

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

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

**№ 9–10 (669–670)**  
Сентябрь–октябрь 2014 г.

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.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Игнатьев, 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)  
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.  
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](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.10.14. Формат 70×108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Усл. печ. л. 12,08+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6864

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Митасов В.М., Адищев В.В., Себешев В.Г., Нарушевич А.Н., Шмаков Д.С. Оценка надежности типовой конструкции платформенного стыка на основе результатов натурных обследований ..... 5

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Метод расчета деревянных стропильных покрытий зданий. Сочинение 2. Численный метод решения и примеры расчета ..... 13

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Колпаков А.В., Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К. Исследование влияния горелых пород в производстве теплоизоляционного кирпича на механические свойства методом линейной регрессии ..... 22

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Волков С.В., Шведов В.Н. Обоснование способа подогрева и выдерживания бетона при возведении высотных зданий в условиях низких температур ..... 29

<b>Кузнецов С.М., Немчикова Л.А.</b> Обоснование очередности строительства объектов .....	39
<b>ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b>	
<b>Бальзанников М.И., Родионов М.В., Мелик-Пашаева Н.Э.</b> Исследования на- ката ветровых волн на новые конструкции гидротехнических берегоукрепительных сооружений .....	48
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И.</b> Моделирование пылевоздуш- ных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-растру- ба. Сообщение 1. Разработка математической модели и вычислительного алго- ритма .....	56
<b>Уляшева В.М., Канев М.А.</b> Численное моделирование воздушных потоков в кон- диционируемом помещении .....	65
<b>Шиляев М.И., Горбунков А.И., Богомолов А.Р., Хромова Е.М.</b> Расчет пре- дельной влажности угольного концентрата при его обезвоживании в центрифугах	71
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Виговская Т.Ю., Кутумов А.А., Шаба- нов Р.Ш.</b> Геометрическая аналогия в принципиальных схемах пневмоударных ме- ханизмов с дроссельным воздухораспределением .....	77
<b>Гладышев Г.В.</b> Пневмоударный механизм с дополнительными проточными каме- рами .....	87
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Короткий В.А., Усманова Е.А.</b> Кривые второго порядка в задачах формообразо- вания архитектурных оболочек .....	101
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Федоров А.В., Фомин П.А., Тропин Д.А., Чен Дж.</b> Моделирование опасности взрыва и смягчение его последствий в силано-воздушных смесях .....	108
<b>Демешкин А.Г., Кургузов В.Д.</b> Компьютерное моделирование отрыва упругой балки, частично приклейнной к жесткой плите .....	126
<b>НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ</b>	
<b>Новые строительные конструкции на основе сталефибробетона .....</b>	133
<b>Нуждин Л.В.</b> Очень полезные книги по геотехнике .....	135

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

N 9–10 (669–670)

September–October 2014

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

### *Editorial Board:*

- A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.  
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)  
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.  
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS  
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.  
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS  
Yu.P. Pravdivetz, 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](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## CONTENTS

### BUILDING CONSTRUCTIONS

- Mitasov V.M., Adishchev V.V., Sebeshev V.G., Narushevich A.N., Shmakov D.S.** Reliability evaluation of platform joint's type construction based on full-scale survey results ..... 5

### THE THEORY OF ENGINEERING SRTUCTURES

- Nemirovskiy Yu.V., Boltakov A.I.** Method of calculation of wooden rafter coverings of buildings. Message 2. Numerical methods for solving and examples of calculation ..... 13

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Kolpakov A.V., Abdrikhimov V.Z., Kayrakbaev A.K.** Research of the influence of burnt rocks in the production of heat-insulating bricks on the mechanical properties by linear regression ..... 22

### ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION

### AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Volkov S.V., Shvedov V.N.** Justification of the method of heating and curing concrete during the construction of high-rise buildings at low temperatures ..... 29

<b>Kuznetsov S.M., Nemchikova L.A.</b> Rationale the sequence of construction of objects .....	39
<b>HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION</b>	
<b>Balzannikov M.I., Rodionov M.V., Melik-Pashaeva N.E.</b> Research of wind wave onset on new design hydraulic bank protecting structures .....	48
<b>SANITARY ENGINEERING</b>	
<b>Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I.</b> Modeling the dust-air flows in the action spectrum of local round ventilation bell exhaust. Message 1. Developing a mathematical model and computational algorithm .....	56
<b>Ulyasheva V.M., Kanev M.A.</b> Numerical simulation of air flow in the room with the air-conditioning .....	65
<b>Shilyaev M.I., Gorbunkov A.I., Bogomolov A.R., Khromova E.M.</b> Calculation of moisture limit of coal concentrates when dewatering in centrifuges .....	71
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Vigovskaya T.Yu., Kutumov A.A., Shabanov R.Sh.</b> Geometrical analogy in the basic schemes of pneumoshock mechanisms with the throttle airdistribution .....	77
<b>Gladyshev G.V.</b> Pneumoshock mechanism with flowing operated chambers of volume attached .....	87
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Korotkiy V.A., Usmanova E.A.</b> Curves of the second order in the tasks shaping architectural membranes .....	101
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Fedorov A.V., Fomin P.A., Tropin D.A., Chen Jenq-Renn.</b> Modelling of explosion hazard and explosion mitigation in silane-air mixtures .....	108
<b>Demeshkin A.G., Kurguzov V.D.</b> Computer modeling of a beam separation partially pasted to the rigid plate .....	126

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.41:693

В.М. МИТАСОВ, В.В. АДИЩЕВ, В.Г. СЕБЕШЕВ, А.Н. НАРУШЕВИЧ,  
Д.С. ШМАКОВ

### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТИПОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЛАТФОРМЕННОГО СТЫКА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

В связи с актуальной проблемой возведения жилых зданий в условиях существующей плотной застройки крупных городов рассмотрены вопросы оценки возможности применения ранее разработанных конструктивных решений типовых серий крупнопанельных зданий при повышении их этажности. На основе результатов обширных обследований 5–12-этажных крупнопанельных зданий выполнена расчетная оценка надежности наиболее ответственной части конструктивной системы — платформенного стыка в типовом решении, с учетом измеренных характерных случайных дефектов, влияющих на несущую способность стыка. В расчетах надежности реализованы два разных подхода — на основании теории нечетких множеств и с использованием методов теории вероятностей, математической статистики и теории надежности. Удовлетворительное соответствие полученных в двух вариантах оценок несущей способности узла позволило сформулировать выводы и рекомендации по ограничениям в применении типовых решений платформенных стыков в крупнопанельных зданиях повышенной этажности и о необходимости изменения конструкции стыка.

**Ключевые слова:** крупнопанельные здания, платформенный стык, обследование, дефекты, теория нечетких множеств, надежность.

Крупнопанельные здания занимают значительную долю в объеме современного жилищного строительства. Основная часть типовых серий крупнопанельных зданий, применяющихся в настоящее время, разработана для возведения 9–12-этажных зданий, что для крупных городов и мегаполисов недостаточно.

Конструктивная особенность крупнопанельных зданий — наличие стыков. Наиболее распространенным является платформенный стык — узел сопряжения стеновых панелей с панелями перекрытий. В платформенном стыке передача давления вертикальных панелей происходит через опорные участки панелей перекрытия и слои раствора, уложенного над и под опорной частью перекрытия. Несущая способность платформенного стыка при наличии в нем дефектов может составлять всего 15–20 % несущей способности среднего сечения стеновой панели [3, 4]. Таким образом, данный узел — одно из наиболее ответственных мест в несущей системе крупнопанельного здания.

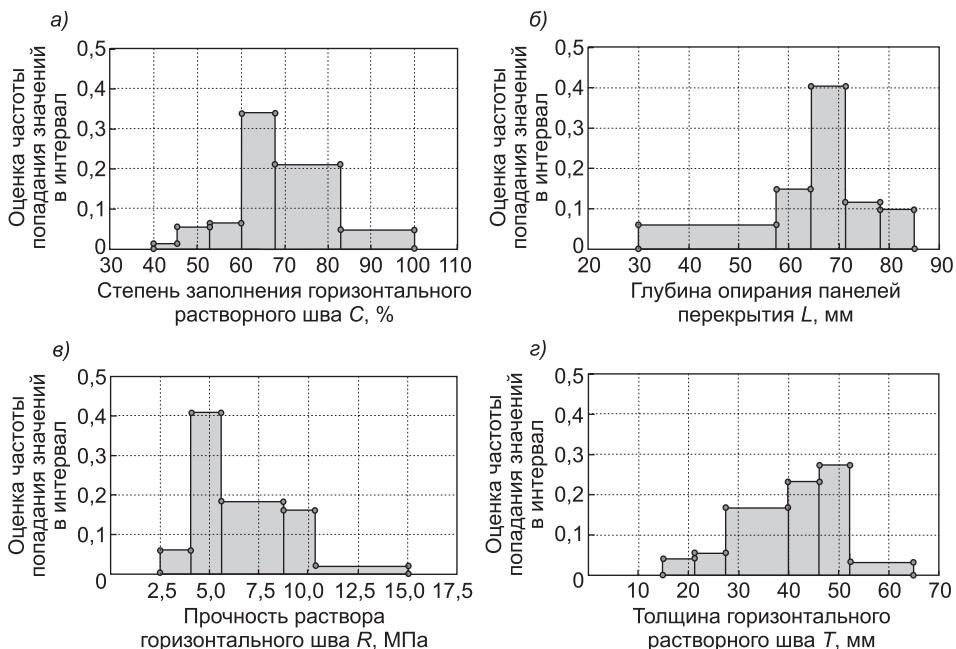
Для принятия решения о возможности применения конструктивных элементов и узлов существующих серий крупнопанельных зданий в зданиях повышенной этажности (до 25 этажей) необходима оценка несущей способности стыков не только при их проектных параметрах, но и с учетом существующего уровня качества строительно-монтажных работ.

Анализ результатов натурных обследований 5–12-этажных крупнопанельных зданий показал, что самые проблемные участки здания —

платформенные стыки наружных и внутренних стен, значительная часть которых фактически имеет существенные отклонения от проектных параметров. Наиболее характерные дефекты: увеличенная толщина горизонтальных растворных швов в платформенных узлах (до 65 мм вместо 20 мм по проекту); пониженная прочность раствора швов (минимальное значение составляло 2,5 МПа против 10 МПа по проекту); некачественное заполнение раствором вертикального и горизонтальных швов в платформенном узле; уменьшенная глубина опирания панелей перекрытий. Рассмотренные здания представлены различными конструктивными схемами: с продольными и поперечными наружными и внутренними несущими стенами, с продольными наружными и внутренними несущими стенами, с внутренними продольными и поперечными несущими стенами. Внутренние стеновые панели и панели перекрытий выполнены толщиной 160 мм. Гистограммы выборок параметров платформенных стыков, полученные обработкой данных натурных обследований, приведены на рис. 1.

Анализ особенностей этих гистограмм, обладающих, в частности, значительной асимметрией, выявил целесообразность применения нового математического аппарата теории нечетких множеств, берущего свое начало с работ Л. Заде [6].

При решении задач в нечеткой постановке обычно подбираются функции принадлежности для описания нечетких величин, что представляет собой довольно серьезную проблему. В данной работе построение функций принадлежности выполнялось на основе «прямой» обработки исходных данных, предложенной в работе [1]. Методика заключается в описании нечетких данных с помощью функций принадлежности непосредственно по



*Рис. 1. Выровненные гистограммы параметров платформенных стыков, построенные по результатам натурных обследований крупнопанельных зданий*

*а* — распределение прочности раствора ( $R$ ) горизонтальных швов платформенных стыков; *б* — распределение толщины горизонтальных растворных швов ( $T$ ) платформенных стыков; *в* — распределение степени заполнения горизонтальных растворных швов ( $C$ ) платформенных стыков; *г* — распределение глубины опирания панелей перекрытия ( $L$ ) в платформенных стыках

результатам наблюдений и их визуализации. Это актуально при решении задач в нечеткой постановке, поскольку не требует подбора характеристических функций на стадии фазификации (формирование нечетких величин, описывающих параметры модели). Алгоритм построения функции принадлежности предусматривает обработку гистограммы, построенной по экспериментальным данным, и включает следующие процедуры:

- выравнивание гистограммы для формирования выпуклой функции принадлежности;
- формирование последовательности вложенных  $\alpha$ -сечений в соответствии с обобщенным принципом Л. Заде.

Были реализованы два подхода к обработке экспериментальных данных с использованием теории нечетких множеств. Первый заключался в построении функций принадлежности отдельно для каждого параметра стыка с последующим определением снижения несущей способности платформенного стыка со случайными параметрами относительно стыка, выполненного по проекту. Несущая способность стыка определялась с использованием дефазифицированных значений (аналог математического ожидания) параметров стыка по методике Пособия<sup>1</sup>. Функции принадлежности параметров платформенного стыка — прочности раствора  $R$  (МПа), толщины  $T$  (мм), степени заполнения  $C$  (%) горизонтальных растворных швов, глубины опирания панелей перекрытия  $L$  (мм) приведены на рис. 2.

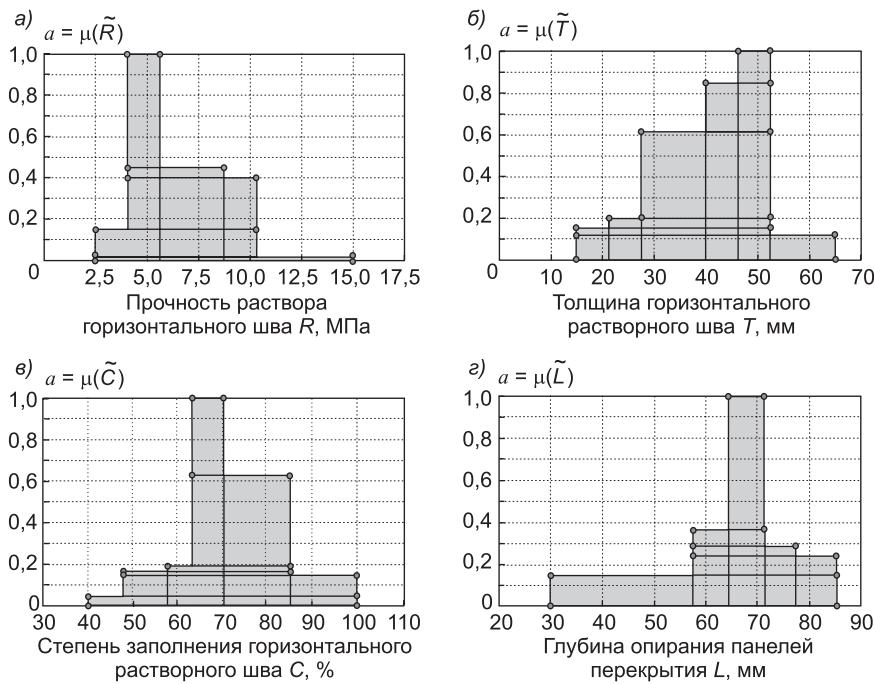


Рис. 2. Функции принадлежности для прочности раствора  $R$  (МПа), толщины  $T$  (мм), степени заполнения  $C$  (%) горизонтальных растворных швов платформенных стыков, глубины опирания панелей перекрытия  $L$  (мм)

*а* — функция принадлежности для нечеткой величины  $\tilde{R}$ ; *б* — функция принадлежности для нечеткой величины  $\tilde{T}$ ; *в* — функция принадлежности для нечеткой величины  $\tilde{C}$ ; *г* — функция принадлежности для нечеткой величины  $\tilde{L}$

<sup>1</sup> Пособие по проектированию жилых зданий / ЦНИИЭП жилища Госкомархитектуры. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). М.: Стройиздат, 1989. 304 с.

Для сравнения со стандартными методиками в теории нечетких множеств используется процедура дефазификации, нахождения некоторого среднего значения, аналогичного математическому ожиданию случайной величины. В данной работе применен метод центра тяжести [2, 5]. В результате дефазификации для каждой из нечетких величин получены дефазифицированные средние значения.

Обработка результатов натурных обследований позволила получить оценки характеристик дефектов платформенных стыков крупнопанельных зданий в виде дефазифицированных значений отклонений от проектных значений.

Дефазифицированное значение нечеткой величины — прочности раствора горизонтальных швов — составляет  $\tilde{R}^{def} = 6,4$  МПа (при проектной прочности раствора швов 10 МПа). Снижение несущей способности платформенного стыка для указанного уменьшения прочности раствора при проектных значениях остальных параметров стыка составляет около 5 %.

Дефазифицированное значение толщины горизонтальных растворных швов  $\tilde{T}^{def} = 40,6$  мм (при проектной толщине швов 20 мм). Снижение несущей способности платформенного стыка для указанного увеличения толщины горизонтальных швов при проектных значениях остальных параметров стыка — около 16 %.

Дефазифицированное значение степени заполнения горизонтальных растворных швов  $\tilde{C}^{def} = 75,7$  % (при качественном выполнении строительно-монтажных работ обеспечивается 100%-ная степень заполнения швов). Несущая способность платформенного стыка пропорциональна степени его заполнения, поэтому ее снижение составит около 24 %.

Дефазифицированное значение глубины оправления панелей перекрытия  $\tilde{L}^{def} = 63,2$  мм (при проектной глубине оправления панелей перекрытия в стыке 70 мм). Снижение несущей способности платформенного стыка для указанного уменьшения глубины оправления панелей перекрытия при проектных значениях остальных параметров стыка — 5 %.

Таким образом, дефектами, наиболее существенно влияющими на несущую способность стыков, являются степень заполнения швов (снижение несущей способности составляет около 24 %) и увеличение толщины горизонтальных швов (снижение несущей способности — около 16 %).

Второй подход к использованию теории нечетких множеств заключался в представлении непосредственно несущей способности как нечеткой величины, с варьированием всех вышеперечисленных параметров.

Выполненная методами указанной теории обработка результатов натурных обследований крупнопанельных зданий позволила определить интегральные характеристики дефектов и рассчитать несущую способность «условного» платформенного стыка, которая учитывает существующий уровень качества строительно-монтажных работ по величине снижения несущей способности. Функция принадлежности несущей способности платформенного стыка приведена на рис. 3.

По результатам расчета несущая способность «условного» платформенного стыка  $\tilde{N}^{def} = 621,26$  кН/м, что примерно на 40 % меньше, чем у стыка, выполненного в соответствии с проектом. Полученное значение

несущей способности стыка внутренних стеновых панелей с перекрытием позволяет воспринять погонную вертикальную сжимающую нагрузку, эквивалентную усилию, действующему на уровне перекрытия над подвалом в 10–12-этажных крупнопанельных зданиях. При повышении этажности до 25 этажей необходимо изменять конструктивную схему стыка.

Полученные результаты дополнены оценкой надежности платформенного стыка при различных уровнях нагрузки, соответствующих разной этажности зданий. На основе фактических гистограмм параметров стыков (см. рис. 1) были выполнены вероятностные расчеты несущей способности  $\tilde{N}$  стыка как случайной величины методом Монте-Карло (статистического моделирования), с использованием расчетной методики Пособия<sup>1</sup>, в зависимости от случайных параметров стыка  $\tilde{R}$ ,  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  и  $\tilde{L}$ . Полученная по выборке объемом  $10^5$  значений гистограмма несущей способности приведена на рис. 4. Несмотря на существенную асимметрию и столбчатый характер гистограмм выборок величин  $\tilde{R}$ ,  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  и  $\tilde{L}$  общее очертание графика плотности распределения  $\tilde{N}$  (подобно гистограмме на рис. 4) — достаточно плавное, что дает основание осуществить выбор подходящей математической модели распределения. Из более чем 10 возможных описаний распределения (Гаусса, Пирсона, Вейбулла, логнормального и др.) одной из лучших моделей по критериям согласия  $\chi^2$  и Колмогорова–Смирнова оказалась модель нормального распределения. Числовые оценки по  $\chi^2$ -критерию для распределения Гаусса, гамма-распределения и логнормального распределения соответственно равны:  $8,450 \cdot 10^{-4}$ ;  $7,911 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,371 \cdot 10^{-3}$ , что свидетельствует о хорошем соответствии перечисленных моделей исходным статистическим данным.

Для выполнения дальнейших расчетов был выбран закон нормального распределения. Полученная плотность распределения характеризуется математическим ожиданием  $M_N = 572$  кН/м и средним квадратическим отклонением  $\sigma_N = 120$  кН/м.

Результаты расчета по двум различным методикам — теории нечетких множеств и стандартного статистического подхода к обработке экспериментальных данных — показали достаточно хорошую согласованность. Так, дефазифицированное значение (аналог математического ожидания) несущей способности, полученное

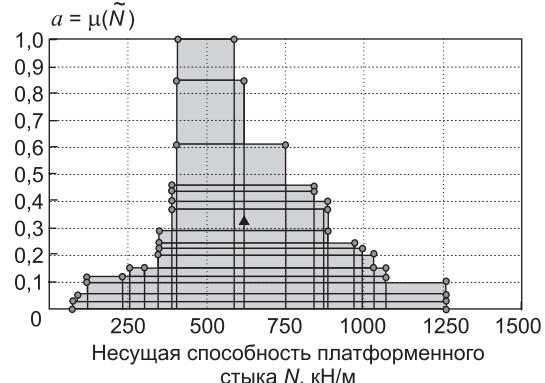


Рис. 3. Функция принадлежности нечеткой величины — несущей способности платформенного стыка

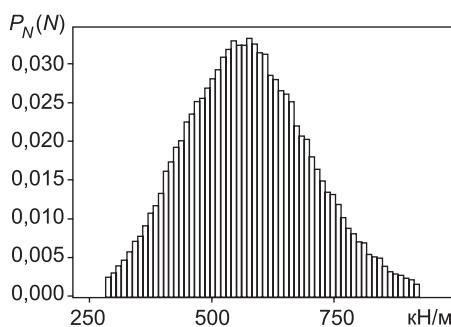


Рис. 4. Гистограмма несущей способности платформенного стыка

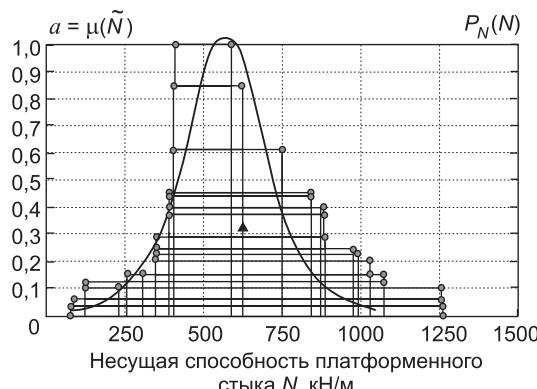


Рис. 5. Сопоставление плотности распределения и функции принадлежности несущей способности платформенного стыка

На основании принятой модели далее определена надежность как вероятность того, что действующая на стык нагрузка не превысит его несущую способность: для зданий средней этажности (10–12 этажей) — 0,9616; для повышенной этажности (25 этажей) — 0,0032, что свидетельствует о недопустимости применения существующей конструкции стыка стеновых панелей и панелей перекрытий при параметрах сборных элементов, соответствующих сериям 90, 97 крупнопанельных зданий. Из этого следует, что для дальнейшего развития крупнопанельного домостроения необходима разработка новой конструкции стыка внутренних стеновых панелей с плитами перекрытий, которая позволяет существенно увеличить несущую способность узла, одновременно с этим снизить влияние дефектов на несущую способность.

