труда, механизации;

$\Delta Zi$  – отклонение за капитальные вложения объекта;

Кмт, Ктр, Кмх – соответственно капитальные вложения в отрасли материалов, труда, механизации;

$\Delta Ki$  – отклонение капитальных вложений  $i$ -го типа;

Ээз – эффективность эксплуатационных затрат;

Эо – эксплуатационные затраты объекта;

Экр, Этр, Эвв – соответственно эксплуатационные затраты – капитальный ремонт, текущий ремонт, восстановление;

$\Delta Эi$  – отклонение эксплуатационных затрат  $i$ -го типа;

По – производительность объекта;

$V$  – объем продукции организации;

Вр – вариантный ряд решений;

Вб – условия выбора;  
 Пз – приведенные затраты.

Уравнения (1–6) отображают условия формирования параметров относительной оценки эффективности по трем сферам деятельности: единовременным затратам, сопряженным капитальным вложениям, текущим затратам; (7) – условия формирования производительности производства по сферам деятельности; (8, 9) – условия по выбору варианта ОТР производительности.

Результаты идентификации параметров с наибольшей производительностью объекта ОТР являются основой для включения их в оценку методом абсолютных оценок. Логико-информационный модельный комплекс оценки методом абсолютных оценок для ФЭР потенциала объекта имеет вид:

$$Эо = \{З + ЧД\}/З = (1; >1; < 1), \quad (10)$$

$$(\Delta\betaв, \Delta\betaи, \Delta\betaн) \Rightarrow З\text{оmin}, \quad (11)$$

$$Эз = \{З/(Зп + Зи + Зн)\} = (1; >1; < 1), \quad (12)$$

$$Эи = \{И/(И + Из)\} = (1; >1; < 1), \quad (13)$$

$$Эн = \{Н/(Н + Нз)\} = (1; >1; < 1), \quad (14)$$

$$+\Delta Зо \Rightarrow -\Delta Дх \Rightarrow -\Delta Пз, \quad (15)$$

$$+\Delta Ио \Rightarrow -\Delta Дх \Rightarrow -\Delta Пи, \quad (16)$$

$$+\Delta Но \Rightarrow -\Delta Дх \Rightarrow -\Delta Пн, \quad (17)$$

$$\{(\Delta Зо) \vee (\Delta Ио) \vee (\Delta Но)\} \Rightarrow \Delta В \Rightarrow \Delta По, \quad (18)$$

где Эо – эффективность объекта;  
 З – затраты;  
 ЧД – чистый доход;  
 Δβв – нормативы ставок к выручке;  
 Δβи – нормативы ставок к инвестициям;  
 Δβн – нормативы ставок к налогам;  
 В – выручка;  
 И – инвестиции;  
 Н – налоги;  
 Нз – затраты по налогам;  
 Пз – производительность по затратам;  
 Дх – доход.

Уравнение (10) отображает условия формирования параметров абсолютной оценки эффективности по трем сферам деятельности: затратам, инвестициям, налогам; (11–17) – условия формирования производительности производства по сферам деятельности; (18) – условия формирования базы данных для анализа и принятия решений по выбору вариантов ФЭР.

Алгоритм оценки ТЭР методом целевых оценок, основанный на использовании производительности в качестве главного критерия эффективности, включает следующие задачи:

– разработка параметров организации и технологии процессов с формированием критерия производительности производства в системе технических решений объекта;

- формирование факторного пространства, отражающего сопряженные затраты для реализации технических решений объекта;
- оптимизация технико-экономических параметров объекта с выбором решений на основе критерия производительности;
- оптимизация значений технико-экономических параметров объекта с учетом риска.

Выполненные расчеты на примере проектов развития строительных объектов г. Новосибирска позволили установить количественные оценки оптимизации параметров на основе различных методов, определяющих эффективность ОТР (см. таблицу).

**Оценка эффективности решений различными методами на примере объектов жилищного строительства г. Новосибирска**

Методы	Зп	К	Эк	ПЗ	Зи	Зн	ЧД	Э	Критерий оценки
МОО	+	+	+	+				1	ПЗ
МАО	+				+	+	+	1,1	ЧД
МЦО	+	+	+	+	+	+	+	1,3	По

*Примечание.* МОО – метод относительных оценок; МАО – метод абсолютных оценок; МЦО – метод целевых оценок; Зп – затраты производства; К – капитальные вложения; Эк – эксплуатационные затраты; ПЗ – приведенные затраты; Зи – затраты по инвестициям; Зн – затраты по налогам; ЧД – чистый доход; Э – эффективность.

Из таблицы следует:

- эффективностью ТЭР отображаются внутренние особенности объемно-конструктивных решений объекта и возможности их реализаций строительным потенциалом;
- использование целевого подхода позволяет максимизировать эффективность решений за счет использования приоритета оценки по производительности производства по сравнению с экономическими и финансовыми критериями существующих методик оценки;
- полученные данные могут быть использованы в качестве базы нормативов по обоснованию реальных затрат строительства на всем жизненном цикле проектирования и строительства объектов;
- эффект за счет формирования оценок и выбора по производительности производства основан на снижении расхода ресурсов в ТЭР и достаточности эффекта ресурсосбережения для покрытия малоэффективных ФЭР.

Разработка информационной технологии должна быть направлена на формирование автоматизированного комплекса сетевых моделей, которым могут решаться задачи: нормализации параметров проектных решений на основе интегрированных нормативов и критериев качества использования ресурсов; корректировки проектных решений под фактические возможности потенциала организации с максимизацией значений критериев качества; управление по критериям качества решений с учетом изменяемых факторов внешней среды; управления знаниями в сфере проектного менеджмента.

**Выводы.** 1. Обоснование эффективности решений – строительных объектов, планов, проектов, программ на практике осуществляется в пространстве финансового и экономических факторов и оценок, ориентированных на денежный результат.

2. Существующие методики не ориентированы на проектную параметризацию и не учитывают важную составляющую прогресса решений – уровень роста производительности производства.

3. Предложенный методический подход основан на этапном подходе, при котором на первом этапе выявляется решение, эффективное с точки зрения роста производительности производства, а на втором – решение с учетом сопряженных эффектов и внешних факторов.

4. Направленное управление параметрами ТЭР позволяет контролировать уровень качества технических решений и на этой основе способствовать росту экономической эффективности строительного производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимов В.В., Коробова О.А., Михальченко О.Ю. Основы инженерного менеджмента строительного производства. Новосибирск: НГАСУ, 2015. 156 с.
2. Герасимов В.В., Шерстяков А.А., Яненко Е.Н. Креативные технологии менеджмента организации. Новосибирск: НГАСУ(Сибстрин), 2014. 80 с.
3. Герасимов В.В., Минина Л.С. Интегрированное проектирование объектов жилищного строительства. Новосибирск: НГАСУ, 2001. 194 с.
4. СН 423–71. Инструкция по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительстве. М.: Стройиздат, 1979.
5. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. М.: Госстрой РФ, 1999. 623 с.

**Герасимов Виталий Владимирович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Исаков Алексей Константинович**, канд. экон. наук, доц.

Сургутский государственный университет

**Сафарян Геворг Борисович**, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Иванов Степан Витальевич**, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 12.02.16

**Gerasimov Vitaliy Vladimirovich**, DSc, Professor

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

**Isakov Alexey Konstantinovich**, PhD, Ass. Professor

Surgut State University, Russia

**Safaryan Gevorg Borisovich**, Post-graduate Student

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

**Ivanov Stepan Vital'evich**, Post-graduate Student

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

#### PERFORMANCE MANAGEMENT TECHNICAL AND ECONOMIC SOLUTIONS FACILITIES CONSTRUCTION

The effectiveness of solutions is an important evaluation criterion for determining the quality of the use of resources at all levels. At the same time due to the complexity of parameterization situations caused by the need to use qualitative and quantitative

assessments of the level of reliability of the solutions it is still insufficient for various levels of documents - projects, plans and programs. Qualitative assessment due to the necessity of linking the various estimates in the engineering and economic clusters. Engineering solutions and displaying characteristics of urban typologies in the area of space planning and designs of objects, organizational and technological solutions in the field of construction processes, financial and economic decision-making in the area of cash flows.

A feature of the assessment is the use of the principles of engineering management, which provides for the use of the integrated features of all sections of specializations that are involved in the optimization of the parameters of the objects. The methodical approach to the development of technical and economic solutions as a multi-parameter complex construction projects, on the basis of which the design, planning and management processes, the dynamics, the projects and programs with the evaluation building complex organizational and technological, financial and cost-effective solutions.

**Key words:** efficiency, technical and economic solutions, construction, technique, efficiency.

#### REFERENCES

1. Gerasimov V.V., Korobova O.A., Mihal'chenko O.Yu. Osnovy inzhenernogo menedzhmenta stroitel'nogo proizvodstva [Fundamentals of Engineering Management of building production]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2015. 156 p. (in Russia)
2. Gerasimov V.V., Sherstyakov A.A., Yanenko E.N. Kreativnye tekhnologii menedzhmenta organizatsii [Creative Technology Management Organization]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2014. 80 p. (in Russia)
3. Gerasimov V.V., Minina L.S. Integrirovannoe proektirovanie ob'ektov zhilishchnogo stroitel'stva [Integrated design of housing projects]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2001. 194 p. (in Russia)
4. SN 423–71. Instruksiya po opredeleniyu ekonomicheskoy effektivnosti kapital'nykh vlozheniy v stroitel'stve [Instructions for determining the economic efficiency of capital investments in construction]. Moscow, Stroyizdat, 1979. (in Russia)
5. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov [Methodical recommendations according to efficiency of investment projects]. Moscow, Gosstroy RF, 1999. 623 p. (in Russia)

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА



УДК 697.971.001.24

О.Д. САМАРИН

### О НОВОМ ПОДХОДЕ К ПОВЕРОЧНОМУ РАСЧЕТУ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ ПРИ УЧЕТЕ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

Рассмотрен процесс изменения состояния влажного воздуха в оборудовании систем механической вентиляции или кондиционирования воздуха при использовании утилизации теплоты с целью предварительного подогрева притока в холодный период года в условиях конденсации водяных паров. Исследованы особенности теплопередачи в аппаратах теплоутилизации при наличии конденсации и изложен алгоритм расчета фактического количества передаваемой теплоты в зависимости от принятого значения температуры и энтальпии наружного воздуха с учетом наличия конденсации. Приведено сопоставление полученных результатов с существующей методикой на основе построения в  $I-d$ -диаграмме эквивалентного «сухого» процесса охлаждения воздуха в теплоизвлекающей части рекуператора. Дана оценка точности предлагаемого алгоритма и определены условия его применимости. Изложение проиллюстрировано числовыми и графическими примерами.

**Ключевые слова:** теплообмен, конденсация, влагосодержание, число единиц переноса, эквивалентный «сухой» процесс.

При конструировании установок обработки воздуха для систем обеспечения микроклимата зданий часто приходится встречаться с таким режимом работы поверхностных воздухоохладителей и утилизаторов теплоты, когда происходит конденсация водяных паров из охлаждаемого потока. Тепловой расчет теплообменников в этом случае имеет некоторые специфические особенности из-за необходимости учитывать влияние конденсации на процесс теплообмена. В отечественной практике чаще всего это делается за счет замены реального процесса охлаждения с конденсацией на фиктивный эквивалентный «сухой» процесс с определением соответствующих условных начальных и конечных температур воздуха [1]. Такой метод является достаточно распространенным и отработанным, но требует для своей реализации графического построения на  $I-d$ -диаграмме.

В последнее время появляются публикации, где делаются попытки решения рассматриваемой задачи путем составления и решения полной системы уравнений тепло- и массопереноса в аппарате, обычно с использованием численных и итерационных методов и привлечением дополнительных экс-

периментальных данных [2–4]. С помощью такого подхода могут быть получены весьма точные решения, но для инженерных расчетов, особенно в массовом проектировании, они малопригодны вследствие их сложности и необходимости использования специально разработанных программ для ЭВМ. При этом в зарубежной практике конденсация в охладителе может и вовсе не учитываться [5]. То же самое относится и к укрупненным оценкам годовой эффективности теплообменных аппаратов [6]. Однако проблема надлежащего выбора и расчета устройств обработки вентиляционного воздуха имеет в настоящее время весьма существенное значение, особенно в связи с повышением требований к энергоэффективности климатических систем, что признается как в нашей стране, так и за рубежом [1, 7].

Для устранения этого противоречия в работе [8] автором был предложен простой подход, позволяющий учитывать наличие конденсации за счет введения поправочного коэффициента к среднелогарифмической разности температур воздуха и холодоносителя  $\Delta T_{cp}$ . Данный коэффициент получается в результате решения системы уравнений теплового баланса и теплопередачи, если записать уравнение для потока охлаждаемого воздуха относительно полной теплоты. Выражение для этого коэффициента имеет следующий вид:

$$\Delta T'_{cp} \approx \sqrt{1 + 2NTU'}, \quad (1)$$

где  $NTU' = \frac{r(d_n - d_o) \cdot 10^{-3}}{c\Delta T_0}$  – безразмерное число единиц переноса теплоты

конденсации, отнесенное к начальной разности температур на входе в аппарат

$$\Delta T_0 = (T_n - t_x), \text{ } ^\circ\text{C};$$

$T_n$  – исходная температура воздуха;

$t_x$  – температура охлажденного холодоносителя на входе в теплообменник;

$c$  – удельная теплоемкость воздуха, которую можно принимать на уровне 1005 Дж/(кг · К);

$r$  – удельная теплота парообразования (конденсации) воды, равная примерно  $2,49 \cdot 10^6$  Дж/кг;

$d_n$  и  $d_o$  – влагосодержание воздуха, г/кг, до и после охлаждения.

Полученное соотношение для  $NTU'$  в его исходном виде приспособлено в первую очередь для конструкторского расчета охладителей. Дело в том, что для поверочного расчета величина  $\Delta T_0$  бывает заранее известной, поскольку  $T_n$  и  $t_x$  являются исходными данными. Однако этого нельзя сказать о разности  $(d_n - d_o)$ , в отличие от конструкторского расчета, когда состояние воздуха после аппарата бывает изначально задано, при поверочном оно, наоборот, подлежит определению. Поэтому построение на  $I-d$ -диаграмме процесса охлаждения для выявления значения  $(d_n - d_o)$  невозможно, так как неизвестно положение конечной точки.

Попытаемся вычислить эту разность аналитически, исходя из соотношений между основными параметрами состояния влажного воздуха. В рассматриваемом решении существенно используется то обстоятельство, что при наличии конденсации водяных паров состояние воздуха после охлаждения в поверхностном теплообменнике не является произвольным, а практически всегда отвечает относительной влажности 90–95 %, если не при-

нимать специальных мер по управлению процессом. Исходя из этого величину  $d_0$  можно вычислить как уменьшенное примерно на 0,3 г/кг значение, соответствующее энтальпии воздуха в конце процесса, рассчитанной по кривой насыщения. Тогда после необходимых преобразований конечное выражение для  $NTU'$  имеет следующий вид:

$$NTU' = \frac{\Delta I_0 / c + 4,5\sqrt{(I_n - \Delta I_0) / c} - T_n - 13,16}{\Delta T_0}. \quad (2)$$

Здесь  $I_n$ , кДж/кг – начальная энтальпия влажного воздуха перед охлаждением, которая должна быть задана наряду с  $T_n$  для однозначного определения состояния воздуха перед аппаратом. Если речь идет о наружном воздухе,  $I_n$  обычно задается по климатическим данным. Параметр  $\Delta I_0$ , кДж/кг, по физическому смыслу приближенно представляет собой изменение энтальпии воздуха в процессе охлаждения, если считать, что конечная точка процесса располагается на кривой насыщения. Его можно вычислить, исходя из максимально возможного уменьшения теплосодержания при доведении воздуха до состояния 100%-й относительной влажности с известными параметрами холодоносителя, с учетом коэффициента эффективности теплообменника  $k_{эф}$ . Поскольку рассматривается приведение реального процесса с конденсацией к эквивалентному «сухому», как в [1], считаем в первом приближении, что величина  $k_{эф}$ , которую нужно использовать для расчета  $\Delta I_0$ , должна совпадать с температурной эффективностью, вычисляемой для того же аппарата при прочих равных условиях. Тогда получаем

$$\Delta I_0 = k_{эф}(I_n - I_x) = k_{эф}\left(I_n - \left(\frac{t_x + 13,83}{4,47}\right)^2\right). \quad (3)$$

В данном выражении  $I_x$  – предельная энтальпия охлажденного воздуха на выходе из аппарата при бесконечной поверхности теплообмена, кДж/кг. Ее значение можно получить из соотношения между энтальпией и температурой влажного воздуха на кривой насыщения<sup>1</sup>:  $t = 4,47\sqrt{I} - 13,83$  °C при  $t > 0$ . С этим же соотношением связано и слагаемое  $(-13,16)$  в формуле (2). Нужно иметь в виду, что  $\Delta I_0$  нельзя непосредственно использовать для расчета состояния воздуха в конце действительного процесса охлаждения, поскольку это условная величина, предназначенная только для определения  $NTU'$ , так как на самом деле конечная точка процесса не лежит на кривой насыщения, а соответствует обычно 90–95%-й относительной влажности [1].

Величина  $k_{эф}$  зависит от безразмерного числа единиц переноса теплоты для воздуха  $NTU_0$  и для воды  $NTU_w^2$ .

$$NTU_0 = \frac{KF}{G_n c}; \quad NTU_w = \frac{KF}{G_w c_w}, \quad (4)$$

где  $G_n$  – расход охлаждаемого воздуха, кг/с;

<sup>1</sup> Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий. М.: Изд-во АСВ, 2014. 208 с.

<sup>2</sup> Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. М.: Изд-во МГТУ, 1997. 684 с.

$K$  – коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/(м<sup>2</sup> · К),  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>, принимаемые по характеристикам соответствующего оборудования;

$c_w$ , Дж/(кг · К),  $G_w$ , кг/с – соответственно удельная теплоемкость и расход холодоносителя. Для воды можно принимать  $c_w = 4190$  Дж/(кг · К).

Заметим, что в отличие от конструкторского расчета поправку  $\Delta T'_{cp}$  нужно теперь вводить не к величине  $\Delta T_{cp}$ , которая до расчета неизвестна, а в уравнение теплового баланса охлаждаемого потока при вычислении количества передаваемой в аппарате теплоты  $Q$ , Вт. При этом конечная температура воздуха после аппарата определяется обычным образом – через  $k_{эф}$ :  $T_o = T_n - k_{эф} \Delta T_o$ . Следовательно,  $Q = \Delta T'_{cp} G_n c (T_n - T_o)$ . В сущности, параметр  $\Delta T'_{cp}$  на самом деле учитывает увеличение за счет конденсации не перепада температур, а непосредственно  $Q$ , и только при конструкторском расчете, когда конечное состояние воздуха известно, формально удобнее относить  $\Delta T'_{cp}$  именно к  $\Delta T_{cp}$ . Тогда действительная энтальпия охлажденного воздуха в конце процесса вычисляется по уравнению баланса полной теплоты, т.е.  $I_o = I_n - 10^{-3} Q / G_n$ . После этого с использованием значений  $Q$ ,  $G_w$ ,  $c_w$  и  $t_x$  вычисляется конечная температура холодоносителя на выходе из теплообменника.

Оценить точность полученного решения и его соответствие имеющимся методам [1] можно на основании следующего примера. Пусть рассматривается процесс охлаждения приточного воздуха в поверхностном воздухоохладителе. Состояние наружного воздуха (точка Н): температура  $T_n = +26,3$  °С, энтальпия  $I_n = 52$  кДж/кг – параметры «Б» в теплый период года для Москвы, температура охлаждающей воды на входе в охладитель  $t_x = +7$  °С. Пусть расход воздуха  $G_n = 12470$  кг/ч или 3,46 кг/с, откуда объемная воздухопроизводительность  $L_n = 12470/1,2 = 10400$  м<sup>3</sup>/ч, тогда расчеты необходимо вести для оборудования, соответствующего приточной установке типа КЦКП-10. В этом случае поверхность теплообмена для одного ряда трубок воздухоохладила составит 19,1 м<sup>2</sup> при шаге пластин, равном 2,5 мм, а величину  $K$  для рассматриваемых условий можно принять равной 34,6 Вт/(м<sup>2</sup>·К)<sup>3</sup>. Параметры в рассматриваемом примере подобраны так, чтобы получить максимальное совпадение с процессом для конструкторского расчета, исследованным в [8]. Отсюда для 12-рядного теплообменника находим:

$$NTU_o = \frac{3600 \cdot 34,6 \cdot 19,1 \cdot 12}{12470 \cdot 1005} = 2,28; \quad NTU_w = \frac{34,6 \cdot 19,1 \cdot 12}{4,05 \cdot 4190} = 0,467.$$

В данном случае оказывается, что  $NTU_w < NTU_o$ , поэтому принимаем  $NTU_{max} = 2,28$ ,  $NTU_{min} = 0,467$ . Тогда эффективность аппарата будет равна:

$$k_{эф} = \frac{1 - \exp(0,467 - 2,28)}{1 - \frac{0,467}{2,28} \exp(0,467 - 2,28)} = \frac{1 - 0,162}{1 - 0,205 \cdot 0,162} = 0,867 \text{ (по воздуху);}$$

<sup>3</sup> По данным ООО «Веца», www.veza.ru.

$$\Delta I_0 = 0,867 \left( 52 - \left( \frac{7 + 13,83}{4,47} \right)^2 \right) = 26,25 \text{ кДж/кг};$$

$$NTU' = \frac{26,25/1,005 + 4,5\sqrt{(52 - 26,25)/1,005} - 26,3 - 13,16}{14,3} = 0,625,$$

откуда  $\Delta T'_{cp} \approx \sqrt{1 + 2 \cdot 0,625} = 1,5$ . Обычный графоаналитический метод [1] после соответствующего построения процесса охлаждения на  $I-d$ -диаграмме дает значение этого отношения, равное 1,53, так что расхождение заведомо лежит в пределах точности инженерного расчета. Вычисления в [8] приводят к  $\Delta T'_{cp} \approx 1,44...1,45$ , что также не слишком отличается от существующего подхода.

Остальные параметры процесса определяем по уравнениям:

$$T_0 = 26,3 - 0,867 \cdot (26,3 - 7) = 9,57 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$Q = 1,5 \cdot 3,46 \cdot 1005(26,3 - 9,57) = 87263 \text{ Вт};$$

$$I_0 = 52 - 10^{-3} 87263/3,46 = 26,78 \text{ кДж/кг}.$$

Заметим, что реальное изменение энтальпии в ходе процесса составляет  $52 - 26,78 = 25,22$  кДж/кг, что действительно не вполне совпадает с рассчитанной ранее условной величиной  $\Delta I_0$ .

Таким образом, принятые допущения действительно приводят к результатам, которые являются эквивалентными другим способам расчета. В то же время полученные соотношения являются очень простыми и доступными для инженерной практики, не требуя при этом графического построения, а потому могут быть рекомендованы для использования в массовом проектировании и в учебном процессе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К о к о р и н О.Я. Современные системы кондиционирования воздуха. М.: Физматлит, 2003. 272 с.
2. Б р о й д а В.А. Расчет параметров работы теплообменника фанкойла с учетом устанавливающегося состояния воздуха в помещении // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 8. С. 72–77.
3. Ш а ц к и й В.П., Г у л е в с к и й В.А. Особенности реализации математической модели тепло- и массообмена в косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителях // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 4. С. 39–46.
4. Е м е л ь я н о в А.Л., К о ж е в н и к о в а Е.В. Методика расчета теплообмена при движении воздуха в поверхностных воздухоохладителях // Вестник МАХ. 2014. № 1. С. 39–42.
5. M i s e v i c i u t e V., M a r t i n a i t i s V. Analysis of ventilation system's heat exchangers integration possibilities for heating season. Pap. of the 8<sup>th</sup> International Conference «Environmental Engineering», May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania. Vol. 2. Pp. 781–787.
6. Т и т о в а Е.М., А в е р ь я н о в а О.В. Анализ эффективности систем кондиционирования с секцией осушения воздуха // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 1. С. 46–52.

7. Dylewski R., Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments // *Energy and Buildings*. 2012. No. 54. Pp. 88–95.
8. Самарин О.Д. О новом подходе к учету конденсации водяных паров при тепловом расчете воздухоохладителей // *Изв. вузов. Строительство*. 2016. № 2. С. 67–73.

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

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 25.01.16

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

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Russia

### **ON A NEW APPROACH TO CHECKING THERMAL CALCULATION OF AIR COOLERS TAKING ACCOUNT OF WATER VAPOR SWEATING**

The process of change of moist air state in the equipment of the mechanical ventilating system or in the air conditioning system with heat recovery for the preliminary warming of external air in a cold season under sweating is observed. The peculiarities of heat transfer in heat recovery units under sweating are studied, and the algorithm of calculation of the real amount of transferred heat in the dependence from assumed level of external air temperature and enthalpy with the account of sweating is presented. The comparison of obtained results with the existing procedure based on plotting of the equivalent «wet» process of air cooling in the heat extracting section of the recoverer in the *I-d*-diagram under water vapor sweating are presented. The estimation of accuracy of offered algorithm is given and the conditions of its validity are determined. The presentation is illustrated with numerical and graphical examples.

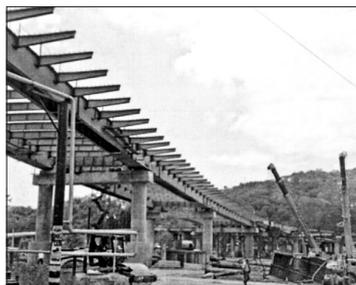
**Key words:** heat exchange, sweating, specific air humidity, number of transfer units, equivalent «wet» process.

#### REFERENCES

1. Kokorin O.Ya. *Sovremennye sistemy konditsionirovaniya vozdukh* [Modern air conditioning systems]. Moscow, Publishing of physical and mathematical literature. 2003. 272 p. (in Russia)
2. Broйда V.A. Raschet parametrov raboty teploobmennika fankoyla s uchetom ustanavlivayushchegosya sostoyaniya vozdukh v pomeshchenii [Calculation of operating parameters for fancoil heat exchanger considering steady indoor conditions for the air]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 8. Pp. 72–77. (in Russia)
3. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A. Osobennosti realizatsii matematicheskoy modeli teplo- i massoobmena v kosvenno-rekuperativnykh vodoisparitel'nykh okhladitelyakh [Features of the implementation of mathematical models of heat and mass transfer in indirect-recuperative water evaporative coolers]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 4. Pp. 39–46. (in Russia)
4. Emel'yanov A.L., Kozhevnikova E.V. Metodika rascheta teploobmena pri dvizhenii vozdukh v poverkhnostnykh vozdukhookhladitelyakh [Procedure of heat transfer calculation under air motion in surface air coolers]. *Vestnik MAH* [News of International Academy of Refrigeration]. 2014. No. 1. Pp. 39–42. (in Russia)

5. Miseviciute V., Martinaitis V. Analysis of ventilation system's heat exchangers integration possibilities for heating season. Pap. of the 8<sup>th</sup> International Conference «Environmental Engineering», May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania. Vol. 2. Pp. 781–787.
  6. Titova E.M., Aver'yanova O.V. Analiz effektivnosti sistem konditsionirovaniya s sektsiyey osusheniya vozdukha [The analysis of efficiency of air conditioning systems with air dehumidifier]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of civil engineering]. 2011. No. 1. Pp. 46–52. (in Russia)
  7. Dylewski R., Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments. Energy and Buildings. 2012. No. 54. Pp. 88–95.
  8. Samarina O.D. O novom podkhode k uchetu kondensatsii vodyanykh parov pri teplovom raschete vozdukhokhladiteley [On a new approach to the account of water vapor sweating during thermal calculation of air coolers]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 2. Pp. 67–73. (in Russia)
-

## СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ



УДК 677.07 : 658.562

С.В. ФЕДОСОВ, Н.А. ГРУЗИНЦЕВА, М.А. ЛЫСОВА, Б.Н. ГУСЕВ

### УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИОРИТЕТНОСТИ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ НАДЕЖНОСТИ ГЕОТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА\*

Предложен аналитический метод определения приоритетности (значимости) показателей надежности геотекстильных материалов, используемых в дорожном строительстве. Значимость показателей надежности рассчитывалась с использованием методов корреляционно-регрессионного анализа. На основании полученных значений значимости единичных показателей рассчитан обобщенный показатель надежности. Данная проблема актуальна как для проектирования качества продукции с учетом требований потребителей, так и для комплексной оценки качества продукции соответствующих групп показателей (надежности, технологичности, безопасности и др.).

**Ключевые слова:** геотекстильные материалы, единичные показатели, группа надежности, обобщенный показатель, аналитический метод, корреляционно-регрессионный анализ.

Для решения проблемы комплексной оценки качества геотекстильных материалов (ГТМ) с использованием методов квалиметрии [1] возникает задача ранжирования единичных показателей качества. Данная проблема решается экспертным методом по известной методике [2].

При наличии результатов лабораторных измерений значений единичных показателей качества данную проблему целесообразнее решать аналитическим методом с использованием методов корреляционно-регрессионного анализа [3], что позволяет устранить субъективизм экспертных оценок и повысить точность полученных результатов [4].

Производственной базой для установления приоритетности между показателями надежности, согласно РД-50-64-84 «Методические указания по разработке государственных стандартов, устанавливающих номенклатуру показателей качества групп однородной продукции», была выбрана продукция промышленного предприятия, которое производит геотекстильные

\* Статья подготовлена в рамках выполнения проектной части госзадания № 11.1898.2014/К Минобрнауки России.

материалы (ГТМ), используемые для укрепления земляного полотна в дорожном строительстве. Данное предприятие производит нетканые полотна из полиэфирных или пропиленовых волокон, изготовленные иглопробивным способом (торговая марка «Геоманит Д»).

В соответствии с техническими условиями анализируемого предприятия выделим единичные показатели ( $X$ ) по группе надежности ГТМ, а именно:

$X_1$  – прочность при растяжении по длине, кН/м;

$X_2$  – прочность при растяжении по ширине, кН/м;

$X_3$  – удлинение по длине, %;

$X_4$  – удлинение по ширине, %;

$X_5$  – ударная прочность, мм.

В качестве базовых (нормативных) значений ( $\|X_i\|$ ) для показателей  $X_1 \dots X_4$  – использовали максимальное, а для  $X_5$  – минимальное значение, т.е. лучшие значения из данной совокупности для исследуемых показателей качества.

Для построения обобщенного показателя надежности (ОПН) использовали арифметический способ усреднения в виде

$$\text{ОПН} = \sum_{i=1}^5 (X_i / \|X_i\|)^b \cdot \alpha_i, \quad (1)$$

где  $X_i, \|X_i\|$  – соответственно фактическое и базовое значения  $i$ -го единичного показателя надежности (ЕПН);

$$b = \begin{cases} +1, & \text{если } X_i < \|X_i\|, \\ -1, & \text{если } X_i > \|X_i\|, \\ 0, & \text{если } X_i = \|X_i\|; \end{cases}$$

$\alpha_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го единичного показателя надежности.

Дополнительно наложим ограничения:

$$\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1; \quad (\text{ОПН})_{\max} = 1; \quad (\text{ОПН})_{\min} = 0.$$

Для формирования уравнений множественной регрессии между ОПН и ЕПН предварительно с использованием данных табл. 1 рассчитаем значения  $(\text{ОПН})_{\text{расч}}$ . Для этого предварительно рассчитаем коэффициенты весомости экспертным методом [5]:  $\alpha_1 = 0,32, \alpha_2 = 0,29, \alpha_3 = 0,14, \alpha_4 = 0,12, \alpha_5 = 0,13$ , при котором значение  $(\text{ОПН})_{\text{расч}}$  будет в определенных условиях отличаться от  $(\text{ОПН})_{\text{факт}}$ .

Данные расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Числовые значения испытаний нетканых иглопробивных геотекстильных полотен торговой марки «Геоманит Д» поверхностной плотности 350 г/м<sup>2</sup>

Статистические характеристики	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	ОПН
Минимальное значение	10,50	11,60	71,90	73,20	12,00	0,667
Максимальное значение	12,90	13,10	88,40	94,40	18,00	1,000
Среднее значение ( $\bar{X}_i$ )	11,28	12,22	74,38	84,06	15,06	0,804
Среднее квадратическое отклонение ( $\sigma_{X_i}$ )	0,002	0,001	0,011	0,003	0,006	0,006

В дальнейшем натуральные значения  $X_i$  и  $\|X_i\|$  переведем в относительные единицы в соответствии с записью

$$(q_x)_i = X_i / \|X_i\|, \text{ если } X_i \leq \|X_i\|; \text{ или } (q_x)_i = \|X_i\| / X_i, \text{ если } X_i > \|X_i\|.$$

Для построения корреляционной матрицы, необходимой для определения коэффициентов регрессионных уравнений (табл. 2), использовали известное выражение для парной корреляции [6].

**Таблица 2. Корреляционная матрица взаимосвязи относительных показателей надежности**

Относительные показатели надежности	Коэффициенты парной корреляции					
	ОПН	$(q_x)_1$	$(q_x)_2$	$(q_x)_3$	$(q_x)_4$	$(q_x)_5$
ОПН	1,00	–	–	–	–	–
$(q_x)_1$	0,93	1,00	–	–	–	–
$(q_x)_2$	0,87	0,77	1,00	–	–	–
$(q_x)_3$	0,89	0,92	0,73	1,00	–	–
$(q_x)_4$	0,84	0,69	0,84	0,69	1,00	–
$(q_x)_5$	0,60	0,43	0,30	0,38	0,35	1,00

Уравнение регрессии предварительно ищем в стандартизованном масштабе:

$$\hat{t}_{\text{ОПН}} = \sum_{i=1}^n \beta_i t_{(q_x)_i}, \tag{2}$$

где  $t_{\text{ОПН}}$ ,  $t_{(q_x)_i}$  – стандартизированные переменные:

$$t_{\text{ОПН}} = \frac{\text{ОПН} - \overline{\text{ОПН}}}{\sigma_{\text{ОПН}}},$$

$$t_{(q_x)_i} = \frac{(q_x)_i - \overline{(q_x)_i}}{\alpha_{(q_x)_i}}, \text{ для которых среднее значение равно нулю: } \overline{t_{\text{ОПН}}} = \overline{t_{(q_x)_i}} = 0;$$

среднее квадратическое отклонение равно единице:  $\sigma_{t_{\text{ОПН}}} = \sigma_{t_{(q_x)_i}} = 1$ ;

$\beta_i$  – стандартизированные значения коэффициентов весоности ЕПН.

В дальнейшем, применяя метод наименьших квадратов к уравнению множественной регрессии в стандартизованном масштабе, получим систему нормальных уравнений в виде:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 + 0,77\beta_2 + 0,92\beta_3 + 0,69\beta_4 + 0,43\beta_5 &= 0,93, \\ 0,77\beta_1 + \beta_2 + 0,73\beta_3 + 0,84\beta_4 + 0,30\beta_5 &= 0,87, \\ 0,92\beta_1 + 0,73\beta_2 + \beta_3 + 0,69\beta_4 + 0,38\beta_5 &= 0,89, \\ 0,69\beta_1 + 0,84\beta_2 + 0,69\beta_3 + \beta_4 + 0,35\beta_5 &= 0,84, \\ 0,43\beta_1 + 0,30\beta_2 + 0,38\beta_3 + 0,35\beta_4 + \beta_5 &= 0,60. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Решив систему уравнений (3), получаем соответственно  $\beta_1 = 0,37$ ;  $\beta_2 = 0,24$ ;  $\beta_3 = 0,14$ ;  $\beta_4 = 0,20$  и  $\beta_5 = 0,24$ .

Значения весомости ЕПН «чистой» регрессии  $\alpha_i$  связаны со стандартизованными значениями регрессии  $\beta_i$  следующим образом [7]:

$$\alpha'_i = \beta_i \frac{\sigma_{\text{ОПН}}}{\sigma_{(q_x)_i}}. \quad (4)$$

Тогда  $\alpha'_1 = 0,0967$ ;  $\alpha'_2 = 0,0748$ ;  $\alpha'_3 = 0,0017$ ;  $\alpha'_4 = 0,0206$ ;  $\alpha'_5 = 0,0136$ . В итоге окончательно получаем  $\alpha_1 = 0,47$ ;  $\alpha_2 = 0,36$ ;  $\alpha_3 = 0,01$ ;  $\alpha_4 = 0,10$ ;  $\alpha_5 = 0,07$ .

Проверку на статистическую значимость полученного уравнения множественной регрессии (3) осуществляли с помощью индекса множественной детерминации ( $R$ ) [6].

В результате получили, что  $R_{X_i, \text{ОПН}} = 0,98$ . Таким образом, данное значение максимально приближено к единице, что свидетельствует о тесной корреляционной связи между выбранными показателями надежности и их обобщенным показателем.

С использованием основной формулы (1) вычислим фактическое значение комплексного показателя надежности (качества) с полученными значениями коэффициентов весомости для заданных значений единичных показателей качества  $X_1 = 10,7$  кН/м,  $X_2 = 11,8$  кН/м,  $X_3 = 73$  %,  $X_4 = 75,3$  %,  $X_5 = 17$  мм:  $\text{ОПН}_{\text{факт}} = 0,850$ . Рассогласование фактической и расчетной оценок по обобщенному показателю надежности составило:

$$\Delta(\text{ОПН}) = |(\text{ОПН}_{\text{факт}}) - (\text{ОПН}_{\text{расч}})| = |0,850 - 0,828| = 0,022$$

или в относительной погрешности

$$\delta(\text{ОПН}) = \frac{\Delta(\text{ОПН})}{\text{ОПН}_{\text{факт}}} = \frac{0,022}{0,850} = 0,0259$$

или 2,59 %.

**Выводы.** 1. Разработана методика аналитического расчета значимости единичных показателей надежности (качества) ГТМ, используемых в дорожном строительстве, которая в отличие от известного экспертного метода определения коэффициентов весомости (значимости) исключает его субъективность, так как использует фактические данные результатов измерения показателей качества нетканых ГТМ.

2. Данная методика может использоваться не только для комплексной оценки качества готовой продукции, но и для проектирования требуемого уровня качества в процессе ее производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосов С.В., Поспелов П.И., Гойс Т.О., Грузинцева Н.А., Матрохин А.Ю., Гусев Б.Н. Проблемы оценки качества и стандартизации геосинтетических материалов в дорожном строительстве // Academia. Архитектура и реставрация. 2016. № 1. С. 9–14.
2. Федюкин В.К. Основы квалиметрии. Управление качеством продукции. М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 2004. 296 с.
3. Герман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. М.: Высшее образование, 2007. 479 с.
4. Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Матрохин А.Ю. Моделирование условий обеспечения качества продукции предприятия по производству строительных

- материалов с учетом уровня профессионализма кадрового потенциала // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 55–60.
5. Лысова М.А., Ломакина И.А., Лунькова С.В., Гусев Б.Н. Математические методы в проектировании и оценивании качества текстильных материалов и изделий. Иваново: ИГТА, 2012. 252 с.
  6. Красс М.С., Чупрынов Б.П. Математика в экономике. Математические методы и модели. М.: Финансы и статистика, 2007. 544 с.
  7. Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Москвитина Т.В., Гусев Б.Н. Обеспечение требуемого уровня качества геотекстильных материалов для дорожного строительства // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 2. С. 19–22.

**Федосов Сергей Викторович**, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Ивановский государственный политехнический университет

**Грузинцева Наталья Александровна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: gruzincevan@mail.ru

Ивановский государственный политехнический университет

**Лысова Марина Александровна**, канд. техн. наук; E-mail: lysova7@yandex.ru

Ивановский государственный химико-технологический университет

**Гусев Борис Николаевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mtsm@ivgpu.com

Ивановский государственный политехнический университет

Получено после доработки 19.02.16

**Fedosov Sergey Viktorovich**, academician RAACS, DSc, Professor; E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Ivanovo State Polytechnic University, Russia

**Gruzintseva Natalia Alexandrovna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: gruzincevan@mail.ru

Ivanovo State Polytechnic University, Russia

**Lysova Marina Alexandrovna**, PhD; E-mail: lysova7@yandex.ru

Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia

**Gusev Boris Nikolaevich**, DSc, Professor; E-mail: mtsm@ivgpu.com

Ivanovo State Polytechnic University, Russia

## **PRIORITIZATION OF RELIABILITY INDICATORS FOR GEOMATERIALS USED IN ROAD CONSTRUCTION**

The analytical method is suggested to determine the priority (importance) of reliability indicators for geotextile materials used in road construction. The importance of reliability indicators was calculated using correlation and regression analysis methods. On the basis of the received values characterizing the importance of individual indicators the generalized reliability indicator was calculated. This problem is currently important both in terms of product of quality design (taking into account customers' demands) and for complex estimation of the product quality with reference to separate groups of indicators (reliability, manufacturability, safety and others).

**Key words:** geotextile materials, individual indicators, reliability group, composite index, analytical method, correlation and regression analysis.

### **REFERENCES**

1. Fedosov S.V., Pospelov P.I., Goits T.O., Gruzintseva N.A., Mitrokhin A.Yu., Gusev B.N. Problemy otsenki kachestva i standartizatsii

- geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve [Problems of assessment of quality and standardization of geosynthetics in road construction]. *Academia. Arkhitektura i restavratsiya* [Academia. Architecture and restoration]. 2016. No. 1. Pp. 9–14. (in Russia)
2. Fed y u k i n V.K. *Osnovy kvalimetrii. Upravlenie kachestvom produktsii* [Fundamentals of qualimetry. The product quality control]. Moscow, Information and publishing house «Filin», 2004. 296 p. (in Russia)
  3. G m e r m a n V.E. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Higher education, 2007. 479 p. (in Russia)
  4. Fed o s o v S.V., G r u z i n t s e v a N.A., M a t r o k h i n A.Yu. *Modelirovanie usloviy obespecheniya kachestva produktsii predpriyatiya po proizvodstvu stroitel'nykh materialov s uchetom urovnya professionalizma kadrovogo potentsiala* [Modeling of conditions for ensuring the quality of products of enterprises producing building materials according to the level of professionalism of personnel potential]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2015. No. 12. Pp. 55–60. (in Russia)
  5. L y s o v a M.A., L o m a k i n a I.A., L u n ' k o v a S.V., G u s e v B.N. *Matematicheskie metody v proektirovanii i otsenivanii kachestva tekstil'nykh materialov i izdeliy* [Mathematical methods in engineering and quality evaluation of textile materials and products]. Ivanovo: ISTA, 2012. 252 p. (in Russia)
  6. K r a s s M.S., C h u p r y n o v B.P. *Matematika v ekonomike. Matematicheskie metody i modeli* [Mathematics in Economics. Mathematical methods and models]. Moscow, Finance and statistics, 2007. 544 p. (in Russia)
  7. G r u z i n t s e v a N.A., L y s o v a M.A., M o s k v i t i n a T.V., G u s e v B.N. *Obespechenie trebuemogo urovnya kachestva geotekstil'nykh materialov dlya dorozhnogo stroitel'stva* [Ensuring the required level of quality geotextile materials for road construction]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Izvestiya universities. Technology of textile industry]. 2015. No. 2. Pp. 19–22. (in Russia)
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ



УДК 621.542.001

Ю.Э. МАЛЫШЕВА, Т.Р. КВАРЦХАЛАЯ, М.П. ДМИТРИЕВ,  
Э.А. АБРАМЕНКОВ

### ДРОССЕЛИ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМАХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассматриваются пневмоударные механизмы с дроссельным воздухораспределением на впуске в камеру рабочего хода, имеющие ярусное размещение и различные геометрические размеры.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** дроссель, пневмоударный механизм, геометрические зависимости, физико-математическое описание, ударник, рабочая камера, предкамера, камера пневматического буфера.

**Введение.** Основой пневматической машины ударного действия любого назначения является пневмоударный механизм с его жизнеобеспечением в виде воздухораспределительной системы, включающей распределитель, ударник, цилиндр с рабочими камерами и наковальню, состоящую из хвостовика и рабочего инструмента. Важные средства для пневматической машины ударного действия – средства управления, виброзащиты и шумозащиты. Виды управленческих средств относятся к управлению: положением, удержанием (навеской), впуском и выпуском воздуха, шумозащитой, виброзащитой и шумоизоляцией. Последние средства защиты основополагающие для конкретных условий применения (эксплуатации) и экологической безопасности при обслуживании машин человеком и окружающей среды.

В данной работе рассматривается только пневмоударный механизм с дроссельной системой воздухораспределения, представляющий класс машин нового типа, в отличие от широкоизвестных машин с золотниковым, клапаным, бесклапанным, беззолотниковым воздухораспределением [1].

Предметом рассмотрения является пневмоударный механизм, синтезированный из известных признаков-элементов классификации [1]. В основу аналитических представлений о работе воздухораспределения синтезированного механизма положены работы Е.В. Герц [2], Л.А. Залмансона [3] и основы баро- и термодинамических процессов пневмоударных

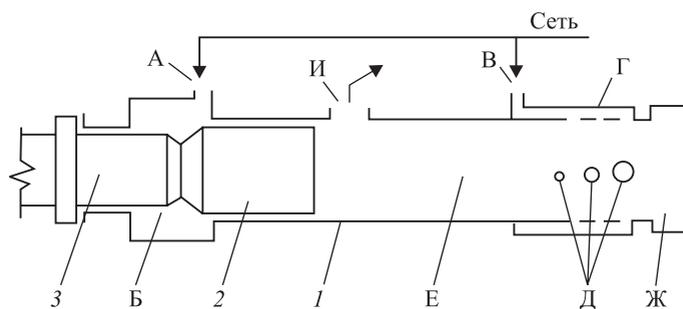


Рис. 1. Принципиальная схема дроссельного пневмоударного механизма

механизмов<sup>1-5</sup>, а также представления о гидравлических сопротивлениях И.Е. Идельчика [4] и А.Д. Альтшуля<sup>6</sup>.

Принципиальная схема с функционированием синтезированного механизма представлена на рис. 1, к которому прилагается краткое описание его работы.

Сжатый воздух из сети постоянно поступает по дроссельному каналу А в камеру Б наддува холостого хода и одновременно по дроссельному каналу В в кольцевую камеру Г форсажа рабочего хода, откуда по каналам Д круглого сечения различных размеров в камеру Е рабочего хода и камеру Ж пневматического буфера в корпусе 1. В зависимости от положения ударника 2 после перекрытия им каналов Д камера Ж разобщается с камерой Г. Каналы Д образуют ярусы с большим размером отверстия со стороны камеры Ж и с уменьшающимися последовательно размерами отверстий в противоположную сторону. Каналы Д могут быть выполнены либо по образующей, либо под углом к ней.

Опорожнение камер Б и Е осуществляется периодически в зависимости от положения ударника через канал И выпуска.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер Б, Е и Ж ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 3.

Расчетная схема и физико-математическое описание представлены на рис. 2 и сопровождаются обозначениями и аналитическим представлением.

<sup>1</sup> Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Пневмоударные механизмы с регулируемым дроссельным впуском // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 1. С. 91–97.

<sup>2</sup> Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Мазалов Г.А., Абраменков Э.А. Необходимый и достаточный объем камеры рабочего хода пневмоударного механизма дроссельного типа // Труды НГАСУ. 2005. Т. 8. № 1 (31). С. 5–13.

<sup>3</sup> Малышева Ю.Э., Мазалов Г.А., Абраменков Э.А. Физико-математические модели золотникового и клапанного однопоршневого пневмоударного механизма // Труды НГАСУ. 2010. Т. 13. № 1 (47). С. 15–23.

<sup>4</sup> Кутумов А.А., Малышева Ю.Э., Трегубенко А.В., Дедов А.С. и др. Программное и аппаратное обеспечение экспериментального исследования пневмоударного механизма навесного молота // Труды НГАСУ. 2008. Т. 11. № 1 (43). С. 14–30.

<sup>5</sup> Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Мазалов Г.А., Абраменков Э.А. Зависимости между показателем процесса и объемом рабочей камеры в дроссельном пневмоударном механизме // Труды НГАСУ. 2007. Т. 10. № 4 (42). С. 5–13.

<sup>6</sup> Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 224 с.

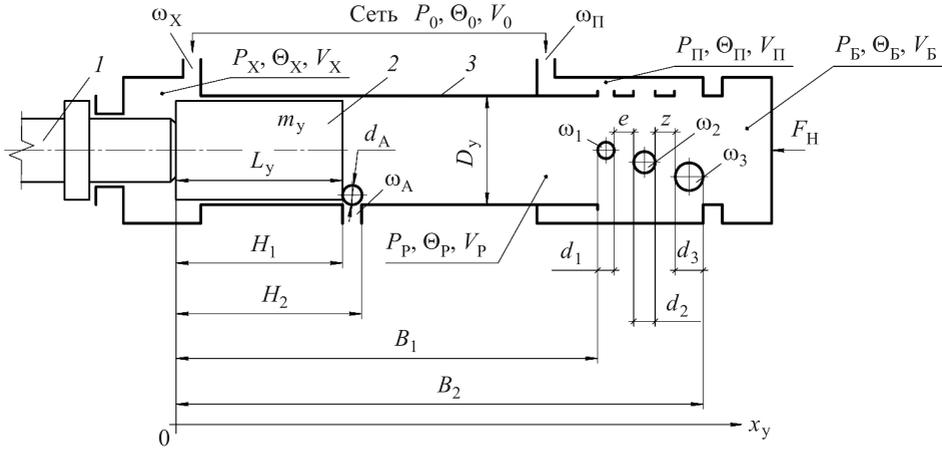


Рис. 2. Расчетная схема синтезированного пневмоударного механизма

Обозначения к рис. 2:

1, 2, 3 – хвостовик, ударник, корпус;

$P_0, P_p, P_x, P_b, P_{\Pi}, P_A$  – давление воздуха в сети, камере рабочего и холодного хода, камере пневматического буфера, предкамере и атмосфере,  $P_p = P_b$ ;

$V_p, V_x, V_b, V_{\Pi}$  – объемы камер рабочего и холодного хода, пневматического буфера и предкамеры;

$\theta_0, \theta_A$  – температура воздуха в сети и атмосфере;

$\theta_p, \theta_x, \theta_b, \theta_{\Pi}$  – температура воздуха в камерах с объемами  $V_p, V_x, V_b, V_{\Pi}$ ;

$\omega_x, \omega_{\Pi}, \omega_A$  – проходные площади сечений дросселей впуска в камеры с объемами  $V_x, V_{\Pi}$  и выпуска в атмосферу;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – дроссели впуска в камеры с объемом  $V_p, V_b$ ;

$e, z$  – расстояние между дросселями  $\omega_1$  и  $\omega_2, \omega_2$  и  $\omega_3$ ;

$H_1, H_2$  – координаты дросселя  $\omega_A$  выпуска в атмосферу;

$B_1, B_2$  – координаты участка размещения дросселей  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  в камеру рабочего хода;

$m_y, m_k$  – масса ударника и корпуса;

$D_y$  – диаметр ударника;

$\varphi_0, \varphi_p, \varphi_x, \varphi_b, \varphi_{\Pi}, \varphi_A$  – коэффициенты бародинамического процесса изменения давления воздуха в сети, объемах  $V_p, V_x, V_b, V_{\Pi}$  и атмосфере;

$\Omega_0, \Omega_p, \Omega_x, \Omega_b, \Omega_{\Pi}, \Omega_A$  – коэффициенты термодинамического процесса изменения температуры воздуха в сети, объемах  $V_p, V_x, V_b, V_{\Pi}$  и атмосфере;

$F_H$  – усилие нажатия на корпус;

$d_1, d_2, d_3$  – диаметры дросселей впуска площадей  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ;

$d_A = d_{Ap} = d_{Ax}$  – диаметры дросселей выпуска с площадями  $\omega_A = \omega_{Ap} = \omega_{Ax}$ .

Ограничения для бародинамических коэффициентов процесса в зависимости от направления истечения воздуха –

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} 0,5283 > P_i/P_j & P_i \cdot \Theta_i^{1/2} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq P_i/P_j & P_i \cdot \Theta_i^{1/2} ((P_i/P_j)^{2/k} - (P_j/P_i)^{(k+1)/k})^{1/2}, \\ 0,5283 > P_j/P_i & -P_j \cdot \Theta_j^{1/2} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq P_j/P_i & -P_j \cdot \Theta_j^{1/2} ((P_j/P_i)^{2/k} - (P_j/P_i)^{(k+1)/k})^{1/2}. \end{cases} \quad (1)$$

Ограничения для термодинамических коэффициентов процесса в зависимости от  $\varphi_{ij}$  –

$$\Omega_{i,j} = \begin{cases} \varphi_{i,j} > 0 & k - (\Theta_i / \Theta_j), \\ \varphi_{i,j} \leq 0 & k - 1, \\ \varphi_{j,i} > 0 & k - (\Theta_j / \Theta_i), \\ \varphi_{j,i} \leq 0 & k - 1. \end{cases} \quad (2)$$

Ограничения для баромеханических функций –

$$\begin{cases} \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_O = -k_y \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ \left( \frac{dx_K}{dt} \right)_O = -k_K \left( \frac{dx_K}{dt} \right)_y & \text{при } x_K \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $k_y$  и  $k_K$  – коэффициенты отскока ударника от хвостовика инструмента и корпуса от буртика инструмента;

$\left( \frac{dx_y}{dt} \right)_O, \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_y$  – скорости отскока и соударения ударника;

$\left( \frac{dx_K}{dt} \right)_O, \left( \frac{dx_K}{dt} \right)_y$  – скорости отскока и соударения корпуса с буртиком

рабочего инструмента.

Имея в виду ограничения (1)–(3), запишем уравнения рабочего процесса пневмоударного механизма в виде бародинамической, термодинамической и баромеханической составляющих.