**Выводы.** 1. Основным слабым местом конструктивной системы крупнопанельного здания является платформенный стык, не позволяющий использовать в полной мере несущую способность стеновых панелей.

2. С достаточным уровнем надежности типовые решения платформенных стыков могут быть использованы в крупнопанельных зданиях с числом этажей до 12.

3. Для решения проблемы повышения этажности крупнопанельного домостроения необходимо разработать новую конструкцию узла сопряжения стеновых панелей с панелями перекрытия с более высокой несущей способностью, обеспечивающую выравнивание несущей способности панелей и стыков.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адищев, В.В. Метод построения функции принадлежности с «прямой» обработкой исходных данных [Текст] / В.В. Адищев, Д.С. Шмаков // Труды НГАСУ. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2013.— Т. 16, № 2 (56). — С. 45–67.
2. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л.А. Заде. — М. : Мир, 1976. — 167 с.
3. Нарушевич, А.Н. Результаты экспериментальных исследований платформенных стыков, имеющих первоначальные дефекты [Текст] / А.Н. Нарушевич, В.А. Беккер // Изв. ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». — 2008. — № 3/19 (549). — С. 19–21.

согласно теории нечетких множеств, составляет  $\tilde{N}^{def} = 621,26$  кН/м, а математическое ожидание для плотности нормального распределения  $M_N = 572$  кН/м (расхождение составляет всего около 8 %). Сопоставление графика полученной функции принадлежности несущей способности платформенного стыка и вычисленной вероятностным расчетом нормированной плотности распределения несущей способности представлено на рис. 5.

4. Нарушевич, А.Н. Экспериментальная оценка несущей способности платформенных стыков, имеющих первоначальные дефекты [Текст] / А.Н. Нарушевич, В.А. Беккер // Материалы Междунар. академ. чтений 9–11 апреля 2009 г. — Курск, 2009. — С. 151–155.
5. Castro, J.L. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators [Текст] / J.L. Castro, M. Delgado // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1996. — № 26(1). — Р. 149–152.
6. Zadeh, L.A. Fuzzy sets [Текст] / L.A. Zadeh // Inform. Contr. — 1965. — Vol. 8. — Р. 338–353.

**МИТАСОВ** Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mitassovv@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**АДИЩЕВ** Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: adishch@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**СЕБЕШЕВ** Владимир Григорьевич, канд. техн. наук, проф.; E-mail: sebeshev@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**НАРУШЕВИЧ** Александр Николаевич, ст. препод.; E-mail: narushevich\_an@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**ШМАКОВ** Дмитрий Сергеевич, ассист.; E-mail: sds-master@yandex.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 21.08.14

**Mitasov Valeriy Mikhailovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mitassovv@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Adishchev Vladimir Vasil'evich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: adishch@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Sebeshev Vladimir Grigor'yevich**, candidate of technical sciences, professor; E-mail: sebeshev@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Narushevich Aleksandr Nikolayevich**, senior lecturer; E-mail: narushevich\_an@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Shmakov Dmitriy Sergeyevich**, assistant; E-mail: sds-master@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **RELIABILITY EVALUATION OF PLATFORM JOINT'S TYPE CONSTRUCTION BASED ON FULL-SCALE SURVEY RESULTS**

In connection with the urgent problem of the housing construction in a dense conditions of large cities the paper presents the evaluation of possible application of previously developed design solutions of type series for large-panel buildings with increasing number of storeys. Based on the results of wide surveys 5-12-storeyed large-panel buildings the estimated reliability has been performed for the most critical part of the structural system (platform joint in the type solution) taking into account the measured specific random defects that affect the carrying capacity of junction. In the calculations of reliability two different approaches were implemented: based on the theory of indistinct sets and using the methods of probability theory, mathematical statistics and reliability theory. Satisfactory agreement obtained in two versions of the joint's carrying capacity estimation allowed to formulate the conclusions and

recommendations for restrictions on application of platform junctions' type solutions in large-panel high-rise buildings and the necessity to change the joint's design.

**Key words:** large-panel buildings, platform joint, survey, defects, theory of fuzzy sets, reliability.

## REFERENCES

1. Adishchev, V.V. Metod postroeniya funktsiy prinadlezhnosti s «pryamoy» obrabotkoy iskhodnykh dannykh [The method of constructing membership functions with «direct» source data processing] [Text] / V.V. Adishchev, D.S. Shmakov // Trudy NGASU. — 2013. — Vol. 16, N 2 (56). — P. 45–67.
2. Zade, L.A. Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of linguistic variable and its application to the adoption of the approximate solutions] [Text] / L.A. Zade. — M.: Mir, 1976. — 167 p.
3. Narushevich, A.N. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovanii platformennykh stykov imeyushchikh pervonachal'nyye defekty [The results of experimental research platform junctions with initial defects] [Text] / A.N. Narushevich, V.A. Bekker // Izvestiya OrelGTU. Seriya «Stroitel'stvo. Transport». — 2008. — N 3/19 (549). — P. 19–21.
4. Narushevich, A.N. Eksperimental'naya otsenka nesushey sposobnosti platformennykh stykov, imeyushchikh pervonachal'nyye defekty [The results of experimental research platform junctions with initial defects] [Text] / A.N. Narushevich, V.A. Bekker // Materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chtenii 9–11 aprelya 2009. — Kursk, 2009. — P. 151–155.
5. Castro, J.L. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators [Text] / J.L. Castro, M. Delgado // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1996. — N 26 (1). — P. 149–152.
6. Zadeh, L.A. Fuzzy sets [Text] / L.A. Zadeh // Inform. Contr. — 1965. — Vol. 8. — P. 338–353.

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ, А.И. БОЛТАЕВ

## МЕТОД РАСЧЕТА ДЕРЕВЯННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗДАНИЙ\*

### Сообщение 2. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Предложен численный алгоритм решения задачи, поставленной в Сообщении 1, о расчете деревянных стропильных покрытий зданий. Суть его состоит в пошаговом приложении нагрузки на конструкцию. В результате этого становится возможным линеаризовать разрешающую систему уравнений и свести решение задачи к итерационному определению приращений деформаций стержней. Приведены результаты расчета стропильного покрытия при различных исходных данных, которые свидетельствуют об определенных особенностях деформирования деревянных конструкций и необходимости учета нелинейного закона деформирования материала при их расчете.

**Ключевые слова:** стропильные покрытия, деревянные конструкции, численные методы решения, предельные деформации, брусья, нелинейные законы деформирования.

**Введение.** В сообщении [1] в ходе решения задачи об определении напряженно-деформированного состояния рассматриваемой стропильной конструкции получена общая система нелинейных уравнений (3.3) из [1] для квадратичного закона деформирования древесины. Поиск решения в аналитическом виде представляет собой достаточно трудную задачу, поэтому при создании алгоритма вычисления для конкретных задач будем использовать численный метод пошагового интегрирования.

**Алгоритм решения для квадратичного закона деформирования.** Так как связь между напряжениями и деформациями представлена нелинейной зависимостью, для решения поставленной задачи необходимо задать не только величину действующей нагрузки, но и историю ее приложения. На первом шаге загружения действует только нагрузка от собственного веса стержней конструкции, далее добавляется вес покрытия и после этого нагрузка, передаваемая через покрытие.

Пошаговое приложение нагрузки позволяет представить основные неизвестные  $z_{0ij}$  и  $\kappa_{ij}$  с учетом линеаризации в виде:

$$\begin{aligned} z_{0ij(k+1)}^n &\approx z_{0ij(k)}^{n-1}(z_{0ij(k)} + n \cdot dz_{0ij(k+1)}), \\ \kappa_{ij(k+1)}^n &\approx \kappa_{ij(k)}^{n-1}(\kappa_{ij(k)} + n \cdot d\kappa_{ij(k+1)}), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $k$  — номер шага загружения;

$z_{0ij(k+1)}$  и  $\kappa_{ij(k+1)}$  — значения неизвестных на  $k+1$  шаге;

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-01-00102.

$z_{0ij(k)}$  и  $\kappa_{ij(k)}$  — значения неизвестных на  $k$  шаге;

$dz_{0ij(k+1)}$  и  $d\kappa_{ij(k+1)}$  — приращения неизвестных на  $k+1$  шаге загружения.

Линеаризация основных неизвестных накладывает определенные ограничения на приращения  $dz_{0ij(k+1)}$  и  $d\kappa_{ij(k+1)}$ , а именно: чем они меньше, тем точнее получается решение. Увеличения точности можно добиться, прикладывая нагрузку на каждом из шагов загружения отдельными ступенями. Количество таких ступеней подбирается экспериментально, путем проверки решения одной и той же задачи с разной величиной дробления нагрузки на ступени.

Перепишем систему (3.3) из [1] для  $k+1$  шага загружения, подставляя в нее выражения (1.1):

$$\begin{cases} (\kappa_{ij(k)} + dz_{0ij(k+1)}) D'_{11ij} + \kappa_{ij(k)} (\kappa_{ij(k)} + 2dz_{0ij(k+1)}) D'_{12ij} = N_{ij(k+1)}, \\ (\kappa_{ij(k)} + dz_{0ij(k+1)}) D'_{21ij} + \kappa_{ij(k)} (\kappa_{ij(k)} + 2dz_{0ij(k+1)}) D'_{22ij} = M_{ij(k+1)}. \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} D'_{11ij} &= V_{1ij} + dz_{0ij(k+1)} S_{1ij}, & D'_{12ij} &= V_{2ij} + dz_{0ij(k+1)} S_{2ij}, \\ D'_{21ij} &= V_{3ij} + dz_{0ij(k+1)} S_{3ij}, & D'_{22ij} &= V_{4ij} + dz_{0ij(k+1)} S_{4ij}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} V_{1ij} &= A_{1ij}^- C_{1ij} + A_{1ij}^+ C_{2ij}, & V_{2ij} &= A_{2ij}^- C_{3ij} + A_{2ij}^+ C_{4ij}, & V_{3ij} &= A_{3ij}^- C_{5ij} + A_{3ij}^+ C_{6ij}, \\ V_{4ij} &= A_{2ij}^- C_{7ij} + A_{2ij}^+ C_{8ij}, & S_{1ij} &= A_{1ij}^- R_{1ij} + A_{1ij}^+ R_{2ij}, & S_{2ij} &= A_{2ij}^- R_{3ij} + A_{2ij}^+ R_{4ij}, \\ S_{3ij} &= A_{3ij}^- R_{5ij} + A_{3ij}^+ R_{6ij}, & S_{4ij} &= A_{4ij}^- R_{7ij} + A_{4ij}^+ R_{8ij}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} C_{1ij} &= h_{ij}^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} - \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij(k)} h_{ij} \left( -k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} \right) + \frac{1}{2} z_{0ij(k)}^2 k_{ij} - \frac{1}{6} z_{0ij(k)}^3 f_{ij}, \\ R_{1ij} &= h_{ij} \left( -k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij(k)} k_{ij} - \frac{1}{2} z_{0ij(k)}^2 f_{ij}, \\ C_{2ij} &= -h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) - z_{0ij(k)} h_{ij}' \left( k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' \right) - \frac{1}{2} z_{0ij(k)}^2 k_{ij} + \frac{1}{6} z_{0ij(k)}^3 f_{ij}, \\ R_{2ij} &= -h_{ij}' \left( k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' \right) - z_{0ij(k)} k_{ij} + \frac{1}{2} z_{0ij(k)}^2 f_{ij}, \\ C_{3ij} &= h_{ij}^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} - \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij(k)} h_{ij}^2 \left( \frac{2}{3} f_{ij} h_{ij} - k_{ij} \right) + z_{0ij(k)}^2 h_{ij} \left( k_{ij} - \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} \right) - \\ &- \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 k_{ij} + \frac{1}{12} z_{0ij(k)}^4 f_{ij}, \\ R_{3ij} &= h_{ij}^2 \left( \frac{2}{3} f_{ij} h_{ij} - k_{ij} \right) + 2z_{0ij(k)} h_{ij} \left( k_{ij} - \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} \right) - z_{0ij(k)}^2 k_{ij} + \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 f_{ij}, \\ C_{4ij} &= h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} + \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij}' \right) + z_{0ij(k)} h_{ij}'^2 \left( \frac{2}{3} f_{ij} h_{ij}' + k_{ij} \right) + z_{0ij(k)}^2 h_{ij}' \left( k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' \right) + \\ &+ \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 k_{ij} - \frac{1}{12} z_{0ij(k)}^4 f_{ij}, \\ R_{4ij} &= h_{ij}'^2 \left( \frac{2}{3} f_{ij} h_{ij}' + k_{ij} \right) + 2z_{0ij(k)} h_{ij}' \left( k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' \right) + z_{0ij(k)}^2 k_{ij} - \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 f_{ij}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{5ij} &= h_{ij}^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} - \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij(k)} h_{ij}^2 \left( -\frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{6} z_{0ij(k)}^3 k_{ij} - \frac{1}{12} z_{0ij(k)}^4 f_{ij}, \\
 R_{5ij} &= h_{ij}^2 \left( -\frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) + \frac{1}{2} z_{0ij(k)}^2 k_{ij} - \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 f_{ij}, \\
 C_{6ij} &= h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} + \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij}' \right) + z_{0ij(k)} h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) - \\
 &\quad - \frac{1}{6} z_{0ij(k)}^3 k_{ij} + \frac{1}{12} z_{0ij(k)}^4 f_{ij}, \\
 R_{6ij} &= h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) - \frac{1}{2} z_{0ij(k)}^2 k_{ij} + \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 f_{ij}, \\
 C_{7ij} &= h_{ij}^4 \left( \frac{1}{4} k_{ij} - \frac{1}{5} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij(k)} h_{ij}^3 \left( \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} - \frac{2}{3} k_{ij} \right) + \\
 &\quad + z_{0ij(k)}^2 h_{ij}^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} - \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) - \frac{1}{12} z_{0ij(k)}^4 k_{ij} + \frac{1}{30} z_{0ij(k)}^5 f_{ij}, \\
 R_{7ij} &= h_{ij}^3 \left( \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} - \frac{2}{3} k_{ij} \right) + 2z_{0ij(k)} h_{ij}^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} - \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) - \\
 &\quad - \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 k_{ij} + \frac{1}{6} z_{0ij(k)}^4 f_{ij}, \\
 C_{8ij} &= -h_{ij}'^4 \left( \frac{1}{4} k_{ij} + \frac{1}{5} f_{ij} h_{ij}' \right) - z_{0ij(k)} h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' + \frac{2}{3} k_{ij} \right) - \\
 &\quad - z_{0ij(k)}^2 h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) + \frac{1}{12} z_{0ij(k)}^4 k_{ij} - \frac{1}{30} z_{0ij(k)}^5 f_{ij}, \\
 R_{8ij} &= -h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' + \frac{2}{3} k_{ij} \right) - 2z_{0ij(k)} h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{3} z_{0ij(k)}^3 k_{ij} - \frac{1}{6} z_{0ij(k)}^4 f_{ij}. \tag{1.5}
 \end{aligned}$$

Из системы (1.2) исключаем неизвестную  $d\kappa_{ij(k+1)}$  и после упрощения приходим к квадратному уравнению (1.6), относительно  $dz_{0ij(k+1)}$ , с параметрическими коэффициентами, зависящими от предыдущего итерационного шага:

$$P_{1ij} dz_{0ij(k+1)}^2 + P_{2ij} dz_{0ij(k+1)} + P_{3ij} = 0, \tag{1.6}$$

$$\begin{aligned}
 P_{1ij} &= \kappa_{ij(k)}^2 (S_{2ij} S_{3ij} - S_{4ij} S_{1ij}), \\
 P_{2ij} &= N_{ij(k+1)} (S_{3ij} + 2\kappa_{ij(k)} S_{4ij}) - M_{ij(k+1)} (S_{1ij} + 2\kappa_{ij(k)} S_{2ij}) - \\
 &\quad - \kappa_{ij(k)}^2 (V_{4ij} S_{1ij} + S_{4ij} V_{1ij} - V_{2ij} S_{3ij} - S_{2ij} V_{3ij}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{3ij} &= N_{ij(k+1)} (V_{3ij} + 2\kappa_{ij(k)} V_{4ij}) - M_{ij(k+1)} (V_{1ij} + 2\kappa_{ij(k)} V_{2ij}) - \\
 &\quad - \kappa_{ij(k)}^2 (V_{4ij} V_{1ij} - V_{2ij} V_{3ij}). \tag{1.7}
 \end{aligned}$$

$$\kappa_{ij(k=0)} = \frac{M_{ij(k=0)}}{A_{lij}^+ I_{ij}}, \quad \epsilon_{0ij(k=0)} = \frac{N_{ij(k=0)}}{A_{lij}^+ A_{ij}}, \quad z_{0ij(k=0)} = -\frac{\epsilon_{ij(k=0)}}{\kappa_{ij(k=0)}}. \quad (1.8)$$

Для решения уравнения (1.6) необходимо задаться начальными значениями  $\kappa_{ij(k=0)}$  и  $z_{0ij(k=0)}$ . Их можно получить из формул линейного изгиба (1.8), приняв в качестве нагрузки, действующей на стропильную конструкцию, только собственный вес стержней, либо его часть. Главным критерием при выборе первоначальной нагрузки является ее малая величина. Это позволяет конструкции находиться в линейной области деформирования.

Решение уравнения (1.6) получим в виде

$$dz_{0ij(k+1)} = \frac{-P_{2ij} \pm \sqrt{P_{2ij}^2 - 4P_{3ij}P_{1ij}}}{2P_{1ij}}. \quad (1.9)$$

При  $M_{ij} > 0$  ( $M_{ij} < 0$ ) в уравнении (1.9) сохраняем знак минус (плюс).

В процессе решения задачи по уравнению (1.9) необходимо следить за нейтральной линией, если она выходит за пределы сечения, делать необходимые поправки в формулах (1.4). Так, если  $dz_{0ij(k)} > h_{ij}$ , приравниваем  $A_{lij}^- = A_{lij}^+$  и  $A_{2ij}^- = A_{2ij}^+$ , при  $dz_{0ij(k)} < -h_{ij}'$  приравниваем  $A_{lij}^+ = A_{lij}^-$  и  $A_{2ij}^+ = A_{2ij}^-$ . После вычисления  $dz_{0ij(k+1)}$  определяем  $d\kappa_{ij(k+1)}$  по оставшемуся уравнению системы (1.2). Вычислив приращения неизвестных, находим  $z_{0ij(k+1)}$  и  $\kappa_{ij(k+1)}$  по (1.1). Пройдя все шаги загружения стропильной конструкции и найдя окончательные значения  $z_{0ij}$  и  $\kappa_{ij}$ , определим  $\epsilon_{0ij}$  по (3.2) из [1].

Сечения на концах каждого из стержней, а также на всем протяжении стержня 52 находятся в безызгибном состоянии растяжения (сжатия), так как  $M_{ij} = 0$ . Для них  $\kappa_{ij} = 0$ , а  $\epsilon_{0ij}$  определяются из аналитического решения квадратного уравнения (1.10) по известным формулам.

$$\sigma_{ij}^+ = \frac{N_{ij}}{A_{ij}} = A_{lij}^\pm \epsilon_{0ij} + A_{2ij}^\pm \epsilon_{0ij}^2. \quad (1.10)$$

В работе [1] было отмечено, что уравнений равновесия недостаточно для определения напряженно-деформированного состояния конструкции. Поэтому в начале решения необходимо задаться произвольным значением неизвестного (например, из решения эквивалентной упругой задачи), в качестве которого принято значение продольного усилия  $N_{52}^0$  в начале стержня 52. Условием же нахождения его действительного значения будет выполнение уравнений непрерывности перемещений узлов системы (1.11) из [1]. После их записи для каждого стержня и упрощения получаем следующие критерии остановки итерационного процесса:

$$\begin{aligned} & \left| (u_{012}(l_{12}) - u_{12}^0) \beta_{12} + \frac{(u_{024}(l_{24}) - u_{24}^0) + (u_{012}(l_{12}) - u_{12}^0) \alpha_{12}}{\beta_{12}} \alpha_{12} - \right. \\ & \left. -(u_{052}(l_{52}) - u_{52}^0) \right| < e, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $u_{012}(l_{12}) - u_{12}^0 = \int_0^{l_{12}} \epsilon_{0ij} d\zeta_{ij}$ , а  $e$  — величина заданной невязки.

Если условие (1.11) выполняется, то процесс решения считается законченным, иначе изменяем значение неизвестного усилия  $N_{52}^0$  и производим перерасчет. Для кривизны, имеющей обратный знак ( $\kappa_{ij} < 0$ ), необходимо разрешающую систему уравнений (3.3) из [1] заменить на (3.8) из [1].

Критерием разрушения конструкции служит условие (1.12) превышения максимальных продольных деформаций стержней над их предельными значениями, которые даны в табл.1 из [1] для каждой из пород дерева:

$$|\varepsilon_{ij}^{\pm(\max)}| > |\varepsilon_*^\pm|. \quad (1.12)$$

Проверку получившегося решения осуществляем следующим способом: используя полученные деформации, определяем напряжения по (2.1) из [1], а через них внутренние усилия  $M_{ij}$  и  $N_{ij}$  путем интегрирования по площади сечения. Они в свою очередь должны быть равны или близки к внутренним усилиям, полученным из уравнений равновесия (1.7) из [1].

**Пример расчета стропильной системы.** Расчетная схема исходной модели приведена на рис. 1 из [1]. В качестве основных параметров, определяющих ее топологию, выбраны: половина пролета конструкции  $L = 4$  м — расстояние между проекциями узлов  $V_1$  и  $V_3$  на ось  $OX$ , длина стержня 52  $l_{52} = 2,7$  м, а также углы  $\alpha_1 = 60^\circ$ ,  $\alpha_2 = 30^\circ$  между горизонтальной плоскостью и стержнями 12 и 23 соответственно. Геометрические характеристики сечений элементов даны в табл. 1. Все стержни конструкции изготовлены из лиственницы с удельным весом  $\gamma_{ij} = 7,85$  кН/м<sup>3</sup>. Прочностные характеристики материала приведены в табл. 1 из [1]. Нагрузка, передаваемая через покрытие, для стержней 12 и 23  $|\tilde{q}_{12}| = |\tilde{q}_{23}| = 21,6$  кН/м, для стержней 24 и 52 она равна нулю и, следовательно, они нагружены только собственным весом.

Размеры поперечного сечения стержней				
Характеристики сечения	№ стержня			
	12	23	24	52
$a_{ij}$ , см	5	5	1,25	5
$b_{ij}$ , см	2,5	2,5	1,25	5
$H_{ij}$ , см	15	15	10	10

В процессе численного эксперимента рассмотрим четыре варианта расчетной схемы. Первый вариант описан выше, второй будет отличаться от первого только тем, что стержни 12 и 23 будут перевернуты вокруг своей оси на  $180^\circ$ . Это эквивалентно приравниванию ширины верхнего основания ширине нижнего и наоборот, т.е.  $a'_{ij} = b_{ij}$  и  $b'_{ij} = a_{ij}$  (см. рис. 2 из [1]), где  $a'_{ij}$  и  $b'_{ij}$  половина ширины верхнего и нижнего основания измененного стержня. В третьем варианте эксперимента в отличие от второго перевернем только стержень 12, а в четвертом только стержень 23. При такой модификации расчетной схемы во всех четырех случаях объем затраченного материала на конструкцию остается постоянным. Кроме этого не происходит изменения главных моментов инерции поперечных сечений стержней, а значит при линейной постановке эксперимента (материал следует закону Гука)  $\kappa_{ij}, \varepsilon_{0ij}$  и  $z_{0ij}$  остаются постоянными (см. формулы (1.8)).

В качестве результатов расчета приведены графики, которые наиболее характерно показывают особенности деформирования конструкции

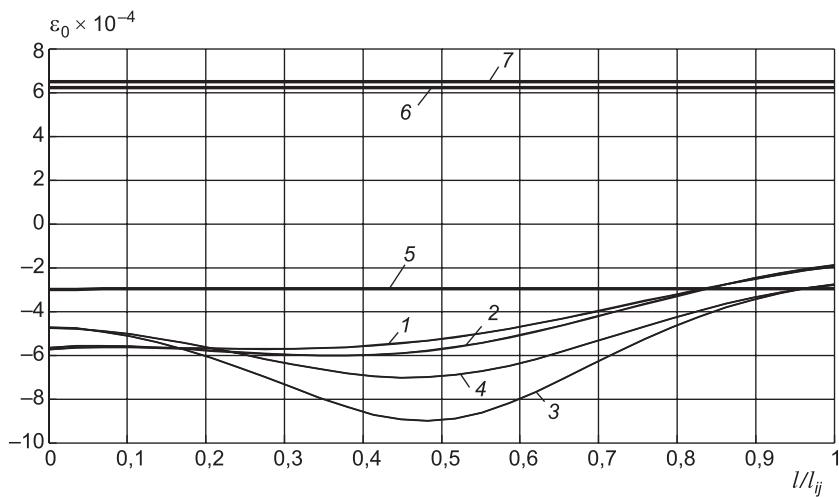


Рис. 1. Деформации волокна, проходящего через центр тяжести сечения  
1 — стержень 12 (варианты 1 и 4); 2 — стержень 12 (варианты 2 и 3); 3 — стержень 23 (варианты 2 и 4); 4 — стержень 23 (варианты 1 и 3); 5 — стержень 52 (варианты 1–4);  
6 — стержень 24 (варианты 1 и 4); 7 — стержень 24 (варианты 2 и 3)

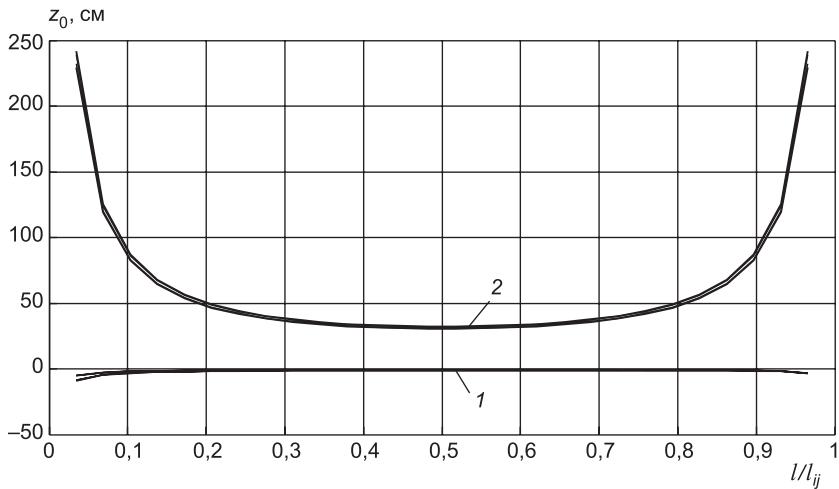


Рис. 2. Расстояние от центра тяжести до нейтральной оси  
1 — стержни 12 и 23 (варианты 1–4); 2 — стержень 24 (варианты 1–4)

из нелинейного материала:  $\varepsilon_{0ij}$  (рис. 1),  $\kappa_{ij}$  (рис. 2),  $z_{0ij}$  (рис. 3),  $\varepsilon_{ij}^B, \varepsilon_{ij}^H$  (рис. 4, 5).

Анализируя результаты расчета, можно выделить следующие характерные отличия напряженно-деформированного состояния стропильной конструкции, выполненной из разносопротивляющегося материала с нелинейным законом деформирования, по сравнению с конструкцией из одинаковосопротивляющегося материала, подчиненного закону Гука.

1. Величина  $\varepsilon_{0ij}$  зависит не только от продольной силы, но и от изгибающего момента. Для каждого из вариантов расчетной схемы она не остается постоянной и принимает различные значения с максимальной разницей в 28,5 % (см. рис. 1). Изменение значения  $\varepsilon_{0ij}$  в стержне происходит в основном за счет его переворота, влияние же переворота сосед-

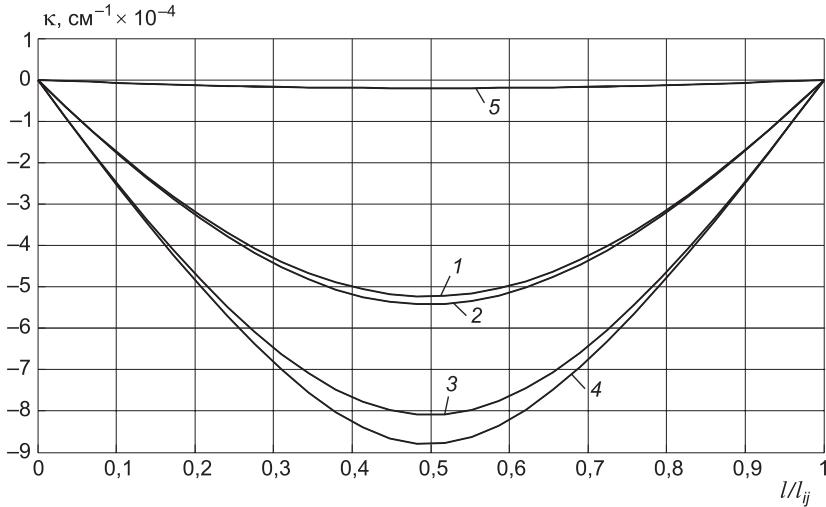


Рис. 3. Кривизна

1 — стержень 12 (варианты 1 и 4); 2 — стержень 12 (варианты 2 и 3); 3 — стержень 23 (варианты 1 и 3); 4 — стержень 23 (варианты 2 и 4); 5 — стержень 24 (варианты 1–4)

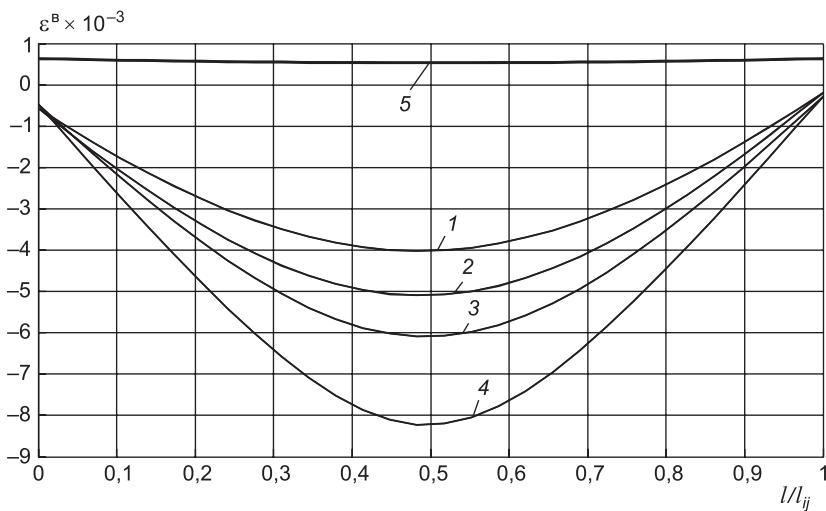


Рис. 4. Деформации верхнего фибрового волокна

1 — стержень 12 (варианты 1 и 4); 2 — стержень 12 (варианты 2 и 3); 3 — стержень 23 (варианты 1 и 3); 4 — стержень 23 (варианты 2 и 4); 5 — стержень 24 (варианты 1–4)

них стержней практически незаметно. Это обусловлено тем, что при перевороте соседних стержней в данном стержне происходит только перераспределение продольных усилий, которые слабо влияют на его напряженно-деформированное состояние.

2. Кривизна  $\kappa_{ij}$  зависит не только от момента, но и от продольной силы. При изменении расчетной схемы она также принимает различные значения (см. рис. 2) с максимальной разницей в 8,7 %. Остальные особенности такие же, как и у  $\varepsilon_{0ij}$ .

3. Координата нейтральной оси  $ij$ -го стержня  $z_{0ij}$  является производной величиной от  $\varepsilon_{0ij}$  и  $\kappa_{ij}$  (см. формулу (3.2) из [1]) и, следовательно,

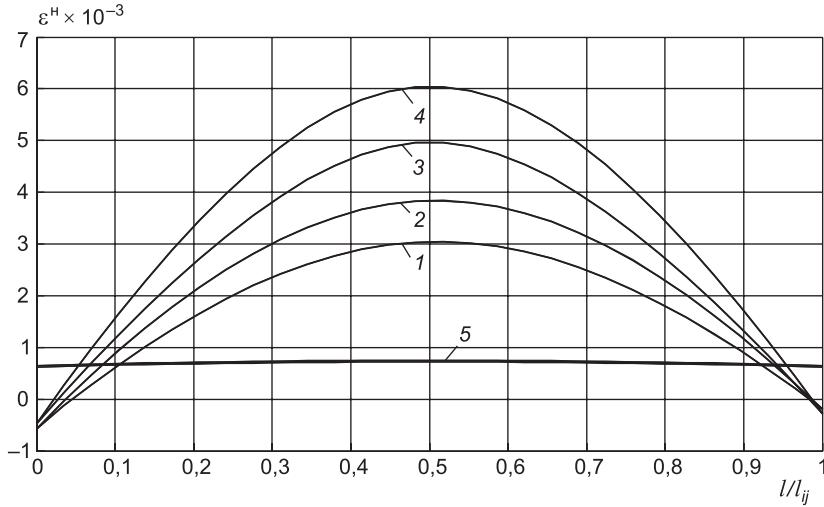


Рис. 5. Деформации нижнего фибрового волокна

1 — стержень 12 (варианты 2 и 3); 2 — стержень 12 (варианты 1 и 4); 3 — стержень 23 (варианты 2 и 4); 4 — стержень 23 (варианты 1 и 3); 5 — стержень 24 (варианты 1–4)

также изменяется при модификации расчетной схемы (см. рис. 3). Максимальная разница составляет 18,6 %.

4. Продольные деформации верхних и нижних фибровых волокон стержней  $\varepsilon_{ij}^B, \varepsilon_{ij}^H$  определяются по формуле (1.9) из [1] и зависят как от изменения  $\varepsilon_{0ij}$  и  $\kappa_{ij}$ , так и от изменения расстояния от центра тяжести до фибровых волокон (см. рис. 4, 5).

Дополнительно для каждого варианта расчетной схемы была найдена максимально допустимая нагрузка, действующая на стержни 12 и 23:  $|\bar{q}_{12}| = |\bar{q}_{23}| = q_{\max}$ . Критерием разрушения конструкции служит условие (1.12). Для варианта 1 и 3  $q_{\max} = 26,3$  кН/м, для варианта 2 и 4  $q_{\max} = 22,0$  кН/м. Этот и вышеупомянутые факты свидетельствуют о том, что работа материала с нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями имеет существенные качественные и количественные отличия от работы материала, подчиняющегося закону Гука. Они выражаются в возникновении новых эффектов, которые, если их использовать должным образом, могут способствовать более рациональному проектированию конструкций.

Во время решения осуществлялась проверка результатов расчета по описанному в статье способу, которая дала максимальную относительную погрешность в 0,0423 %, что говорит о хорошей точности решения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Немировский, Ю.В. Метод расчета деревянных стропильных покрытий зданий. Сообщение 1: Моделирование и общие закономерности [Текст] / Ю.В. Немировский, А.И. Болтаев // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 3. — С. 5–13.

**НЕМИРОВСКИЙ** Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

*БОЛТАЕВ Артем Иванович, асп.; E-mail: boltaev\_artem@.ru  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
г. Новосибирск*

Получено после доработки 14.08.14

**Nemirovskiy Yuriy Vladimirovich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Boltaev Artem Ivanovich**, post-graduate student; E-mail: boltaev\_artem@.ru, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

## **METHOD OF CALCULATION OF WOODEN RAFTER COVERINGS OF BUILDINGS**

### **Message 2. NUMERICAL METHODS FOR SOLVING AND EXAMPLES OF CALCULATION**

The numerical algorithm of the solution of the task set in the Message 1 about calculation of wooden rafter coverings of buildings is offered. Its essence consists in the step-by-step appendix of load of a design. As a result of it becomes possible to linearize the allowing system of the equations and to consolidate the solution of a task to iterative definition of increments of deformations of cores. Results of calculation of a rafter covering at various basic data which testify to certain features of deformation of wooden designs and need of the accounting of the nonlinear law of deformation of material at their calculation are given.

**Key words:** rafter coverings, wooden designs, numerical methods of the decision, limit deformations, bars, deformation laws.

#### **REFERENCES**

1. Nemirovskiy, Yu.V. Method of calculation of wooden rafter coverings of buildings. Message 1: Modellings and general regularities [Text] / Yu.V. Nemirovskiy, A.I. Boltaev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 3. — P. 5–13.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.42:539.4

А.В. КОЛПАКОВ, В.З. АБДРАХИМОВ, А.К. КАЙРАКБАЕВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРЕЛЫХ ПОРОД В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО КИРПИЧА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Исследована зависимость между содержанием в керамических образцах на основе межсланцевой глины отощающей и выгорающей добавки в виде горелых пород и основных механических свойств керамической массы (пластичность) и образцов (предел прочности при сжатии) методом линейной регрессии. Модель зависимости строится на основании результатов фактического эксперимента и аналитически описывает зависимость результатов опытов.

Ключевые слова: межсланцевая глина, горелые породы, теплоизоляционный кирпич, метод линейной регрессии, пластичность, предел прочности при сжатии.

В работах [1–4] показана принципиальная возможность использования в производстве керамических материалов отходов при добыче горючих сланцев: межсланцевой глины и горелых пород, химический состав которых представлен в табл. 1.

В качестве глинистого компонента для производства керамических материалов в данной работе использовалась межсланцевая глина [1], которая образуется при добыче горючих сланцев на сланцеверерабатывающих заводах и является отходом. 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>. Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюды, монтмориллонита и кальцита.

Для производства керамических теплоизоляционных материалов в качестве отощителя и выгорающей добавки использовались горелые породы [2, 3] (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав исследуемых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %							
	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	R <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	П.п.п.
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	1–2	9–20
Горелые породы	39–40	12–13	7–8	17–18	1–2	1–2	4–5	14–15

Образуются горелые породы в местах добычи сланцев. По основным физическим и химическим свойствам они близки к глинам, обожженным при 800–1000 °C.

© Колпаков А.В., Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К., 2014

При исследовании зависимости между содержанием горелых пород и основными механическими характеристиками керамической массы (пластичность) и образцов (предел прочности при сжатии) использовался достаточно распространенный метод линейной регрессии. Этот метод позволяет выявить, как изменения одной переменной влияют на другие [4–6]. Модель строится на основании результатов фактического эксперимента и аналитически описывает зависимость результатов опытов.

Определяющим фактором качества керамического материала является единственный показатель — процентное содержание горелых пород в массе. Эксперимент состоял из девяти опытов. В первом опыте независимая переменная  $X$  принимала минимальное значение, равное 0 %. В каждом последующем опыте содержание горелых пород увеличивали, и в последнем опыте  $X$  приняла максимальное значение, равное 50 % (табл. 2).

Таблица 2. Составы керамических масс

Компоненты	Содержание компонентов, %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Межсланцевая глина	100	85	80	75	70	65	60	55	50
Горелые породы	0	15	20	25	30	35	40	45	50

Составы керамических масс готовили пластическим способом формования при влажности шихты 22–28 % (в зависимости от содержания горелых пород). Сформованные образцы, высушенные до остаточной влажности не более 8 %, обжигались при температуре 1050 °C. Механические показатели керамической массы и образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Механические показатели керамической массы и образцов

Показатели	Содержание компонентов, %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пластичность керамической массы ( $Y_1$ )	28	26	23	20	18	15	12	10	9
Предел прочности при сжатии, МПа ( $Y_2$ )	14,4	14,0	13,2	12,8	12,1	11,4	10,1	9,4	8,8

При проведении экспериментов такие факторы, как давление прессования и температура обжига, не изменяли своих значений, поэтому влияния на полученные результаты они не оказывали. Таким образом, определяющим фактором качества образца является показатель процентного содержания горелых пород в массе.

Регрессивный анализ проводился в два этапа: на первом этапе анализировалось влияние содержания горелых пород на пластичность керамической массы, на втором — влияние содержания горелых пород на прочность при сжатии.

Составленное линейное уравнение модели первого порядка имело вид

$$Y = aX + b, \quad (1)$$

где  $a$  — коэффициент при независимой переменной  $X_1$ ;

$b$  — свободный член регрессии.

Для определения коэффициентов был применен метод наименьших квадратов [5, 6].

При выполнении регрессионного анализа получены значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , приведенные в табл. 4.

Модельное уравнение приняло вид:  
для пластичности

$$Y_1 = -0,4304X + 30,324, \quad (2)$$

для прочности при сжатии

$$Y_2 = -0,1232X + 15,3587, \quad (3)$$

где  $X$  — содержание горелых пород;

$Y$  — значение соответствующих их величин.

Для оценки величины корреляции с моделью определили коэффициент детерминированности ( $R$ -квадрат), получаемый при сравнении фактических и предсказанных значений  $Y$ . Этот коэффициент при расчетах нормируется от 0 до 1 и в случае, если он равен единице, можно сделать вывод, что имеется полная корреляция модели с экспериментом. Значения коэффициентов детерминированности приведены в табл. 4.

Для оценки статистической надежности уравнения регрессии использовали критерий Фишера. Затем определяли табличное значение по таблицам распределения Фишера для заданного уровня значимости (0,05), принимая во внимание, что число степеней свободы для общей суммы квадратов (большой дисперсии) равно 1 и число степеней свободы остаточной суммы квадратов (меньшей дисперсии) при линейной регрессии равно  $n-2$ . В нашем случае  $F$ -табличное равно 5,59. Если фактическое значение  $F$ -кри-

**Таблица 4. Значение коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения регрессии и величин регрессии анализа**

Коэффициенты	Для уравнения регрессии по	
	пластичности ( $Y_1$ )	пределу прочности при сжатии ( $Y_2$ )
Значение коэффициента $a$	-0,4304	-0,1232
Значение коэффициента $b$	30,324	15,3587
$R^2$	0,9624	0,9298
Стандартной ошибки	1,43	0,57
Ошибки для коэффициента $a$	0,0321	0,0128
Ошибки для свободного члена $b$	1,04	0,423
$t$ -критерия для коэффициента $a$	13,39	9,63
$t$ -критерия для свободного члена $b$	29,04	36,94
Нижней границы (95 %) для коэффициента $a$	-0,51	-0,15
Верхней границы (95 %) для коэффициента $a$	-0,35	-0,0929
Нижней границы (95 %) для свободного члена $b$	27,85	14,38
Верхней границы (95 %) для свободного члена $b$	32,79	16,34
$F$ -наблюдаемое значение	179,41	92,67
Средний коэффициент эластичности	-0,7	-0,3
Средняя ошибка аппроксимации	5,58	3,94
Границы интервала $Y$	(15,4; 17,7)	(10,96; 11,88)

терия меньше табличного, то уравнение в целом статистически незначимо, т.е. делается вывод о возможности случайного характера взаимосвязи между переменными. В противном случае с вероятностью 0,95 утверждаем, что коэффициент детерминации статистически значим и найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна. Таким образом, все уравнения регрессии (2), (3) статистически надежны с вероятностью 0,95.