Бародинамическая составляющая –

$$\begin{cases} \frac{dP_P}{dt} = \frac{k}{(V_B + V_P) - x_y S_y} \times \\ \times \left[ W(\omega_1(x_y)\varphi_1 + \omega_2(x_y)\varphi_2 + \omega_3(x_y)\varphi_3 - \omega_{AP}(x_y)\varphi_{AP}) + P_P \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{dP_X}{dt} = \frac{k}{(V_X + x_y S_y)} \left[ W(\omega_X \varphi_X - \omega_{AX}(x_y)\varphi_{AX}) - P_X \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{dP_\Pi}{dt} = \frac{k}{V_\Pi} [W(\omega_\Pi \varphi_\Pi - \omega_1(x_y)\varphi_1 - \omega_2(x_y)\varphi_2 - \omega_3(x_y)\varphi_3)]. \end{cases} \quad (4)$$

Термодинамическая составляющая –

$$\begin{cases} \frac{d\theta_P}{dt} = \frac{\theta_P}{(V_B + V_P) - x_y S_y} \times \\ \times \left[ W(\omega_1(x_y)\varphi_1 \Omega_1 + \omega_2(x_y)\varphi_2 \Omega_2 + \omega_3(x_y)\varphi_3 \Omega_3 - \right. \\ \left. - \omega_{AP}\varphi_{AP} \Omega_{AP}) + (k-1)P_P \left( \frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \end{cases} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d_x}{dt} &= \frac{\theta_x}{P_x(V_x + x_y S_y)} \left[ W(\omega_x \varphi_x \Omega_x - \omega_{Ax}(x_y) \varphi_{Ax} \Omega_{Ax}) - (k-1) P_x \left( \frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{d\theta_{\Pi}}{dt} &= \frac{\theta_{\Pi}}{P_{\Pi} V_{\Pi}} [W(\omega_{\Pi} \varphi_{\Pi} \Omega_{\Pi} - \omega_1(x_y) \varphi_1 \Omega_1 - \omega_2(x_y) \varphi_2 \Omega_2 - \omega_3(x_y) \varphi_3 \Omega_3)]. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Баромеханическая составляющая –

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 x_y}{dt^2} &= S_y (P_x - P_p) / m_y \quad \text{при } x_y > 0, \\ \frac{d^2 x_K}{dt^2} &= (S_y (P_x - P_p) + F_H) / m_K \quad \text{при } x_K > 0. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Ограничения для координат и площадей сечений дросселей впуска в камеру с объемом  $(V_p + V_b)$  –

$$\omega_p(x_y) = \left\{ \begin{aligned} &(x_y + L_y) \leq B_1 \\ &(B_1 + d_1) < (x_y + L_y) < (B_1 + d_1 + e + d_2) \\ &(B_1 + d_1 + e + d_2) < (x_y + L_y) < (B_1 + d_1 + e + d_2 + z) \\ &(B_1 + d_1 + e + d_2 + z) < (x_y + L_y) < (B_1 + d_1 + e + d_2 + z + d_3) \end{aligned} \right. \left\{ \begin{aligned} \omega_p &= \frac{\pi(d_1^2 + d_2^2 + d_3^2)}{4}, \\ \omega_p &= \frac{\pi(d_2^2 + d_3^2)}{4}, \\ \omega_p &= \frac{\pi d_3^2}{4}, \\ \omega_p &= 0. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Ограничения для координат и площади сечения дросселя впуска  $\omega_x$  в камеру с объемом  $V_x$  –

$$\omega_x(x_y) = \max \omega_x = \text{const.}$$

Ограничения для координат и площади сечения дросселя (канала) выпуска при  $d_p = d_x$  и  $\omega_{AP} = \omega_{AX}$ :

$$\omega_{AX} = \left\{ \begin{aligned} &x_y = 0 \\ &0 < x_y < H_1 \\ &H_1 < x_y < H_2 \\ &H_2 < x_y < B_1 \end{aligned} \right. \left\{ \begin{aligned} \omega_{AX} &= 0, \\ \omega_{AX} &= 0, \\ \omega_{AX} &= 0,5 \frac{\pi d_x^2}{4}, \\ \omega_{AX} &= \max \omega_{AX} = \frac{\pi d_x^2}{4}; \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\omega_{AP} = \left\{ \begin{aligned} &0 < (x_y + L_1) < H_1 \\ &H_1 < (x_y + L_1) < H_2 \\ &H_2 < (x_y + L_1) < B_1 \end{aligned} \right. \left\{ \begin{aligned} \omega_{AP} &= \frac{\pi d_p^2}{4}, \\ \omega_{AP} &= 0,5 \frac{\pi d_p^2}{4}, \\ \omega_{AP} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Принципиальные особенности расчетов эффективных проходных сечений площадей впускных и выпускных дросселей следующие.

Эффективное проходное сечение  $\omega_{\text{э}}$  дросселя впуска определяется зависимостями:

$$\omega_{\text{э}} = G/\varphi(\alpha), \quad (10)$$

$$\text{где} \quad \varphi(\alpha) = (2g\rho p_0 k/(k-1)(\alpha^{2/k} - \alpha^{k/(k+1)}))^{1/2} \quad (11)$$

при  $\alpha > 0,5288$

$$\text{и} \quad \varphi(\alpha) = (2g\rho p_0 k/(k-1)(2(k+1)^{k/(k+1)}))^{1/2} \quad (12)$$

при  $\alpha \leq 0,5288$ ,

$G$  – массовый расход сжатого воздуха;

$\varphi(\alpha)$  – функция  $\alpha = p_i/p_0$ ;

$\rho$  – плотность воздуха;

$p_0, p_B$  – давление воздуха на впуске и на выпуске;

$k, g$  – показатель процесса и ускорение свободного падения.

Эффективное проходное сечение круглых отверстий впуска в виде нескольких круглых отверстий, расположенных последовательно друг за другом по длине цилиндра, определяется зависимостями (10)–(12) и геометрией свободных сечений при перекрытии их ударником:

$$\omega_{\text{э}i} = \omega_{\text{э}}(m_i, d_i), \quad (13)$$

где  $m_i$  – изменяющееся количество отверстий дросселей впуска диаметром  $d_i$ .

В случае дросселей с различными размерами (13) записывается в виде –

$$\omega_{\text{э}1} = \omega_1(d_1), \omega_{\text{э}2} = \omega_2(d_2), \dots, \omega_{\text{э}n} = \omega_n(d_n)! \quad (13')$$

Текущее значение  $\omega_{\text{э}i}$  одного дросселя впуска круглого сечения

$$\omega_{\text{э}i} = 0,25d_i^2((\pi/360)\delta - 0,5\sin\delta_i), \quad (14)$$

где  $\delta_i$  – центральный угол, ограниченный хордой длиной  $L_i$ :

$$\delta_i = 2\arccos(1 - 2L_i/d_i). \quad (15)$$

Аналогично (14) и (15) определяются эффективные сечения выпускных дросселей (каналов).

Основная задача – отыскание наилучших энергетических параметров и взаимозависимостей между энергетическими параметрами и геометрическими размерами в дроссельном пневматическом ударном механизме – зависит от выбора ограничений  $\omega_i$  и их координат.

**Выводы.** 1. Расположение дополнительных камер последовательно позволяет объединить их объемы даже при различных функциях (4)–(6).

2. Усреднение для площади сечения выпускного дросселя (канала) круглой формы при перемещении отсекающей кромки ударника (8), (9) со стороны хвостовика с полным открытием позволяет увеличить участок перемещения ударника за счет задержки выпуска из камеры холостого хода.

3. Представлены объяснения частного случая учета функционирования дросселей впуска при последовательном их расположении (10)–(13).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков Э.А., Абраменков Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия. Новосибирск, 1993. 430 с.

2. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 507 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

**Мальшева Юлия Эдуардовна**, ведущий инж. НИС

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Кварцхалая Тимур Рамазович**, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Дмитриев Михаил Петрович**, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Абраменков Эдуард Александрович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 11.02.16

**Malysheva Yuliya Eduardovna**, Lead Engineer of Reseach and Development

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

**Kvartskhalaya Timur Ramazovich**, Student

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

**Dmitriev Mikhail Petrovich**, Post-graduate Student

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

**Abramenkov Eduard Alexandrovich**, DSc, Professor

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

## **CHOKES AIR DISTRIBUTION TO PNEUMATIC MECHANISMS PERCUSSION MACHINES**

Considers pneumatic percussion mechanism with a throttle air distribution at issue in the working stroke chamber with tiered arrangement and different geometric dimensions.

**Key words:** throttle, air percussion mechanism, according to geometric, physical and mathematical description, drummer, working chamber, antechamber, pneumatic buffer chamber.

### **REFERENCES**

1. **Abramenkov E.A., Abramenkov D.E.** Pnevmaticheskie mekhanizmy mashin udarnogo deystviya [Pneumatic mechanisms of impact machines: throttle, inkjet, without spool, valveless: Ref. manual]. Novosibirsk, 1993. 430 p. (in Russia)
2. **Hertz E.V.** Dinamika pnevmaticheskikh system mashin [Speaker Systems pneumatic machines]. Moscow, Mechanical Engineering, 1985. 256 p. (in Russia)
3. **Zalmanzon L.A.** Teoriya elementov pnevmoniki [Theory pnevmonick elements]. Moscow, Science, 1969. 507 p. (in Russia)
4. **Idel'chik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow, Mechanical Engineering, 1975. 559 p. (in Russia)

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ



УДК 728.2:69(083.75)

М.И. АКИМОВА, А.С. ЧЕЧУЛИНА

### ЭВОЛЮЦИЯ САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К МНОГОЭТАЖНЫМ ЖИЛЫМ ДОМАМ

Рассматриваются тенденции развития санитарно-эпидемиологических правил и гигиенических нормативов РФ в период с 1985 по 2015 г. Проанализированы и систематизированы изменения в санитарно-эпидемиологических требованиях, содержащихся в Строительных Нормах и Правилах (СНиП) и Санитарных Правилах и Нормах (СанПиН), регулирующих проектирование многоквартирных жилых зданий на территории с суровым климатом.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** санитарно-эпидемиологические требования, многоквартирные жилые здания, инсоляция, индекс изоляции воздушного шума, лифты, высота этажа, высота потолка.

Наиболее распространенный тип городского жилья – многоквартирные жилые здания, в которых проходит значительная часть жизни горожан. Важным условием их комфортного проживания служит выполнение государством обязанности по охране здоровья граждан (Конституция Российской Федерации, ст. 41, гл. 2), законодательное регулирование и своевременная актуализация нормативно-правовых документов в этой сфере. Решающее влияние на изменение нормативно-правовых документов оказывали политические и социально-экономические условия, которые претерпевали значительные изменения начиная с 1985 г.

Основные нормативные документы, реализующие право гражданина на охрану здоровья, – это федеральные законы «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» от 21 ноября 2011 г. N323 и «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30 марта 1999 г. N52.

Санитарно-эпидемиологическое благополучие населения – одно из важнейших понятий в указанных законах, предусматривающее состояние здоровья населения, среды обитания, при котором отсутствует вредное воздействие факторов среды обитания на человека и обеспечиваются благоприятные условия его жизнедеятельности.

Безопасность и безвредность для человека факторов среды обитания, в том числе зданий, строений, сооружений и помещений, определяется государственными санитарно-эпидемиологическими правилами и гигиеническими нормативами. Эволюцию содержания этих нормативов и правил

рассмотрим на примере требований к многоквартирным жилым зданиям на территории с суровым климатом.

Исследованиями в данной области занимались такие ученые, как Д.В. Бахарев, А.Г. Боганик, Ю.Д. Губернский, С.А. Коростин, Л.Н. Орлова, Е.И. Сидорова, С.Г. Фокин, В.Л. Хайт, которые рассматривали изменения отдельных аспектов санитарно-эпидемиологических нормативов.

Цель данного исследования – выявление тенденций санитарно-эпидемиологического нормирования в области проектирования многоквартирных жилых зданий в регионах с суровым климатом.

Задачей работы стали анализ и систематизация изменений в санитарно-эпидемиологических требованиях, содержащихся в Строительных Нормах и Правилах (СНиП) и Санитарных Правилах и Нормах (СанПиН), регулирующих проектирование многоквартирных жилых зданий на территории с суровым климатом.

К СНиПам, содержащим санитарно-эпидемиологические требования к многоэтажным жилым зданиям в рассматриваемый период, относятся: СНиП II-Л. 1–71\* «Жилые здания. Нормы проектирования»; СНиП 2.08.01–85 «Жилые здания»; СНиП 2.08.01–89\* «Жилые здания»; СНиП 31-01–2003 «Здания жилые многоквартирные»; СП 54.13330.2011 «Здания жилые многоквартирные».

Среди требований к проектированию жилых зданий, изменившихся за рассматриваемый период, можно выделить высоту этажа и потолка; отношение площади световых проемов к площади пола; состав комнат, которые должны иметь естественное освещение; обеспеченность лифтами; индекс изоляции воздушного шума для межквартирных перегородок и стен.

*Высота этажа и потолка.* Высота потолка влияет на такие определяющие комфорт проживания человека факторы, как субъективное восприятие объема помещения, объем воздуха в комнате, распределение температур в помещении.

В типовых сериях жилых зданий СССР чаще всего встречается высота потолков 2,5 м. Эта высота была обоснована в 1942–1946 гг. Ле Корбюзье [1] как минимальная допустимая для проживания человека. Она применялась в проектах советских архитекторов, так как позволяла экономить средства и ресурсы: чем меньше площадь наружных стен, тем меньше затраты на строительство и обогрев здания.

Исходя из этих соображений, до СНиП 31-01–2003 высота этажа была ограничена 2,8 м (табл. 1), что с учетом толщины перекрытия жилого дома устанавливало высоту потолка не больше 2,65 м. В дальнейшем высота этажа нормативно не ограничивается и устанавливается лишь минимум проживания. Также стоит отметить, что в СНиП 2.08.01–89\* уточняется категория

**Т а б л и ц а 1. Изменение высоты этажа и потолков**

СНиП II-Л. 1–71*	СНиП 2.08.01–85	СНиП 2.08.01–89*	СНиП 31-01–2003	СП 54.13330.2011
Высота этажа – 2,8 м Высота до потолка – не менее 2,5 м	Высота этажа – не более 2,8 м Высота до потолка – не менее 2,5 м	Высота этажа социального жилья – 2,8 м Высота до потолка – не менее 2,5 м	Высота до потолка – не менее 2,5 м	Высота до потолка – не менее 2,5 м

жилья, для которого действует ограничение по высоте этажей. Это было сделано в связи с ростом в этот период объемов кооперативного жилья, при строительстве которого не требовалось жесткой экономии [2].

*Отношение площади световых проемов* всех жилых комнат и кухонь к площади пола этих помещений, которое определяется из соображений оптимальных теплопотерь и освещенности солнечным светом, в период с 1971 г. остается неизменным и составляет 1:5,5 – 1:8 для жилых комнат и кухонь.

В СНиП 2.08.01–85 данный норматив отсутствовал. Нужно также отметить, что с принятием этого СНиПа было отменено ограничение на глубину жилых комнат (до 6 м). Возможно, это было связано с реализацией государственной программы «Жилье-2000», на основании которой происходил переход к развитию сегмента частной собственности в жилищном секторе в целом [3]. Отсутствие строгого нормирования позволяло повысить привлекательность кооперативного и индивидуального жилья путем разнообразия архитектурных и планировочных решений [4].

Однако эти изменения также могли приводить к ухудшению условий проживания. Опыт исключения этой нормы можно считать неудачным ввиду того, что уже в следующем СНиПе нормирование отношения площади окон к площади пола вернулось. Новые нормативы СНиП 2.08.01–89\* учитывали также увеличение объемов строительства жилых домов с мансардным этажом и определили нормы соотношения площади световых проемов наклонной поверхности к полу (1:10).

*Состав комнат, которые должны иметь естественное освещение*, постоянно менялся, в том числе и из-за реформ самой нормативной базы. Например, неканализованные уборные (т.е. дворовые уборные с выгребом) относятся к малоэтажному строительству, но так как до 2002 г. проектирование как многоэтажных, так и малоэтажных домов нормировалось одним и тем же СНиПом, то и состав комнат, требующих освещения, был общий. Неизменным оставалось естественное освещение в жилых комнатах и кухнях. Данные представлены в табл. 2.

*Обеспеченность лифтами* многоэтажных домов – необходимое условие для комфортного проживания людей. Заметное изменение данной нормы

Таблица 2. Изменение состава комнат, которые должны иметь естественное освещение

СНиП II-Л. 1–71*	СНиП 2.08.01–85	СНиП 2.08.01–89*	СНиП 31-01–2003	СП 54.13330.2011
Жилые комнаты	Жилые комнаты	Жилые комнаты	Жилые комнаты	Жилые комнаты
Кухни	Кухни	Кухни	Кухни	Кухни
Неканализованные уборные	Неканализованные уборные	Неканализованные уборные	–	–
–	Входные тамбуры	Входные тамбуры	–	–
–	–	Лестничные клетки	–	–
–	Общие коридоры	Общие коридоры	–	–
–	–	–	Помещения общественного назначения	Помещения общественного назначения

произошло в СНиП 31-01–2003 (табл. 3), когда была понижена высотность здания, с которой требуется установка лифта, и повышена грузоподъемность лифтов, что создавало условия, достаточные для беспрепятственного проноса в кабину носилок и других крупногабаритных грузов [5].

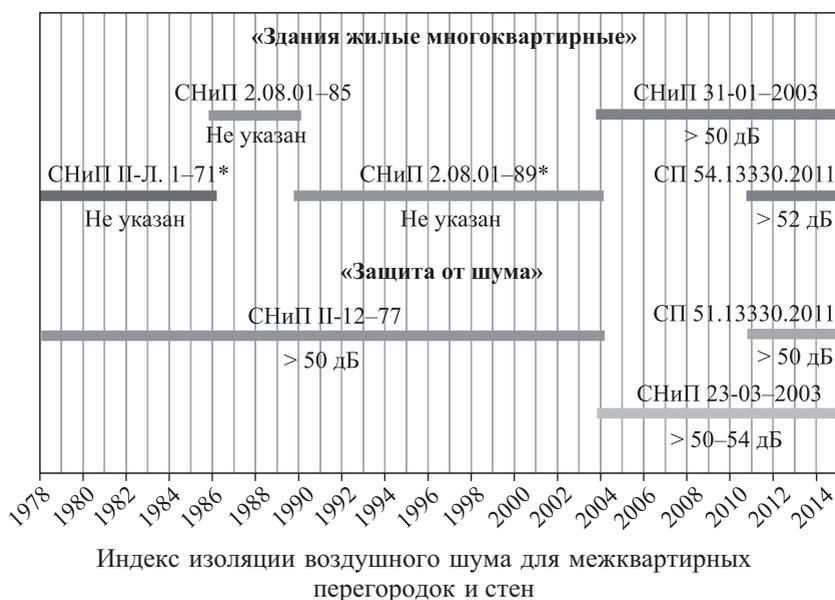
Т а б л и ц а 3. Обеспеченность лифтами

СНиП II-Л. 1-71*	СНиП 2.08.01-85	СНиП 2.08.01-89*	СНиП 31-01-2003	СП 54.13330.2011
В домах 6 этажей и выше или с отметкой верхнего этажа от 14 м и больше	В домах с отметкой верхнего этажа от 14 м и больше	В домах с отметкой верхнего этажа от 14 м и больше	В домах с отметкой верхнего этажа от 11,2 м и больше	В домах с отметкой верхнего этажа от 12 м и больше
Грузоподъемность от 320 кг	Грузоподъемность от 400 кг	Грузоподъемность от 400 кг	Грузоподъемность от 630 кг	Грузоподъемность от 630 кг

Индекс изоляции воздушного шума для межквартирных перегородок и стен определяет степень акустического комфорта для жильцов квартир и является показателем собственной шумоизоляции стен. В разное время значение данного индекса определялось наряду со СНиПом «Жилые здания»: СНиП II-12–77 «Защита от шума»; СНиП 23-03–2003 «Защита от шума»; СП 51.13330.2011 «Защита от шума».

Как видно из рисунка, до 2004 г. индекс изоляции воздушного шума нормировался только в СНиП II-12–77 «Защита от шума» и составлял 50 дБ для всех типов домов. В СНиП 31-01–2003 «Здания жилые многоквартирные» сохраняется значение индекса, в то время как в СНиП 23-03–2003 он повышается для домов повышенного комфорта до 54 дБ.

Вышеуказанные значения не являются достаточными, для обеспечения комфортной тишины в квартире необходим индекс изоляции воздушного шума для межквартирных стен не менее 62 дБ [6].



За последние годы СанПиН также претерпели существенные изменения, которые в основном происходили в нормативах, регулирующих инсоляцию зданий, в то время как санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям их дублировали. В связи с этим в данном исследовании были изучены: СанПиН 2605–82 «Санитарные нормы и правила обеспечения инсоляцией жилых и общественных зданий и территории жилой застройки»; СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076–01 «Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий».

Среди нормативов СанПиН, изменившихся за последние 30 лет, можно выделить продолжительность и прерывистость инсоляции в жилых зданиях, допустимое снижение продолжительности инсоляции.

*Продолжительность и прерывистость инсоляции.* Общеоздоровительное, психофизиологическое, бактерицидное и тепловое действия инсоляции достигаются при обеспечении ежедневного непрерывного облучения прямыми солнечными лучами помещений и территорий.

Продолжительность инсоляции в условиях увеличения плотности городской территории является одним из важнейших факторов, влияющих на конфигурацию зданий и их расположение и требующих строгого государственного санитарно-эпидемиологического надзора [7].

Среди главных изменений СанПиН можно отметить снижение требуемой инсоляции на полчаса для всех климатических зон России (с 2,5 ч для Центральной зоны до 2 ч), что приводит к увеличению количества квартир с недостаточностью инсоляции и снижению количества квартир с перегревом [8]. Вследствие чего, возможно, понятие «оптимальная продолжительность инсоляции» (имевшее значение 3–4 ч) отсутствует в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076–01. Непрерывные периоды инсоляции должны составлять не менее 1 ч каждый.

*Допускаемое снижение инсоляции* также претерпело изменения. Если ранее снижение инсоляции было возможно только при условии, что инсолировались все жилые комнаты квартиры, то в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076–01 было разрешено снизить инсоляцию при обеспечении продолжительной освещенности в большинстве жилых комнат. Стоит отметить также, что в СанПиН 2605–82 не упоминалось инсолирование квартир с количеством жилых комнат более пяти ввиду неактуальности.

**Выводы.** Анализ современных тенденций изменений санитарно-эпидемиологических требований к многоэтажным жилым домам показывает их неоднозначность. Так, положительными тенденциями можно считать:

- ужесточение нормирования шумоизоляции межквартирных перегородок и стен, снятие ограничений на высоту потолков квартир;
- закрепление зависимости площади окон от площади пола, а также основного состава комнат, требующих естественного освещения;
- повышение требований к этажности зданий, требующих оснащения лифтами, а также к габаритам лифтов.

В то же время тенденция с уменьшением продолжительности инсоляции является негативной, потому что наблюдается неуклонное снижение продолжительности освещенности квартир солнечным светом, что создает некомфортную среду обитания людей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ле Корбюзье. Архитектура XX века / пер. с фр. В.Н. Зайцевой, В.В. Фрязинова; послесл. К.Т. Топуридзе. М.: Прогресс, 1977. 307 с.
2. Жилище в России: век XX. Архитектура и социальная история: монограф. сб.; сост. и ред. У. Брумфилд, Б. Рубл. М.: Три квадрата, 2001. 191 с.: ил.
3. Коростин С.А. Исторический опыт решения проблемы повышения качества жилья в социально-экономической политике России // Проблемы современной экономики. 2014. № 4 (52). С. 387–391.
4. Актуальные проблемы нормирования в области архитектуры и градостроительства: сб. ст. / Рос. акад. архитектуры и строит. наук, НИИ теории архитектуры и градостроительства; сост. и науч. ред. В.Л. Хайт, Н.П. Крайняя. М.: Едиториал УРСС, 2002. 94 с.
5. Проектирование жилых зданий. Объемно-планировочные решения: пособие к СНиП / ЦНИИЭП жилища. М.: Стройиздат, 1991. 103 с.
6. Боганик А.Г. Повышение звукоизоляционных характеристик перегородок // Технологии строительства. 2002. № 4. С. 26–29.
7. Губернский Ю.Д., Лицкевич В.К., Рахманин Ю.А., Калинина Н.В. Проблемные вопросы гигиены жилых и общественных зданий и концепция развития исследований на перспективу // Гигиена и санитария. 2012. № 4. С. 12–15.
8. Фокин С.Г. Обоснование гигиенических требований к световому режиму помещений жилых и общественных зданий в условиях крупного города: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.07 / Фокин Сергей Геннадьевич; ГОУ ВПО «Московская медицинская академия». М.: 2003. 26 с.

**Акимова Мария Игоревна**, канд. искусствоведения, доц.; E-mail: amari-83@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Чечулина Александра Сергеевна**, магистр

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено 16.02.16

**Akimova Mariya Igorevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: amari-83@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Chechulina Alexandra Sergeevna**, MSc

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

**EVOLUTION OF SANITARY EPIDEMIOLOGICAL REGULATIONS FOR RESIDENTIAL BUILDING**

In the article described trends of sanitary epidemiological regulations in Russian Federation from 1985 to 2015. The paper presents analysis of changes to the sanitary epidemiological regulations contained in Building Norms and Regulations (SNiP) and Sanitary Rules and Norms (SanPiN), which regulate designing of residential buildings within the territory of Novosibirsk city.

**Key words:** sanitary epidemiological regulations, residential building, daylighting, index of airborne sound insulation, elevator, floor height, ceiling height.

REFERENCES

1. Le Corbusier. Arkhitektura XX veka [Architecture of XX century]. Transl. of fr. V.N. Zaytseva, V.V. Fryazinov; afterw. K.T. Topuridze. Moscow, Progress, 1977. 307 p. (in Russia)

2. Brumfield W., Ruble B. (Eds.). Zhilishche v Rossii: vek XX. Arkhitektura i sotsial'naya istoriya [Russian Housing in Modern Age: Design and Social History]. Washington D.C. and Cambridge, 1993. 322 p.; Russ. ed. W. Brumfield, B. Ruble. Moscow, Tri Kvadrata, 2001. 191 p.
  3. Korostin S.A. Istoricheskiy opyt resheniya problemy povysheniya kachestva zhil'ya v sotsial'no-ekonomicheskoy politike Rossii [Historical experience of solving the problem of improving the quality of housing in social and economic policy of Russia]. Problemy sovremennoy ekonomiki [Problems of modern economy]. 2014. No. 4(52). Pp. 387–391. (in Russia)
  4. Aktual'nye problemy normirovaniya v oblasti arkhitektury i gradostroitel'stva [Current problems of standardization in the field of architecture and urban development]. Comp. and sci. ed. V.L. Hait, N.P. Krainyaya (Eds.). Moscow, Editorial URSS, 2002. 94 p. (in Russia)
  5. Proektirovanie zhilykh zdaniy. Ob'yemno-planirovochnye resheniya: posobie k SNiP [Designing of residential buildings. Space-planning solutions. Tutorial for Russian Building Norms and Regulations]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 103 p. (in Russia)
  6. Boganik A.G. Povyshenie zvukoizolyatsionnykh kharakteristik peregorodok [Improving of separating walls sound isolation characteristics]. Tekhnologii stroitel'stva [Construction technology]. 2002. No. 4. Pp. 26–29. (in Russia)
  7. Gubernskiy Yu.D., Litskevich V.K., Rakhmanin Yu.A., Kalinina N.V. Problemnye voprosy gigieny zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i kontseptsiya razvitiya issledovaniy na perspektivu [Problem questions of hygiene of residential and public buildings and concept of development of studies for the future]. Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]. 2012. No. 4. Pp. 12–15. (in Russia)
  8. Fokin S.G. Obosnovanie gigenicheskikh trebovaniy k svetovomu rezhimu pomeshcheniy zhilykh i obshchestvennykh zdaniy v usloviyakh krupnogo goroda [Explanation of hygienic regulations for daylighting in residential and non-residential buildings in a large city: extended abstract of PhD dissertation]. Moscow medical academy. Moscow, 2003. 26 p. (in Russia)
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 532.592

**В.И. БУКРЕЕВ, В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.В. ЧЕБОТНИКОВ**

### **ПОВЕРХНОСТНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ КОНТЕЙНЕРА**

Приведены результаты экспериментального исследования возмущений в прямоугольном контейнере, частично заполненном водой, при его угловых колебаниях по гармоническому закону относительно неподвижной горизонтальной оси. Показано, что при частотах колебаний контейнера, совпадающих с нечетными собственными частотами колебаний воды, имеет место резонанс. Установлено, что с ростом частоты колебания контейнера амплитуда возмущений на воде уменьшается по экспоненциальному закону. Выполнено сравнение со случаем горизонтальных гармонических колебаний контейнера, когда область существования упорядоченных возмущений теоретически безгранична.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** собственная частота, гравитационные волны, килевая качка, резонанс.