Далее была рассчитана стандартная ошибка. Значения стандартных ошибок по каждому из этапов анализа и для констант уравнений приведены в табл. 4. Более того, рассчитаны границы интервала, в котором будет сосредоточено 95 % возможных значений  $Y$  (для каждого уравнения) при неограниченно большом числе наблюдений. Рассчитанные значения  $Y$  и остатки приведены в табл. 5.

Таблица 5. Рассчитанные значения  $Y$  и остатки

Опыт	Для уравнения регрессии по			
	пластичности ( $Y_1$ )		пределу прочности при сжатии ( $Y_2$ )	
	предсказанное $Y$	остатки	предсказанное $Y$	остатки
1	30,32	-2,324	2065,31	-165,31
2	23,87	2,133	1815,63	34,37
3	21,72	1,285	1732,4	67,6
4	19,56	0,436	1649,18	100,82
5	17,41	0,592	1565,95	84,05
6	15,26	-0,258	1482,72	67,28
7	13,11	-1,105	1399,5	20,05
8	10,95	-0,954	1316,27	-76,27
9	8,8	0,198	1233,04	-133,04

Коэффициенты  $a$  и  $b$  уравнения линейной регрессии  $Y = bX + a$  вычисляли по известным формулам:

$$b = \frac{\sum x \sum y - n \sum xy}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} = \frac{260 \cdot 161 - 9 \cdot 3795}{260^2 - 9 \cdot 9500} = -0,4304;$$

$$a = \frac{\sum x \sum yx - n \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} = \frac{260 \cdot 3795 - 9500 \cdot 161}{260^2 - 9 \cdot 9500} = 30,324.$$

Коэффициентам уравнения линейной регрессии можно придать экономический смысл.

Коэффициент регрессии  $b = -0,43$  показывает среднее изменение результирующего показателя (в единицах измерения  $y$ ) с повышением или понижением величины фактора  $x$  на единицу его измерения. В данном примере с увеличением на одну единицу  $y$  понижается в среднем на  $-0,43$ .

Коэффициент  $a = 30,32$  формально показывает прогнозируемый уровень  $y$ , но только в том случае, если  $x = 0$  находится близко с выборочными значениями. Но если  $x = 0$  находится далеко от выборочных значений  $x$ , то буквальная интерпретация может привести к неверным результатам, и даже если линия регрессии довольно точно описывает значения наблюдаемой выборки, нет гарантий, что также будет при экстраполяции влево или вправо.

Ошибка аппроксимации в пределах 5–7 % свидетельствует о хорошем подборе уравнения регрессии к исходным данным

$$\bar{A} = \frac{0,5}{9} 100 \% = 5,58 \%.$$

Поскольку ошибка меньше 7 %, то данное уравнение можно использовать в качестве регрессии.

Как известно, квадрат (множественного) коэффициента корреляции называется коэффициентом детерминации, который показывает долю вариации результативного признака, объясненную вариацией факторного признака.

Чаще всего, давая интерпретацию коэффициента детерминации, его выражают в процентах:

$$R^2 = -0,98^2 = 0,9624,$$

т.е. в 96,24 % случаев изменения  $x$  приводят к изменению  $y$ . Другими словами, точность подбора уравнения регрессии высокая. Остальные 3,76 % изменения  $Y$  объясняются факторами, не учтенными в модели.

Определим доверительные интервалы коэффициентов регрессии, которые с надежностью 95 % будут следующими:

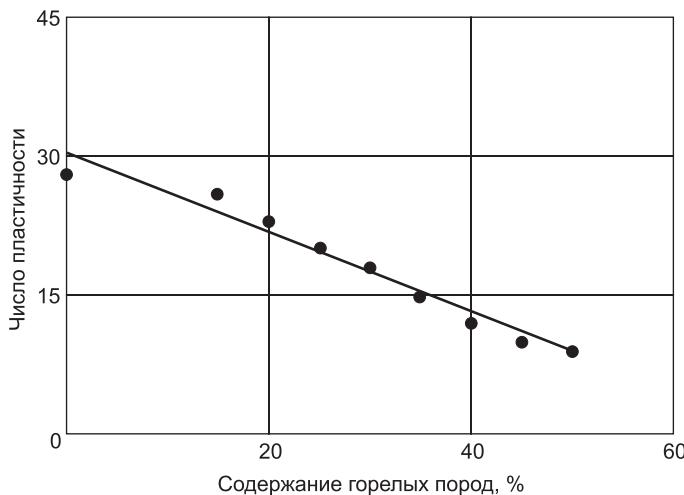
$$(b - t_{\text{крит}} S_b; b + t_{\text{крит}} S_b); \\ (-0,43 - 2,365 \cdot 0,0321; -0,43 + 2,365 \cdot 0,0321); \\ (-0,51; -0,35).$$

С вероятностью 95 % можно утверждать, что значения данного параметра будут лежать в найденном интервале.

$$(a - t_{\text{крит}} S_a; a + t_{\text{крит}} S_a); \\ (30,32 - 2,365 \cdot 1,04; 30,32 + 2,365 \cdot 1,04); \\ (27,85; 32,79).$$

С вероятностью 95 % можно утверждать, что значения данного параметра будут лежать в найденном интервале.

Графики полученных зависимостей и экспериментальные данные представлены на рис. 1, 2.



*Рис. 1. Зависимость числа пластиности формовочной массы от содержания горелых пород*

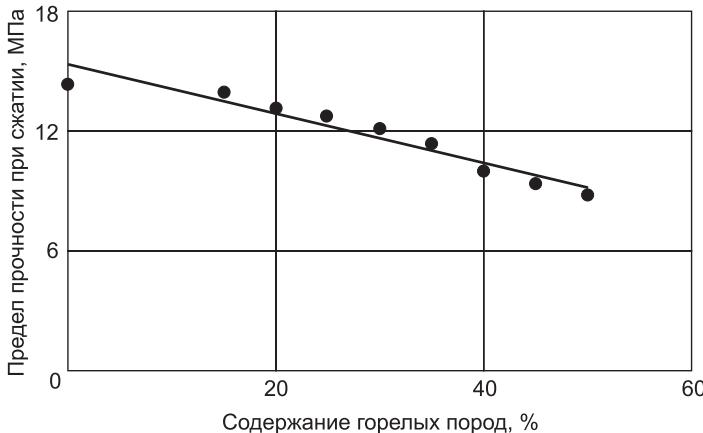


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания горелых пород

**Выводы.** 1. Исследована зависимость между содержанием в керамических образцах на основе межсланцевой глины отощающей и выгорающей добавки в виде горелых пород и основных механических свойств керамической массы (пластичность) и образцов (предел прочности при сжатии) методом линейной регрессии.

2. Модель зависимости строится на основании результатов фактического эксперимента и аналитически описывает зависимость результатов опытов.

3. Приведенный регрессионный анализ позволяет получить математические модели, делающие возможным предсказание свойств керамических масс в точках, не вошедших в серию эксперимента, а также определить область оптимальных с точки зрения использования отходов топливно-энергетического комплекса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б д р а х и м о в, В.З. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге легковесного кирпича на основе межсланцевой глины и нефтяного кека [Текст] / В.З. Абдрахимов, А.В. Колпаков // Огнеупоры и техническая керамика. — 2011. — № 11–12. — С. 24–28.
2. А б д р а х и м о в, В.З. Экспериментальное исследование теплопроводности легковесного кирпича на основе бейделлитовой глины и горелых пород [Текст] / В.З. Абдрахимов, Е.А. Белякова, Д.Ю. Денисов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2010. — № 11–12. — С. 49–52.
3. А б д р а х и м о в, В.З. Использование отходов горючих сланцев в производстве теплоизоляционных материалов без применения природного сырья [Текст] / В.З. Абдрахимов, И.Ю. Рошупкина, Е.С. Абдрахимова, А.В. Колпаков // Экология и промышленность России. — 2012. — № 3. — С. 28–31.
4. А б д р а х и м о в, В.З. Оптимизация состава керамических масс по физико-механическим свойствам [Текст] / В.З. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. — 2003. — № 1. — С. 45–47.
5. З а к с, Ш. Теория статистических выводов [Текст] / Ш. Закс. — М. : Мир, 1975. — 776 с.
6. Л и н н и к, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю.В. Линник. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. — 354 с.

КОЛПАКОВ Александр Викторович асп.; E-mail: roland.alex@mail.ru  
Самарская академия государственного и муниципального управления  
АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный экономический университет  
КАЙРАКБАЕВ Аят Крымович, канд. физ.-мат. наук, доц.  
Казахско-русский международный университет, Казахстан

Получено после доработки 18.08.14

**Kolpakov Alexander Viktorovich**, post-graduate student; E-mail: roland.alex@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara State University of Economics, Russia

**Kayrakbaev Ayat Krymovich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Kazakh-Russian International University, Kazakhstan

## **RESEARCH OF THE INFLUENCE OF BURNT ROCKS IN THE PRODUCTION OF HEAT-INSULATING BRICKS ON THE MECHANICAL PROPERTIES BY LINEAR REGRESSION**

The dependence between the content in the ceramic samples based on inter shale clay nonplastic and burnable additives in the form of burnt rocks and basic mechanical properties of the ceramic mass (plasticity) and samples (breaking strength) by linear regression. Depending on the model is built based on the actual results of the experiment and analytically describes the dependence of the results of experiments.

**Key words:** inter shale clay, burnt rocks, heat-insulating bricks, linear regression method, plasticity, breaking strength.

### **REFERENCES**

1. Abdrakhimov, V.Z. Study of heat and mass transfer processes by burning lightweight brick based on inter shale clay and oil cake [Text] / V.Z. Abdrakhimov, A.V. Kolpakov // Refractories and technical ceramics. — 2011. — N 11–12. — P. 24–28.
2. Abdrakhimov, V.Z. Experimental study of thermal conductivity of lightweight brick based on inter shale clay and burnt rocks [Text] / V.Z. Abdrakhimov, E.A. Belyakova, D.Yu. Denisov // Refractories and technical ceramics. — 2010. — N 11–12. — P. 49–52.
3. Abdrakhimov, V.Z. Use of oil shale waste in production of heat-insulating materials without application natural raw material [Text] / V.Z. Abdrakhimov, I.Yu. Roshchupkina, E.S. Abdrakhimova, A.V. Kolpakov // Ecology and industry of Russia. — 2012. — N 3. — P. 28–31.
4. Abdrakhimov, V.Z. Optimization of ceramic materials on physical and mechanical properties [Text] / V.Z. Abdrakhimov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2003. — N 1. — P. 45–47.
5. Zacks, Sh. The theory of statistical inference [Text] / Sh. Zacks. — M. : «Mir», 1975. — 776 p.
6. Linnik, Yu.V. Least squares method and basis of mathematical-statistical theory of observation processing [Text] / Yu.V. Linnik. — M. : State Publishing House of Physical-Mathematical Literature, 1962. — 354 p.

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

**УДК 693.547.3**

**С.В. ВОЛКОВ, В.Н. ШВЕДОВ**

## **ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОДОГРЕВА И ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОНА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Предложена методика обоснования способа подогрева и выдерживания бетона при возведении высотных зданий в условиях низких температур.

**Ключевые слова:** организационно-технологические решения при строительстве высотных зданий в зимнее время года, технология и организация строительства.

Общий порядок обоснования наиболее эффективного способа подогрева и выдерживания бетона при возведении железобетонных конструкций высотных зданий в условиях низких температур окружающего воздуха определяется с учетом конструктивных особенностей объекта, типа опалубки, величины установленной мощности на объекте и директивного срока набора требуемой прочности бетона.

Условия производства бетонных работ, при которых обеспечение проектных показателей бетона осуществляется в период, когда среднесуточная температура наружного воздуха ожидается ниже  $5^{\circ}\text{C}$ , а минимальная суточная температура — ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , относятся к зимним условиям [1].

При возведении высотных зданий в зимних условиях необходимо производить анализ и выбор ресурсосберегающих методов ускорения твердения бетона монолитных железобетонных конструкций с определением оптимальных сфер применения каждого из них [2]. Критическая прочность бетона измеряется в процентах от прочности, соответствующей проектному классу бетона, после достижения которой бетон может быть заморожен без снижения прочности и других показателей в процессе его последующего твердения после оттаивания [3]. Проектную прочность бетон приобретает при выдерживании в нормальных условиях труда в течение не менее 28 сут (R28).

Для моделирования температурно-прочностного поведения бетона при выдерживании монолитных конструкций следует выполнять теплотехнические расчеты, в основе которых лежат дифференциальные уравнения Фурье. Способ подогрева и выдерживания бетона при зимнем бетонировании должен быть установлен в проекте производства работ (ППР) на основании технико-экономического сопоставления предлагае-

мых способов для конкретных конструкций и условий, учитывающих температуру наружного воздуха и скорость ветра [3].

Выбор способа зимнего бетонирования должен включать разработку организационно-технических мероприятий по экономии тепловой и электрической энергии. Организационно-технические мероприятия по экономии тепловой и электрической энергии разрабатываются на всех уровнях управления и планируются по следующим основным направлениям:

- совершенствование технологии зимнего бетонирования;
- улучшение структуры технологического оборудования и устройств, их использования;
- повышение эффективности использования тепловой и электрической энергии;
- повышение качества компонентов бетона, применение их менее энергоемких видов;
- прочие мероприятия (организационные, экономические и др.).

При разработке планов организационно-технических мероприятий по экономии тепловой и электрической энергии необходимо учитывать достижения научно-технического прогресса, результаты работы предприятия по экономии энергоресурсов за прошедший период, а также проводить оценку экономической эффективности мероприятий, целесообразности и очередности их внедрения в производство.

Подбор состава бетона для зимнего бетонирования конструкций высотных зданий осуществляется по правилам, установленным ГОСТ 27006–86, по показателям проектной прочности бетона, подвижности к моменту укладки, воздухосодержания смеси при минимальном показателе водоцементного соотношения. Расход портландцемента марки 500 при изготовлении бетона класса В30, как правило, не должен превышать 450 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси. При зимнем бетонировании водоцементное отношение для бетонов класса В22,5 и выше должно быть 0,5 и ниже [3].

Температура уложенной бетонной смеси ( $T_{\text{ул.см}}$ , °C) с учетом потерь теплоты на отогрев металла, опалубки, теплоизоляции и грунта (бетона) должна превышать температуру замерзания применяемого раствора затворения не менее чем на 5 °C для предотвращения замораживания бетона непосредственно после укладки. Такая температура определяется по формуле [3]:

$$T_{\text{ул.см}} = (\sum V_i \times \gamma_i \times c_i \times t_i) / (\sum V_i \times \gamma_i \times c_i), \quad (1)$$

где  $V_i$  — объем бетона, опалубки, теплоизоляции, арматуры, соприкасающегося с бетоном грунта («старым» бетоном), м<sup>3</sup>;

$\gamma_i$  — плотность указанных материалов, кг/м<sup>3</sup>;

$c_i$  — удельные теплоемкости материалов, кДж (кг · °C);

$t_i$  — температура материалов, °C.

При производстве бетонных работ в зимних условиях [3] бетонная смесь должна приготавливаться с обязательным применением комплексных добавок. Так, для бетонов класса В25 и выше применяются добавки НН + С-3 и НН + ПФМ-НЛК, где НН — нитрит натрия, С-3 — суперпластификатор, ПФМ-НЛК — модификатор бетона. Особенности подогрева и выдерживания бетона в зимнее время года при бетонировании монолит-

**Таблица 1. Способы подогрева и выдерживания бетона при бетонировании конструкций высотных зданий в зимнее время года**

Вид бетонных, железобетонных конструкций	Распалубочная прочность бетона, %	Способы прогрева и выдерживания бетона	Примечания
1. Буронабивные сваи и подземные конструкции	≥70	Греющий провод; электропрогрев	С применением противоморозных добавок. Промерзание грунта до 2,0 м
2. Монолитная железобетонная плита фундамента	≥70	Способ термоса; греющая опалубка; греющий провод	Утепление конструкций теплоизоляцией, применение добавок
3. Рандбалки, балки, ригели	≥80	Греющая опалубка; греющий провод; воздушный обогрев	Устройство тепляков из негорючих материалов, предварительный электроразогрев бетонной смеси и другие способы
4. Колонны	≥70	Греющая опалубка; греющий провод	То же
5. Стена	≥80	Способ термоса; греющий провод; греющая опалубка	»
6. Перекрытия	≥80	Греющий провод; воздушный обогрев	Укрытие бетона теплоизоляцией по пароизоляции, с применением добавок

ных и сборно-монолитных конструкций высотных зданий при температуре подогрева и выдерживания бетона, не превышающей 40–60 °С, представлены в табл. 1.

Для того, чтобы температура уложенной бетонной смеси с учетом потерь теплоты превышала не менее чем на 5 °С температуру замерзания применяемого раствора затворения, применяется вода, подогретая до температуры не более 80 °С. Если по конкретным условиям производства работ этого окажется недостаточно, то подогреваются заполнители, в первую очередь песок. При этом необходимо соблюдать предусмотренный технологией порядок перемешивания заполнителей [3].

Применение того или иного способа зимнего бетонирования железобетонных конструкций высотных зданий определяется массивностью конструкции и температурой наружного воздуха (табл. 2). Все это оказывает влияние на характер организационно-технологических решений, которые принимаются в процессе разработки организационно-технологической документации для строительства высотных зданий [3].

Рассмотрим способы прогрева и выдерживания бетона, применяемые при бетонировании среднемассивных конструкций возводимых высотных зданий с модулем поверхности  $M_n = 8-12 \text{ м}^{-1}$  (табл. 3).

Определению показателей технико-экономической оценки способов зимнего бетонирования должно предшествовать назначение технологических, конструктивных и климатических факторов: марки бетона, вида и марки цемента, требуемой прочности к моменту возможного замораживания или к концу термообработки, типа и геометрических размеров конструкций, температуры наружного воздуха и скорости ветра, суточного потока бетон-

Таблица 2. Способы зимнего бетонирования, применяемые при различной температуре окружающего воздуха для конструкций высотных зданий

Наименование способа	Рекомендуемые конструкции высотных зданий	Сущность способа	Temperatura, °C	
			бетонной смеси	окружающего воздуха
Способ термоса	Среднемассивные и массивные конструкции, $M_n = 2-3 \text{ м}^{-1}$	Использование теплоты, внесенной при приготовлении бетонной смеси, и экзотермической теплоты бетона в процессе твердения	До 60	До минус 20
Термообработка бетона	Среднемассивные конструкции, $M_n = 4-8 \text{ м}^{-1}$	Использование пара, горячего воздуха или электрического тока	До 60	До минус 40
Предварительный разогрев бетонной смеси	Среднемассивные и сборные конструкции, $M_n = 4-8 \text{ м}^{-1}$	Порционный электроразогрев бетонной смеси	60-80	До минус 20
Электропрогрев электродный	Малоармированные конструкции, $M_n \leq 8 \text{ м}^{-1}$	Сквозной, периферийный электропрогрев переменным током с напряжением не выше 120 В	До 60	До минус 40
Обогрев бетона в греющей опалубке	Тонкостенные и среднемассивные конструкции, $M_n = 8-12 \text{ м}^{-1}$	Обогрев слоев бетона путем передачи и распределения теплоты от греющей опалубки	До 80	До минус 40
Обогрев бетона греющим проводом	Железобетонные колонны, перекрытия, балки, $M_n \leq 8 \text{ м}^{-1}$	Передача тепла бетону конструкции кондуктивно, изнутри с помощью стального изолированного провода	До 60	До минус 40
Воздушный прогрев бетона	Железобетонные колонны, перекрытия, $M_n \leq 12 \text{ м}^{-1}$	Конвективный обогрев бетона воздушным тепловым потоком	До 80	До минус 40

ной смеси, вида опалубки и утеплителя. Дополнительными критериями выбора способа зимнего бетонирования, кроме минимума приведенных затрат, должны стать целесообразность принимаемых ОТР для данной генподрядной строительно-монтажной организации, работающей в конкретных территориальных, климатических и хозяйственных условиях.

Для технико-экономического обоснования, оценки и выбора наиболее эффективного способа подогрева и выдерживания бетона среднемассивных конструкций возводимых высотных зданий сравним два способа: способ термоса и способ предварительного электроразогрева бетонной смеси. Выбранные способы являются универсальными и могут применяться для различных видов конструкций возводимых высотных зданий. Для выбора наиболее эффективного способа выдерживания и обогрева бетона сравним два параметра:

- удельная тепловая мощность, требуемая в периоды подъема температуры ( $P_n$ , кВт/м<sup>3</sup>) и изотермического прогрева ( $P_i$ , кВт/м<sup>3</sup>);
- общая продолжительность тепловой обработки, включая периоды предварительного выдерживания от момента окончания укладки бетон-

**Таблица 3. Способы подогрева и выдерживания бетона среднемассивных конструкций возводимых высотных зданий, модуль поверхности  $M_n = 8\text{--}12 \text{ м}^{-1}$**

Виды конструкций	Способы прогрева, выдерживания бетона	Температура окружающего воздуха, °C
Подземные конструкции (сваи, фундаментная плита)	Способ термоса; предварительно разогретая бетонная смесь; греющая опалубка; электропрогрев; греющий провод; воздушный обогрев	До минус 40
Монолитные несущие конструкции высотных зданий (колонны, перекрытия, стены)	Греющий провод; способ термоса; греющая опалубка; комбинированный способ; предварительно разогретая бетонная смесь	Минус 20–40
Сборно-монолитные несущие конструкции высотных зданий (балки, ригели, пли ты перекрытий)	Комбинированный способ; предварительный разогрев бетонной смеси; способ термоса; греющая опалубка	Минус 20–40

ной смеси до начала прогрева; подъема температуры; изотермического прогрева и остывания.

Выбор указанных параметров связан с необходимостью достижения заданной прочности бетона и обеспечения расчетной температуры бетонной смеси в зимних условиях бетонирования конструкций в зависимости от принятого способа выдерживания бетона, в соответствии с теплотехническим расчетом. Также следует учитывать затраты энергетических ресурсов на тепловую обработку бетонов с целью их экономии, сокращение продолжительности тепловой обработки и уменьшения расхода энергии в соответствии с технико-экономическим расчетом.