Для перевозки жидких грузов часто используется автомобильный транспорт. При этом может иметь место процесс плескания жидкости с образованием кумулятивных струй, обладающих большой разрушительной силой. В данной статье приведены результаты экспериментального исследования плескания воды в прямоугольном контейнере при его периодических угловых колебаниях в вертикальной плоскости.

Аналогичные исследования были выполнены в [1, 2], где опыты выполнялись при частотах колебаний контейнера, в окрестности первой собственной моды колебаний жидкости. В настоящей работе измерения выполнялись вплоть до частоты восьмой собственной моды колебаний жидкости.

Большой объем информации получен в случае модельной задачи о вертикальных колебаниях (волнах Фарадея) в работах сотрудников Института проблем механики РАН. Здесь указана только одна публикация [3].

Данная работа является продолжением исследований [4, 5], в которых рассматривался случай продольных колебаний контейнера. В [4, 5] значительные колебания свободной поверхности прослежены вплоть до 15-й собственной моды. В линейной теории идеальной жидкости верхняя граница области существования резонансных режимов стремится к бесконечности. Реально вследствие влияния вязкости воды область существования резонансных режимов хотя и велика, но ограничена.

Принципиальное отличие рассматриваемой здесь задачи заключается в том, что колебания свободной поверхности, различимые на фоне небольших помех, имели место только до частоты седьмой собственной моды колебаний жидкости. При более высоких частотах наблюдались только не-

большие нерегулярные колебания в пределах погрешности эксперимента. Еще одно отличие рассматриваемой задачи от задач [4, 5] заключается в том, что максимальное отклонение свободной поверхности от положения равновесия (без учета высоты подъема кумулятивной струи, см. ниже) наблюдалось на частоте первой собственной моды колебаний жидкости, тогда как в [4, 5] соответствующий максимум имел место на частоте третьей собственной моды.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. В опытах использовался прямоугольный стеклянный контейнер 1 длиной  $L = 1,79$  м, шириной  $b = 0,08$  м и высотой  $H = 0,2$  м. Контейнер установлен на оси неподвижной цилиндрической опоры 2. Контейнер заполнялся водой до глубины  $h$  в горизонтальном положении его дна, а затем совершал угловые колебания по гармоническому закону с угловой амплитудой  $\varphi_0 = 1,21^\circ$  и круговой частотой  $\Omega$ .

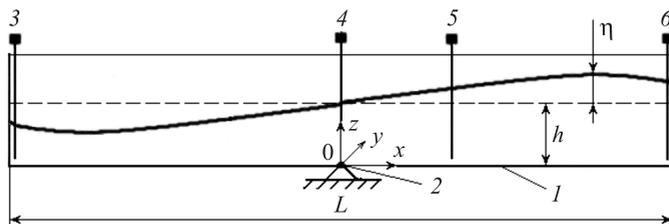


Рис. 1. Схема эксперимента

1 – контейнер; 2 – цилиндрическая опора; 3–6 – волномеры

Система привода контейнера в движение включала электродвигатель постоянного тока и кривошипно-шатунный механизм. Большое значение отношения длины шатуна (0,97 м) к длине кривошипа (0,021 м) обеспечивало синусоидальный характер колебаний контейнера с погрешностью не более 2,1 %.

Далее используется подвижная прямоугольная система координат  $Oxyz$  (см. рис. 1), колеблющаяся вместе с контейнером. Начало координат расположено в середине дна контейнера. Ось вращения контейнера расположена на его дне. В начальный момент времени дно контейнера горизонтально. Глубина воды  $h$  в этот момент равнялась 0,072 м. Угол поворота контейнера от его горизонтального положения  $\varphi$  отсчитывается по часовой стрелке.

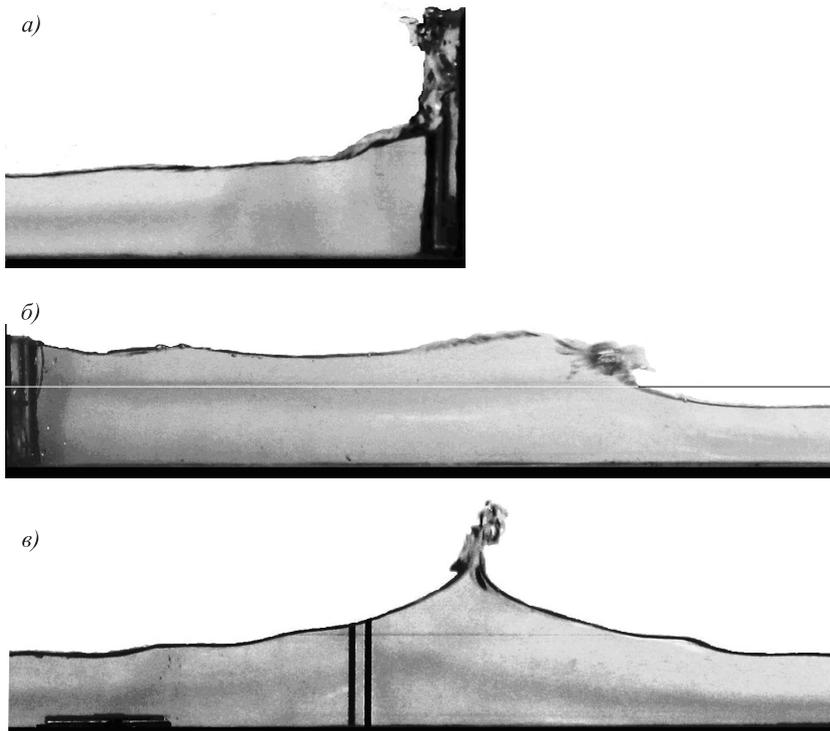
Отклонения свободной поверхности от положения равновесия  $\eta(x, t)$  ( $t$  – время) регистрировались четырьмя волномерами (см. рис. 1, 3–6) резистивного типа, закрепленными на контейнере. Волномеры располагались на продольной оси симметрии контейнера. Показания волномеров регистрировались компьютером с частотой дискретизации при аналого-цифровом преобразовании, равной 100 Гц. Для регистрации закона движения контейнера использовался дополнительный волномер, закрепленный снаружи правой торцевой стенки контейнера. Его электроды погружались в неподвижную воду.

Следует отметить, что в неподвижной системе координат дно и торцевые стенки контейнера совершали угловые колебания в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси, проходящей через вершину точки опоры 2 на рис. 1. По абсолютной величине амплитуда колебаний максимальна на торцевых стенках и линейно уменьшается до нуля на оси вращения.

По линейной теории при колебаниях контейнера в резонансном режиме образуются бесконечно высокие стоячие волны. Реально нелинейность и дисперсия ограничивают высоту волн, и образуются бегущие волны. Бегущие волны отражаются от торцевых стенок контейнера. Это происходит поочередно от правой и левой стенок контейнера два раза за период его колебаний. При наложении встречных бегущих волн образуется кумулятивная струя, которая может подниматься на значительную высоту и обладать разрушительной силой.

Три кадра фотосъемки движения жидкости в контейнере при двух значениях частоты его колебаний, соответствующих нечетным модам колебаний жидкости, приведены на рис. 2. Сплошная линия соответствует уровню свободной поверхности при горизонтальном положении контейнера в покое. Снимок на рис. 2, *а* получен в момент отражения первой по порядку волны от правой торцевой стенки. В этот момент времени имел место высокий заплеск воды на стенку. Брызги при заплеске перелетали через верхний край контейнера. Аналогичный процесс наблюдался у противоположной стенки со сдвигом во времени, равным половине периода колебаний контейнера.

Снимок бегущей волны с горизонтальной кумулятивной струей на переднем фронте и ондуляциями за этим фронтом приведен на рис. 2, *б*. Кумулятивная струя сильно насыщена воздухом. Ее невозможно описать в рамках механики сплошной среды, поскольку ее плотность зависит от многих факторов и непредсказуема. Соответствующую информацию можно получать



*Рис. 2. Фотоснимки кумулятивных струй при килевой качке прямоугольного контейнера,  $h = 0,072$  м,  $L = 1,98$  м*

*а* – заплеск на торцевую стенку (первая мода),  $\varphi = 1,2^\circ$ ; *б* – горизонтальная кумулятивная струя на фронте бора и ондуляции (вторая мода),  $\varphi = 0,2^\circ$ ; *в* – кумулятивная струя при встрече двух бегущих волн (третья мода),  $\varphi = 0,2^\circ$

только в опытах. Для решения этих задач также перспективны дискретные математические модели.

Всплеск в виде вертикальной кумулятивной струи, сравнимый по высоте с высотой заплеска на рис. 2, а, имел место на частоте третьей собственной моды колебаний воды. Соответствующий снимок приведен на рис. 2, в. Вертикальная струя, зарегистрированная на этом снимке, образовалась в момент наложения встречных бегущих волн, отразившихся от противоположных торцевых стенок контейнера. В кумулятивной струе сосредоточивается много энергии. Эта струя может подняться на большую высоту и обладать значительной разрушительной силой. При более высоких частотах колебаний контейнера, соответствующих нечетным собственным модам, высота подъема воды убывала с ростом номера моды по экспоненциальному закону.

Принципиальное отличие волн при вертикальных угловых колебаниях контейнера от волн при горизонтальных колебаниях состоит в том, что в первом случае волны быстро затухают и существуют в ограниченном диапазоне частот, а во втором случае амплитуда волн уменьшается намного медленнее с ростом частоты колебаний.

В случае колебаний контейнера с частотами, совпадающими с четными собственными частотами колебаний жидкости, линейная теория не дает количественной информации о величине их амплитуд, поскольку в этой теории амплитуда волн является бесконечно малой величиной, не имеющей количественной меры. Ответ на обсуждаемый вопрос можно получить только из эксперимента. В рассмотренной здесь конкретной задаче высоты волн при четных частотах колебаний контейнера лишь незначительно превышали погрешность измерений.

Пример записи закона движения контейнера (кривая 1, 2) и колебаний свободной поверхности в характерных точках продольной оси симметрии контейнера (кривые 3–5), полученных с помощью волномеров, приведен на рис. 3. По оси ординат отложены отклонения свободной поверхности  $\eta^0$  и

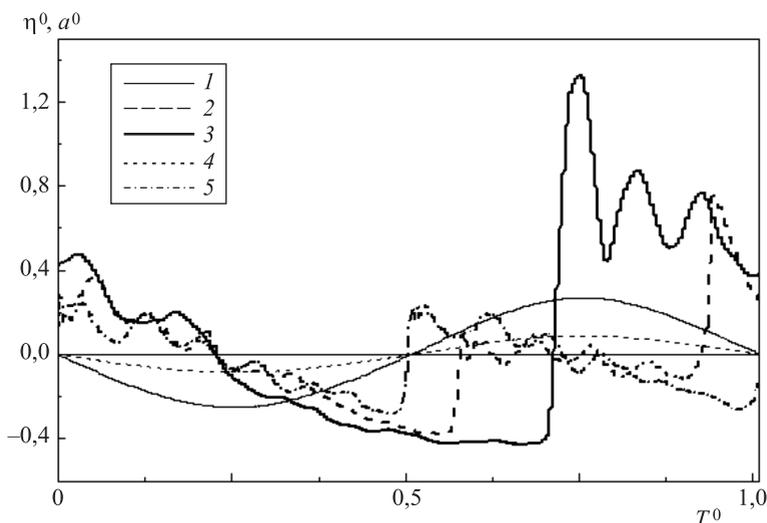


Рис. 3. Пример записи закона движения контейнера (1, 2) и колебаний свободной поверхности (3–5),  $h = 0,072$  м,  $L = 1,80$  м,  $T = T_1 = 4,30$  с  
 1 –  $x = 1/2L$ , 2 –  $x = 1/6L$ , 3 –  $x = 1/2L$ , 4 –  $x = 1/6L$ , 5 –  $x = 0$

вертикальные отклонения контейнера  $a^0$ , нормированные на начальную глубину  $h$ . По оси абсцисс отложено время  $T^0$ , нормированное на период колебаний контейнера. Кривая 3 получена волномером, расположенным у правой торцевой стенки контейнера, кривая 4 – волномером, расположенным на расстоянии  $1/3L$  от этой стенки (пучность третьей моды), и кривая 5 – волномером, расположенным в середине длины контейнера. В этом сечении находятся пучности всех четных собственных мод.

Записи получены при колебании контейнера на частоте первой собственной моды колебаний воды. Из рис. 3 видно, что интенсивность возмущений свободной поверхности намного больше амплитуды колебаний контейнера. Усиление обусловлено резонансом, имеющим место в данном опыте. Возмущение в резонансном режиме имело вид бегущей волны в виде бора (движущегося гидравлического прыжка) с кумулятивной струей на переднем фронте (см. рис. 2, б).

Волномеры не давали информации о направлении распространения волны. В их сигналах и в соответствующих записях передний фронт волн всегда располагался справа. Информацию о направлении распространения волны можно получить по показаниям двух волномеров или визуально.

Волномеры недостаточно точно описывают высоту подъема струи вследствие содержащегося в ней воздуха, сильно занижающего их показания. Для адекватного измерения высоты подъема струи необходимо использовать фото- или видеосъемку.

**Заключение.** Опыты показали, что зависимость высоты волн в резонансном режиме в рассмотренном случае угловых колебаний контейнера сильно отличается от изученной ранее аналогичной зависимости при горизонтальных продольных колебаниях контейнера. В первом случае всплеск воды с образованием насыщенной воздухом вертикальной кумулятивной струи наблюдался только на частоте первой и третьей собственных мод колебаний воды. При дальнейшем увеличении этой частоты высота волн быстро, по экспоненциальному закону, уменьшалась. Во втором случае уменьшение высоты волн с ростом номера собственной моды происходило намного медленнее. В опытах [4, 5] высота волн почти не изменилась даже на частоте 13-й собственной моды колебаний контейнера.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Verhagen J.H.G., Wijngaarden L. Non-linear oscillations of fluid in a container // *J. Fluid Mech.* 1965. Vol. 22. P. 4. Pp. 737–751.
2. Akyildiz H., Unal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing // *Ocean Engineering.* 2005. Vol. 32. Issue 11-12. Pp. 1503–1516.
3. Калинин В.А., Нестеров С.В., Со А.Н. Волны Фарадея в прямоугольном сосуде с локальными нерегулярностями дна // *Изв. РАН. МЖГ.* 2015. № 4. С. 83–91.
4. Букреев В.И., Чеботников А.В. Волны на воде в продольно колеблющемся контейнере // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2015. № 3. С. 140–147.
5. Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Гравитационные поверхностные волны при продольной качке контейнера, частично заполненного жидкостью // *Изв. вузов. Строительство.* 2015. № 1. С. 77–83.

**Букреев Виктор Иванович**, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск  
**Дегтярев Владимир Владимирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сиб-  
стрин)

**Чеботников Алексей Владимирович**, канд. техн. наук; E-mail: avchebotnikov@gmail.com  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено 12.02.16

**Bukreev Viktor Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru  
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

**Degtyarev Vladimir Vladimirovich**, DSc, Professor; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Chebotnikov Alexey Vladimirovich**, PhD; E-mail: avchebotnikov@gmail.com  
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

## **THE SURFACE GRAVITY WAVES AT VERTICAL ANGULAR OSCILLATIONS OF THE CONTAINER**

The results are present of experimental studies of disturbances in a rectangular container, partially filled with water, during angular harmonic oscillations relative to the fixed horizontal axis. It is shown that at frequencies of oscillations of the container coinciding with the odd natural frequencies of oscillations of water a resonance took place. It was found that with increasing frequency container oscillations on the water amplitude oscillations decreases exponentially. The comparison are present with the case of horizontal harmonic oscillations of the container when the region of existence of ordered perturbation theoretically unlimited.

**Key words:** natural frequency, gravitational waves, pitch, resonance.

### REFERENCES

1. Verhagen J.H.G., Wijngaarden L. Non-linear oscillations of fluid in a container. *J. Fluid Mech.* 1965. Vol. 22. P. 4. Pp. 737–751.
2. Akyildiz H., Unal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. *Ocean Engineering.* 2005. Vol. 32. Issue 11-12. Pp. 1503–1516.
3. Kalinichenko V.A., Nesterov S.V., So A.N. Volny Faradeya v pryamougol'nom sosude s lokal'nymi neregulyarnostyami dna [Faraday waves in a rectangular reservoir with local bottom irregularities]. *Izvestiya RAN. MZhG.* [Fluid Dynamics]. 2015. Vol. 50. Issue 4. Pp. 535–542. (in Russia)
4. Bukreev V.I., Chebotnikov A.V. Volny na vode v prodol'no koleblyushchemsya konteynere [Water waves in a longitudinally oscillating container]. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Dynamics]. 2015. Vol. 50. Issue 3. Pp. 435–441. (in Russia)
5. Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V. Gravitatsionnye poverkhnostnye volny pri prodol'noy kachke konteynera, chastichno zapolnennogo zhidkost'yu [Gravity surface waves at the longitudinal pitching of a container partially filled with liquid]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutional. Construction]. 2015. No. 1. Pp. 77–83. (in Russia)

УДК 532. 542

Л.И. ВЫСОЦКИЙ

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ<sup>1</sup>

### Часть III

Представлены результаты анализа влияния на «качество трубы» числа Рейнольдса при разных значениях относительной шероховатости. Они были получены с использованием данных вычислительного эксперимента.

**Ключевые слова:** формула Кольбука, формула Прандтля, число Рейнольдса, дефицит скорости, новая модель строения турбулентного потока.

**Пример 2.** Рассмотрим ту же проблему с использованием аналогичного вычислительного эксперимента. Исходные формулы для распределения скоростей [1, 2] имеют тот же вид:

– распределение осредненных скоростей в турбулентном равномерном (плоском) потоке со свободной поверхностью при гладких стенках. Обозначим расстояние по нормали от дна  $z$ , глубину  $H$ . Тогда

при  $z \leq AH$  ( $z$  – расстояние от стенки)

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{ct}}{u_*} + \frac{1}{\kappa} \left( \ln \frac{z}{\delta_{ct}} - \frac{z - \delta_{ct}}{H} \right); \quad (14)^2$$

при  $z > AH$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{u_{ct}}{u_*} + \frac{1}{\kappa} \left( \ln \frac{AH}{\delta_{ct}} - A + \frac{\delta_{ct}}{H} \right) + \frac{1}{\kappa H} \left[ \frac{z}{H} \left( 1 - 0,5 \frac{z}{H} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right]; \quad (15)$$

– средняя по вертикали скорость:

$$\begin{aligned} \frac{V}{u_*} = \frac{\bar{u}_{ct}}{u_*} \left( 1 - \frac{\delta_{ct}}{H} \right) + 2,5 \ln \frac{AH}{\delta_{ct}} - 2,5(1+A) + 0,417A^2 + \frac{0,833}{A} + \\ + \frac{\delta_{ct}}{H} (5 + 0,177a) - \left( \frac{\delta_{ct}}{H} \right)^2 (1,25 + 0,026a); \end{aligned} \quad (16)$$

– максимальная скорость (на свободной поверхности):

$$\frac{\bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{ct}}{u_*} + 2,5 \ln \frac{AH}{\delta_{ct}} - 2,5 - 1,25A + \frac{1,25}{A} + 2,5 \frac{\delta_{ct}}{H}. \quad (17)$$

<sup>1</sup> См.: Высоцкий Л.И. Эффективное использование новой модели строения турбулентных продольно-однородных потоков при анализе их параметров. Ч. I // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 1. С. 90–97; Высоцкий Л.И. Эффективное использование новой модели строения турбулентных продольно-однородных потоков при анализе их параметров. Ч. II // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 2. С. 92–97.

<sup>2</sup> В статье продолжается нумерация формул и рисунков части II.

В случае, когда  $\Delta H = \delta_{ст}$ , т.е. в случае вырождения части турбулентного ядра с логарифмическим распределением скоростей в формулах (14)–(17), логарифмический член исчезает из-за  $\ln 1 = 0$ . Дефицит средней скорости в рассматриваемом случае  $D_V = 4$ .

С учетом методики проведения вычислительного эксперимента, разработанной для турбулентных течений в круглых трубах и изложенной в [1, 2], были выполнены соответствующие эксперименты применительно к турбулентным плоским продольно-однородным потокам со свободной поверхностью. Полученные данные (табл. 1–4) позволяют представить зависимость дефицита скорости от глобальных параметров турбулентности в графической форме. На рис. 9, 10, а, б приведены графики зависимости  $D = D(z/H)$  при значениях  $\Delta/H$ , равных 0,00, 0,0005, 0,001, 0,005, 0,01, 0,05, и числах Рейнольдса, равных 3000, 5000,  $10^4$  и  $10^5$ .

На рис. 9, а представлена зависимость  $D = D(z/H)$  при  $\Delta/H = 0$ , которая наглядно свидетельствует об отсутствии автомодельности при значениях числа Рейнольдса, равных  $Re_H = 3000, 5000$  и  $10\,000$ . Данные, представленные

Таблица 1. Данные вычислительного эксперимента к построению графиков  $D = D(z/H; \Delta/H)$  при  $Re_H = 3000$

$\Delta/H = 0,0000$		$\Delta/H = 0,0005$		$\Delta/H = 0,001$		$\Delta/H = 0,005$		$\Delta/H = 0,01$		$\Delta/H = 0,05$	
$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$
0,03	12,27	0,05	10,58	0,049	11,57	0,046	10,51	0,043	10,24	0,050	7,00
0,07	8,42	0,109	5,26	0,108	5,27	0,101	5,30	0,110	4,43	0,106	4,14
0,09	6,64	0,209	2,44	0,206	2,50	0,192	2,62	0,203	2,44	0,195	2,98
0,13	4,25	0,319	1,44	0,316	1,38	0,321	1,45	0,297	1,63	0,30	2,25
0,21	2,46	0,402	1,00	0,398	1,03	0,398	1,06	0,392	1,13	0,50	1,65
0,266	1,86	0,50	0,64	0,50	0,65	0,50	0,69	0,50	0,75	0,60	1,15
0,50	0,63	0,60	0,41	0,60	0,42	0,60	0,44	0,60	0,48	0,70	0,73
0,60	0,40	0,70	0,23	0,70	0,24	0,70	0,25	0,70	0,27	0,80	0,41
0,70	0,23	0,80	0,10	0,80	0,11	0,80	0,11	0,80	0,12	0,90	0,19
0,80	0,10	0,90	0,02	0,90	0,03	0,90	0,03	0,90	0,03	1,00	0,05
0,90	0,02	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	–	0,00
1,00	0,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 2. Данные вычислительного эксперимента к построению графиков  $D = D(z/H; \Delta/H)$  при  $Re_H = 5000$

$\Delta/H = 0,0000$		$\Delta/H = 0,0005$		$\Delta/H = 0,001$		$\Delta/H = 0,005$		$\Delta/H = 0,01$		$\Delta/H = 0,05$	
$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$
0,03	12,17	0,054	10,58	0,053	8,33	0,058	7,18	0,052	7,45	0,052	7,04
0,054	8,31	0,102	5,26	0,100	4,82	0,101	4,82	0,113	4,68	0,103	5,80
0,078	5,95	0,209	2,44	0,200	2,92	0,20	3,16	0,206	3,41	0,20	4,65
0,127	4,12	0,30	1,44	0,30	2,13	0,30	2,36	0,30	2,63	0,30	3,56
0,30	2,07	0,40	1,00	0,40	1,56	0,40	1,73	0,40	1,93	0,40	2,62
0,40	1,52	0,50	0,64	0,50	1,08	0,50	1,20	0,50	1,37	0,50	1,82
0,50	1,06	0,60	0,41	0,60	0,69	0,60	0,77	0,60	0,86	0,60	1,16
0,60	0,68	0,70	0,23	0,70	0,39	0,70	0,43	0,70	0,48	0,70	0,65
0,70	0,38	0,80	0,10	0,80	0,17	0,80	0,19	0,80	0,21	0,80	0,29
0,80	0,17	0,90	0,02	0,90	0,04	0,90	0,05	0,90	0,05	0,90	0,07
0,90	0,05	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
1,00	0,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 3. Данные вычислительного эксперимента к построению графиков  $D = D(z/H; \Delta/H)$  при  $Re_H = 10\ 000$

$\Delta/H = 0,0000$		$\Delta/H = 0,0005$		$\Delta/H = 0,001$		$\Delta/H = 0,005$		$\Delta/H = 0,01$		$\Delta/H = 0,05$	
$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$
0,02	14,18	0,050	7,66	0,049	7,70	0,052	7,39	0,05	7,72	0,051	7,87
0,05	7,83	0,104	5,75	0,101	5,81	0,101	5,90	0,10	6,12	0,10	6,11
0,09	5,55	0,20	4,30	0,20	4,32	0,20	4,44	0,20	4,61	0,20	4,61
0,20	3,21	0,30	3,29	0,30	3,31	0,30	3,40	0,30	3,53	0,30	3,53
0,30	2,42	0,40	2,42	0,40	2,43	0,40	2,50	0,40	2,59	0,40	2,59
0,40	1,78	0,50	1,68	0,50	1,69	0,50	1,73	0,50	1,80	0,50	1,80
0,50	1,24	0,60	1,08	0,60	1,08	0,60	1,11	0,60	1,15	0,60	1,15
0,60	0,79	0,70	0,61	0,70	0,61	0,70	0,62	0,70	0,65	0,70	0,65
0,70	0,45	0,80	0,27	0,80	0,27	0,80	0,28	0,80	0,29	0,80	0,29
0,80	0,20	0,90	0,07	0,90	0,07	0,90	0,07	0,90	0,07	0,90	0,07
0,90	0,05	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4. Данные вычислительного эксперимента к построению графиков  $D = D(z/H; \Delta/H)$  при  $Re_H = 100\ 000$

$\Delta/H = 0,0000$		$\Delta/H = 0,0005$		$\Delta/H = 0,001$		$\Delta/H = 0,005$		$\Delta/H = 0,01$		$\Delta/H = 0,05$	
$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$	$z/H$	$D$
0,02	10,11	0,05	7,68	0,05	7,70	0,05	7,71	0,051	7,37	0,051	7,75
0,05	7,65	0,10	6,08	0,10	6,08	0,10	6,11	0,105	5,91	0,10	6,12
0,10	6,05	0,20	4,57	0,20	4,58	0,20	4,60	0,20	4,52	0,20	4,61
0,20	4,55	0,30	3,59	0,30	3,51	0,30	3,52	0,30	3,46	0,30	3,53
0,30	3,48	0,40	2,57	0,40	2,58	0,40	2,59	0,40	2,54	0,40	2,59
0,40	2,56	0,50	1,79	0,50	1,79	0,50	1,80	0,50	1,77	0,50	1,80
0,50	1,78	0,60	1,14	0,60	1,15	0,60	1,15	0,60	1,13	0,60	1,15
0,60	1,14	0,70	0,64	0,70	0,64	0,70	0,65	0,70	0,64	0,70	0,65
0,70	0,64	0,80	0,29	0,80	0,29	0,80	0,29	0,80	0,28	0,80	0,29
0,80	0,28	0,90	0,07	0,90	0,07	0,90	0,07	0,90	0,07	0,90	0,07
0,90	0,07	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
1,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

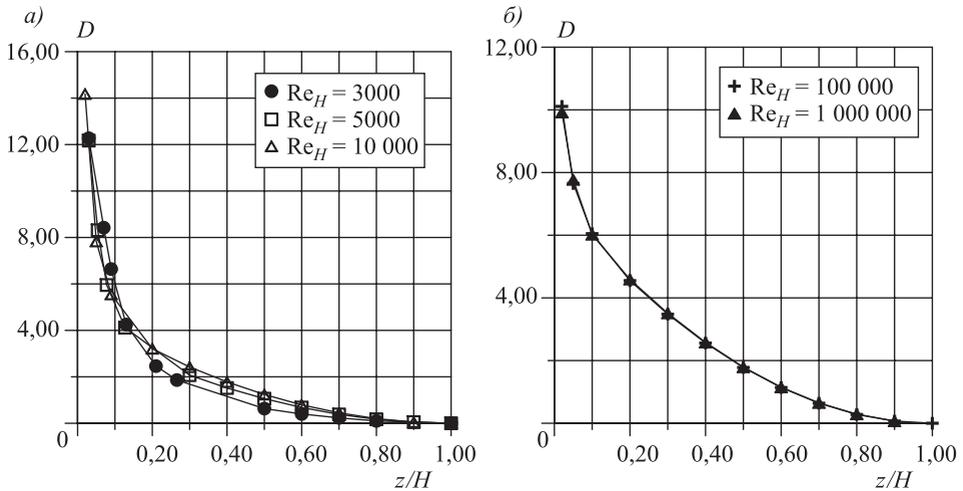


Рис. 9. Графики зависимости (а, б) дефицита скорости  $D = D(z/H)$  от числа Рейнольдса в случае гладких стенок ( $\Delta/H = 0$ )

ные на рис. 9, б, наоборот, свидетельствуют о ее возникновении при числах Рейнольдса, превышающих значение  $Re_H > 10^5$ .