**Способ термоса.** Удельная тепловая мощность в период подъема температуры ( $P_n$ ) складывается из суммы удельных мощностей, необходимых для нагрева бетона ( $P_1$ ), для нагрева опалубки ( $P_2$ ) и для компенсации теплопотерь в окружающую среду ( $P_3$ ) за вычетом удельной мощности соответствующей интенсивности тепловыделения при твердении бетона ( $P_4$ ). Определим требуемую удельную тепловую мощность в период подъема температуры при кондуктивном способе передачи тепла бетону конструкции по формуле [4]:

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 - P_4, \quad (2)$$

$$P_n = [(C_b \times \gamma_b) / 3600] \times p \times [\Sigma (C_{опi} \times \gamma_{опi} \delta_{опi} \times M_{опi}) / 3600] \times \\ \times P / 2 + \{[K \times M \times (t_u - t_{н.в.})] / 1000\} - 0,8, \quad (3)$$

где  $C_b$ ,  $C_{опi}$  — удельная теплоемкость бетона, удельная теплоемкость материала опалубки или укрытия неопалубленных поверхностей, кДж/(кг · °C);

$\gamma_b$ ,  $\gamma_{опi}$  — плотность бетона, плотность материала опалубки или укрытия неопалубленных поверхностей соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$p$  — скорость подъема температуры бетона, °C/ч;

$\delta_{опi}$  — толщина материала опалубки, м;

$M_{опi}$  — модуль опалубленной поверхности, для которой показатели опалубки равны:  $C_{опi}$ ,  $\gamma_{опi}$ ,  $\delta_{опi}$ ,  $\text{м}^{-1}$ ;

$P$  — удельная электрическая мощность,  $\text{kВт}/\text{м}^3$ ;

$K$  — коэффициент теплопередачи опалубки или укрытия неопалубленных поверхностей,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;

$t_i$ ,  $t_{H.B}$  — температура изотермического прогрева бетона, температура наружного воздуха соответственно,  $\text{°C}$ .

Расчет требуемой удельной электрической мощности для способа термоса выполним для бетона класса В30 и выше и параметрах расчета, приведенных в табл. 4.

Таблица 4. Исходные данные для расчета требуемой удельной электрической мощности методом термоса

Показатель	Единица измерения	Значение	Примечание
$C_6$	$\text{kДж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$	0,84	При условии: $\gamma_6 = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$
$C_{опi}$	$\text{kДж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$	0,47	Для металлической опалубки
$\gamma_6$	$\text{кг}/\text{м}^3$	2500	Для бетонов класса В30 и выше
$\gamma_{опi}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	7800	Для металлической опалубки
$\delta_{опi}$	м	0,003	Для металлической опалубки
$p$	$\text{°C}/\text{ч}$	10	
$K$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	1,3	
$t_i$	$\text{°C}$	80	
$t_{H.B}$	$\text{°C}$	-20	
$M_{опi}$	$\text{м}^{-1}$	10	$M_{опi} = F_{опi}/V_6$ , где $F_{опi}$ — площадь опалубленной поверхности; $V_6$ — объем бетона конструкции. На один этаж примем $F_{опi} = 500 \text{ м}^2$ , $V_6 = 50 \text{ м}^3$

Определение требуемой удельной тепловой мощности в период подъема температуры выполним на основе данных табл. 5. В соответствии с этими данными требуемую удельную тепловую мощность в период подъема температуры бетона в металлической опалубке толщиной 3 мм с утеплением минеральной ватой толщиной 50 мм и защитным слоем толщиной 4 мм найдем по табл. 9 [4]:

$$P_{\pi} = 7,53 \text{ кВт}/\text{м}^3.$$

Вычислим удельную тепловую мощность ( $P_{\pi}$ ) в период изотермического прогрева бетона

$$P_{\pi} = 1,16 \times 10^{-3} \times K \times M \times (t_i - t_{H.B}). \quad (4)$$

Для определения  $P_{\pi}$  исходные данные приведены в табл. 6.

Удельная тепловая мощность в период изотермического прогрева бетона в металлической опалубке толщиной 3 мм с утеплением минеральной ватой толщиной 50 мм и защитным слоем толщиной 4 мм при скорости ветра 5 м/с определена согласно табл. 13 [4]

$$P_{\pi} = 1,28 \text{ кВт}/\text{м}^3.$$

**Таблица 5. Исходные данные для определения требуемой удельной тепловой мощности в период подъема температуры бетона**

Показатель	Единица измерения	Значение
$t_{\text{н.в}}$	°C	-20
$p$	°C/ч	10
$M_{\text{оп}i}$	$\text{м}^{-1}$	10
$t_i$	°C	80

**Таблица 6. Исходные данные для определения удельной тепловой мощности в период изотермического прогрева бетона**

Показатель	Единица измерения	Значение
$t_{\text{н.в}}$	°C	-20
$M_{\text{оп}i}$	$\text{м}^{-1}$	10
$t_i$	°C	80

Таким образом, требуемая удельная электрическая мощность для способа термоса составит

$$P = 7,53 + 1,28 = 9,81 \text{ кВт/м}^3.$$

Общая продолжительность тепловой обработки бетона включает периоды предварительного выдерживания от момента окончания укладки бетонной смеси до начала прогрева; подъема температуры; изотермического прогрева и остывания. Продолжительность данных периодов согласно графикам нарастания до требуемой распалубочной прочности бетона [4, рис. 2, 3] составила 6, 10 и 4 ч соответственно. Общая продолжительность тепловой обработки бетона по способу термоса 20 ч.

*Способ с предварительным электроразогревом бетонной смеси.* Удельная электрическая мощность ( $P$ ), необходимая для разогрева бетонной смеси, определяется теплотехническим расчетом по формуле [4]:

$$P = [C \times \gamma \times (t_p - t_{tp}) \times 1,16K \times 60V_6] / (10^2 \times 1,18K_{ep} \times T_p). \quad (5)$$

При  $K = 1,1$  и  $K_{ep} = 0,95$  получим

$$P = [19,28 \times 10^{-2} \times C \times \gamma \times (t_p - t_{tp}) \times V_6] / T_p, \quad (6)$$

где  $C$  — удельная теплоемкость бетонной смеси,  $\text{кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ;

$\gamma$  — объемная масса бетонной смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;

$t_p$  — конечная температура разогрева бетонной смеси, °C;

$t_{tp}$  — температура после транспортирования бетонной смеси, °C;

$V_6$  — объем одновременно разогреваемой порции бетонной смеси,  $\text{м}^3$ ;

$K$  — коэффициент, учитывающий потери тепла в процессе разогрева бетонной смеси, принимается равным 1,1;

$K_{ep}$  — коэффициент использования электроэнергии, при электроразогреве бетонной смеси принимается равным 0,95;

$T_p$  — время разогрева бетонной смеси, мин.

Для расчета требуемой удельной электрической мощности для способа с предварительным электроразогревом бетонной смеси примем следующие исходные данные (табл. 7).

Значение потребной удельной электрической мощности на разогрев 1  $\text{м}^3$  бетонной смеси в течение 20 мин на  $\Delta t = 60$  °C согласно [4, табл. 39] ориентировочно составляет  $P = 160$  кВт/м $^3$ .

Удельная тепловая мощность в период изотермического прогрева бетона в металлической опалубке толщиной 3 мм с утеплением минераль-

**Таблица 7. Исходные данные для расчета требуемой удельной электрической мощности для способа с предварительным электроразогревом бетонной смеси**

Показатель	Единица измерения	Значение	Примечание
$C$	кДж / (кг · °C)	0,84	При условии: $\gamma_6 = 2500 \text{ кг} / \text{м}^3$
$\gamma$	кг / м <sup>3</sup>	2500	Для бетонов класса В30 и выше
$T_p$	мин	20	
$K_{\varphi p}$		0,95	При электроразогреве бетонной смеси
$K$		1,1	
$t_p$	°C	80	
$t_{tp}$	°C	60	
$V_6$	м <sup>3</sup>	1	

ной ватой толщиной 50 мм и защитным слоем толщиной 4 мм при скорости ветра 5 м / с определена согласно табл. 13 [4]:  $P_i = 1,28 \text{ кВт} / \text{м}^3$ .

Требуемая удельная электрическая мощность для зимнего бетонирования с использованием способа электротермообогрева бетона составит

$$P = 160,0 + 1,28 = 161,28 \text{ кВт} / \text{м}^3.$$

Продолжительность периодов предварительного выдерживания от момента окончания укладки бетонной смеси до начала прогрева, подъема температуры, изотермического прогрева и остывания 2, 8 и 2 ч соответственно, согласно графикам, представленным на рис. 2 и 3 [4]. Общая продолжительность тепловой обработки бетона до требуемой распалубочной прочности в условиях зимнего бетонирования для способа предварительного электроразогрева бетонной смеси составляет 12 ч.

Сравнительная характеристика показателей рассмотренных способов подогрева и выдерживания бетона среднемассивных конструкций возводимых высотных зданий приведена в табл. 8.

Применение предварительного электроразогрева бетонной смеси при зимнем бетонировании монолитных конструкций высотных зданий позволяет отказаться от подогрева заполнителей, ограничиваясь только их оттаиванием, получить более высокую прочность бетона к моменту его замерзания, сократить активную тепловую обработку бетона непосредственно в конструкции, а также сократить сроки достижения заданной прочности по сравнению с методом термоса.

**Таблица 8. Сравнение способов обогрева и выдерживания бетона среднемассивных конструкций**

Способы подогрева, выдерживания бетона	Удельная электрическая мощность нагревателя для обогрева 1 м <sup>3</sup> железобетонных конструкций на всех стадиях зимнего бетонирования, кВт / м <sup>3</sup>	Общая продолжительность тепловой обработки бетона при температуре до 80 °C, включая разогрев и остывание, ч
Способ термоса	9,81	20,0
Способ с предварительным электроразогревом бетонной смеси	161,28	12,0

Учитывая большие потребности в установочных электрических мощностях, предварительный электроразогрев бетонных смесей рекомендуется применять в следующих случаях:

- способ термоса в сочетании с противоморозными добавками не обеспечивает достижение требуемой прочности или заданного срока достижения этой прочности в данных конкретных погодно-климатических условиях;
- применение способа термоса трудно осуществимо или экономически нецелесообразно из-за значительных материальных и трудовых затрат;
- отсутствуют необходимые эффективные теплоизоляционные материалы и другие ресурсы, что должно быть подтверждено технико-экономическим обоснованием;
- отсутствуют противоморозные добавки или их применение не допускается для данных конструкций.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СП 70.13330.2014. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 [Текст].
2. Трембецкий, С.М. Энерго- и ресурсосбережение в заводской и строительной технологии железобетонных изделий и конструкций [Текст] / С.М. Трембецкий. — М. : Стройиздат, 2004. — 262 с.
3. ТСН 12-336-2007. Производство бетонных работ при отрицательных температурах среди на территории Республики Саха (Якутия) [Текст] / Министерство строительства и промышленности строительных материалов Республики Саха (Якутия). — Якутск, 2007. — 50 с.
4. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера [Текст] / ЦНИИОМТП ГОССТРОЯ СССР. — М. : Стройиздат, 1982. — 100 с.

*ВОЛКОВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: wsw\_1953@mail.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ШВЕДОВ Владимир Николаевич, канд. техн. наук  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 12.08.14

**Volkov Sergey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, E-mail: wsw\_1953@mail.ru, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Shvedov Vladimir Nikolaevich**, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### **JUSTIFICATION OF THE METHOD OF HEATING AND CURING CONCRETE DURING THE CONSTRUCTION OF HIGH-RISE BUILDINGS AT LOW TEMPERATURES**

The proposed methodology justification of the method of heating and curing of concrete during the construction of high-rise buildings in low temperatures.

**Key words:** organizational and technological solutions for the construction of tall buildings in the winter time, technology and organization of construction.

REFERENCES

1. Set of Rules 70.13330.2014. Bearing and enclosing structures. Updated edition of SNiP 3.03.01-87 [Text].
  2. Trembitskiy, S.M. Energy-saving in factory and building technology of concrete products and structures [Text] / S.M. Trembitskiy. — M. : Stroyizdat, 2004. — 262 p.
  3. TSN 12-336-2007. Production of concrete works at low temperatures of the environment on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) [Text] / The Ministry of construction and building materials industry of the Republic of Sakha (Yakutia). — Yakutsk, 2007. — 50 p.
  4. Guide for the production of concrete work in winter conditions, the regions of the Far East, Siberia and the Far North [Text] / GOSSTROY USSR. — M. : Stroyizdat, 1982. — 100 p.
-

УДК 69.05 : 658.512.6

С.М. КУЗНЕЦОВ, Л.А. НЕМЧИКОВА

## ОБОСНОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ

На основе программного обеспечения «Potok» обоснована модель очередности строительства объектов, которая позволяет с большей надежностью определять продолжительность строительства зданий и сооружений. Применение данной модели повышает эффективность работы рабочих бригад и использования машин.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, оптимальный вариант, очередьность и циклограмма строительства объектов, база результатов натурных испытаний процессов, риск продолжительности выполнения процессов, организационно-технологическая надежность процессов.

В Сибирском государственном университете путей сообщения разработано методическое, математическое и программное обеспечение для автоматизации обоснования очередности строительства объектов с помощью имитационной модели процесса строительства. Количество возможных вариантов, устанавливающих очередьность возведения объектов (захваток), среди которых находится и оптимальный вариант, зависит от числа возводимых объектов ( $M$ ) и определяется числом перестановок  $M!$ . Путь полного перебора всех возможных вариантов является весьма трудоемким и решается только с помощью компьютера [1, 2].

Программное обеспечение «Potok» [3, 4] позволяет определить очередьность строительства объектов и распределить финансирование по всей продолжительности строительства объектов. В табл. 1–3 приведены исходные данные программы.

Таблица 1. Исходные данные

Показатель	Обозначение
Количество процессов, шт.	6
Количество объектов, шт.	4

Таблица 2. Продолжительность работ, дн.

Объект	Процесс					
	1	2	3	4	5	6
1	8	40	130	60	60	70
2	15	30	130	70	80	70
3	7	25	35	35	30	35
4	12	20	115	45	45	55

Программное обеспечение позволяет определить оптимальную очередьность возведения объектов и рассчитать минимально возможный срок строительства. Для оптимального варианта очередности включения объектов в поток с целью более наглядного представления полученного решения в программе строится циклограмма и график освоения сметной стоимости.

Проведенный расчет показал, что оптимальной по продолжительности является следующая последовательность строительства объектов.

На рис. 1 показана циклограмма строительства объектов (табл. 4) без учета организационно-технологической надежности (ОНТ) строи-

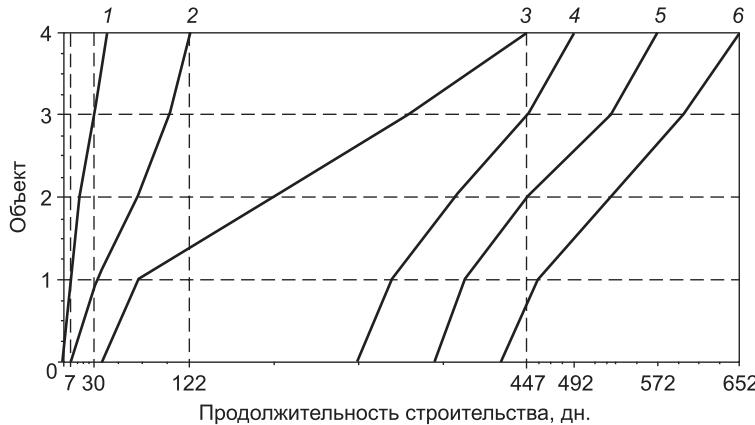


Рис. 1. Циклограмма строительства объектов

1 — земляные работы; 2 — нулевой цикл; 3 — монтаж коробки здания; 4 — кровельные, столярные, стекольные работы и устройство полов; 5 — сантехнические, электротехнические, слаботочные, монтаж оборудования; 6 — отделочные работы

Таблица 3. Наименование объектов

Объект	Наименование объекта
1	12-этажный жилой дом в г. Новосибирске
2	Пост ЭЦ на станции Новосибирск-Главный
3	АБК локомотивного депо на станции Инская
4	9-этажный жилой дом в г. Новосибирске

Таблица 4. Оптимальная очередность строительства объектов

Объект	Наименование объекта
1	АБК локомотивного депо на станции Инская
2	12-этажный жилой дом в г. Новосибирске
3	Пост ЭЦ на станции Новосибирск-Главный
4	9-этажный жилой дом в г. Новосибирске

тельства. Рассчитанная с помощью программы продолжительность строительства объектов является случайной величиной. Случайной называется величина, которая в результате испытания может принять то или иное возможное значение, неизвестное заранее, но обязательно одно.

Для обоснования продолжительности строительства необходимо создать базы результатов натурных испытаний строительных процессов. Информация баз данных должна быть очищена от неверных измерений. Для этой цели проводятся две проверки [5, 6]:

— логическая, при которой по замечаниям наблюдателя исключались значения, не относящиеся к нормируемому процессу;

— математическая, при которой методами математической статистики определялась правомерность отклонений.

Для определения продолжительности процессов с заданной вероятностью следует в нормативных документах приводить среднюю величину

и среднее квадратическое отклонение нормы времени. Тогда продолжительность выполнения процессов с минимальным риском можно будет определять по формуле [7, 8]

$$t = \bar{t} + r, \quad (1)$$

где  $r$  — риск продолжительности выполнения процессов;  $\bar{t}$  — средняя продолжительность выполнения процессов.

Риск продолжительности выполнения процессов определяется по формуле [7, 8]

$$r = \sqrt{V}, \quad (2)$$

где  $V$  — вариация отклонения от среднего значения продолжительности выполнения процессов.

Вариация отклонения от среднего значения продолжительности выполнения процессов определяется по формуле

$$V_{ij}^n = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} V_{ij}}{n^2}, \quad (3)$$

где  $V_{ij}^n$  — ковариация продолжительности выполнения процессов при использовании  $i$ -го и  $j$ -го испытания.

Ковариация продолжительности выполнения процессов при использовании  $i$ -го и  $j$ -го испытания определяется по формуле

$$V_{ij} = (t_i - \bar{t})(t_j - \bar{t}). \quad (4)$$

При наличии результатов натурных испытаний по соответствующим технологическим процессам можно рассчитать организационно-технологическую надежность строительства зданий и сооружений. Под организационно-технологической надежностью понимается способность технологических, организационных, управлеченческих экономических решений обеспечивать достижение заданного результата строительного производства в условиях случайных возмущений, присущих строительству как сложной стохастической системе. Значение показателя ОТН во многих методиках представляет собой именно оценку вероятности выполнения проекта в расчетный срок. При этом необходимо учитывать специфику такой сложной человеко-машинной системы, как строительное производство [9, 10].

Минимизировать организационно-технологический риск и повысить ОТН строительства предлагается с помощью рекомендаций [7, 8]. В транспортном строительстве до 95 % объемов работ выполняется машинами, а в промышленном и гражданском строительстве около 85 %, следовательно, можно утверждать, что надежность строительства в значительной степени зависит от эффективной работы строительных и дорожных машин.

Для оценки продолжительности строительства с минимальным риском следует проанализировать выборки коэффициентов использования по времени бульдозеров, буровых станков, земснарядов и роторных экскаваторов [11]. Результаты обработки выборок приведены в табл. 5.

Таблица 5. Коэффициенты использования машин по времени

Наименование	Бульдозер	Буровой станок	Земснаряд	Экскаватор роторный
Количество опытов, шт.	872	151	145	403
Количество связей, шт.	3	3	3	3
Уровень значимости	0,05	0,05	0,05	0,05
Минимальное значение фактора	0,453	0,548	0,509	0,704
Максимальное значение фактора	0,843	0,917	0,64	1,0
Выборочное среднее значение фактора	0,6597	0,7715	0,5740	0,8528
Среднее линейное отклонение фактора	0,0580	0,0684	0,0229	0,0514
Среднее квадратическое отклонение	0,0708	0,0814	0,0278	0,0627
Стандартное отклонение фактора	0,0709	0,0816	0,0279	0,0628
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,0024	0,0066	0,0023	0,0031
Ошибка в % от среднего значения фактора	0,3640	0,8611	0,4038	0,3667
Эмпирическая дисперсия выборки	0,0050	0,0067	0,00078	0,0039
Вариации отклонения от среднего значения	0,003367	0,004681	0,000527	0,002643
Риск отклонения от среднего значения	0,0580	0,0684	0,0229	0,0514
Коэффициент вариации	0,1074	0,1055	0,0485	0,0735
Вычисленное значение критерия Пирсона	2,34	2,31	5,59	5,46
Табличное значение критерия Пирсона	8,13	7,86	7,86	8,13
Количество интервалов	11	8	8	10

Для анализа изменения продолжительности процессов при минимальном риске воспользуемся следующими уравнениями:

$$V_p = \bar{\Pi}_s \cdot \bar{t}, \quad (5)$$

$$V_p = \Pi_{\text{эм}} \cdot t_m, \quad (6)$$

где  $V_p$  — объем работ;

$\Pi_{\text{эм}}$  и  $\bar{\Pi}_s$  — соответственно эксплуатационная производительность при минимальном риске и средняя эксплуатационная производительность машины;

$t_m$  и  $\bar{t}$  — соответственно продолжительность работы при минимальном риске и средняя продолжительность работы машины. Из выражений (5), (6) находится изменение продолжительности процессов при минимальном риске

$$\frac{\bar{t}}{t_m} = \frac{\bar{\Pi}_s}{\Pi_{\text{эм}}} = \frac{\Pi_t \bar{K}_b}{\Pi_t K_{bm}} = \frac{\bar{K}_b}{K_{bm}} = \frac{\bar{K}_b}{\bar{K}_b - r}, \quad (7)$$

где  $\Pi_t$  — техническая производительность машины;

$K_{bm}$  и  $\bar{K}_b$  — соответственно коэффициент использования машины по времени с минимальным риском и средний коэффициент;

$r$  — риск отклонения от среднего значения.

При минимальном риске времени продолжительности работы бульдозеров увеличится в 1,0964 раза, буровых станков — в 1,0973, земснарядов — в 1,0416 и роторных экскаваторов — в 1,0641 раза.

Проведенные исследования по работе строительных машин за 12-летний период показали, что при минимизации организационно-технологического риска машин продолжительность строительства может увеличиться не более чем на 10 %. Так как основной объем работ в строительстве выполняется машинами, то, следовательно, и продолжительность основных строительных процессов может увеличиться не более чем на 10 %.

Для автоматизации прогнозирования продолжительности, стоимости и последовательности строительства объектов авторами разработана также имитационная модель потока и программа «Impotok». В настоящее время с помощью программного обеспечения «Impotok» можно рассчитать не только продолжительность и стоимость строительства, но и организационно-технологическую надежность календарного планирования, сметную стоимость строительства объектов, прибыль строительной организации и другие факторы [12].

В табл. 6 даны результаты статистической обработки выборки основных технико-экономических показателей строительства объектов при максимальном увеличении продолжительности строительных работ 10 %.

**Таблица 6. Данные расчета по программе «Impotok»**

Наименование	Максимальное отклонение продолжительности работ 10 %
Плановая продолжительность строительства сооружения, дн.	652
Минимальная продолжительность строительства сооружения, дн.	657
Средневзвешенная продолжительность строительства сооружения, дн.	684
Максимальная продолжительность строительства сооружения, дн.	711
Вариационный размах, дн.	54
Среднее квадратическое отклонение (дисперсия), дн.	7,343
Плановая продолжительность строительства сооружения, лет	1,79
Плановая стоимость строительства сооружения, тыс. руб.	71056,68
Сметная прибыль, тыс. руб.	4678,629
Минимальная продолжительность строительства сооружения, лет	1,8
Соответствующая стоимость строительства сооружения, тыс. руб.	71086,95
Соответствующая прибыль строительной организации, тыс. руб.	4648,3542
Средневзвешенная продолжительность строительства сооружения, лет	1,87
Соответствующая стоимость строительства сооружения, тыс. руб.	71251,435
Соответствующая прибыль строительной организации, тыс. руб.	4483,870
Максимальная продолжительность строительства сооружения, лет	1,95
Соответствующая стоимость строительства сооружения, тыс. руб.	71413,917
Соответствующая прибыль строительной организации, тыс. руб.	4321,387
Вариационный размах продолжительности строительства, лет	0,14795
Среднее квадратическое отклонение продолжительности строительства, лет	0,02012

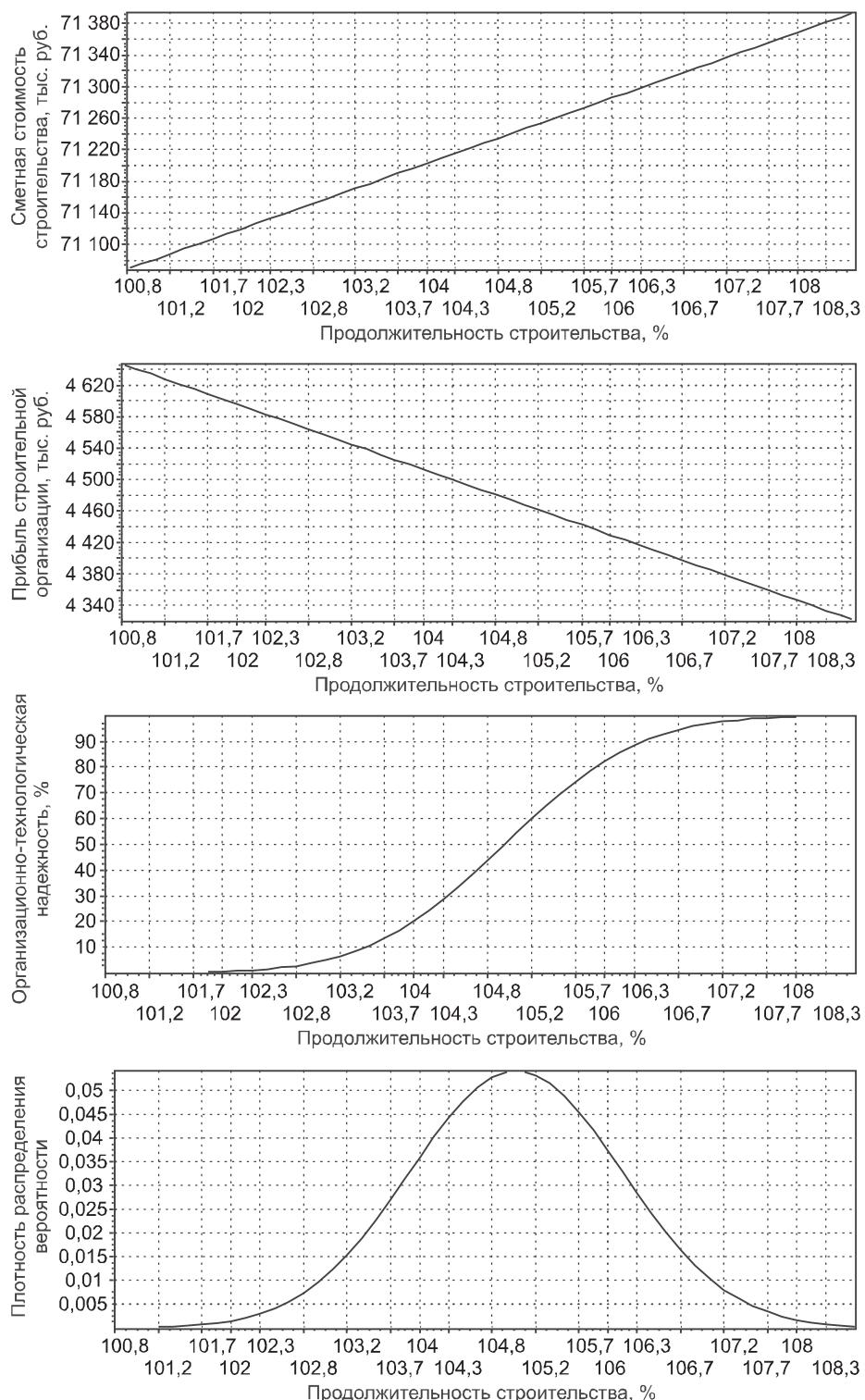


Рис. 2. Зависимости стоимости строительства, прибыли строительной организации, организационно-технологической надежности и вероятности от относительной продолжительности строительства при максимальном увеличении продолжительности строительных процессов на 10 %

Проведенные исследования показали, что во всех выборках с максимальным отклонением 10 % продолжительности строительных процессов оптимальная последовательность строительства объектов не меняется.

С помощью имитационной модели потока авторами проанализировано влияние увеличения времени выполнения отдельных работ на общую продолжительность строительства объекта в целом, на изменение сметной стоимости строительства, прибыли строительной организации с учетом организационно-технологической надежности строительства (см. табл. 6). Для этой цели с помощью датчика случайных чисел рассмотрено 100 тыс. возможных вариантов потока. В качестве примера рассматривалось строительство приведенных выше объектов в г. Новосибирске. Результаты расчетов стоимости строительства, прибыли строительной организации, организационно-технологической надежности и вероятности от относительной продолжительности строительства при максимальном увеличении продолжительности строительных процессов на 10 % приведены на рис. 2.

Предлагаемая модель обоснования очередности строительства объектов является универсальной, она применима как для транспортного, так и для промышленного и гражданского строительства. В настоящее время программное обеспечение внедрено в учебный процесс в СГУПСе и используется при оценке организационно-технологической надежности календарного планирования в строительно-монтажном тресте № 12 ОАО «РЖД».

**Вывод.** Предлагаемая модель обоснования очередности строительства объектов позволяет при известных объемах работ по данным натурных испытаний строительных процессов или натурных испытаний работы машин с большей надежностью определять продолжительность строительства. Модель является универсальной, она применима как для транспортного, так и для промышленного и гражданского строительства. Использование модели позволит с заданной надежностью рассчитать время строительства объектов, повысить эффективность использования машин за счет их ритмичной и бесперебойной работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев, В.А. Поточная организация строительства [Текст] / В.А. Афанасьев. — Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. — 302 с.
2. Афанасьев, В.А. Поточная организация работ в строительстве: учеб. пособие [Текст] / В.А. Афанасьев, А.В. Афанасьев. — СПб. : СПбГАСУ, 2000. — 152 с.
3. Сироткин, Н.А. Оценка обоснованности очередности строительства объектов методом имитационного моделирования [Текст] / Н.А. Сироткин, С.М. Кузнецов // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 1. — С. 81–86.
4. Сироткин, Н.А. Оптимизация продолжительности строительства объектов [Текст] / Н.А. Сироткин, С.М. Кузнецов, В.П. Перцев // Транспортное строительство. — 2007. — № 5. — С. 16–17.
5. Кузнецов, С.М. Обработка результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С.М. Кузнецов, К.С. Кузнецова // Экономика ж. д. — 2010. — № 7. — С. 88–99.
6. Кузнецов, С.М. Совершенствование обработки результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С.М. Кузнецов // Экономика ж. д. — 2013. — № 7. — С. 90–97.
7. Markowitz, Harry M. Portfolio Selection [Текст] / Harry M. Markowitz // The Journal of Finance. — 1952. — Vol. 7, N 1. — P. 77–91.

8. Кузнецов, С.М. Автоматизация формирования портфеля ценных бумаг [Текст] / С.М. Кузнецов, К.С. Кузнецова, Н.А. Сироткин // Экономика ж. д. — 2006. — № 9. — С. 73–77.
9. Гусаков, А.А. Организационно-технологическая надежность строительного производства (в условиях автоматизированных систем проектирования) [Текст] / А.А. Гусаков. — М. : Стройиздат, 1974. — 252 с.
10. Кузнецов, С.М. Оценка организационно-технологической надежности строительства [Текст] / С.М. Кузнецов, Н.А. Сироткин, О.А. Легостаева, С.Н. Ячменьев // Экономика ж. д. — 2006. — № 3. — С. 77–83.
11. Кузнецов, С.М. Обоснование риска продолжительности строительства объектов [Текст] / С.М. Кузнецов, Н.В. Холомеева, С.Э. Ольховиков // Научно-исследовательские публикации. — Воронеж. — 2014. — № 3 (7). — С. 23–31.
12. Сироткин, Н.А. Имитационная модель обоснования очередности строительства объектов [Текст] / Н.А. Сироткин, С.М. Кузнецов, С.Н. Ячменьев // Путь и путевое хозяйство. — 2007. — № 10. — С. 30–31.

*КУЗНЕЦОВ Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ksm56@yandex.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
НЕМЧИКОВА Лариса Александровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: lara\_1963@bk.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 19.08.14

**Kuznetsov Sergey Mikhaylovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ksm56@yandex.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Nemchikova Larisa Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: lara\_1963@bk.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## RATIONALE THE SEQUENCE OF CONSTRUCTION OF OBJECTS

Based on the software «Potok» justified model of the sequence of construction of objects, which allows greater reliability to determine the duration of construction of buildings and structures. The model increases efficiency of work teams and using machines.

**Key words:** software, optimal variant, sequence and cyclogram of construction of objects, the base of results of field tests of processes, risk of duration of performance of processes, organizational and technological reliability of processes.

## REFERENCES

1. Afanasyev, V.A. Production organization of construction [Text] / V.A. Afanasyev. — L. : Stroyizdat. Leningrad. branch, 1990. — 302 p.
2. Afanasyev, V.A. Production organization of works in construction: the manual [Text] / V.A. Afanasyev, A.V. Afanasyev. — SPb. : SPbSUACE, 2000. — 152 p.
3. Sirotnik, N.A. Assessment of the reasonableness of the sequence of construction of objects by the method of imitation modeling [Text] / N.A. Sirotnik, S.M. Kuznetsov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 1. — P. 81–86.
4. Sirotnik, N.A. Optimization of duration of construction of objects [Text] / N.A. Sirotnik, S.M. Kuznetsov, V.P. Pertsev // Transport construction. — 2007. — N 5. — P. 16–17.
5. Kuznetsov, S.M. Processing of the results of field tests with the technical and tariff regulation [Text] / S.M. Kuznetsov, K.S. Kuznetsova // Economy zh. d. — 2010. — N 7. — P. 88–99.

6. Kuznetsov, S.M. Improvement of processing the results of field tests with the technical and tariff regulation [Text] / S.M. Kuznetsov // Economy zh. d. — 2013. — N 7. — P. 90–97.
  7. Markowitz, Harry M. Portfolio Selection [Text] / Harry M. Markowitz // The Journal of Finance. — 1952. — Vol. 7, N 1. — P. 77–91.
  8. Kuznetsov, S.M. Automation of formation of securities portfolio [Text] / S.M. Kuznetsov, K.S. Kuznetsova, N.A. Sirokin // Economy zh. d. — 2006. — N 9. — P. 73–77.
  9. Gusakov, A.A. Organizational-technological reliability of construction production (in the conditions of the automated systems of design) [Text] / A.A. Gusakov. — M. : Stroyizdat, 1974. — 252 p.
  10. Kuznetsov, S.M. Assessment of organizational and technological reliability of construction [Text] / S.M. Kuznetsov, N.A. Sirokin, O.A. Legostaeva, S.N. Yachmenkov // Economy zh. d. — 2006. — N 3. — P. 77–83.
  11. Kuznetsov, S.M. Justification of risk of duration of construction of facilities [Text] / S.M. Kuznetsov, N.V. Holomeeva, S.E. Olkhovikov // Research publications. — Voronezh. — 2014. — N 3 (7). — P. 23–31.
  12. Sirokin, N.A. Simulation model to study the sequence of construction of objects [Text] / N.A. Sirokin, S.M. Kuznetsov, S.N. Yachmenkov // Path and track facilities. — 2007. — N 10. — P. 30–31.
-

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.8.09

М.И. БАЛЬЗАННИКОВ, М.В. РОДИОНОВ, Н.Э. МЕЛИК-ПАШАЕВА

### ИССЛЕДОВАНИЯ НАКАТА ВЕТРОВЫХ ВОЛН НА НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рассматриваются конструкции берегоукрепительных устройств, используемых для защиты откосов гидротехнических сооружений и склонов рек от разрушающего воздействия ветровых волн. Приводятся результаты модельных исследований новых конструкций берегоукрепительных сооружений: габионных матрацев и бетононаполняемых текстильных матов. Анализируются полученные данные о параметрах наката ветровых волн на эти устройства и коэффициентах их шероховатости.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, берегоукрепление, модельные исследования, габионы, бетононаполняемые текстильные маты.

Элементы природного ландшафта и антропогенные сооружения, непосредственно взаимодействующие с водным объектом, подвергаются постоянному воздействию воды, которое неизбежно приводит их к постепенному разрушению и переходу в новое качественное состояние. Среди таких воздействий можно выделить следующие наиболее существенные: 1) подъем уровня воды в период половодья, 2) гидростатическое давление воды, 3) повышение уровня грунтовых вод, 4) размывы береговых откосов потоком воды, 5) воздействие ветровых волн.

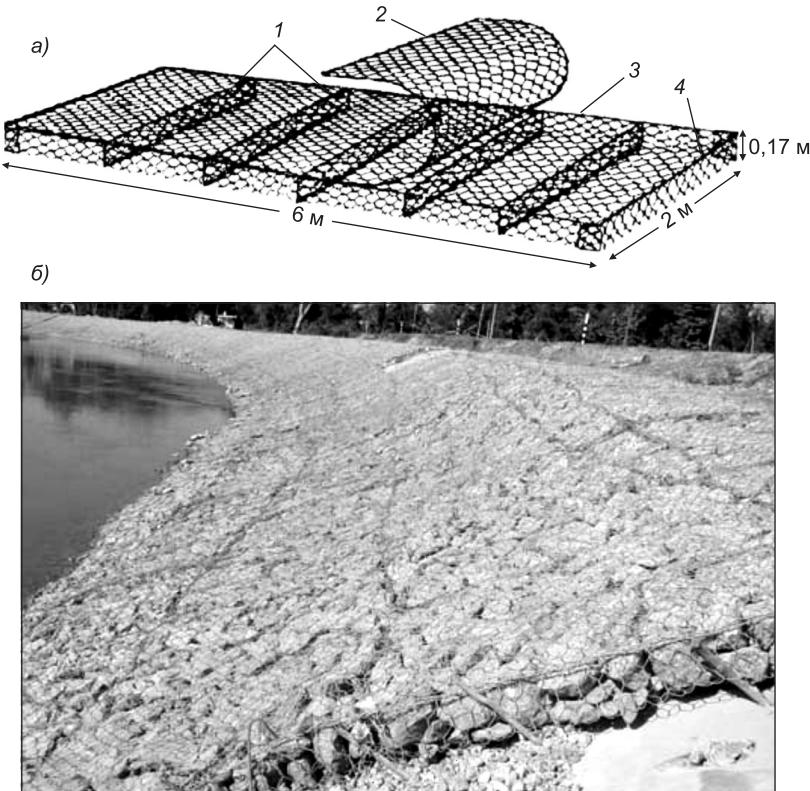
Для минимизации ущербов названных факторов воздействия реализуются различные организационные и технические мероприятия. Так, с целью уменьшения негативных последствий от подъема уровня воды в период половодья применяют различного типа защитные дамбы [1], а для предотвращения разрушения подпорных гидротехнических сооружений гидростатическим давлением и обеспечения их эксплуатационной надежности — современные организационные мероприятия [2, 3], эффективные конструктивные [4, 5] и технологические решения [6].

Опасность воздействия ветровых волн на откос подпорного гидротехнического сооружения из грунтовых материалов или береговой склон реки заключается в том, что может явиться причиной потери целостности объекта и его разрушения [7]. Для защиты откосов различных грунтовых гидротехнических сооружений и берегов рек от разрушающего воздействия ветровых волн, согласно нормативной документации (СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» и СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения»), рекомендуется применение следующих типов крепления: каменные (насыпные), бетонные монолитные, железобетонные сборные и монолитные; биологические и др.

В настоящее время в нашей стране все большее распространение получают такие типы берегоукрепительных сооружений откосного профиля, как габионные матрацы и бетонозаполняемые текстильные маты [4, 5].

---

© Бальзанников М.И., Родионов М.В., Мелик-Пашаева Н.Э., 2014



*Рис. 1. Крепление откосов габионными матрацами*  
*а — схема конструкции; б — пример укладки на береговой откос; 1 — диафрагма,*  
*2—4 — верхняя, боковая и нижняя панели соответственно*

Габионные матрацы обычно изготавливаются в заводских условиях в виде плоскостных конструкций небольшой высоты, но значительной площади. Выполняют эти элементы из металлической сетки с ячейками в виде шестиугольников и с разделением на секции (рис. 1). При этом для обеспечения целостности и прочности элемента, а также для предотвращения раскручивания в случае разрыва сетки часто применяют ее двойное скручивание. Для заполнения матрацев используется камень фракции 125–200 мм. В связи с наличием металлической сетки относительная шероховатость поверхности матов отличается от шероховатости каменной наброски той же фракции.

Бетонозаполняемые маты представляют собой текстильную опалубку, состоящую из двух соединенных между собой высокопрочными тканых материалов (рис. 2). Благодаря варьированию длиной распорок их можно выполнять различной общей толщины. Внутреннее пространство мата заполняют бетонным раствором с помощью насосного оборудования. Толщина таких заполненных матов варьируется в пределах от 7 до 60 см. В зависимости от выбранного типа они могут быть водопроницаемыми или водонепроницаемыми, гибкими или жесткими, переменной или постоянной толщины. Гибкая текстильная опалубка после заполнения бетоном не позволяет создавать прямолинейных форм берегоукрепительных конструкций, что повышает их относительную шероховатость в сравнении с шероховатостью традиционных железобетонных плит.

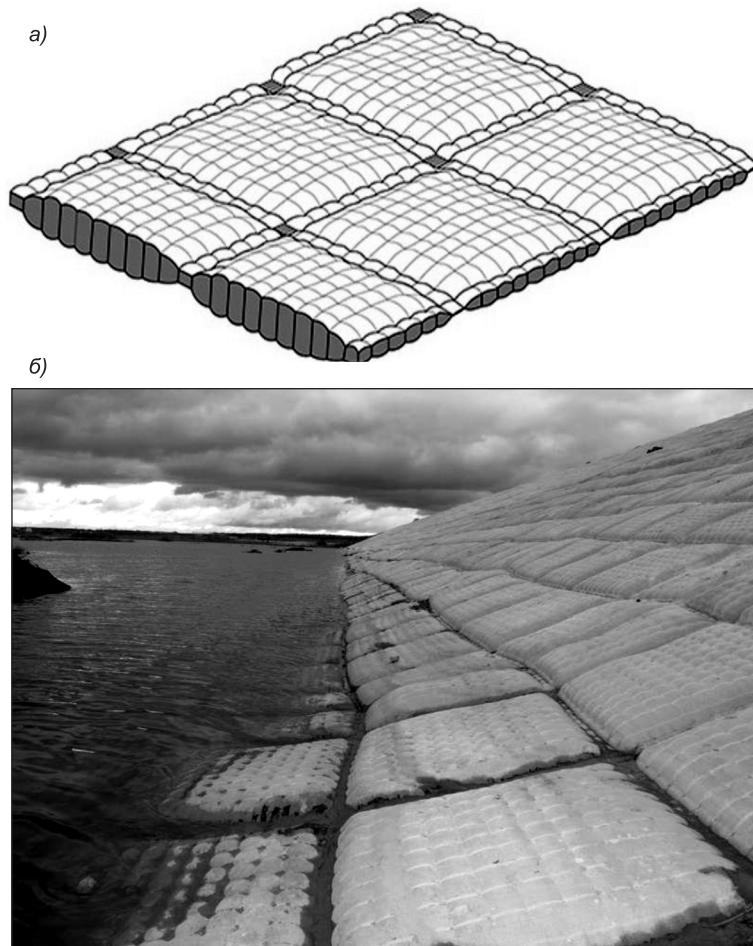


Рис. 2. Крепление откосов бетононаполняемыми текстильными матами  
а — схема конструкции; б — пример крепления берегового откоса

Принципы проектирования, строительства и эксплуатации данных типов берегоукрепительных сооружений недостаточно полно отображены в нормативной документации. Одним из параметров, значительно влияющих на надежность и экономичность берегоукрепления, является назначение отметки верха крепления откоса. Данный параметр определяется величиной наката волны, которая зависит от шероховатости откоса. Значения коэффициента шероховатости в литературе (СП 38.133302011 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)») приведены для крепления откосов каменной наброской, бетонными плитами и блоками, в связи с чем не могут быть корректно применимы для новых типов конструкций берегоукрепления. Сложившаяся ситуация не позволяет точно назначить отметку верха новых типов крепления откосов и, как следствие, получить максимальный экономический эффект при сохранении надежности сооружения. Таким образом, исследования шероховатости новых типов конструкций берегоукрепления, на наш взгляд, являются весьма актуальными.