Аналогичные результаты получаются и при значениях относительной шероховатости  $\Delta/H$ , равных 0,0005, 0,001, 0,005, 0,01, 0,05 (рис. 10, 11). Этот результат качественно согласуется с полученным в случае круглых труб. Количественное расхождение связано с разными значениями дефицита средней скорости в круглых трубах и плоских потоках.

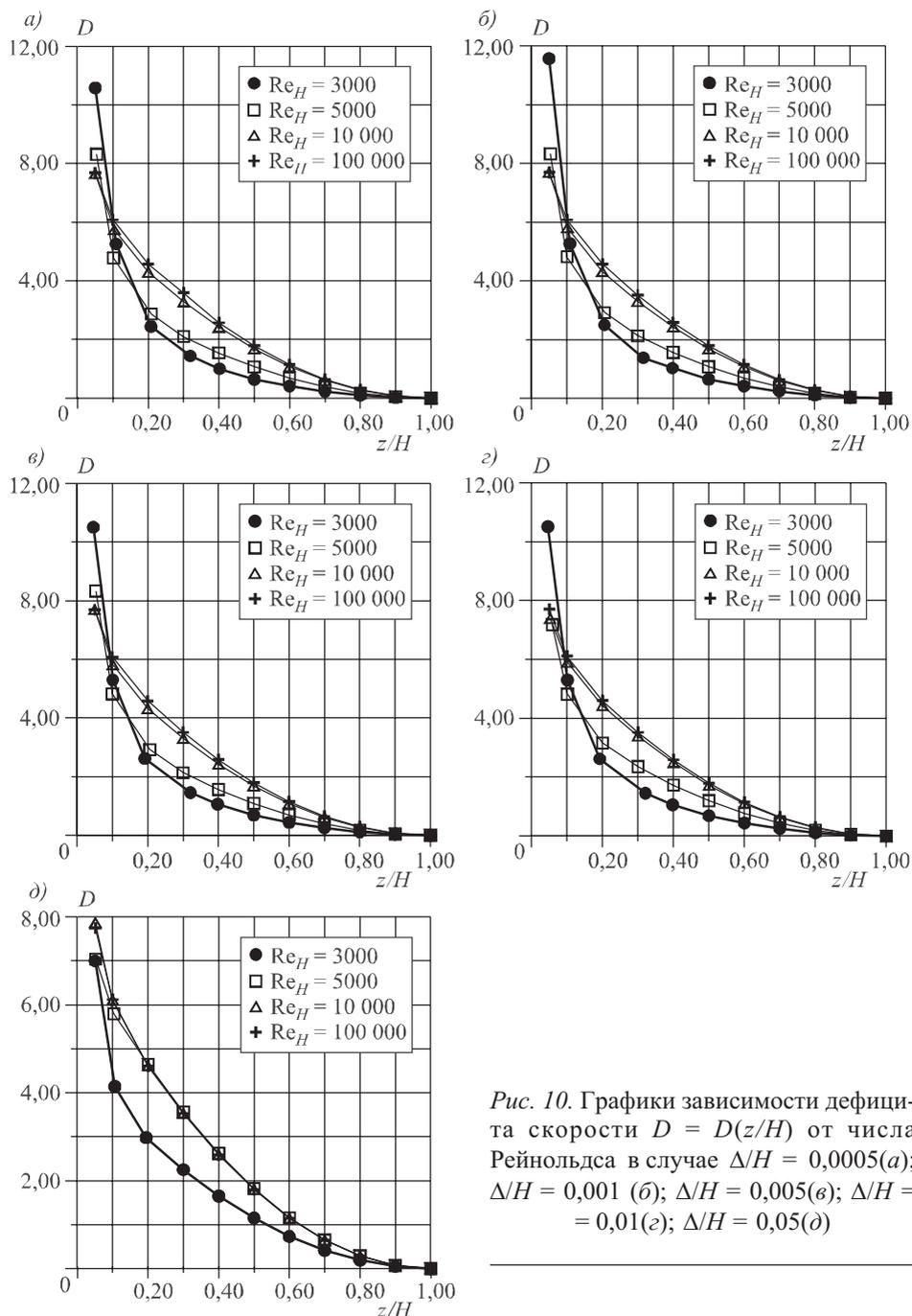


Рис. 10. Графики зависимости дефицита скорости  $D = D(z/H)$  от числа Рейнольдса в случае  $\Delta/H = 0,0005$ (а);  $\Delta/H = 0,001$  (б);  $\Delta/H = 0,005$ (в);  $\Delta/H = 0,01$ (г);  $\Delta/H = 0,05$ (д)

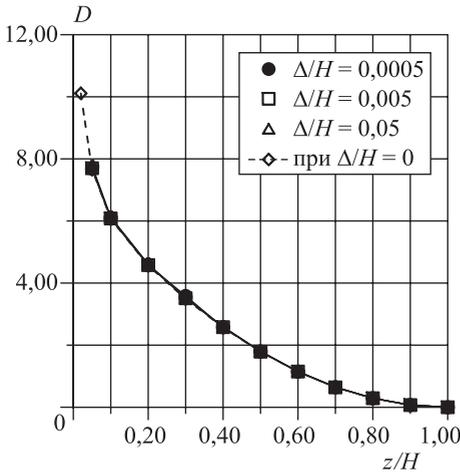


Рис. 11. Графики зависимости дефицита скорости  $D = D(z/H)$  при числах Рейнольдса больших 100 000 в случае всех значений  $\Delta/H$

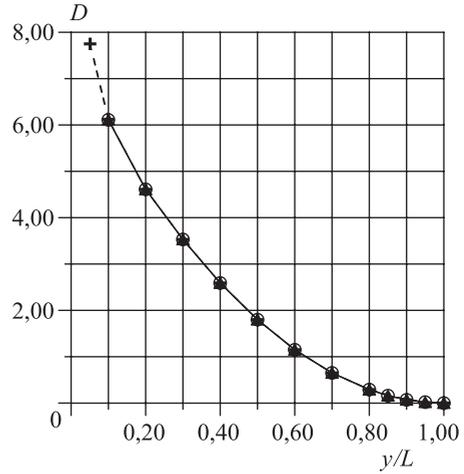


Рис. 12. Графики зависимости дефицита скорости  $D = D(y/L)$  при числах Рейнольдса больших 100 000 в случае всех значений относительных шероховатостей в диапазоне от 0,00 до 0,05

На рис. 12 представлен совмещенный график зависимости  $D = D(y/L)$  при числах Рейнольдса больших 100 000 в случае всех значений относительных шероховатостей в диапазоне от 0,00 до 0,05 как для круглых труб, так и для плоских потоков. Здесь через  $L$  обозначено либо  $H$ , либо  $r$ , а через  $y/L$  либо  $y/r$ , либо  $z/H$ . Данные для круглых труб обозначены крестиками и пунктиром.

Можно заключить, что этот график имеет универсальный характер для плоских потоков и потоков в круглых трубах, а течения в них являются автомодельными и не требуют введения каких-либо поправок типа на «неполную автомодельность» и др.

**Пример 3.** При анализе течений в пограничных слоях при нулевом градиенте давления также часто используется постулат о дефиците скорости. При экспериментальных исследованиях зависимости дефицита скорости от глобальных параметров турбулентности следует иметь в виду, что несмотря на феноменальные достижения в области техники измерения скоростей, их точность не может превзойти точности подобных измерений при изучении течений в круглых трубах и плоских потоках. Это объясняется несопоставимостью геометрических размеров изучаемых объектов. При одних и тех же безразмерных расстояниях от дна  $y/\delta$ ,  $y/r$  и  $y/H$  реальные значения  $\delta$  часто в сотни и более раз меньше значений  $r$  и  $H$ . Ясно, что это приводит к увеличению погрешностей при измерении скоростей. Данное обстоятельство, в свою очередь, обуславливает увеличение относительной погрешности при определении их разности, связанной с вычислением дефицита скорости.

Выше было показано, что следует рассматривать понятие «автомодельность» не только по отношению к числу Рейнольдса, но и по отношению ко второму глобальному параметру турбулентности – относительной эквивалентной шероховатости. Применительно к течениям в пограничных слоях

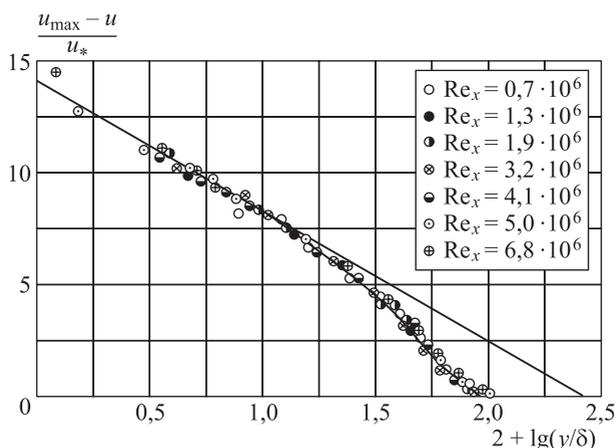


Рис. 13. Обобщенный график зависимости дефицита скорости от  $(y/\delta)$ .

подобные исследования проводились лишь для гладких поверхностей, т.е. изучалась автомодельность относительно числа Рейнольдса. Обобщение подобных данных приведено, например, в [3]. На рис. 13 сплошной линией показан график зависимости  $D = D(y/\delta)$  и видно, что разброс опытных данных достаточно велик. Компьютерная обработка данных рис. 13 свидетельствует о том, что отклонения опытных данных от графика при разных значениях  $y/\delta$  весьма внушительны и достигают десятков и сотен процентов.

Проиллюстрируем сказанное на примере современных опытных данных, полученных Остерлундом. Как и ранее, при расчете распределения осредненных скоростей необходимо предварительно задать значение дефицита средней скорости  $D_V$ . Поскольку родоначальником теории течений в пограничных слоях является Л. Прандтль, высказавший гипотезу о том, что распределение осредненных скоростей в пограничном слое аналогично их распределению в круглой трубе, то примем  $D_V = 4,0$ . Представляется, что в пограничном слое течение плоское, поэтому, вероятно, имеет право на существование и условие  $D_V = 2,6$ .

Найдем распределение осредненных скоростей предложенным в [1, 2] методом при четырех значениях числа Рейнольдса  $Re_\delta = \delta u_* / \nu$  (1194, 3994, 8133 и 11 060), вычислим значения дефицита скорости и проведем необходимые сопоставления. Результаты приведены в табл. 5–8.

Как и в прежнем случае, на очень малых расстояниях от гладких стенок на результатах измерений заметно сказывается влияние погрешностей. Одна-

Таблица 5. Результаты сопоставлений при  $Re_\delta = 1194$

$y/\delta$	$u^+$ (опыт)	$u^+$ ( $D_V = 4$ )	%	$u^+$ ( $D_V = 2,6$ )	%	$D$ (опыт)	$D$ ( $D_V = 4$ )	%	$D$ ( $D_V = 2,6$ )	%
0,1	16,52	16,17	-2,1	19,04	13,0	8,00	8,35	4,4	5,48	-31,5
0,2	18,34	17,95	-2,2	20,52	10,6	6,18	6,57	6,3	4,08	-35,3
0,4	21,40	20,81	-2,8	22,26	3,6	3,12	3,71	18,8	2,26	-27,5
0,6	23,40	22,85	-2,6	23,50	0,4	1,12	1,67	49,2	1,02	-8,9
0,8	24,40	24,08	-1,3	24,24	0,7	0,12	0,44	267	0,28	-133

Таблица 6. Результаты сопоставлений при  $Re_\delta = 3994$

$y/\delta$	$u^+$ (опыт)	$u^+$ ( $D_V = 4$ )	%	$u^+$ ( $D_V = 2,6$ )	%	$D$ (опыт)	$D$ ( $D_V = 4$ )	%	$D$ ( $D_V = 2,6$ )	%
0,1	19,54	19,28	-1,3	22,07	10,0	8,13	5,55	-31,6	5,60	-31,1
0,2	21,90	21,06	-4,3	23,56	7,6	5,77	4,07	-27,6	4,11	-40,7
0,4	24,85	23,94	-3,6	25,34	2,0	2,82	2,32	-17,7	2,33	-17,2
0,6	27,20	25,99	-4,5	26,62	-2,1	0,47	1,03	119,0	1,05	123
0,8	27,66	27,23	-1,6	27,38	-1,0	0,01	0,27	2700	0,29	2800

Таблица 7. Результаты сопоставлений при  $Re_\delta = 8133$

$y/\delta$	$u^+$ (опыт)	$u^+$ ( $D_V = 4$ )	%	$u^+$ ( $D_V = 2,6$ )	%	$D$ (опыт)	$D$ ( $D_V = 4$ )	%	$D$ ( $D_V = 2,6$ )	%
0,1	23,77	21,03	-9,8	23,82	0,5	5,65	8,39	48,5	5,60	-0,9
0,2	25,00	22,81	-8,8	26,30	1,2	4,42	6,61	49,5	4,12	-6,5
0,4	27,00	26,69	-4,9	27,10	0,4	2,42	3,73	54,8	2,32	-4,1
0,6	28,82	27,75	-3,7	28,38	-1,5	0,60	1,67	178	1,00	66,7
0,8	29,42	28,99	-1,4	29,15	-1,2	0,00	0,43	-	0,27	-

Таблица 8. Результаты сопоставлений при  $Re_\delta = 11\ 060$

$y/\delta$	$u^+$ (опыт)	$u^+$ ( $D_V = 4$ )	%	$u^+$ ( $D_V = 2,6$ )	%	$D$ (опыт)	$D$ ( $D_V = 4$ )	%	$D$ ( $D_V = 2,6$ )	%
0,1	22,61	21,77	-3,8	24,55	8,6	7,56	8,40	11,1	5,62	-25,6
0,2	24,80	23,56	-5,6	23,04	5,0	5,37	6,51	21,4	4,13	-26,2
0,4	26,50	26,44	-0,3	27,83	5,0	3,67	3,73	1,6	2,34	-36,6
0,6	29,60	28,50	-3,7	29,12	-1,6	0,47	1,67	19,2	1,05	75,5
0,8	30,10	29,74	-1,2	29,89	-0,7	0,07	0,43	514	0,28	300

ко при обоих значениях дефицита средней скорости (4,0 и 2,6) точность расчетов вполне допустима. Отметим, что отклонение осредненной скорости при  $D_V = 4,0$  чаще наблюдается в меньшую сторону, а при  $D_V = 2,6$  – в большую. Некоторое преимущество имеет случай, когда  $D_V = 4,0$ , т. е. при следовании гипотезе Л. Прандтля. Исходя из установленного факта, далее будем принимать для пограничных течений  $D_V = 4,0$ . На рис. 14 представлены графики зависимости  $D = D(y/\delta)$  при этом условии. Там же пунктиром показана аналогичная зависимость для течений в круглых трубах и плоских каналах при наличии квадратичной зоны сопротивления.

Так или иначе, но данные, приведенные в табл. 5–8, наглядно свидетельствуют в пользу известного положения о значительном увеличении от-

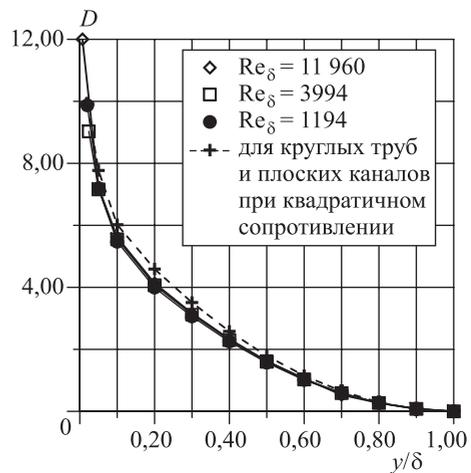


Рис. 14. Графики зависимости  $D = D(y/\delta)$  для условий опытов Остерлунда

носительной погрешности разности приближенных величин. Легко обнаружить, что, казалось бы, вопреки допустимым значениям относительных погрешностей определения осредненных скоростей, относительные погрешности их дефицита заведомо неприемлемы. Следовательно, в этих условиях использование опытных данных для анализа зависимости дефицита скорости от расстояния от стенки не может привести к достоверному результату. Гораздо надежнее для этой цели использовать достаточно обоснованную аналитическую формулу.

**Пример 4.** В литературе встречается обсуждение соотношения средних и максимальных скоростей в продольно-однородных турбулентных потоках (оно часто именуется «качеством трубы»). Наиболее известным результатом является эмпирическая формула А.Д. Альтшуля [3]:

$$\frac{V}{\bar{u}_{\max}} = 1 - \frac{0,835}{\lg \text{Re}_d}$$

Она предназначена для гладких труб и была представлена там же в графической форме (рис. 9, а).

В [1, 2] получены универсальные формулы для определения значений средней и максимальной скоростей в виде аналитических зависимостей, которые можно использовать для непосредственного вычисления их соотношения.

Из найденных соотношений легко получить формулы для определения относительной средней скорости  $\frac{V}{u_*}$ :

– при  $\delta_{\text{ст}} < Ar_0$ :

$$\begin{aligned} \frac{V}{u_*} = \frac{\bar{u}_{\text{ст}}}{u_*} \left( 1 - \frac{\delta_{\text{ст}}}{r_0} \right)^2 + 2,5 \left( \ln \frac{Ar_0}{\delta_{\text{ст}}} - 1 \right) + \frac{0,625}{A} - 3,75A + 1,25A^2 - 0,2A^3 + \\ + \frac{\delta_{\text{ст}}}{r_0} (7,5 + 0,354a_1) - \left( \frac{\delta_{\text{ст}}}{r_0} \right)^2 (3,75 + 0,252a_1) + \left( \frac{\delta_{\text{ст}}}{r_0} \right)^3 (0,84 + 0,034a_1); \end{aligned} \quad (18)$$

– при  $\delta_{\text{ст}} > Ar_0$ :

$$\begin{aligned} \frac{V}{u_*} = (1-A)^2 \frac{\bar{u}_{\text{ст}}}{u_*} + \frac{0,625}{A} - 2,5 + A(3,75 + 0,354a_1) - \\ - A^2(2,5 + 0,252a_1) + A^3(0,64 + 0,034a_1); \end{aligned} \quad (19)$$

– при  $A = 1$ :

$$\frac{V}{u_*} = 0,136a_1. \quad (20)$$

Соответственно на оси трубопровода значение относительной максимальной осредненной скорости определяется зависимостями:

– при  $\delta_{\text{ст}} < Ar_0$ :

$$\frac{\bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{\text{ст}}}{u_*} + \frac{1}{\kappa} \left( \ln \frac{Ar_0}{\delta_{\text{ст}}} - A + \frac{\delta_{\text{ст}}}{r_0} \right) + \frac{1}{\kappa A} \left( 0,5 - A + \frac{A^2}{2} \right),$$

а если принято  $\kappa = 0,4$ , то

$$\frac{\bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{\text{ст}}}{u_*} + 2,5 \left( \ln \frac{Ar_0}{\delta_{\text{ст}}} - A + \frac{\delta_{\text{ст}}}{r_0} \right) + \frac{2,5}{A} \left( 0,5 - A + \frac{A^2}{2} \right); \quad (21)$$

– при  $\delta_{\text{ст}} > Ar_0$ :

$$\frac{\bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{\text{ст}}}{u_*} + \frac{1,25}{A} - 2,5 + 1,25A; \quad (22)$$

– при  $A = 1$ :

$$\frac{\bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{\text{ст}}}{u_*}. \quad (23)$$

Полученные зависимости дают возможность найти выражения для определения соотношения средней и максимальной скоростей как для гладких, так и шероховатых и работающих при переходной зоне сопротивления труб и каналов. Заметим также, что на соотношение этих скоростей влияют (в общем случае) глобальные параметры  $Re_d$  и  $\Delta/d$ .

В [2] получено более удобное выражение, исходя из формулы для дефицита средней скорости:

$$\frac{\bar{u}_{\max} - V}{u_*} = D. \quad (24)$$

Отсюда 
$$\frac{V}{\bar{u}_{\max}} = 1 - \frac{D}{\bar{u}_{\max} / u_*}.$$

Это выражение легко приводится к виду

$$\frac{V}{\bar{u}_{\max}} = \frac{1}{1 + D / \frac{V}{u_*}}. \quad (25)$$

Поскольку ранее было показано, что для круглых труб  $D = 4,0$  а для плоских каналов  $D = 2,6$ , то формула (25) в этих случаях принимает вид

$$\frac{V}{\bar{u}_{\max}} = \frac{1}{1 + 4 / \frac{V}{u_*}} \text{ – для круглых труб}; \quad (26)$$

$$\frac{V}{\bar{u}_{\max}} = \frac{1}{1 + 2,6 / \frac{V}{u_*}} \text{ – для плоских потоков}. \quad (27)$$

Эти формулы дают возможность легко вычислять соотношение средней и максимальной скоростей как для гладких, так и шероховатых и работающих при переходной зоне сопротивления труб и каналов (рис. 15). Для расчета по ним необходимо знать лишь значение средней и динамиче-

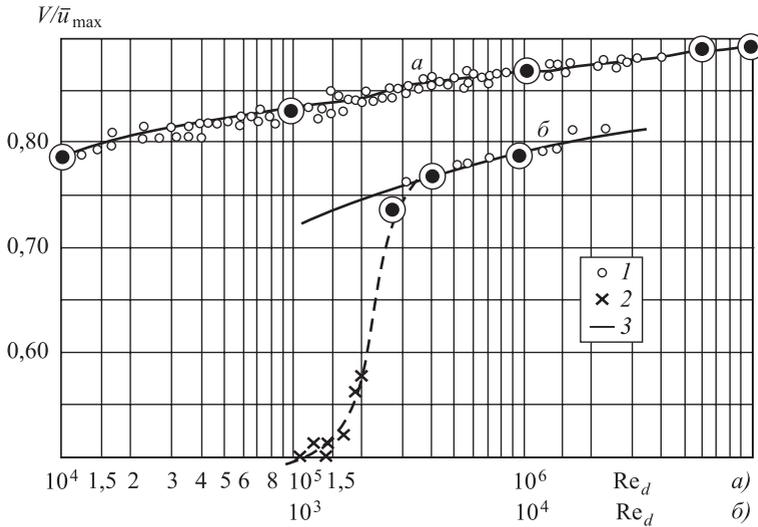


Рис. 15. Зависимость отношения средней скорости к максимальной от числа Рейнольдса (для гладких труб)

1 – опыты Никурадзе; 2 – опыты Стентона; 3 – по формуле А.Д. Альтшуля. Кружками с черной сердцевинкой обозначены результаты расчета по формуле (26) при  $(\Delta/r) = 0$

ской скоростей. Одновременно отметим, что полученные формулы даже проще формулы А.Д. Альтшуля, хотя и универсальны.

Так как  $\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{\lambda_d}}$ , то можно тем же формулам придать иной вид

$$\frac{V}{\bar{u}_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{D}{\sqrt{8/\lambda_d}}}, \quad (28)$$

где  $\lambda_d$  вычисляется по формуле Кольбрука.

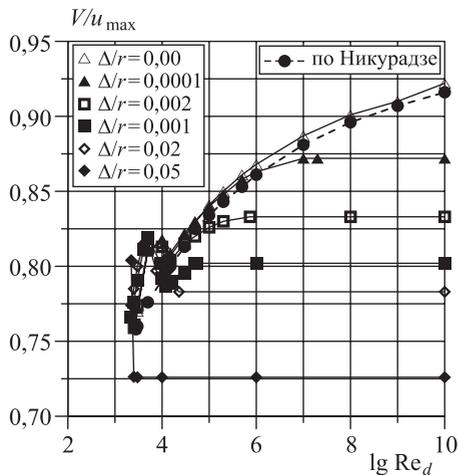


Рис. 16. Зависимость  $V/u_{\max} = f(\lg Re_d)$  при разных значениях относительных шероховатостей

Сопоставление расчетных (по формуле (26)) и данных при разных значениях относительных шероховатостей приведено на рис. 16.

Результаты сопоставления расчетов по предлагаемой формуле свидетельствуют о значительном влиянии параметра.

Автору не известны публикации, посвященные исследованию «качества трубы» при наличии доквадратичной и квадратичной зон сопротивления. Выполним этот анализ предлагаемым методом, т.е. с помощью вычислительного эксперимента.