Для оценки величины наката волн на различные типы конструкций берегоукрепления были проведены модельные исследования с использо-

ванием экспериментальной установки лаборатории кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарского государственного архитектурно-строительного университета [8]. Основные элементы установки: успокоительный бак, проточная часть (гидравлический лоток), модель конструкции берегоукрепления откосного профиля, мерный бак и накопительный бак.

Успокоительный бак представляет собой металлический резервуар прямоугольной формы высотой 0,6 м, шириной 0,6 м и длиной 1,2 м. В успокоительном баке установлены гасящая решетка, а также направляющие стенки, обеспечивающие плавное сужение потока воды, входящего в проточную часть. Проточная часть выполнена в виде гидравлического лотка с передней прозрачной стенкой из оргстекла. Основные размеры гидравлического лотка позволяли размещать различные варианты исследуемых моделей конструкции берегоукрепления откосного профиля и имели следующие значения: длина 5,6 м, ширина 0,23 м, высота 0,9 м и 0,5 м. Для регулирования уровня воды в нижнем бьефе в проточной части был установлен поворотный затвор, а для наблюдения за глубиной воды — пьезометр. Из проточной части вода через водосбросное отверстие сбрасывается в мерный бак. Мерный бак выполнен из металла квадратной формы с размерами сторон 1,2 м и оборудован мерным пьезометром. Вода на экспериментальную установку подавалась центробежным насосом из накопительного бака по трубопроводу, оборудованному задвижкой. Для моделирования волновых явлений использовался волнопродуктор, представляющий собой закрепленный шарнирно у дна, поворачивающийся металлический щит.

В ходе экспериментов в лотке устанавливались модели различных типов конструкций берегоукрепления откосного типа с коэффициентом заложения, равным трем. С помощью волнопродуктора для каждой модели создавались волны постоянной величины.

Исследовались следующие модели берегоукрепительных конструкций. Модель № 1 — моделировала откос, защищенный бетонными плитами (рис. 3, а), изготавливавшаяся из листа фанеры с поверхностью, покрытой лаком для соблюдения геометрического подобия ее шероховатости. Модель № 2 — представляла каменную наброску (рис. 3, б). Выполнялась из гравия со средним размером 5 мм, отсыпаемого толщиной 30 мм на фанерном листе. Модель № 3 — моделировала габионные матрацы (рис. 3, в). Для ее изготовления использовались металлическая сетка Streck с размером ячеек 10 × 10 мм и гравий со средним размером 5 мм. Модель № 4 — для моделирования бетононаполняемых текстильных мат (рис. 3, г). Для соблюдения геометрического подобия шероховатости поверхность модели, выполненной из гипса, покрывалась краской.

Коэффициент шероховатости крепления оценивался путем определения разницы величины наката волн на различные конструктивные типы крепления в сравнении с моделью крепления откоса бетонными плитами. Для последней коэффициент шероховатости, согласно нормативной литературе (СП 38.133302011 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)»), был принят равным единице.



Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице. При этом для определения относительной величины наката было принято отношение высоты волны к высоте наката волны на откос.

Анализ полученных результатов показывает, что наличие металлической сетки поверх каменного крепления приводит к увеличению коэффициента шероховатости, а бетононаполняемые маты имеют более низкий коэффициент шероховатости в сравнении с бетонными плитами.

#### Экспериментальные данные о коэффициенте шероховатости

№ п/п	Модель	Относительная величина наката	Опытный коэффициент шероховатости
1	Бетонные плиты	1,68	1
2	Бетононаполняемые текстильные маты	1,36	0,91
3	Габионные матрасы	0,98	0,76
4	Каменная наброска	0,79	0,71

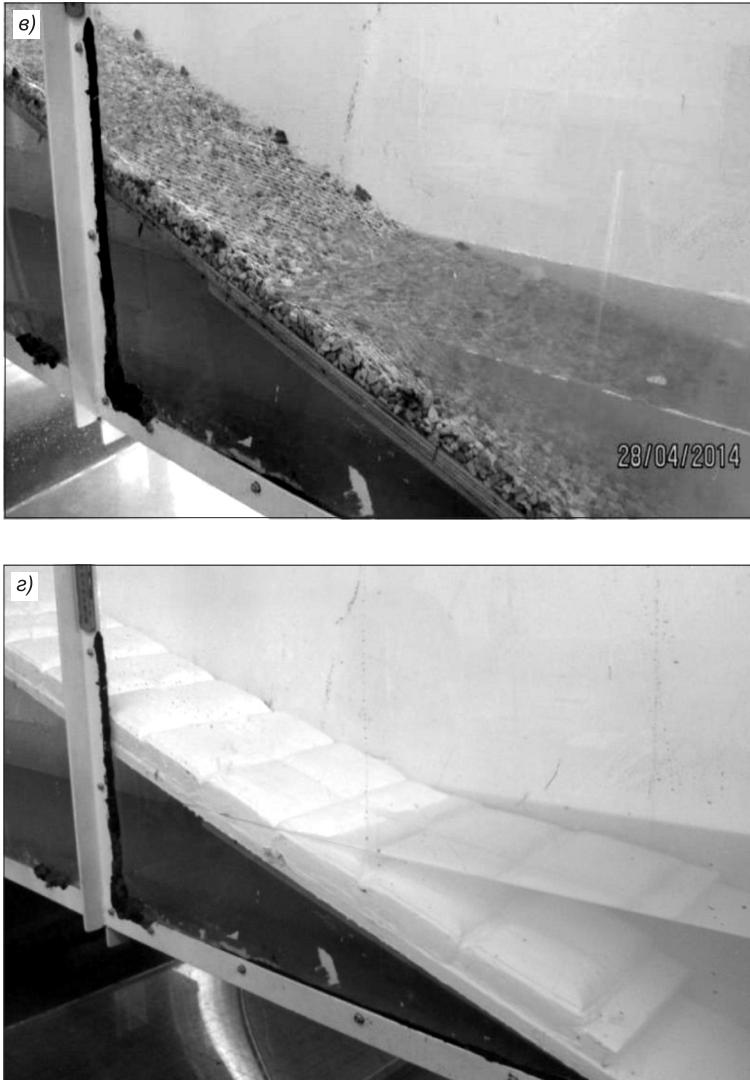


Рис. 3. Модели берегоукрепительных конструкций

а — бетонные плиты; б — каменная наброска; в — габионные матрасы;  
г — бетононаполняемые текстильные маты

Таким образом, на основании полученных данных можно заключить, что учет фактических значений коэффициента шероховатости новых типов конструкций берегоукрепительных сооружений повышает их экономическую эффективность за счет обеспечения возможности снижения отметки верха крепления откоса и, как следствие, уменьшения объемов строительных работ.

**Выводы.** 1. В настоящее время для уменьшения разрушающего воздействия ветровых волн на откос грунтового гидротехнического сооружения или береговой склон реки все большее распространение получают новые типы конструкций берегоукрепительных сооружений откосного профиля, в частности, габионные матрасы, бетонозаполняемые текстильные маты и гибкие бетонные маты. Данных о параметрах наката волн на такие устройства в справочной и нормативной литературе не приводится, что затрудняет выполнение расчетов и обоснованное назначение их

геометрических параметров. В связи с этим необходимы экспериментальные исследования для выявления их свойств.

2. Выполнены экспериментальные исследования физических моделей новых типов конструкции берегоукрепительных сооружений: габионных матрацев и бетононаполняемых текстильных матов. Результаты исследований позволили получить данные о коэффициентах шероховатости этих устройств. Выявлено, что наличие металлической сетки, используемой поверх каменного крепления, повышает коэффициент шероховатости поверхности берегоукрепительного сооружения по сравнению с поверхностью из каменной наброски. Применение же криволинейных бетононаполняемых текстильных матов снижает значение коэффициента шероховатости по сравнению с поверхностью из бетонных плит.

3. Учет фактических значений коэффициентов шероховатости берегоукрепительных конструкций из габионных матрацев и бетононаполняемых текстильных матов позволит более обоснованно определить параметры крепления откоса и тем самым снизить стоимость строительных работ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б а л ь з а н н и к о в , М.И. Противопаводковый защитный контур жилого района [Текст] / М.И. Бальзанников, В.В. Кругликов, А.А. Михасек // Вестн. СГАСУ. Градостроительство и архитектура. — 2013. — № 2. — С. 69–74.
2. Е в д о к и м о в , С.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений [Текст] / С.В. Евдокимов, Т.В. Дормидонтова // Вестн. СГАСУ. Градостроительство и архитектура. — 2012. — № 1. — С. 49–53.
3. Б а л ь з а н н и к о в , М.И. Повышение экологической безопасности эксплуатируемых грунтовых гидротехнических сооружений [Текст] / М.И. Бальзанников, М.В. Родионов, В.А. Селивёрстов // Вестн. СГАСУ. Градостроительство и архитектура. — 2011. — № 1. — С. 100–105.
4. Б а л ь з а н н и к о в , М.И. Повышение эксплуатационной надежности низконапорных гидротехнических объектов с грунтовыми плотинами [Текст] / М.И. Бальзанников, М.В. Родионов, Ю.Э. Сеницкий // Приволжский научный журнал. — 2012. — № 2. — С. 35–40.
5. Balzannikov, M.I. Extending the operating life of low embankment dams in Russia [Текст] / M.I. Balzannikov, M.V. Rodionov // International journal on Hydropower and Dams. — 2013. — № 6. — P. 60–63.
6. Rodionov, M. Experience of construction of earth structures with the application of geosynthetics in difficult climatic conditions [Текст] / M. Rodionov // The 2nd international conference on geotechnics for sustainable development GEOTEC HANOI 2013. 28-29 November. — Hanoi, Vietnam, 2013. — P. 399–402.
7. Balzannikov, M.I. The Causes of Large Plains River Shoreand Collapse Research and Measures to Prevent It [Текст] / M.I. Balzannikov, Yu.M. Galitskova // Eastern European Scientific Journal (Gesellschaftswissenschaften). — Düsseldorf (Germany) : Auris Verlag, 2013. — № 6. — P. 28–32.
8. Б а л ь з а н н и к о в , М.И. Результаты исследования грунтовой переливной плотины со ступенчато-криволинейным низовым откосом [Текст] / М.И. Бальзанников, М.В. Родионов // Вестн. МГСУ. — 2012. — № 2. — С. 70–76.

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

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

**РОДИОНОВ Максим Владимирович, канд. техн. наук, доц.**

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

**МЕЛИК-ПАШАЕВА Наталья Эрнестовна, магистрант**

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 29.08.14

**Balzannikov Mikhail Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering (SGASU), Russia

**Rodionov Maksim Vladimirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering (SGASU), Russia

**Melik-Pashaeva Nataliya Ernestovna**, master's degree student, Samara State University of Architecture and Civil Engineering (SGASU), Russia

## **RESEARCH OF WIND WAVE ONSET ON NEW DESIGN HYDRAULIC BANK PROTECTING STRUCTURES**

The bank protecting facilities used to protect the slopes of hydraulic structures and slopes of rivers from the damaging effect of wind waves are considered. The results of model study of new design bank protecting structures: gabion mattresses and concrete-filled textile mats are given. The obtained parameters of wind wave onset on these facilities and their coefficient of roughness are analyzed.

**Key words:** hydraulic structures, bank protection, model study, gabions, concrete-filled textile mats.

### **REFERENCES**

1. Balzannikov, M.I. Protivopavodkovyyi zaschitnyiy kontur zhilogo rayona [Flood Protection Circuit of a Residential Area] [Text] / M.I. Balzannikov, V.V. Kruglikov, A.A. Mikhasek // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arhitektura. — 2013. — N 2. — P. 69–74.
2. Evdokimov, S.V. Otsenka nadezhnosti gidrotehnicheskikh sooruzheniy [Evaluation of Reliability of Hydraulic Structures] [Text] / S.V. Evdokimov, T.V. Dormidontova // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arhitektura. — 2012. — N 1. — P. 49–53.
3. Balzannikov, M.I. Povyishenie ekologicheskoy bezopasnosti ekspluatiruemiyh gruntovyih gidrotehnicheskikh sooruzheniy [How to Further Environment Safety at Exploited Groundwater Hydraulic Structures] [Text] / M.I. Balzannikov, M.V. Rodionov, V.A. Seliverstov // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arhitektura. — 2011. — N 1. — P. 100–105.
4. Balzannikov, M.I. Povyishenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti nizkonaporniyh gidrotehnicheskikh ob'ektorov s gruntovyimi plotinami [Operating Reliability Enhancement of Low Pressure Hydraulic Structures With Earth Dams] [Text] / M.I. Balzannikov, M.V. Rodionov, Yu.E. Senitskiy // Privilzhskiy nauchnyiy zhurnal. — 2012. — N 2. — P. 35–40.
5. Balzannikov, M.I. Uvelichenie sroka ekspluatatsii nizkonaporniyh gruntovyih plotin v Rossii [Extending the operating life of low embankment dams in Russia] [Text] / M.I. Balzannikov, M.V. Rodionov // International journal on Hydropower and Dams. — 2013. — N 6. — P. 60–63.
6. Rodionov, M. Opyit stroitelstva gruntovyih sooruzheniy s primeneniem geosinteticheskikh materialov v slozhnyih klimaticheskikh usloviyah [Experience of construction of earth structures with the application of geosynthetics in difficult climatic conditions] [Text] / M. Rodionov // The 2nd international conference on geotechnics for sustainable development GEOTEC HANOI 2013. 28-29 November. — Hanoi, Vietnam, 2013. — P. 399–402.
7. Balzannikov, M.I. Issledovaniya prichin obrusheniy berega krupnoy ravninnoy reki i meropriyatiya po ikh predotvrascheniyu [The Causes of Large Plains River Shoreand Collapse Research and Measures to Prevent It] [Text] / M.I. Balzannikov, Yu.M. Galitskova // Eastern European Scientific Journal (Gesellschaftswissenschaften). — Düsseldorf (Germany) : Auris Verlag, 2013. — N 6. — P. 28–32.
8. Balzannikov, M.I. Rezul'taty issledovaniya gruntovoy perelivnoy plotiny so stupenchato-krivolineynym nizovym otkosom [Research Findings of a Groundwater Overflow Dam With Step-curved Lower Slope] [Text] / M.I. Balzannikov, M.V. Rodionov // Vestnik MGSU. — 2012. — N 2. — P. 70–76.

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.511:533.6

К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА, Е.И. ТОЛМАЧЕВА

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СПЕКТРЕ ДЕЙСТВИЯ КРУГЛОГО МЕСТНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ОТСОСА-РАСТРУБА\*

#### Сообщение 1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА

Обсуждаются критерии эффективности местного вентиляционного отсоса-раструба. С использованием стационарных дискретных вихревых колец строится метод математического моделирования отрывного течения на входе в круглый отсос-раструб.

**Ключевые слова:** местный вентиляционный отсос, предельные траектории, метод дискретных вихрей.

**Введение.** Местный вентиляционный отсос-раструб является наиболее простым и распространенным элементом систем вытяжной вентиляции. Представляет интерес определение границ отрывной зоны на входе в отсос, профилирование по которым улучшит аэродинамические и акустические свойства раструба. Аналогичные исследования для щелевидного отсоса-раструба были впервые изложены в серии статей [1–3]. Здесь использовались методы теории функций комплексного переменного. Для круглых отсосов-раструбов отрывные течения исследовались с использованием метода дискретных вихрей в нестационарной постановке [4, 5]. Были получены характерные размеры вихревой области на входе в раструб (рис. 1) в фиксированный момент времени. Не было учтено, что эти размеры пульсируют с течением времени. Попытка осреднить по времени величины характерных размеров была произведена в работе [6]. Осреднение производилось путем нахождения среднеарифметического значения данной величины за 20 произвольных моментов времени. Расчет был достаточно трудоемким и в ряде случаев 20 моментов времени недостаточно для получения сходящегося к конкретной величине результата. Поэтому возникла необходимость расчета отрывной области течения в рамках стационарной модели дискретных вихрей, идея которой была впервые изложена в статье [7], а затем развита в работах [8–11]. Кроме того, представляет интерес определение таких углов раскрытия раструба и его длины, при которых местный вентиляционный отсос-раструб более эффективен.

**1. Критерии эффективности отсоса-раструба.** Существуют различные подходы к определению эффективности раструба. Одним из них является критерий неравномерности всасывания, определяемый отно-

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-41-08005р\_офи\_м) и Президента РФ (проект МК-103.2014.1).

шением скорости в центре раstrauba к средней скорости всасывания  $\eta = v_c / v_0$ . По данным [12]  $\eta = 0,95 - 0,97$  для трубы без раstrauba; для  $\alpha = 60^\circ$  —  $\eta = 1,03 \div 1,09$ ; для  $\alpha = 90^\circ$  —  $\eta = 1,65 \div 1,75$ . Исследования проводились Т.А. Фиалковской [13] и В.В. Батуриным [14]. Определялось поле скоростей в зоне всасывания зонтов квадратной и прямоугольной формы с отношением сторон 1:2, 1:3, 1:4 и при различных углах между образующими от 50° до 90° (очевидно это угол  $\alpha$  на рис. 1). О длине раstrauba сведений не приводилось. Упоминания о круглых отсосах-раstraубах также не было.

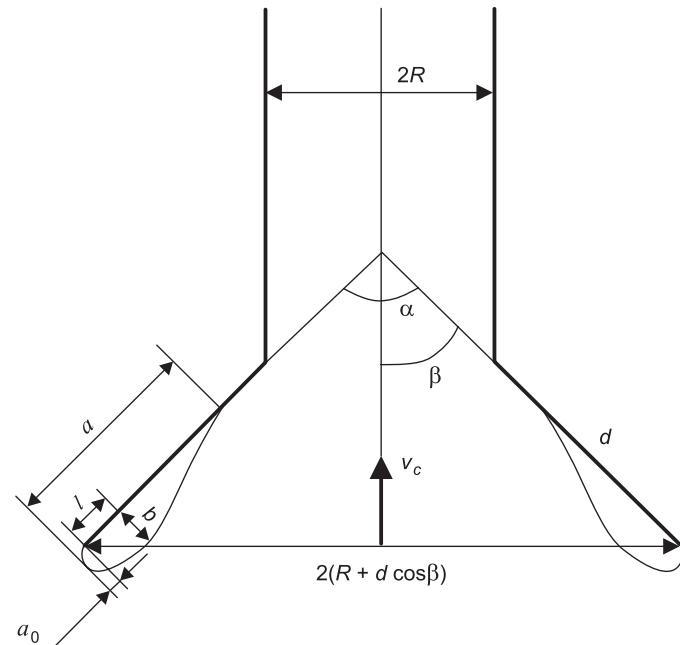


Рис. 1. Круглый местный вентиляционный отсос-раstraуб

Сделан вывод, что поскольку у зонтов с углом раскрытия  $\alpha = 60^\circ$  относительная скорость в центре отверстия зонта близка к средней скорости  $v_0$  во всасывающем отверстии (расход, разделенный на площадь), то угол при вершине зонта должен быть не более  $\alpha = 60^\circ$ . Размеры входного отверстия зонта должны быть больше размеров источника теплоты.

Далее утверждение о наиболее эффективном угле раскрытия  $\alpha = 60^\circ$  напечатано во множестве книг, например, в книге [15] указано, для того чтобы зонт работал полным воздухоприемным сечением, угол раскрытия зонта принимают, как правило, не более  $\alpha = 60^\circ$ . При больших углах фактически действует лишь центральная часть зонта, а на периферии создаются мертвые зоны.

Существуют и иные позиции. Так, в книге В.Н. Посохина [16] отмечено, что зонт следует делать с углом раскрытия  $\beta = 60^\circ$ . В этом случае размер вихревой зоны на входе в раstraуб минимален и соответственно максимален «эффективный размер» зонта. Но здесь под углом раскрытия понимается  $\beta = \alpha / 2$ . Исследования проводились с использованием метода конформных отображений [1–3] и рассматривались щелевидные отсосы-

раструбы. Таким образом, здесь в качестве критерия эффективности принималась ширина эффективного всасывания.

Другим критерием эффективности является наибольшая скорость всасывания на оси отсоса-раструба. Путем численных и аналитических исследований [17] показано, что осевая скорость достигает максимальной величины при  $\beta = \alpha / 2 = 90^\circ$ . Здесь использовались как метод конформных отображений, так и метод дискретных вихрей. Рассматривались как щелевидные, так и круглые отсосы-раструбы.

В качестве еще одного критерия эффективности отсоса-раструба можно указать его аэродинамическое сопротивление. По графикам, приведенным в [18, 19], заключаем, что наименьшим к.м.с. обладает отсос-раструб при  $\alpha = 50 - 100^\circ$  в зависимости от длины раструба. Чем меньше длина раструба, тем больше изменение к.м.с. от угла раскрытия приближается к линейному закону.

Поскольку местные вентиляционные отсосы используют не только для улавливания избытков теплоты, но и для улавливания различных видов пылей: абразивно-металлической, древесной, цемента, песка, сварочных аэрозолей и др., предлагается ввести еще один критерий эффективности: безразмерный коэффициент улавливания — отношение объема аспирации данного отсоса-раструба к объему аспирации патрубка без раструба. Объем аспирации — это объем области, находясь в которой пылевая частица с заданными геометрическими и физическими свойствами будет уловлена местным вентиляционным отсосом.

Сформулируем цель работы: разработать математическую модель и вычислительный алгоритм расчета отрывной области на входе в круглый отсос-раструб с использованием стационарных дискретных вихрей; выявить закономерности изменения параметров вихревой зоны на входе в раструб; исследовать местный отсос-раструб на эффективность с использованием предложенного критерия.