На рис. 17 представлены результаты исследования зависимости

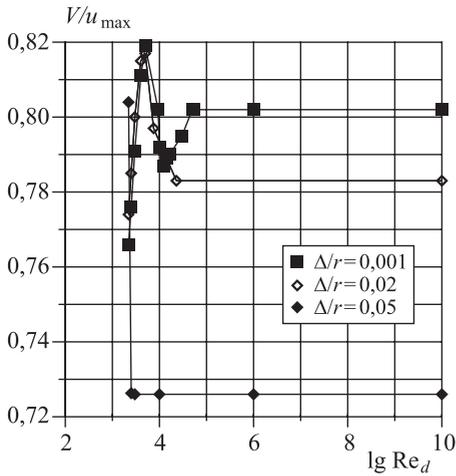


Рис. 17. Зависимость  $V/u_{\max} = f(\lg Re_d)$  при больших значениях относительных шероховатостей

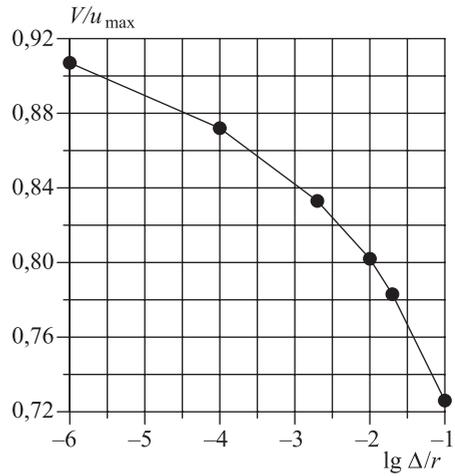


Рис. 18. График зависимости  $V/u_{\max} = f(\lg \Delta/r)$  для квадратичной зоны сопротивления

$V/u_{\max} = f(\lg Re_d)$  при различных значениях относительных шероховатостей. Влияние этого параметра вполне очевидно. Обнаруживаются зоны отсутствия влияния числа Рейнольдса на соотношение  $V/u_{\max}$  (в виде горизонтальных участков линий). В районе значения  $\lg Re_d \approx 10\,000 \div 15\,000$  обнаруживается некоторая впадина. Ее возникновение связано с началом развития логарифмического слоя в эюре распределения осредненных скоростей. В более крупном масштабе этот феномен продемонстрирован на рис. 17. С ростом значения  $\Delta/r$  «глубина» впадины существенно увеличивается. При  $\Delta/r = 0,00$  она составляет 0,012, а при  $\Delta/r = 0,05$  достигает 0,074. На рис. 15 обнаруживается схожая впадина, обычно принимаемая за экспериментальную погрешность. Однако заметим, что такие параметры, как средняя  $V$  и максимальная  $u_{\max}$  скорости, определяются опытным путем очень легко, просто и надежно.

**Пример 5.** В качестве пятого примера приведем полученный на базе тех же вычислительных экспериментов график зависимости  $V/u_{\max} = f(\lg \Delta/r)$ . Подобная зависимость получена, по-видимому, впервые (рис. 18).

**Выводы.** 1. В районе значения  $\lg Re_d \approx 10\,000 \div 15\,000$  обнаруживается некоторая впадина. Ее возникновение связано с началом развития слоя с логарифмическим законом распределения осредненных скоростей.

2. Показано, что относительная шероховатость оказывает существенное влияние на «качество трубы» как при докватратичном, так и при квадратичном сопротивлении.

3. При квадратичном сопротивлении «качество трубы» не зависит от числа Рейнольдса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высоцкий Л.И., Высоцкий И.С. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки. Саратов: СГТУ, 2011. 560 с.
2. Высоцкий Л.И., Высоцкий И.С. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки. СПб.: Изд-во «Лань», 2015. 672 с.
3. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970. 216 с.

**Высоцкий Лев Ильич**, д-р техн. наук, проф.  
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Получено 25.02.16

**Vysotskiy Lev Il'ich**, DSc, Professor  
Saratov State Technical University, Russia

**EFFICIENT USE A NEW MODEL OF TURBULENT STRUCTURE  
OF A LONGITUDINALLY-UNIFORM FLOW WHEN  
ANALYZING THEIR PARAMETERS**

**Part III**

In the third part of the paper presents results of the impact analysis «tube quality» of the Reynolds number at different values of relative roughness. They were obtained using the numerical experiment data.

**Key words:** the formula Colebrooke, the formula of Prandtl, the Reynolds number, the velocity deficit, a new model for the structure of turbulent flow.

REFERENCES

1. Vysotskiy L.I., Vysotskiy I.S. Prodol'no-odnorodnye osrednennye turbulentnye potoki [Longitudinally-averaged homogeneous turbulent flows]. Saratov, SSTU, 2011. 560 p. (in Russia)
2. Vysotskiy L.I., Vysotskiy I.S. Prodol'no-odnorodnye osrednennye turbulentnye potoki [Longitudinally-averaged homogeneous turbulent flows]. Saint-Petersburg, Publishing house «Lan'», 2015. 672 p. (in Russia)
3. Al'tshul' A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya [Hydraulic resistance]. Moscow, Nedra, 1970. 216 p. (in Russia)

УДК 662.63

О.Э. КОШЕЛЕВА, В.А. ЛОГВИНЕНКО

## ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДРЕВЕСИНЫ

## Часть II

Анализируется поведение древесины березы и сосны при нагреве, рассмотрены процессы двухстадийной термодеструкции (горения). Приведены результаты кинетического анализа.

Ключевые слова: древесина сосны, термический анализ, кинетика, горение.

Поведение древесины разных пород при внешнем нагреве определяет их устойчивость к возгоранию. Изменение химического состава и процессы термодеструкции древесины березы описывались в первой части статьи [1], во второй части рассматривается поведение при нагреве древесины сосны, широко распространенной в Западной Сибири.

Термический анализ образцов древесины проводился на термовесах Netzsch Thermal Analyzer TG 209 F1. Кривые потери массы в процессе горения были получены в протоке смеси аргона и кислорода ( $40 \text{ см}^3/\text{мин} + 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ ); скорости нагрева 5, 10, 20 и 30 К/мин, корундовый стандартный тигель, массы образцов примерно 5 мг. Обработка термоаналитических кривых проводилась на основе компьютерной программы NETZSCH Thermokinetics 2 [2, 3].

Изучение кинетики окислительной термодеструкции сосны проходило аналогично исследованию процесса горения березы в интервале температур 220–360 °С, что соответствует первому пику ДТГ на рис. 1, 2 (условия анализа указаны выше).

Анализ кривых по методу Фридмана показал, что величина энергии активации непостоянна во всем интервале реакции, хотя кривая ТГ монотонна (см. рис. 1), следовательно, процесс горения сосны многостадийный. Методом нелинейной регрессии установлено математически наиболее

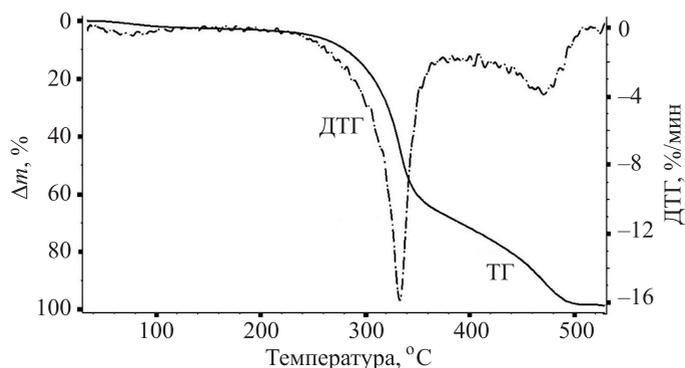


Рис. 1. Окислительная термодеструкция древесины сосны

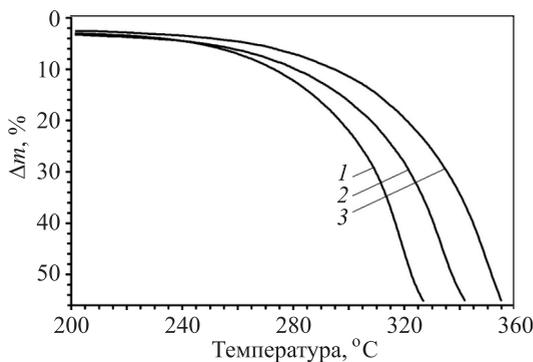


Рис. 2. Кривые потери массы образцов древесины сосны при термодеструкции при разных скоростях нагрева  
1 – 5, 2 – 10, 3 – 20 град/мин

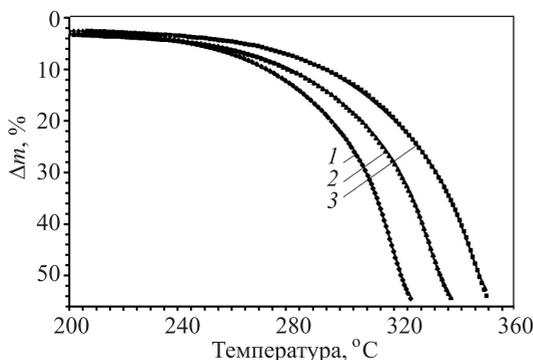


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных данных (линии) потерь массы при термодеструкции древесины сосны при разных скоростях нагрева  
1 – 5, 2 – 10, 3 – 20 град/мин

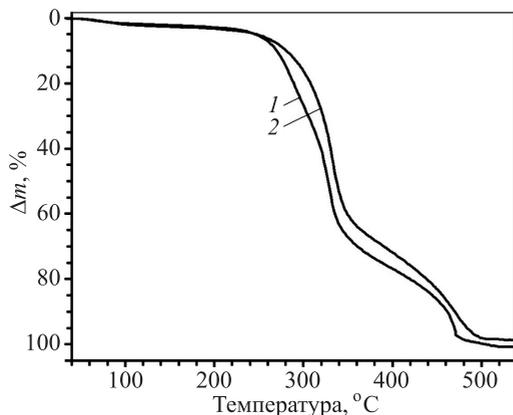


Рис. 4. Кривые потери массы процессов окислительной термодеструкции  
1 – березы; 2 – сосны

корректное описание процесса как двухстадийной реакции с последовательными стадиями ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ), для которой справедливы топохимические уравнения Аврамы – Ерофеева:



$$f_1(\alpha) = (1-\alpha)/[-\ln(1-\alpha)]^{0,67},$$

$$E_1 = 165 \pm 1 \text{ кДж/моль},$$

$$\lg A_1 = 12,2 \pm 0,1.$$



$$f_2(\alpha) = (1-\alpha) \cdot [-\ln(1-\alpha)]^{0,64},$$

$$E_2 = 113 \pm 1 \text{ кДж/моль},$$

$$\lg A_2 = 8,1 \pm 0,1.$$

Величина корреляционного коэффициента для двухстадийной реакции ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ) 0,999894. При формально-кинетическом исследовании горения компонент В рассматривают как кинетически заторможенную фазу, связанную с первичным (внешним) горением. Этот процесс состоит из двух частей: возможно, первая – это горение выделяющихся из древесины летучих веществ и горение целлюлозы, а вторая – горение гемицеллюлозы. Рис. 3 показывает четкое совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Вклад каждого процесса, определяемого в соответствии с методикой расчета, оценивается следующим образом: первая стадия 95,9 %, вторая – 4,1 %. Вклад второй стадии невелик, т.е. основную роль в горении сосны играет первая стадия. Для сравнения вклад первой стадии в процесс горения березы составил 35,8 %.

Величина энергии активации процесса термодеструкции

древесины сосны (165 кДж/моль) близка к величине, полученной при изучении кинетики первой стадии окислительной термодеструкции веток и хвоя сосны (168 и 164 кДж/моль соответственно) [4].

На рис. 4 сравниваются кривые горения сосны и березы. В условиях термоаналитического эксперимента (проток смеси аргона и кислорода (40 см<sup>3</sup>/мин + 10 см<sup>3</sup>/мин); скорость нагрева 10 град/мин, корундовый стандартный тигель) температурный интервал окислительной термодеструкции березы незначительно ниже, чем у сосны при линейном подъеме температуры.

По склонности к возгоранию и огнестойкости береза относится к среднестойким, а сосна к нестойким породам древесины [5, 6]. По-видимому, склонность к возгоранию и огнестойкость будут определяться первой ступенью термодеструкции древесины (по первым пикам ДТГ) в интервале температур 220–360 °С, т.е. начальными характеристиками процесса горения. Установлено, что по данным кинетического исследования разница в процессе горения обоих образцов заметна не по температурному интервалу термодеструкции при линейном нагреве (см. рис. 4), а по кинетическим параметрам этих процессов. Энергия активации первой ступени процесса окисления при температуре 220–360 °С древесины березы (183–187 кДж/моль) несколько больше, чем энергия активации первой ступени окисления сосновой древесины (165 кДж/моль).

Это подтверждается данными расчета изотермического процесса горения (на основании найденных кинетических параметров) при температуре 320 °С (рис. 5, 6). В условиях анализа двухстадийная термодеструкция образца березовой древесины полностью заканчивается за 11 мин, а двухстадийная термодеструкция образца сосновой древесины – за 6 мин.

Индекс огнестойкости широко используется в настоящее время для оценки склонности древесины к возгоранию; у березы он в пределах 2,0–3,5, а у сосны 1,1–1,5 [6]. Результаты формального кинетического анализа процессов окислительной термодеструкции древесины позволяют количественно

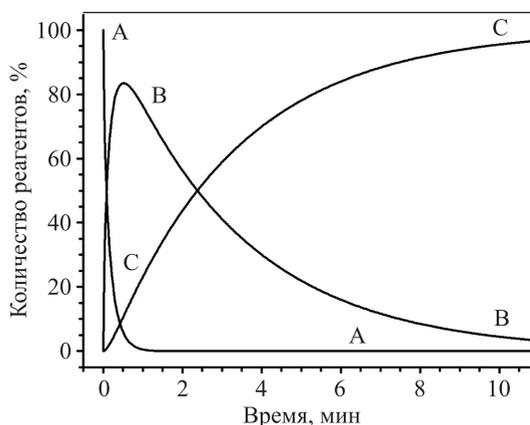


Рис. 5. Изменение количества компонентов при окислительной термодеструкции древесины березы при 320 °С

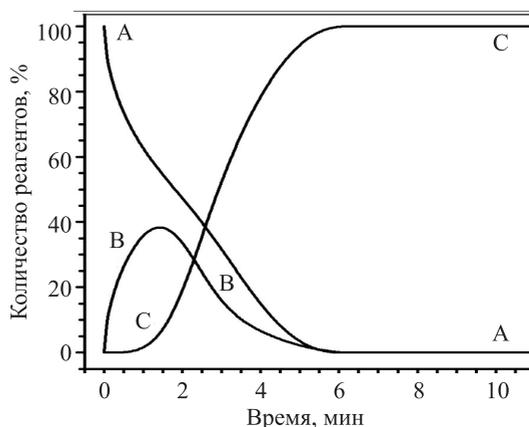


Рис. 6. Изменение количества компонентов при окислительной термодеструкции древесины сосны при 320 °С

оценивать склонность к возгоранию и огнестойкости древесины березы и сосны по времени полноты первой ступени изотермического горения, которое коррелирует с индексом огнестойкости.

Таким образом, в статье приведены результаты кинетического анализа термодеструкции двух видов древесины, широко распространенных в Сибири, – сосны и березы. Доказана более высокая устойчивость к нагреванию древесины березы. Найдены топохимические описания двухстадийной реакции горения древесины и рассчитаны кинетические параметры. Следующим этапом работы будет описание процессов горения этих видов материалов после обработки антипиренами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелева О.Э., Логвиненко В.А. Термический анализ древесины. Ч. 1 // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 2. С. 98–103.
2. Netzsch Thermokinetics. <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/us/products-%20%20solutions/advanced-software/thermokinetics.html>.
3. M o u k h i n a E. Determination of kinetic mechanisms for reactions measured with thermoanalytical instruments // J. Therm. Anal. Calorim. 2012. No. 109. Pp. 1203–1214.
4. К о р о б е й н и ч е в О.П. и др. Пиролиз и горение лесных горючих материалов // Горение твердого топлива: труды VIII Всерос. конф. Новосибирск: Изд-во ИК СО РАН, 2012. С. 50.1–50.8.
5. Серков Б.Б., Асеева Р.М., Сивенков А.Б. Физико-химические основы горения и пожарная опасность древесины (ч. 2) // Интернет-журнал «Технология техносферной безопасности» (<http://ipb.mos.ru/ttb>).
6. Причины разрушения древесины – поражающие факторы. <http://wood-petr.ru>.

**Кошелева Ольга Эдуардовна**, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Логвиненко Владимир Александрович**, д-р хим. наук, проф.

Институт неорганической химии СО РАН, г. Новосибирск

Получено 02.02.16

**Kosheleva Ol'ga Eduardovna**, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Logvinenko Vladimir Alexandrovich**, DSc, Professor

Institute of Inorganic Chemistry Siberian office of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

## THERMAL ANALYSIS OF THE WOOD

### Part II

In the article the behavior of the wood of birch and pine tree with the heating is analyzed, the processes of two-stage thermal destruction (combustion) are examined. The results of kinetic analysis are given.

**Key words:** the wood of pine tree, thermal analysis, kinetics, the combustion.

#### REFERENCES

1. K o s h e l e v a O.E., L o g v i n e n k o V.A. Termicheskiy analiz drevesiny. Ch. 1 [Thermal analysis of wood. P. 1]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 2. Pp. 98–103. (in Russia)

2. Netzsch Thermokinetics. <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/us/products-%20%20solutions/advanced-software/thermokinetics.html>.
  3. Moukhina E. Determination of kinetic mechanisms for reactions measured with thermoanalytical instruments. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012. No. 109. Pp. 1203–1214.
  4. Korobeynikov O.P. and others. Piroliz i gorenie lesnykh goryuchikh materialov [Pyrolysis and the combustion of forest fuels]. *Gorenie tverdogo topliva: trudy VIII Vserossiyskoy konferentsii* [The combustion of the solid fuel: the transactions of VIII All-Russian conference]. Novosibirsk, 2012. Pp. 50.1–50.8. (in Russia)
  5. Serkov B.B., Aseeva R.M., Sivenkov A.B. The physical chemistry bases of combustion and the fire hazard of wood (p. 2). Internet-periodical «The technology of the technosfernoy safety» (<http://ipb.mos.ru/ttb>). (in Russia)
  6. Prichiny razrusheniya drevesiny – porazhayushchie factory [Reasons for the destruction of wood – the damaging factors]. <http://wood-petr.ru>. (in Russia)
-

УДК 624.072.014.046

В.С. УТКИН, С.А. СОЛОВЬЕВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОК НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ ОПОРНЫХ ЗАКРЕПЛЕНИЙ**

Рассмотрены методы определения остаточной несущей способности эксплуатируемых металлических балок с учетом угловой жесткости опорных креплений балок. Показано, что при одних видах нагрузок понижение угловой жесткости опорных креплений в процессе эксплуатации балки приводит к повышению несущей способности металлических балок, а при других, наоборот, к понижению. На примере показан алгоритм экспериментально-теоретического определения угловой жесткости опорных креплений балки. Также на примере проиллюстрирован вариант повышения несущей способности балки при снижении угловой жесткости опор.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** металлическая балка, угловая жесткость, опорные крепления, предельная нагрузка, несущая способность, механическая безопасность.

С 2014 г. введен в действие Межгосударственный стандарт ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», которым предписано устанавливать категорию технического состояния здания или сооружения в зависимости от доли снижения фактической несущей способности (предельной нагрузки). Согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», вступившему в силу 1 июля 2015 г., несущая способность – максимальный эффект воздействия, реализуемый в строительном объекте без превышения предельных состояний. Мерой несущей способности несущего элемента конструкции служит предельная нагрузка, которую он выдерживает, не приходя в предельное состояние. В [1] отмечается увеличение количества аварий несущих строительных конструкций на действующих предприятиях, находящихся длительное время в эксплуатации, из-за снижения несущей способности элементов конструкций, а также из-за отсутствия методов для своевременного определения остаточной несущей способности в процессе эксплуатации. В мировой практике [2] также отмечается важность текущего контроля остаточной предельной нагрузки в процессе эксплуатации несущих элементов с целью оценки уровня безопасности эксплуатации конструкций.

Определение несущей способности железобетонных балок по критериям прочности, жесткости, ширины раскрытия и длины трещины было описано в работах [3–5]. Также известны методы определения остаточной несущей способности металлических балок [6]. Однако в этих методах рассматриваются балки с шарнирными или защемленными опорами, в то время как в реальных условиях нередко балка опирается на опоры с угловой жесткостью или защемлена не абсолютно жестко, например, ригель рамы, балки, заведен-

ные в кирпичную кладку и т.д. Неслучайно в ГОСТ 31937–2011 предписывается «определение реальной расчетной схемы здания или сооружения и его отдельных конструкций». Выявление уточненных расчетных схем балок и рам на стадии эксплуатации и проверочные расчеты их несущей способности частично приводятся в [7].

В данной статье предлагается рассмотреть метод определения угловой жесткости опор и остаточной несущей способности металлических балок по критерию прочности при различных нагрузках и изменении угловой жесткости опор на стадии эксплуатации. Благодаря учету угловой жесткости опор балок в некоторых случаях можно выявить резерв их несущей способности, что позволит не прибегать к их усилению или замене с экономическим эффектом.

При проектировании несущих конструкций, в частности металлических балок, используются идеализированные расчетные схемы. Так, однопролетные металлические балки при закреплении их, как правило, через фланцы на болтах или на сварке к колонне принято рассчитывать по схеме свободно опертой балки без учета некоторого (неизвестного) защемляющего влияния опор на значение изгибающего момента. Это вызвано тем, что на стадии проектирования невозможно оценить значение угловой жесткости опорных закреплений. Либо расчет ведут по расчетной схеме с «абсолютно» защемленными опорами. В последнем решении в процессе эксплуатации и снижении значений угловой жесткости опор в одних случаях происходит повышение несущей способности по значению изгибающего момента вблизи опор балки (рис. 1, а), в других, наоборот, снижение несущей способности по значению изгибающего момента (в середине пролета), как, например, в балке по рис. 1, б, где моменты  $M_A$  и  $M_B$  уменьшаются, а момент в середине пролета возрастает. В балке (рис. 1, а) при абсолютно жестком защемлении момент в сечении балки вблизи опоры  $M = ql^2 / 12$ . В действительности он всегда меньше этого значения и в данном случае принятие «абсолютной» угловой жесткости опор приводит к занижению несущей способности балки по сравнению с реальной несущей способностью. В расчетных схемах по рис. 1, а уменьшение угловой жесткости опор приводит к уменьшению наибольших моментов (на опорах) и выравниванию моментов в пролете балки, что повышает несущую способность балок и является положительным событием при постоянных размерах поперечного сечения балок. Такой же результат имеет место в балке с одной шарнирной опорой

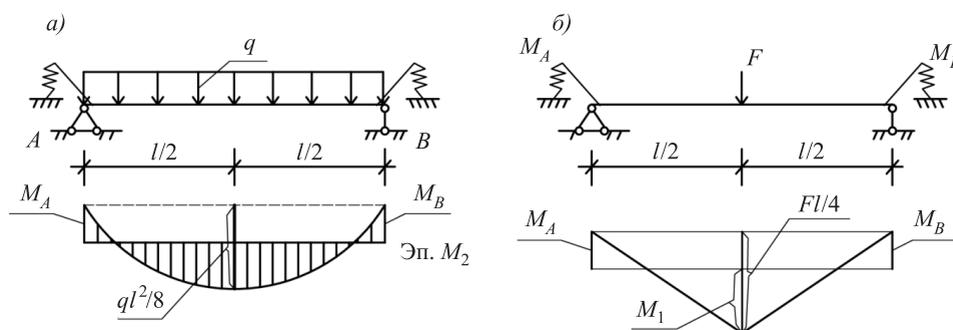


Рис. 1. Расчетные схемы и эпюры моментов балки с упругоподатливыми опорами

и другой «абсолютно» жесткой опорой. Уменьшение угловой жесткости опор (рис. 1, б) приводит к увеличению момента в пролете и соответственно уменьшению несущей способности балки.

Предлагаем рассмотреть методику испытаний металлических балок несвободно опирающихся на опоры для определения угловой жесткости опорных закреплений и для использования ее при оценке несущей способности балки на стадии эксплуатации. Как будет показано ниже, для определения несущей способности (предельной нагрузки) необходимо учитывать

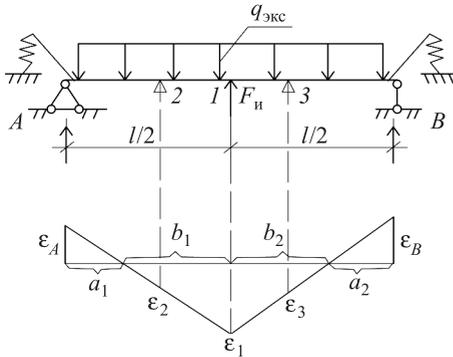


Рис. 2. Расчетная схема балки при проведении испытаний и эпюра деформаций  $\varepsilon$

на любом расстоянии (рис. 2). Деформации определяются с помощью датчиков сопротивления (тензорезисторов) по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{R_{0,i} - R_{1,i}}{kR_{1,i}},$$

где  $R_{0,i}$ ,  $R_{1,i}$  – омическое сопротивление тензорезистора до приложения и после приложения нагрузки  $F_{и}$ ;

$k$  – коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

По результатам измерения деформаций, например на нижней грани сечения балки, строится эпюра деформаций  $\varepsilon$  (при  $W_{\min} = idem$ ). В качестве примера на рис. 2 условно показана расчетная схема балки с эксплуатационной нагрузкой и сосредоточенной испытательной нагрузкой  $F_{и}$ , приложенной в середине пролета, а также эпюра деформаций металлической балки  $\varepsilon_s$  при постоянном значении момента сопротивления балки  $W_{\min}$ . В ином случае строится эпюра  $M = \varepsilon_i E_s W_i$  с учетом наименьших значений моментов сопротивления по длине балки, где  $E_s$  – модуль упругости стали балки. Для безопасности и сохранности балки от дополнительного воздействия испытательной нагрузки  $F_{и}$  предлагается направлять  $F_{и}$  на разгрузку балки, путем приложения ее противоположно эксплуатационной нагрузке, что легко осуществить с помощью гидравлического домкрата и деревянных стоек в условиях эксплуатации. Так как эпюра изгибающего момента  $M$  от нагрузки  $F_{и}$  состоит из прямолинейных участков, то и эпюра  $\varepsilon = M / E_s W$  будет прямолинейной при  $W_{\min} = idem$  на участке измерения деформаций, иначе, как отмечено выше, следует строить эпюру  $M$  по значениям

$M = \varepsilon_i E_s W_i$  в трех сечениях балки. На рис. 3 изображена эпюра  $M$  от испытательной нагрузки  $F_n$  по трем сечениям (снизу в средней части балки при ее разгрузке путем удаления нагрузки  $F_n$ ) для определения значений  $a_1, b_1$  и  $a_2, b_2$ , которые не зависят от значения  $F_n$ . Значение  $R_{0,i}$  измеряется в момент полного значения  $F_n$  на балке, а  $R_{1,i}$  измеряется при удалении  $F_n$ .

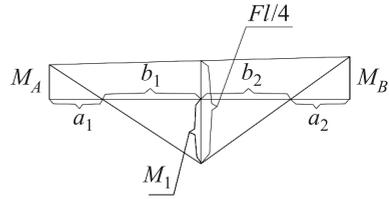


Рис. 3. Эпюра  $M$  от испытательной нагрузки

Изгибающий момент  $M = \varepsilon_i E_s W_i$  определяется не менее чем по трем испытаниям одной и той же нагрузкой  $F_n$  для статистики и определения доверительного интервала (среднего значения  $\bar{\varepsilon}_i$  и среднего квадратического отклонения  $S_{\varepsilon_i}$ ). Результаты измерений относительных деформаций от одной и той же силы  $F_n$  в одном и том же поперечном сечении балки будут характеризоваться нормальным законом распределения, для которого применимо «правило трех сигм» [8]. В этом случае эпюру  $\varepsilon$  или эпюру  $M$  строят с обеспеченностью 0,9973 по значениям  $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_i + 3S_{\varepsilon_i}$  или  $M = \bar{M}_i + 3S_{M_i}$  в каждом сечении балки (см. рис. 2, 3). Эпюра моментов  $M$ , представленная рис. 3, будет геометрически подобна эпюре деформаций  $\varepsilon$  (см. рис. 2).

Известно, что предельное значение изгибающего момента для металлической балки определяется по формулам:

$$M_{пр} = \varepsilon_{пр,s} E_s W \quad \text{или} \quad M_{пр} = R_s W,$$

где  $\varepsilon_{пр,s}$  – предельная относительная деформация стали, соответствующая, как правило, пределу текучести стали  $\sigma_{0,2}$  или  $R_s$  – расчетному сопротивлению стали балки (при расчете по критерию прочности балки), т.е. до появления пластической деформации во всех элементах опорного узла и на всю высоту поперечного сечения балки.

По известному моменту  $M_{пр,1}$  в сечении балки в середине пролета, используя геометрическое подобие эпюр  $\varepsilon$  или  $M$ , строят предельную эпюру изгибающих моментов по известным значениям  $M_{пр,1}, a_1, b_1$  и  $a_2, b_2$  (рис. 4), из которого найдем значение предельной нагрузки  $F_{пр}$  на балку из условия ее прочности с обеспеченностью 0,9973 (при нормальном распределении относительных деформаций и использовании «правила трех сигм»):

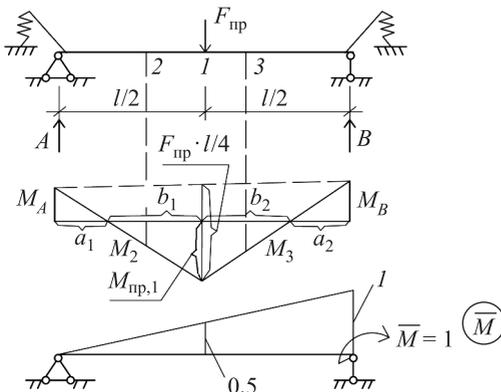


Рис. 4. Эпюры  $M_{пр}$  и  $\bar{M}$  для определения угла поворота балки в опоре  $B$  при предельном значении момента  $M_{пр,1}$  и  $M_A < M_B$

ее прочности с обеспеченностью 0,9973 (при нормальном распределении относительных деформаций и использовании «правила трех сигм»):

$$F_{пр} = \frac{4}{l} \left[ M_{пр,1} + \left( \frac{M_A + M_B}{2} \right) \right]. \quad (1)$$

Как отмечено выше, для определения предельной нагрузки на балку по критерию ее прочности при любом виде нагрузки необходимо знать значения реальной угловой жесткости опор  $A$

и  $B$ , которые определяются при значении предельной нагрузки, например, равной предельной  $F_{\text{пр}}$ . Экспериментально это сделать невозможно. Найдем значения угловых жесткостей опор  $A$  и  $B$  при предельной нагрузке  $F_{\text{пр}}$  экспериментально-теоретическим методом. Для этого необходимо вычислить (или измерить, что представляет собой определенную трудность) значения углов поворота  $\varphi_A$  опоры  $A$  и  $\varphi_B$  опоры  $B$ . Угловая жесткость опор не зависит от вида силового воздействия на балку, а зависит от величины внутренних усилий (изгибающего момента в опорном сечении балки), согласно исследованиям О.В. Коржова (диссертация «Несущая способность и деформативность податливых узловых сопряжений стальных перекрестных балок», 2010 г., г. Москва). С ростом значения изгибающего момента в опорном сечении балки угловая жесткость возрастает в условиях упругих деформаций работы всех элементов узлового соединения, а при достижении пластических деформаций в определенном числе элементов уменьшается, согласно О.В. Коржову. Угол поворота сечения балки на опорах  $A$  и  $B$  от предельной нагрузки  $F_{\text{пр}}$  предлагается определять аналитически, методами строительной механики [9], в условиях упругих деформаций, принимая  $M_{\text{пр},1} = R_s W_{\text{min}}$ . Для этого строят эпюру изгибающих моментов от нагрузки  $F_{\text{пр}}$  при известном значении  $M_{\text{пр},1}$  (см. рис. 4) с использованием значений  $M_B = M_{\text{пр},1} \frac{a_2}{b_2}$

и  $M_A = M_{\text{пр},1} \frac{a_1}{b_1}$ , полученных из подобия треугольников. По [9] в условиях

упругих деформаций строят эпюру  $\bar{M}$  от единичного момента  $\bar{M}=1$  на опоре  $B$ . По формуле Симпсона [9] находят угол поворота  $\varphi_B$ :

$$\varphi_B = \frac{l/2}{6EJ} \left[ -4 \cdot \frac{(M_{\text{пр},1} - M_A)}{2} \cdot 0,25 - 0,5 \cdot M_{\text{пр},1} \right] + \frac{l/2}{6EJ} \left[ -0,5 \cdot M_{\text{пр},1} - 4 \cdot \frac{(M_{\text{пр},1} - M_B)}{2} + 1 \cdot M_B \right],$$

где  $EJ$  – жесткость при изгибе металлической балки (принято  $EJ = \text{idem}$ ). Значение угловой жесткости опоры  $B$  находят по формуле:  $C_B = M_B / \varphi_B$ . Значение жесткости  $C_B$ , например, в опоре  $B$  сохраняется и при других предельных значениях нагрузок на балку, например, при  $q_{\text{пр}}$ . Аналогично найдем значение  $C_A = M_A / \varphi_A$ .

**Пример 1.** Пусть условно известны значения  $M_{\text{пр},1} = 250$  кНм;  $l = 6$  м;  $a_1 = 1,2$  м;  $b_1 = 1,8$  м;  $a_2 = 1,4$  м;  $b_2 = 1,6$  м;  $EJ = 22$  МНм<sup>2</sup>. Тогда  $M_A = M_{\text{пр},1} \frac{a_1}{b_1} = 250 \frac{1,2}{1,8} = 166,7$  кНм и  $M_B = M_{\text{пр},1} \frac{a_2}{b_2} = 218,8$  кНм. Значение предельной нагрузки

$$F_{\text{пр}} = \frac{4}{6} \left[ 250 + \left( \frac{166,7 + 218,8}{2} \right) \right] = 295,2 \text{ кН.}$$

Определим угол поворота  $\varphi_B$  опоры  $B$  от нагрузки  $F_{\text{пр}}$ :

$$\varphi_B = \frac{1}{22 \cdot 10^3} [0 - 4 \cdot 41,7 \cdot 0,25 - 0,5 \cdot 250] +$$

$$+ \frac{1}{22 \cdot 10^3} [-0,5 \cdot 250 - 4 \cdot 15,6 \cdot 0,75 + 1 \cdot 218,8] = -2,72 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

Найдем жесткость опорного закрепления  $B$ :

$$C_B = 218,8 / 2,72 \cdot 10^{-3} = 80,4 \text{ МН/рад.}$$

Аналогично находим:

$$\varphi_A = \frac{1}{22 \cdot 10^3} [166,7 - 4 \cdot 41,7 \cdot 0,75 - 0,5 \cdot 250] +$$

$$+ \frac{1}{22 \cdot 10^3} [-0,5 \cdot 250 - 4 \cdot 15,6 \cdot 0,25 + 0] = -4,38 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

$$\text{и } C_A = 166,7 / 4,38 \cdot 10^{-3} = 38,06 \text{ МН/рад.}$$

После определения угловых жесткостей опор на уровне предельной нагрузки  $F_{пр}$  можно рассмотреть ее определение по критерию прочности балки при любой нагрузке, например, при равномерно распределенной  $q$ . Для этого выявляют значения изгибающих моментов на опорах и в середине пролета балки по приведенной выше методике. Если в данном случае получается, что момент на опоре  $A$  или  $B$  больше, чем в пролете, то необходимо установить значение предельной равномерно распределенной нагрузки исходя из прочности опорного сечения. Если наибольший изгибающий момент будет в пролете балки, то используется прочность этого сечения балки. Рассмотрим расчет предельной нагрузки  $q_{пр}$  на балку от эксплуатационной нагрузки вида  $q$  в условиях упругой деформации (рис. 5), с наибольшим моментом в опорном сечении  $B$  балки.

Система канонических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \Delta_{1F} &= -\varphi_A \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \Delta_{2F} &= -\varphi_B \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

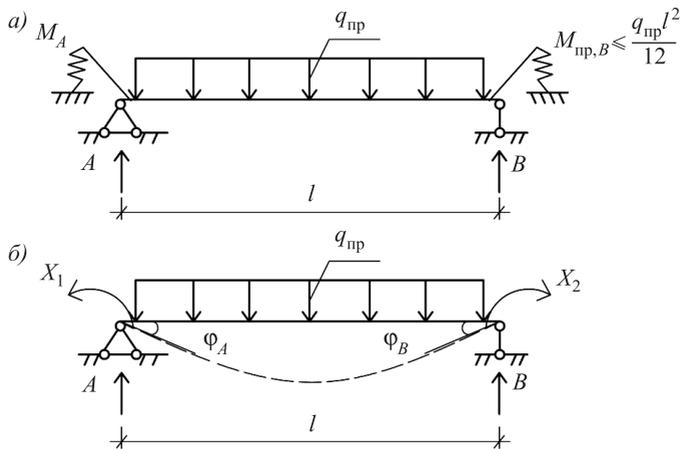


Рис. 5. Заданная (а) и эквивалентная (б) системы для железобетонной балки

где  $X_1 = C_A \varphi_A$  при неизвестном  $\varphi_A$  и  $X_2 = C_B \varphi_B = M_{пр,Б}$  для принятого варианта балки с  $M_{max} = M_{пр,Б} = R_s W_B$ , значение которого известно. Перемещения  $\Delta_{1F}$  и  $\Delta_{2F}$  выражаются через неизвестное  $q_{пр}$  путем определения их по формулам строительной механики:

$$\Delta_{1F} = \frac{\text{Эп}M_F \times \text{Эп}\bar{M}_1}{EJ}; \quad \Delta_{2F} = \frac{\text{Эп}M_F \times \text{Эп}\bar{M}_2}{EJ}; \quad \delta_{22} = \frac{\text{Эп}\bar{M}_2 \times \text{Эп}\bar{M}_2}{EJ} = \frac{l}{3EJ};$$

$$\delta_{11} = \frac{l}{3EJ}; \quad \delta_{12} = \delta_{21} = \frac{\text{Эп}\bar{M}_1 \times \text{Эп}\bar{M}_2}{EJ} = \frac{l}{6EJ}; \quad \Delta_{1F} = \Delta_{2F} = -\frac{q_{пр} l^3}{24EJ},$$

где  $EJ$  – жесткость металлической балки при изгибе.

Подставляя эти перемещения в (2) с учетом  $X_2 = M_{пр,Б} = R_s W_B$ ,  $\varphi_A = X_1 / C_A$ ,  $\varphi_B = X_2 / C_B$ , получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} X_1 \left( \frac{l}{3EJ} + \frac{1}{C_A} \right) + \frac{l}{6EJ} X_2 - \frac{q_{пр} l^3}{24EJ} &= 0 \\ \frac{l}{6EJ} X_1 + X_2 \left( \frac{l}{3EJ} + \frac{1}{C_B} \right) - \frac{q_{пр} l^3}{24EJ} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из первого уравнения в (3) найдем  $X_1$  через  $q_{пр}$  и  $X_2 = M_{пр,Б} = R_s W_B$ , подставляя во второе уравнение значение  $X_1$ , найдем значение предельной нагрузки  $q_{пр}$ .

**Пример 2.** Пусть  $X_2 = M_{пр,Б} = 250$  кНм;  $l = 3$  м. Воспользуемся данными для жесткостей из примера 1. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} X_1 \left( \frac{3}{3 \cdot 22 \cdot 10^6} + \frac{1}{38,06 \cdot 10^6} \right) + \frac{3}{6 \cdot 22 \cdot 10^6} X_2 - \frac{q_{пр} \cdot 3^3}{24 \cdot 22 \cdot 10^6} &= 0 \\ \frac{3}{6 \cdot 22 \cdot 10^6} X_1 + X_2 \left( \frac{3}{3 \cdot 22 \cdot 10^6} + \frac{1}{80,4 \cdot 10^6} \right) - \frac{q_{пр} \cdot 3^3}{24 \cdot 22 \cdot 10^6} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Решая систему уравнений, найдем:  $X_1 = M_A = 180$  кНм;  $q_{пр} = 370$  кН/м при  $X_2 = M_{пр,Б} = 250$  кНм. При абсолютно жестких опорах имеем  $q_{пр,1} = \frac{12M_{пр,Б}}{l^2} = 333$  кН/м, т.е. меньше, чем при упругоподатливых опорах.

Если бы задача решалась для шарнирно опертой балки, то значение предельной нагрузки  $q_{пр,2} = \frac{8M_{пр,Б}}{l^2} = 222,2$  кН/м. Учет реальных жесткостей опор позволил выявить резерв несущей способности балки соответственно в 1,11 и 1,71 раза по сравнению с  $q_{пр,1}$  и  $q_{пр,2}$ , получаемых на стадии проектирования.

Рассмотренный метод определения предельной нагрузки может быть использован при любых видах нагрузок. По результатам предельной нагрузки можно определить коэффициент запаса по прочности балки по формуле

$k = \frac{q_{пр}}{q_{экс}}$ , где  $q_{экс}$  – эксплуатационная нагрузка, и тем самым оценить уровень

безопасности эксплуатации балки.

**Выводы.** 1. Предложен метод определения значения угловых жесткостей опор металлической балки, значения предельной нагрузки (остаточной несущей способности) металлических балок на стадии эксплуатации при учете угловых жесткостей опорных закреплений.

2. Рассмотрено определение предельной нагрузки для балки, нагруженной по всей длине пролета эксплуатационной нагрузкой  $q_{экс}$ . Данную методику можно использовать для определения предельной нагрузки при любых видах эксплуатационной нагрузки с наибольшим (предельным) моментом на опоре.

3. Представленные расчеты позволяют выявить резерв несущей способности балок на стадии их эксплуатации и в некоторых случаях получить экономический эффект от отказа проведения усиления или замены балки по условию безопасности ее эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. З о л и н а Т.В. Обоснование необходимости учета жесткости ригеля поперечной рамы одноэтажного промышленного здания при его проектировании и оценке несущей способности в процессе эксплуатации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. № 1(11). С. 93–98.
2. X i a n g l i n G., X i a n y u J., Y o n g Z. Basic principles of concrete structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016. 597 p.
3. У т к и н В.С. Определение остаточной несущей способности железобетонных балок на стадии эксплуатации по критерию прочности арматуры и бетона // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 1. С. 15–23.
4. У т к и н В.С., С о л о в ь е в С.А. Определение остаточной несущей способности железобетонных балок по критерию жесткости (прогиба) // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4. С. 45–53.
5. У т к и н В.С., С о л о в ь е в С.А. Определение несущей способности железобетонных балок на стадии эксплуатации при наличии трещин в бетоне // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6(53). С. 58–64.
6. Пат. РФ № 2460057. МПК G01N3/32. Способ неразрушающего определения несущей способности строительных конструкций / В.С. Уткин, А.Н. Редькин. М., 2012. Бюл. № 24.
7. У т к и н В.С. Уточнение расчетных схем балок и рам на стадии эксплуатации и проверочный расчет их несущей способности // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 1. С. 6–10.
8. Ш и ш к и н И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: учебник для вузов / под ред. акад. Н.С. Соломенко. М.: Изд-во стандартов, 1990. 342 с.
9. Р ж а н и ц ы н А.Р. Строительная механика. 2-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.

Уткин Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: utkinvogtu@mail.ru  
Вологодский государственный университет

**Соловьев Сергей Александрович**, асп.; E-mail: ser6sol@yandex.ru  
Вологодский государственный университет

Получено после доработки 15.02.16

**Utkin Vladimir Sergeevich**, DSc, Professor; E-mail: utkinvogtu@mail.ru

Vologda State University, Russia

**Solov'ev Sergey Alexandrovich**, Post-graduate Student; E-mail: ser6sol@yandex.ru

Vologda State University, Russia

## **CALCULATION OF STEEL BEAMS LOAD-BEARING CAPACITY ON OPERATION STAGE TAKING INTO ACCOUNT TO RIGIDITY OF THE SUPPORTS**

The article describes the methods of calculation the residual bearing capacity of the operated metal beams taking into account the angular rigidity of the supports. It is shown that under certain types of loads, lowering the angular rigidity of the supports leads to an increase of steel beams load-bearing capacity while the others, on the contrary, to decrease. The example shows the algorithm experimentally-theoretical definition of angular rigidity of the beam supports. Also in the illustrated example increasing the load-bearing capacity of the steel beam in the reducing of angular rigidity.

**Key words:** steel beam, angular rigidity, reference fixing, the ultimate load, load-bearing capacity, mechanical safety.

### REFERENCES

1. Zolina T.V. Obosnovanie neobkhodimosti ucheta zhestkosti rigilya poperechnoy ramy odnoetazhnogo promyshlennogo zdaniya pri ego proektirovani i otsenke nesushchey sposobnosti v protsesse ekspluatatsii [Justification of rigidity of the beam cross-frame one-story industrial building in designing and evaluating load-bearing capacity at operation stage]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Civil Bulletin of the Caspian]. 2015. No. 1(11). Pp. 93–98. (in Russia)
2. Xianglin G., Xianyu J., Yong Z. Basic principles of concrete structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016. 597 p.
3. Utkin V.S. Opredelenie ostatochnoy nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh balok na stadii ekspluatatsii po kriteriyu prochnosti armatury i betona [Calculation the residual bearing capacity of reinforced concrete beams at the operation stage according to the criterion of strength of steel bars and concrete]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2015. No. 1. Pp. 15–23. (in Russia)
4. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Opredelenie ostatochnoy nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh balok po kriteriyu zhestkosti (progiba) [Calculation the residual bearing capacity of reinforced concrete beams according to the rigidity criterion]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2015. No. 4. Pp. 45–53. (in Russia)
5. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Opredelenie nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh balok na stadii ekspluatatsii pri nalichii treshchin v betone [Calculation of reinforced concrete beams bearing capacity at the operation stage with cracks in the concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2015. No. 6(53). Pp. 58–64. (in Russia)
6. Pat. No. 2460057. IPC G01N3/32. Sposob nerazrushayushchego opredeleniya nesushchey sposobnosti stroitel'nykh konstruktsiy [Non-destructive method of

- determining the bearing capacity of building structures]. V.S. Utkin, A.N. Red'kin. Moscow, 2012. Bull. No. 24. (in Russia)
7. Utkin V.S. Utochnenie raschetnykh skhem balok i ram na stadii ekspluatatsii i proverochnyy raschet ikh nesushchey sposobnosti [Refinement of design schemes beams and frames during the operational phase and check calculation of bearing capacity]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structure mechanics and building calculations]. 2015. No. 1. Pp. 6–10. (in Russia)
  8. Shishkin I.F. Metrologiya, standartizatsiya i upravlenie kachestvom [Metrology, standardization and quality management]. Moscow: Izd-vo standartov, 1990. 342 p. (in Russia)
  9. Rzhantsyn A.R. Stroitel'naya mekhanika [Structure mechanics]. Moscow, Higher school, 1991. 439 p. (in Russia)
-

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ



УДК 624.042.8

С.А. БЕХЕР, А.О. КОЛОМЕЕЦ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЛЬСЫ ПОДКРАНОВОГО ПУТИ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Работа направлена на решение актуальной проблемы повышения достоверности тензометрического метода для измерения динамических сил в реальных условиях эксплуатации. Приведены результаты экспериментальных исследований динамических сил и деформаций железнодорожных рельсов подкранового пути с использованием быстродействующей тензометрии. Нагружение рельсов с наклеенными на них тензодатчиками осуществлялось ударным воздействием. Исследованы и классифицированы возникающие в рельсах колебательные процессы. Экспериментально установлена связь типа деформаций, временных и амплитудных параметров сигналов с уровнем динамических сил. Определены частотные характеристики тензометрических сигналов. Разработана методика калибровки тензометрической системы, предназначенной для измерения динамических сил, с использованием ударного нагружения.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** тензометрия, быстродействующая тензометрическая система, ударное нагружение, измерение динамических сил, деформации рельсов.

Один из наиболее эффективных методов мониторинга технического состояния стальных конструкций основывается на измерениях деформаций и напряжений. Используя эти данные и физические модели, рассчитывают прочностные характеристики и оценивают сроки безопасной эксплуатации. Для измерения деформаций наибольшее распространение получили тензометрические методы, в которых регистрируется деформация упругого элемента, закрепляемого на поверхности конструкции. Чувствительными элементами чаще всего являются преобразователи, основанные на тензорезистивном эффекте в металлических проводниках пленочного и проволочного типа. В последнее время находят применение полупроводниковые тензорезисторы и оптоволоконные преобразователи [1, 2].

Возможности контактного тензометрического метода с использованием упругого элемента существенно ограничены зависимостью коэффициента преобразования от субъективных факторов, условий и технологии крепления преобразователя на поверхность объекта контроля. Существующие тензо-

метрические системы обеспечивают относительную погрешность измерения электрических сигналов в пределах  $\pm 0,5\%$ , а вариации на этапе установки преобразователя повышают погрешность до уровня  $\pm 5\%$  [3]. Для уменьшения этой составляющей погрешности необходимы технические решения, в которых повышение точности достигается за счет тарировки преобразователей после их установки на объект контроля.

Задача измерения действительных значений чувствительности установленных преобразователей приобретает особую актуальность при измерении быстропротекающих процессов, вызванных ударным нагружением [4–6]. При динамическом нагружении линейная связь деформаций и сил нарушается. Механическая система в динамике описывается системой линейных дифференциальных уравнений [7]. Существенное влияние на достоверность определения сил оказывают граничные условия, которые часто известны с недостаточной точностью. Поэтому для определения значений динамических сил, действующих на конструкцию, с использованием тензометрии необходимы методики экспериментальной тарировки преобразователей [8].

Целью работы является создание экспериментальной методики тарировки тензометрической системы с установленными на объекте контроля тензодатчиками для измерения динамических сил, вызванных ударными процессами, в реальных условиях эксплуатации.

Экспериментальные исследования проводились на участке рельсового пути длиной 25 м на железобетонных шпалах (рис. 1). Участок предназначен для регистрации динамических сил в системе «колесо–рельс» и оборудован тензодатчиками. Всего проведено три серии экспериментов. В первой серии импульсное воздействие на рельс осуществлялось в точке А (см. рис. 1), во второй – Б, в третьей – В. В каждой серии экспериментов импульсное воздействие воспроизводилось с помощью ударного устройства, которое сбрасывалось с различной высоты от поверхности катания рельса.

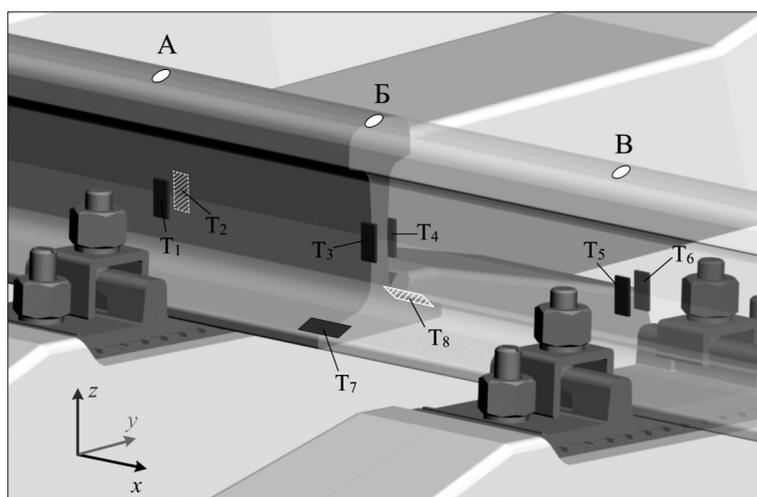


Рис. 1. Схема измерительного участка пути  
 А, Б, В – точки приложения динамических сил;  $T_1, T_2$  и  $T_5, T_6$  – тензодатчики, установленные на шейке рельса над центрами шпал;  $T_3, T_4$  – тензодатчики, установленные симметрично между шпал на шейки и  $T_7, T_8$  на подошве рельса

Для регистрации параметров динамических процессов, возникающих в процессе взаимодействия ударного устройства и рельса, использовался электрический метод измерений. Длительность контакта ударного устройства и рельса фиксировалась с помощью специальной электрической схемы, а для регистрации упругих относительных деформаций на шейке и подошве рельса устанавливались 8 тензорезистивных проволочных тензодатчиков типа ПКС-200 с номинальным сопротивлением 200 Ом и базой 12 мм. Сигналы с тензодатчиков регистрировались с частотой дискретизации 20 кГц тензометрической системой «Динамика-1» (ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», Новосибирск), зарегистрированной в государственном реестре средств измерений за № 32885-06 [9].

Вертикальные относительные деформации шейки рельса  $\varepsilon_z$  (см. рис. 1) измерялись тремя парами тензодатчиков, причем две пары тензодатчиков  $T_1$  и  $T_2$ ,  $T_5$  и  $T_6$  располагались над центрами шпал, а пара  $T_3$  и  $T_4$  – симметрично в межшпальном ящике. Продольные деформации подошвы рельса  $\varepsilon_x$  регистрировались парой тензодатчиков  $T_7$ ,  $T_8$ , наклеенных на подошву и ориентированных вдоль рельса. Сигналы с тензодатчиков  $T_7$  и  $T_8$  использовались для оценки симметричности продольных деформаций подошвы рельса, связанных с изгибом рельса в вертикальной плоскости.

Конструкция ударного устройства показана на рис. 2 и представляет собой наборный комплект металлических шайб 6, 7 и боек 5, которые скрепляются шпилькой М10 1. Рабочий торец бойка имеет форму усеченного конуса (см. рис. 2). В комплект входят пять шайб весом по 2 кг и боек весом 3 кг, изготовленные из стали 45. Одна из шайб изготавливалась из алюминиевого сплава Д16Т, что позволило обеспечить для ударного устройства отношение длины к диаметру больше единицы и, следовательно, уменьшить вероятность перекосов при падении ударного устройства.

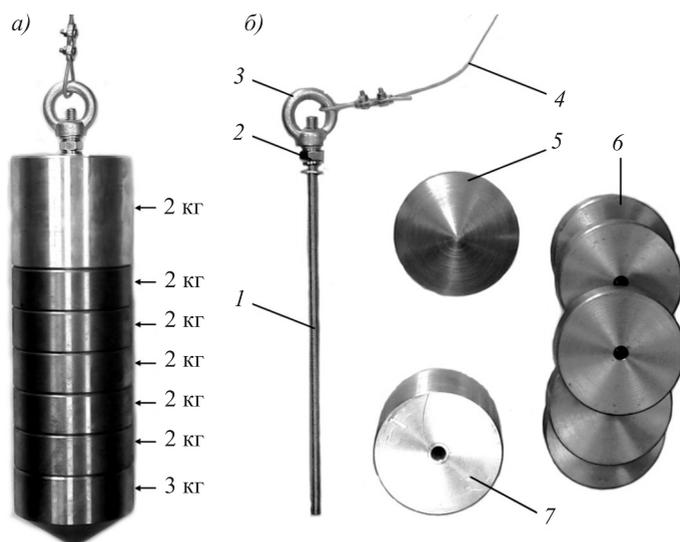


Рис. 2. Ударное устройство в сборе (а) и его элементы (б)

1 – соединительная шпилька; 2 – фиксирующая гайка; 3 – петля для подвешивания; 4 – трос диаметром 4 мм; 5 – ударный конус из стали 45, массой 3 кг; 6 – шайбы из стали 45, массой 2 кг; 7 – шайба из дюралюминия Д16, массой 2 кг

Комплект металлических шайб позволяет собрать устройство с массой от 5 до 15 кг. Локализация динамического воздействия на поверхность катания обеспечивалась использованием полипропиленовой трубы с внутренним диаметром 100 мм и длиной 2 м.

Для регистрации продолжительности удара к одному из каналов тензосистемы подключалась электрическая цепь, состоящая из груза, рельса и эталонного сопротивления 200 Ом. При контакте бойка с поверхностью катания рельса цепь замыкается, что вызывает изменение сигнала тензосистемы, по длительности импульса в сигнале определяется продолжительность удара.

На рис. 3 приведена зависимость симметричных относительных деформаций шейки рельса, зарегистрированных парой тензодатчиков  $T_3$  и  $T_4$  при испытании ударным устройством массой 5 кг с высоты 1,0 м:

$$\varepsilon_{s34} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_3, \varepsilon_4$  – относительные деформации, регистрируемые тензодатчиками  $T_3$  и  $T_4$ .

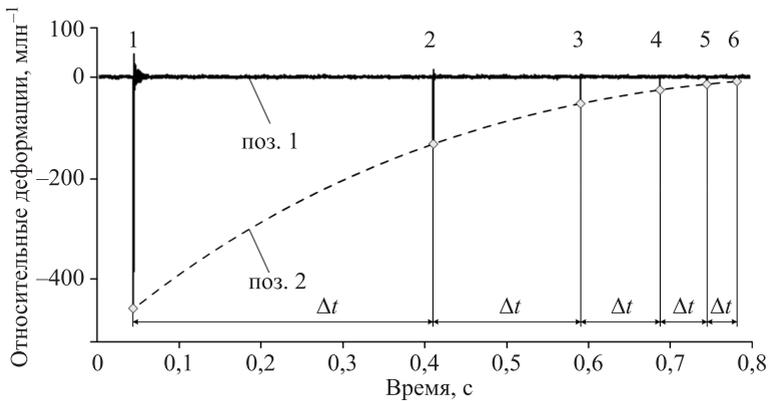


Рис. 3. Зависимость симметричных деформаций шейки рельса от времени при ударе грузом весом 5 кг

1–6 – импульсы от ударов груза,  $\Delta t$  – время между двумя последовательными ударами

В рамках одного эксперимента ударное устройство совершает несколько ударов по рельсу с монотонно уменьшающейся амплитудой симметричных деформаций. Уменьшение амплитуды связано с частичным переходом кинетической энергии ударного устройства в энергию упругих волн, а также с затратами энергии на трение, пластическую деформацию и т.д.

Для описания динамики взаимодействия ударного устройства с рельсом ввели понятие среднего значения силы удара, которое определили как отношение изменения импульса груза к продолжительности удара:

$$F = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta \tau}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса груза, кг;

$\Delta v = v_k - v_n$  – изменение скорости груза при ударе, м/с;

$\Delta\tau$  – продолжительность удара, с.

Из опубликованных работ [10] известно, что изменение скорости при упругом ударе может быть выражено через коэффициент  $k_d$ , характеризующий уменьшение энергии тела при ударе и связанный с потерями энергии. Тогда выражение для расчета силы через скорость в начале удара принимает вид:

$$F = \frac{m \cdot (1 + \sqrt{k_d}) \cdot v_n}{\Delta\tau} \quad (3)$$

В пренебрежении силами сопротивления воздуха и трения ударного устройства о направляющую трубу, скорость в начале удара может быть выражена через интервал времени  $\Delta t$  между двумя последовательными ударами  $v_n = g \cdot \frac{\Delta t}{2}$ . Окончательное выражение для расчета среднего значения силы приобретает вид:

$$F = m \cdot g \cdot \frac{(1 + \sqrt{k_d})}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\tau} \quad (4)$$

где значение коэффициента  $k_d = 0,24$  (СКО среднего  $\pm 10\%$ ) получено экспериментально по интервалу времени между ударами.

На рис. 4, а, 2–5 приведены графики зависимости симметричных деформаций шейки рельса от времени при первом ударе в точке Б. Вертикальные симметричные относительные деформации  $\epsilon_z$  над шпалами обозначены

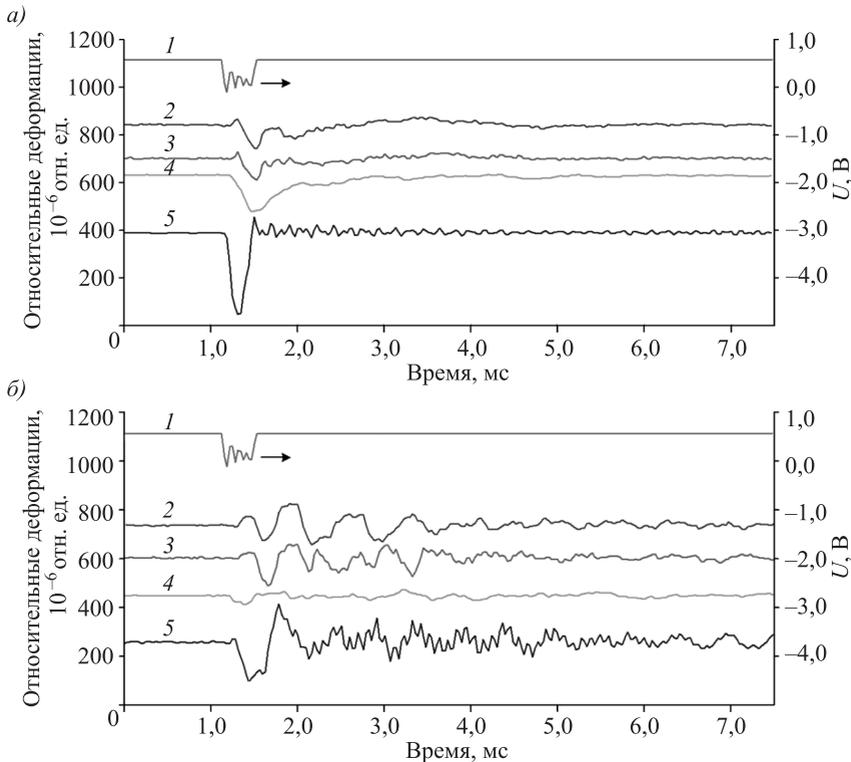


Рис. 4. График зависимости симметричных (а) и антисимметричных деформаций (б) шейки рельса от времени при ударе грузом массой 7 кг с высоты 1,5 м

цифрами 2 и 3, между шпалами – цифрой 5, а продольные относительные деформации  $\varepsilon_x$  – цифрой 4, электрический сигнал контакта ударного устройства и рельса – цифрой 1.

Взаимодействие ударного устройства с рельсом является сложным физическим явлением, при котором результирующий сигнал представляет собой суперпозицию колебаний с различными частотами и амплитудами. С одной стороны, это усложняет интерпретацию экспериментальных данных, а с другой – позволяет контролировать несколько параметров кранового пути. Наиболее высокочастотные колебания от 12 до 16 кГц наблюдаются в электрическом сигнале контакта ударного устройства с рельсом (см. рис. 4, а, 1), при этом во всех испытаниях длительность удара составляла от 0,3 до 0,6 мс.

При ударе между шпалами в точке Б максимальная амплитуда деформаций регистрировалась парой тензодатчиков  $T_3$  и  $T_4$  (рис. 4, а, 5). В сигнале уверенно идентифицируется локальный минимум, непосредственно связанный с воздействием ударного устройства на рельс, и затухающие высокочастотные колебания после удара с частотой 10 кГц и временем затухания от 1 до 2 мс. Длительность локального минимума с учетом погрешности  $\pm 0,03$  мс соответствует длительности сигнала (рис. 4, а, 1) электрического контакта с рельсом, что указывает на отсутствие инерционности преобразования силы в вертикальные деформации шейки рельса, непосредственно под местом удара. При этом отсутствует влияние подрельсового основания на вертикальные деформации  $\varepsilon_z$  между шпалами (тензодатчики  $T_3$  и  $T_4$ ). Сигнал симметричных деформаций с этих тензодатчиков (рис. 4, а, 5) может быть использован в качестве временной диаграммы динамической силы, действующей в системе «ударное устройство – рельс».

Изгиб рельса в вертикальной плоскости описывается продольными деформациями  $\varepsilon_x$  подошвы рельса, в сигнале (рис. 4, а, 4) которых наблюдаются низкочастотные колебания с частотой менее 1 кГц, связанные с движением в вертикальной плоскости рельса и рельсошпальной решетки в целом. В сигналах симметричных вертикальных деформаций над шпалами (рис. 4, а, 2, 3) наблюдаются как высокочастотные, так и низкочастотные компоненты, связанные с реакциями шпал на рельсы. Локальные минимумы деформаций  $\varepsilon_z$  шейки рельса над шпалами и продольных деформаций  $\varepsilon_x$  между шпалами зарегистрированы в конце удара. В этот момент рельс находится в крайнем нижнем положении, максимально изогнут в вертикальной плоскости и на него действуют максимальные силы реакции опоры шпал. Следовательно, относительные продольные деформации и вертикальные деформации над шпалами являются инерционными и напрямую зависят от граничных условий в местах крепления шпал на рельсах и импульса, передаваемого при ударе. Подрельсовое основание при ударном нагружении создает силу реакции опоры, которая вместе с ударной нагрузкой определяет вертикальные деформации  $\varepsilon_z$  тензодатчиков  $T_1$  и  $T_2$ ,  $T_5$  и  $T_6$ , установленных над шпалами. Деформации над шпалами существенно зависят от жесткости и нелинейности подрельсового основания.

Антисимметричные деформации  $\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_B - \varepsilon_H}{2}$ , определяемые как по-  
луразность деформаций с внутренней и наружной сторон рельса, приведены на рис. 4, б. Этот вид деформаций связан с кручением рельса, вызванным

эксцентрицитетом приложения нагрузки на поверхность катания и боковой нагрузкой. Во всех сигналах фиксируются две моды колебаний: низкочастотная с частотой около 1,7 кГц и высокочастотная – 12 кГц. Сигналы на паре датчиков  $T_3, T_4$  (см. рис. 4, б, 5) и  $T_1, T_2$  (рис. 4, б, 2) сдвинуты по фазе, что свидетельствует о распространении вдоль рельса упругой волны.

Зависимость симметричных вертикальных деформаций  $\varepsilon_{s34}$  от средней силы, оцениваемой по формуле (4), показана на рис. 5, а. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются линейной зависимостью с коэффициентом корреляции более 0,99:

$$\varepsilon_{s34} = k_F \cdot F + b_F,$$

где  $k_F = 2,0 \cdot 10^{-6}$  отн. ед. · кН<sup>-1</sup>;

$b_F = -0,68 \cdot 10^{-6}$  отн. ед. – постоянные коэффициенты, значения которых получены методом наименьших квадратов.

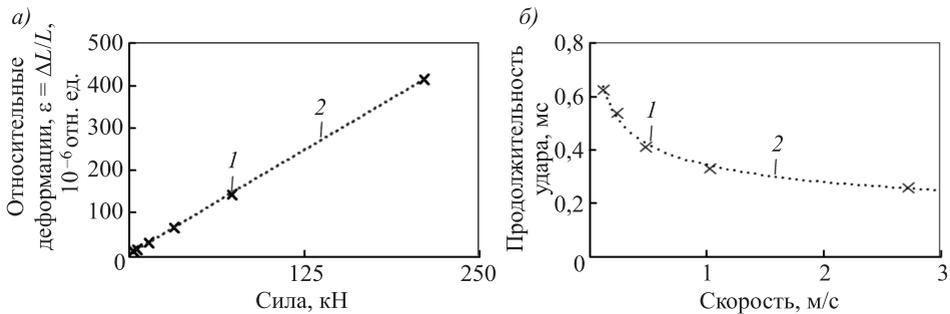


Рис. 5. Зависимость относительных деформаций шейки рельса от силы удара (а) и продолжительности удара от скорости груза (б)

1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация методом наименьших квадратов

Коэффициент преобразования силы в деформации для реализованных условий крепления преобразователей составил  $k_F = 2,0 \cdot 10^{-6}$  отн. ед. · кН<sup>-1</sup>. В проведенных экспериментах (см. рис. 5, б) продолжительность удара при увеличении скорости уменьшается по формуле

$$\Delta\tau = k_\tau \cdot v^{-0,3},$$

где  $k_\tau = 0,34$  мс · (м/с)<sup>0,3</sup> – постоянный коэффициент, значение которого получено методом наименьших квадратов.

Таким образом, при падении ударного устройства массой 5 кг с высоты 1,0 м удалось воспроизвести силовое импульсное воздействие амплитудой 210 кН и длительностью 0,3 мс. При ударном воздействии на рельс инерционность и влияние подрельсового основания на симметричные вертикальные деформации шейки рельса между шпалами не обнаружены. Экспериментально определен коэффициент преобразования силы в симметричные вертикальные деформации  $2,0 \cdot 10^{-6}$  отн. ед. · кН<sup>-1</sup>. В сигналах деформаций зарегистрированы моды колебаний: симметричные на частотах от 12 до 15 кГц, антисимметричные на частоте около 1,7 кГц и изгибные в вертикальной плоскости с частотой менее 1 кГц. Показана возможность измерения сил реакции шпал по симметричным деформациям шейки рельса над шпалами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Le Dosquet G., Pawellek F., Müller-Boruttau F. Automatic monitoring of the running quality of railway vehicles // ETR. 2007. No. 2. Pp. 1–6.
2. Буряк С.Ю. Диагностирование состояния поверхности катания колеса подвижного состава железных дорог // Наука и прогресс транспорта/ Вестн. Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. 2013. Вып. 1. № 43. С. 22–29.
3. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. [и др.]. Тензометрия в транспортном машиностроении. Новосибирск: Наука, 2014. 272 с.
4. Степанова Л.Н., Беккер С.А., Кочетков А.С. Investigation of the effect of buffing loading on the propagation of elastic vibrations in rails // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. Vol. 46. No. 3. Pp. 170–176.
5. Автоматическая диагностика колесных пар с помощью системы ARGUS // Железные дороги мира. 2001. № 12. С. 36–40.
6. Измерительная система Quo Vadis // Железные дороги мира. 2005. № 11. С. 64–68.
7. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М.Ф. Вериго. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
8. Bekker S.A., Kolomeets A.O. Calibration methods of force control diagnostic system of a rolling stock on the run // Journal of physics: Conference series. 2016. No. 1(671). Pp. 012029.
9. Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Беккер С.А. и др. Тензометрическая система для обнаружения дефектов поверхности катания колес грузового вагона // Датчики и системы. 2013. No. 10(173). С. 38–44.
10. Аппель П. Теоретическая механика. Т. 2. М.: Физматгиз, 1960. 487 с.

**Бехер Сергей Алексеевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: behers@mail.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Коломеец Андрей Олегович**, асп.; E-mail: flasher@ngs.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 25.02.16

**Bekker Sergey Alexeevich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: behers@mail.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Kolomeets Andrey Olegovich**, Post-graduate Student; E-mail: flasher@ngs.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR DETERMINING THE DYNAMIC FORCE BY THE STRAIN GAUGE SYSTEM**

It is directed to the solution of an actual problem: increase of strain measurements method reliability for dynamic forces measurement in actual practice to operation. Experimental research results of subcrane way rails dynamic deformations use by a high-speed strain measurements are given. Loading of rails with the strain gages pasted on them, was carried out by shock influence. The oscillatory processes arising in rails are investigated and classified. Dependence deformations type, temporary and amplitude parameters from the level of dynamic forces is experimentally established. Frequency characteristics of strain signals are defined. The calibration technique of the strain system intended for dynamic forces measurement with use of shock loading is developed.

**Key words:** strain measurements, high-speed strain system, shock loading, dynamic forces measurement, rails strain.

REFERENCES

1. Le Dosquet G., Pawellek F., Müller-Boruttau F. Automatic monitoring of the running quality of railway vehicles. ETR. 2007. No. 2. Pp. 1–6.
2. Buryak S.Yu. Diagnostirovanie sostoyaniya poverkhnosti kataniya koleasa podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Diagnosing of a condition of a surface of driving of a wheel of a rolling stock of the railroads]. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo Natsional'nogo Universiteta Zheleznodorozhnogo Transporta [Science and progress transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport]. 2013. Fasc. 1. No. 43. Pp. 22–29. (in Russia)
3. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I. Tenzometriya v transportnom mashinostroenii [Tenzometriya in transport mechanical engineering]. Novosibirsk, Nauka, 2014. 272 p. (in Russia)
4. Stepanova L.N., Bekher S.A., Kochetkov A.S. Investigation of the effect of buffing loading on the propagation of elastic vibrations in rails. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. Vol. 46. No. 3. Pp. 170–176.
5. Avtomaticheskaya diagnostika kolesnykh par s pomoshch'yu sistemy ARGUS [Automatic diagnostics of wheel couples by means of the ARGUS system]. Zheleznye dorogi mira [Railroads of world]. 2001. No. 12. Pp. 36–40. (in Russia)
6. Izmeritel'naya sistema Quo Vadis [Measuring Quo Vadis system]. Zheleznye dorogi mira [Railroads of world]. 2005. No. 11. Pp. 64–68. (in Russia)
7. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of a way and rolling stock]. Under the editorship of M.F. Verigo. Moscow, Transport, 1986. 559 p. (in Russia)
8. Bekher S.A., Kolomeets A.O. Calibration methods of force control diagnostic system of a rolling stock on the run. Journal of physics: Conference series. 2016. No. 1(671). Pp. 012029.
9. Stepanova L.N., Kabanov S.I., Bekher S.A. a.o. Tenzometricheskaya sistema dlya obnaruzheniya defektov poverkhnosti kataniya koleas gruzovogo vagona [Tensometric system for detection of defects of a surface of driving of wheels of the freight car]. Datchiki i sistemy [Sensors and Systems]. 2013. No.10(173). Pp. 38–44. (in Russia)
10. Appel' P. Teoreticheskaya mekhanika [Theoretical mechanics]. Vol. 2. Moscow, Fizmatgiz, 1960. 487 p. (in Russia)

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

### ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ В ОБЛАСТИ ТЕОРИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

(Валерию Михайловичу Митасову – 75 лет)

18 марта 2016 г. исполнилось 75 лет со дня рождения и 50 лет научной деятельности крупному ученому в области теории и практики строительных конструкций, доктору технических наук, профессору, почетному строителю России, действительному члену Международной академии высшей школы Валерию Михайловичу Митасову.

Валерий Михайлович родился в 1941 г. в г. Новосибирске. В 1959 г. поступил в НИИЖТ (СГУПС) на факультет «Промышленное и гражданское строительство». Одновременно начал свою трудовую деятельность в тресте «Томсктрансстрой».

В 1965 г. после окончания института был направлен в трест «Запсибтрансстрой», где работал на строительстве различных зданий и сооружений. В частности, возглавляя работы по удлинению взлетно-посадочной полосы и строительству инфраструктуры Толмачевского аэропорта в г. Новосибирске, проявил себя энергичным, квалифицированным специалистом, способным принимать решения в нестандартных ситуациях.

В 1967 г. по ходатайству руководства НИИЖТа был переведен на работу в Научно-исследовательскую лабораторию предварительно напряженного железобетона кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений НИИЖТа в качестве инженера, старшего инженера, сочетая научную деятельность с преподавательской работой. В этот период им проведено большое количество натурных испытаний преднапряженных конструкций на заводах стройиндустрии в различных регионах Советского Союза.

В 1970 г. В.М. Митасов поступил в очную аспирантуру кафедры строительных конструкций НИИЖТа, по окончании которой в 1974 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. С 1974 по 1978 г. работал старшим научным сотрудником НИЛ железобетона НИИЖТа.

С декабря 1977 г. работал доцентом кафедры железобетонных конструкций Новосибирского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева. С 1993 г. возглавляет эту кафедру. Работал зам. декана строительного факультета (1979–1982 гг.), проректором по научной работе (1984–1991 гг.). В 1991 г. защитил в НИИЖБ докторскую диссертацию «Применение энерге-



тических соотношений для решения некоторых задач теории сопротивления железобетона», став первым доктором технических наук в области железобетонных конструкций во всем Сибирском регионе. В этом же году В.М. Митасову присвоено ученое звание профессора. Решением Ученого совета университета он назначен директором вновь организуемого НИИ строительных конструкций и технологий. В 2001 г. В.М. Митасов избран членом-корреспондентом СО МАНШ, в 2011 г. – действительным членом Международной академии высшей школы.

Созданный им в 1991 г. Научно-исследовательский, проектно-технологический и производственный центр при НИСИ зарекомендовал себя наиболее авторитетной организацией в Новосибирске по вопросам технической экспертизы, обследования и реконструкции.

Профессор В.М. Митасов возглавлял работы по обследованию состояния ряда значимых объектов г. Новосибирска и области – театра оперы и балета, театра музыкальной комедии, стадиона «Спартак», Новосибирского электродного завода и др. Под его руководством выполнен проект реконструкции здания для размещения центра обработки вызовов 112, реконструкции жилого дома без отселения жильцов (впервые в России), проект здания технопарка в р.п. Кольцово НСО, а также проекты множества других жилых и гражданских зданий.

В 2008 г. Валерию Михайловичу было присвоено звание почетного строителя России, он – член международных профессиональных общественных организаций IABSE, ASCE, ICE, ACI, председатель диссертационного совета, советник губернатора НСО по вопросам строительства и архитектуры.

За годы научной и педагогической деятельности В.М. Митасов опубликовал более 100 научных и учебно-методических трудов, подготовил сотни инженеров-строителей, кандидатов и докторов наук. В настоящее время под его руководством ведутся активные научные исследования в области развития теории железобетонных конструкций, проводятся экспериментальные исследования новой концепции работы железобетона с заранее организованными трещинами в балках и плитах.

*КАФЕДРА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И РУКОВОДСТВО НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА (СИБСТРИН) ЖЕЛАЮТ ВАЛЕРИЮ МИХАЙЛОВИЧУ ДАЛЬНЕЙШИХ УСПЕХОВ, НОВЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУЧНОЙ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА ПРИСОЕДИНЯЕТСЯ К ПОЗДРАВЛЕНИЯМ И ПОЖЕЛАНИЯМ ЮБИЛЯРУ.*

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется в редакцию на *русском языке*. Зарубежные авторы могут присылать статьи на *английском языке*. Возможна публикация статьи одновременно в двух вариантах — на русском и английском языках. В этом случае оформляются два текста статьи — на русском языке и точный перевод на английский.

- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;
- *рекомендация* соответствующего академического (кафедры) или научного подразделения (заверенная выписка из протокола заседания подразделения);
- *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись.

Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от Word 97 до Word 10; от Windows XP до Windows 10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу по середине. Объем рукописи — до 12 страниц А4, включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

3. Состав рукописи статьи, правила и образец оформления см. на Internet-сайте журнала <http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/>

### а) *русскоязычная часть:*

- индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
  - инициалы, фамилии авторов;
  - название статьи;
  - аннотация объемом до 1/3 страницы текста (не менее 80 слов);
  - ключевые слова (не менее 5);
  - текст статьи;
  - следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
  - аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом использовании;
  - **ф о р м у л ы** набирать шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, в статье должен быть необходимый минимум формул; все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента);
  - русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом; латинские буквы — курсивом;
  - во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов *l*, *e* и *1* (цифра), *л* и *п*, *I* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
  - **и л л ю с т р а ц и и** представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 dpi, с расширением cdr (предпочтительно) или .doc, фотографии — TIFF или JPEG; надписи и цифры набирать шрифтом Times New Roman, иллюстрации, в том числе фотографии, должны иметь хорошую проработку деталей и должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки);
  - иллюстрации распечатываются в двух экземплярах, с подписями к ним, размер иллюстрации — не более 20х30 см, их общее число, как правило, не более 4;
  - **т а б л и ц ы** печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
  - **б и б л и о г р а ф и ч е с к и й** **с п и с о к** (не менее 8 ссылок) составляется по следующим правилам: в список включаются *только опубликованные работы*, в порядке упоминания в статье, ссылки на них в тексте статьи даются арабскими цифрами в квадратных скобках, в списке не должно быть нормативных документов (ГОСТов, СНИПов, технических регламентов, правовых актов и т.п. неавторизованных источников) — ссылки на них даются в тексте статьи в развернутом виде или в форме подстрочных сносок, библиографический список следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (примеры см. на сайте [http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules\\_and\\_examples\\_of\\_design\\_bibliograficheskogo\\_list/](http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibliograficheskogo_list/)), ссылки на интернет-сайты не допускаются;
  - для статей из зарегистрированных *электронных журналов* указываются фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта журнала и дата обращения к электронному ресурсу;
- сведения об авторах: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

### б) *англоязычная часть:*

- сведения об авторах — последовательно для каждого:
- фамилия, имя, отчество полностью, транслитерированные в латинские символы по системе BGN (использовать таблицу «правила транслитерации» см. на сайте [http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN\\_PCGN\\_romanization/](http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN_PCGN_romanization/));

(Окончание правил)

- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления), ученые звания (Professor, Ass. Professor, Academician of..., Cor. Member of... — профессор, доцент, академик ..., член-корреспондент ...), другое — Senior Lecturer (ст. преподаватель), Engineer (инженер), Post-graduate Student (аспирант), Student (студент);
  - официальное англоязычное название организации (учреждения), города (если не упоминается в названии организации), страны;
- название статьи;
- аннотация;
- ключевые слова (Keywords);
- библиографический список;
- для зарубежных источников на латинице — с сохранением оригинального описания;
  - для ссылок на русскоязычные источники — транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов и название статьи; затем в квадратных скобках — название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, —, // и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pp., в конце — (in Russia).
4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).
5. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению; авторы могут сообщить редакции данные о специалистах по профилю статьи. Доработанную после рецензии статью присылать в электронном виде.
6. Корректурa статьи может предоставляться по запросу автора.
7. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.
8. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики ф. и. о. полностью, звания и контактная информация. Электронная версия обязательна.
9. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

**«СТРОИТЕЛЬСТВО»**

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции	Строительство автомобильных дорог и мостов
Теория инженерных сооружений	Строительные и дорожные машины
Строительные материалы и изделия	Научные проблемы архитектуры и экологии
Экономика и организация строительства	Научно-методический раздел
Автоматизация и технология строительного производства	В лабораториях вузов
Гидротехническое строительство	Внедрение научных достижений в производство
Санитарная техника	Научная информация

На 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2016 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3300 р.

цена отдельного номера — 550 р.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 3 (687) 2016**

Научно-теоретический журнал

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

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*