**2. Разработка математической модели и вычислительного алгоритма.** Для разработки математической модели отрывного течения на входе в круглый отсос-раструб воспользуемся дискретными бесконечно тонкими вихревыми кольцами. Границу отсоса-раструба дискретизируем набором присоединенных вихревых колец и контрольных точек (произвольных точек на окружности, охватывающей отсос-раструб). Свободная поверхность тока начинается на острой кромке раструба, для нее задается начальное приближение. Дискретная модель в меридиональной полуплоскости изображена на рис. 2. Крестиками изображены контроль-

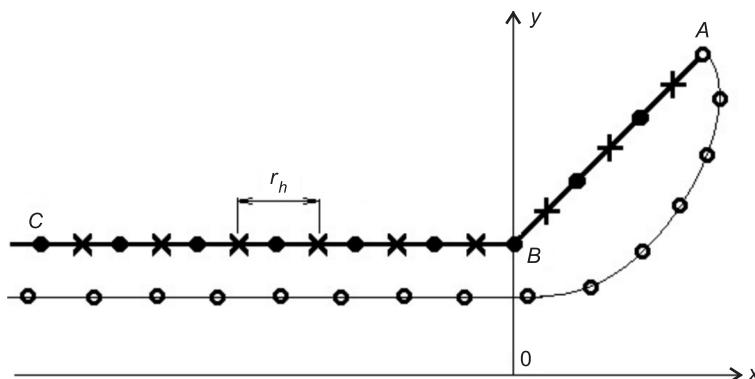


Рис. 2. Дискретная модель отрывного течения на входе в отсос-раструб

ные точки, в них выполняется условие непроницаемости — скорость вдоль направления нормали равна нулю. Закрашенные кружочки — это присоединенные кольцевые вихри. Пустые кружочки — свободные вихревые кольца.

Обозначим через  $N$  — количество присоединенных вихревых колец;  $N_s$  — количество свободных вихревых колец;  $x^p$  — контрольная точка,  $p = 1, 2, \dots, N$ .

Скорость в произвольной точке  $x$  вдоль направления  $\vec{n}$  вычисляется с помощью формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q), \quad (1)$$

где  $\xi^q$  — точка расположения  $q$ -го присоединенного вихревого кольца с циркуляцией  $\Gamma(\xi^q)$ ;

$\gamma = \text{const}$  — заданная циркуляция свободного вихревого кольца;

$\zeta^q$  — точка расположения  $q$ -го свободного вихревого кольца.

Функция  $G(x, \xi)$  выражает собой влияние на точку  $x$  вихревого кольца с единичной циркуляцией, расположенного в точке  $\xi$ :

$$\begin{cases} G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a - b)\sqrt{a + b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a + b}} F(t) & \text{при } b \neq 0, \\ G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2a\sqrt{a}} & \text{при } b = 0, \end{cases}$$

$2x_2\xi_2 = b > 0$ ,  $a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0$ ,  $A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}$ ,  $A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1]$ ,  $F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - t^2 \sin^2 \theta}}$ ,  $E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - t^2 \sin^2 \theta} d\theta$  — полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода;

$$t = \frac{2b}{a+b}; \quad F(t) = \sum_{i=0}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=0}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t};$$

$$E(t) = 1 + \sum_{i=1}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=1}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t};$$

$c_i$ ,  $d_i$  взяты из таблиц [20].

Если расстояние от точки  $x$  до точки  $\xi$  меньше шага дискретности  $r_h$ , то данная функция вычисляется по формуле

$$G(x, \xi) = \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{2\pi r_h^2},$$

где  $r_h$  — шаг дискретности (расстояние между соседними вихревыми кольцами).

В случае  $x = \xi$  функция  $G(x, \xi) = 0$ .

Вычислительный алгоритм строится следующим образом. После задания точек расположения присоединенных вихрей и начального приближения для свободных вихрей формируется матрица

$$G^{pq} = G(x^p, \xi^q); \quad p=1, 2, \dots, N; \quad q=1, 2, \dots, N.$$

Далее начинается первая итерация.

Формируется столбец свободных членов:

$$v^p = -\gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^q), \quad p=1, 2, \dots, N.$$

Решается система линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{q=1}^N \Gamma^q G^{pq} = v^p, \quad p=1, 2, 3, \dots, N,$$

откуда определяются неизвестные  $\Gamma^q = \Gamma(\xi^q)$ .

Строится свободная линия тока начиная с острой кромки  $A$ . С использованием формулы (1) при  $\vec{n} = \{1, 0\}$  вычисляется составляющая скорости  $v_x$ , при  $\vec{n} = \{0, 1\}$  вычисляется составляющая скорости  $v_y$ . Последующая точка  $(x', y')$  определяется из предыдущей  $(x, y)$  с использованием формул:

$$x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad y' = y + \Delta t v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

где  $\Delta t$  — шаг, который выбирается достаточно малым.

В случае приближения свободной поверхности тока к растробу на величину меньшую шага дискретности считается, что первая отрывная область замыкается (поверхность тока налипает на стенки растроба) и начинает строиться вторая отрывная область начиная с точки  $(-r_h \cos \beta, R - r_h \sin \beta)$ .

Свободная поверхность тока будет состоять из свободных вихревых колец, удаленных друг от друга на расстояние шага дискретности  $r_h$ . То есть в процессе вычислений на каждом этапе проверяется расстояние до предыдущего свободного вихревого кольца. Как только в некоторой точке это расстояние становится равным с точностью до малой погрешности шагу дискретности, то в эту точку помещается следующее вихревое кольцо. Построение продолжается до сечения, когда дискретная модель стенок патрубка прерывается.

На этом первая итерация заканчивается. Заметим, что  $N_s$  может измениться. Также задаются новые значения элементов массива расположения свободных вихревых колец, который будет использоваться на следующей итерации.

Итерационный процесс заканчивается, если положение свободной поверхности тока в заданной внутри патрубка точке перестает изменяться с точностью до заданной погрешности. Либо можно задать фиксированное количество итераций, уточняющее положение свободной поверхности тока.

После находятся параметры отрывной области течения.

Параметр  $b$  определялся с использованием формулы расстояния от точки  $(x, y)$  до прямой  $x \sin \beta - y \cos \beta + B \cos \beta = 0$ , на которой расположен

раструб. Задавалась начальная точка построения ( $d\cos\beta, R + d\sin\beta$ ), начиная с которой строится линия тока. На каждом шаге построения линии тока вычислялось расстояние

$$b = |x\sin\beta - y\cos\beta + R\cos\beta|. \quad (2)$$

Как только  $|x\sin\beta - y\cos\beta + R\cos\beta| > b$ , вычисленного на предыдущем этапе, производилось переприсвоение этой величины по формуле (2) и запоминались координаты данной точки ( $x_{\max}, y_{\max}$ ). Расчет велся до тех пор пока линия тока достигала сечения патрубка. Параметр  $l$  определялся из формулы:

$$l = \sqrt{(x_{\max} - d\cos\beta)^2 + (y_{\max} - d\sin\beta - R)^2}.$$

Параметр  $a_0$  также определяется путем построения линии тока начиная с точки ( $d\cos\beta, R + d\sin\beta$ ). Здесь на каждом шаге построения линии тока используется формула

$$a_0 = |x\cos\beta + y\sin\beta - d - R\sin\beta|, \quad (3)$$

выражающая расстояние от точки до прямой  $x\cos\beta + y\sin\beta - d - R\sin\beta = 0$ , проходящей перпендикулярно раструбу через его острую кромку  $A$ . Как только  $|x\cos\beta + y\sin\beta - d - R\sin\beta| > a_0$ , найденного на предыдущем шаге, происходит переприсвоение этой величины с использованием формулы (3).

Радиус эффективного всасывания  $R_e$  определяется путем построения линии тока начиная с точки ( $d\cos\beta, R + d\sin\beta$ ). Цикл выполняется до тех пор пока  $x > d\cos\beta$ . При выходе из цикла определяется  $R_e = y$ , где  $y$  — это ордината последней, вычисленной точки линии тока.

Длина  $a$  первой вихревой области определяется также при построении линии тока начиная с острой кромки раструба. На каждом шаге вычисляется расстояние  $|x\sin\beta - y\cos\beta + R\cos\beta|$  до раструба. Как только оно становится меньше шага дискретности, расчет прекращается и вычисляется значение искомого параметра с помощью формулы (3), где вместо  $a_0$  следует подставить  $a - a_0$ .

Средняя эффективная скорость всасывания определялась из выражения

$$v_e = \frac{\pi \sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{\pi R_e^2}, \quad (4)$$

здесь  $v_{xi}$  — скорость в точке  $x = d\cos\beta$ ;  $y_i = y_{i-1} + h$ , где  $y_0 = 0$ ;  $y_N = R_e$ . В расчетах  $h = 0,0001$ . Суммирование в числителе (4) производилось до тех пор пока  $|y_i - R_e| > 0,0001$ .

Средняя скорость внутри трубы определялась из выражения

$$v_0 = \frac{\pi \sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{\pi R^2}, \quad (5)$$

здесь  $v_{xi}$  — скорость в точке  $x = -5R$ ;  $y_i = y_{i-1} + h$ , где  $y_0 = 0$ ;  $y_N = R$ ,  $h = 0,0001$ . Суммирование в числителе (5) производилось до тех пор пока  $|y_i - R| > 0,0001$ .

Средняя скорость на входе в раструб рассчитывалась с использованием следующей формулы:

$$v_p = \frac{\sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{(R + d\sin\beta)^2}, \quad (6)$$

здесь  $v_{xi}$  — скорость в точках  $x = d\cos\beta$ ;  $y_i = y_{i-1} + h$ , где  $y_0 = 0$ ;  $y_N = R + d\sin\beta$ ,  $h = 0,0001$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пosoхин, В.Н. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба [Текст] / В.Н. Пosoхин, Н.Б. Салимов, К.И. Логачев, А.М. Живов // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 8. — С. 70–76.
2. Пosoхин, В.Н. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба [Текст] / В.Н. Пosoхин, Н.Б. Салимов, К.И. Логачев, А.М. Живов // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 9. — С. 80–85.
3. Пosoхин, В.Н. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба [Текст] / В.Н. Пosoхин, Н.Б. Салимов, К.И. Логачев, А.М. Живов // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 10. — С. 81–85.
4. Логачев, К.И. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей [Текст] / К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Н. Пosoхин // Изв. вузов. Проблемы энергетики. — 2004. — № 7–8. — С. 61–69.
5. Логачев, К.И. Геометрические характеристики течений на входе в отсосы, выполненные в виде зонтов [Текст] / К.И. Логачев, В.Н. Пosoхин, А.И. Пузанок // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. — 2005. — № 1. — С. 12–14.
6. Аверкова, О.А. Усредненные характеристики вихревых областей на входе в круглый сток-раструб [Текст] / О.А. Аверкова, А.Э. Канар, Е.И. Толмачева, И.В. Ходаков // Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие. Электронное научное издание: сб. материалов Междунар. науч.-практ. интернет-конференции. ФГБОУ «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск, 2014. — С. 162–167.
7. Логачев, К.И. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка [Текст] / К.И. Логачев, В.Н. Пosoхин // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2004. — № 1. — С. 29–32.
8. Аверкова, О.А. Моделирование потенциальных течений с неизвестными границами на основе стационарных дискретных вихрей [Текст] / О.А. Аверкова, И.Н. Логачев, К.И. Логачев // Вычислительные методы и программирование. — 2011. — Т. 12, № 2. — С. 213–219.
9. Аверкова, О.А. Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы в областях с разрезами [Текст] / О.А. Аверкова, И.Н. Логачев, К.И. Логачев // Вычислительные методы и программирование. — 2012. — Т. 13, № 2. — С. 298–306.
10. Аверкова, О.А. Отрывные течения в спектрах вытяжных каналов [Текст] / О.А. Аверкова, И.Н. Логачев, К.И. Логачев. — Москва–Ижевск : ИКИ, 2012. — 288 с.
11. Логачев, И.Н. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова. — Москва–Ижевск : РХД, 2013. — 504 с.
12. Каменев, П.Н. Отопление и вентиляция. Ч. 2: Вентиляция [Текст] / П.Н. Каменев. — М. : Госстройиздат, 1959. — 424 с.
13. Фиалковская, Т.А. Вытяжные зонты и шкафы [Текст] / Т.А. Фиалковская. — М. : Стройиздат, 1947.

14. Батурина, В.В. Основы промышленной вентиляции [Текст] / В.В. Батурина. — М. : Профиздат, 1965. — 608 с.
15. Штокман, Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности [Текст] / Е.А. Штокман, В.А. Шилов, Е.Е. Новгородский, И.И. Саввиди, Т.А. Скорик, В.В. Пашков; под ред. Е.А. Штокмана. — М. : Изд-во АСВ, 2001. — 688 с.
16. Посохин, В.Н. Аэродинамика вентиляции [Текст] / В.Н. Посохин. — М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. — 209 с.
17. Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. — СПб. : Химиздат, 2005. — 659 с.
18. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. — М. : Машиностроение, 1977. — 559 с.
19. Alden, J.L. Design of Industrial Ventilation Systems [Текст] / J.L. Alden, J.M. Kane. N. Y. : Industrial Press, 1982.
20. Справочник по специальным функциям [Текст] / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. — М. : Наука, 1979. — 832 с.

*ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kilogachev@mail.ru*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ТОЛМАЧЕВА Елена Игоревна, асп.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 15.08.14

**Logachev Konstantin Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kilogachev@mail.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Averkova Olga Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Tolmacheva Elena Igorevna**, post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **MODELING THE DUST-AIR FLOWS IN THE ACTION SPECTRUM OF LOCAL ROUND VENTILATION BELL EXHAUST**

### **Message 1. DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL AND COMPUTATIONAL ALGORITHM**

There are discussed the efficiency criteria of local bell ventilation exhaust. By means of using stationary discrete vortex rings there is developed the method of math modeling of the separation flow at the entrance of round bell exhaust.

**Key words:** local ventilation exhaust, extreme trajectories, discrete vortex method.

### **REFERENCES**

1. Posokhin, V.N. Regarding analysis of flows around a slotted bell-shaped hood inlet [Text] / V.N. Posokhin, N.B. Salimov, K.I. Logachev, A.M. Zhivov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 8. — P. 70–76.
2. Posokhin, V.N. Regarding analysis of flows around a slotted bell-shaped hood inlet [Text] / V.N. Posokhin, N.B. Salimov, K.I. Logachev, A.M. Zhivov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 9. — P. 80–85.
3. Posokhin, V.N. Regarding analysis of flows around a slotted bell-shaped hood inlet [Text] / V.N. Posokhin, N.B. Salimov, K.I. Logachev, A.M. Zhivov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 10. — P. 81–85.

4. Logachev, K.I. Analysis of flows around a slotted bell-shaped hood inlets using the discrete vortex method [Text] / K.I. Logachev, A.I. Puzanok, V.N. Posokhin // Izv. vuzov. Problems of energetics. — 2004. — N 7–8. — P. 61–69.
  5. Logachev, K.I. Geometrical characteristics of flows at the entrance of hood-shaped exhausts [Text] / K.I. Logachev, V.N. Posokhin, A.I. Puzanok // Engineering systems. AVOK North-West. — 2005. — N 1. — P. 12–14.
  6. Averkova, O.A. Average characteristics of eddy regions at the entrance of a round bell duct [Text] / O.A. Averkova, A.E. Kanar, E.I. Tolmacheva, I.V. Khodakov // Energy saving, information technologies and sustainable development. Electronic scientific publications: digest of the International research and application internet conference. FSBEI «IzhGTU named after M.T. Kalashnikov», Izhevsk, 2014. — P. 162–167.
  7. Logachev, K.I. Analysis of flows around intake pipes of round cross-section [Text] / K.I. Logachev, V.N. Posokhin // Izv. vuzov. Aeronautical engineering. — 2004. — N 1. — P. 29–32.
  8. Averkova, O.A. Modeling of potential flows with unknown boundaries on the basis of stationary discrete vortices [Text] / O.A. Averkova, I.N. Logachev, K.I. Logachev // Computational methods and programming. — 2011. — Vol. 12, N 2. — P. 213–219.
  9. Averkova, O.A. Modeling of flow separation at the inlet of a suction channel in regions with cuts [Text] / O.A. Averkova, I.N. Logachev, K.I. Logachev // Computational methods and programming. — 2012. — Vol. 13, N 2. — P. 298–306.
  10. Averkova, O.A. Separation flows in the exhaust ducts spectra [Text] / O.A. Averkova, I.N. Logachev, K.I. Logachev. — Moscow–Izhevsk : IKI, 2012. — 288 p.
  11. Logachev, I.N. Energy saving in aspiration. Theoretical assumptions and recommendations [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova. — Moscow–Izhevsk : RHD, 2013. — 504 p.
  12. Kamenev, P.N. Heating and ventilation. Part 2: Ventilation [Text] / P.N. Kamenev. — M. : Gosstroyizdat, 1959. — 424 p.
  13. Fialkovskaya, T.A. Exhaust hoods and fume chambers [Text] / T.A. Fialkovskaya. — M. : Stroyizdat, 1947.
  14. Baturin, V.V. The fundamentals of industrial ventilation [Text] / V.V. Baturin. — M. : Profizdat, 1965. — 608 p.
  15. Shtokman, E.A. Ventilation, conditioning and air purification at food industry enterprises [Text] / E.A. Shtokman, V.A. Shilov, E.E. Novgorodskiy, I.I. Savvidi, T.A. Skorik, V.V. Pashkov; ed. by E.A. Shtokman. — M. : ASV publishing house, 2001. — 688 p.
  16. Posokhin, V.N. Ventilation aerodynamics [Text] / V.N. Posokhin. — M. : AVOK-PRESS, 2008. — 209 p.
  17. Logachev, I.N. Aerodynamic basis of suctions [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev. — SPb. : Khimizdat, 2005. — 659 p.
  18. Idelchik, I.E. Hydraulic resistance guide book [Text] / I.E. Idelchik. — M. : Mashinostroenie, 1977. — 559 p.
  19. Alden, J.L. Design of Industrial Ventilation Systems [Text] / J.L. Alden, J.M. Kane. — N. Y. : Industrial Press, 1982.
  20. Special functions reference book [Text] / ed. by M. Abramovits and I. Stigan. — M. : Nauka, 1979. — 832 p.
-

УДК 697.93:518.5

В.М. УЛЯШЕВА, М.А. КАНЕВ

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В КОНДИЦИОНИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

Представлены результаты численного моделирования процессов тепло- и воздухообмена в кондиционируемых помещениях при использовании модели турбулентности Спаларт–Аллмареса (SA). Выполнено обоснование применения однопараметрической модели турбулентности SA. Приведен анализ результатов расчета и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** источник тепловыделений, микроклимат, численный метод, модели турбулентности.

Анализ состояния воздушной среды, выполненный при участии автора, на объектах, расположенных в северной климатической зоне [1], определяет актуальность исследований по созданию и поддержанию, в частности, в холодный период года относительной влажности согласно требованиям нормативных документов. Как известно, офисные помещения характеризуются наличием большого количества офисной техники и бумажной документации. Бумага обладает высокой адсорбционной способностью. Данные исследований показывают, что при температуре наружного воздуха ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  относительная влажность при функцио-

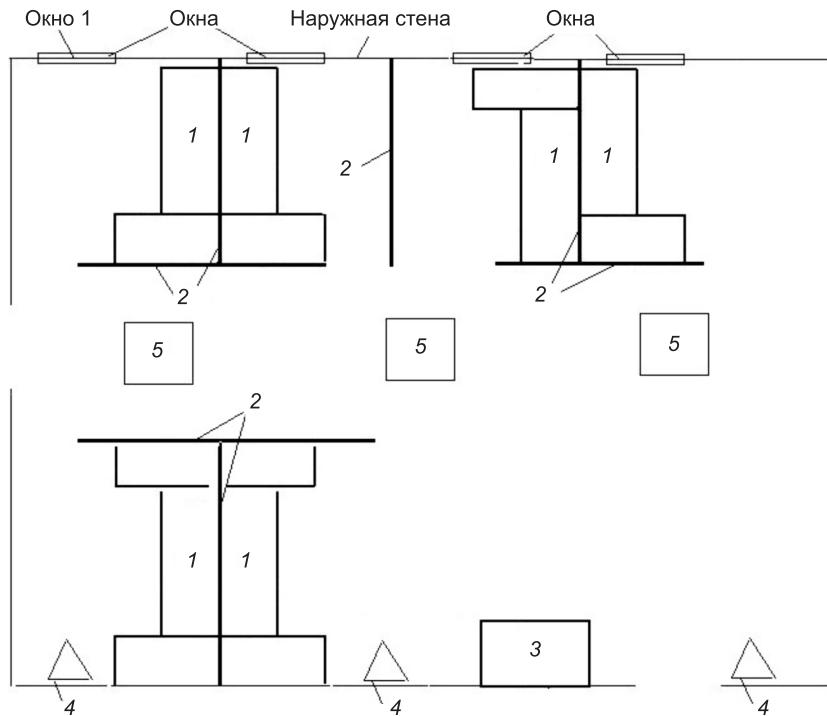


Рис. 1. План исследуемого помещения

1 — рабочие столы с ПЭВМ; 2 — перегородки; 3 — множительная техника; 4 — приточные устройства; 5 — вытяжные устройства

нировании систем отопления и вентиляции колеблется в пределах 5 ÷ 10 %. В северной климатической зоне подобное состояние микроклимата имеет место в течение 150 ÷ 200 сут. Низкая относительная влажность воздуха приводит к обезвоживанию как всего организма человека в целом, так и отдельно органов дыхания. Последнее вызывает развитие легочных болезней. Кроме того, сухой воздух, являясь плохим проводником статического электричества, способствует накоплению последнего на различных поверхностях с последующим разрядом разнозначных зарядов, что приводит к выходу из строя дорогостоящей электронной аппаратуры. Для обеспечения нормируемых значений относительной влажности в установках центрального кондиционирования воздуха устанавливаются увлажнительные камеры (блоки).

Объектом исследования послужило офисное помещение, разделенное светопрозрачными перегородками (экранами) для организации современных комфортных рабочих мест (рис. 1). Для данного объекта выполнены натурные тепловизионные обследования и измерения параметров микроклимата. Некоторые данные этих исследований приведены на рис. 2.

В настоящее время при изучении тепло- и гидрогазодинамических процессов, в том числе в вентиляционной практике, доминирующим становится численный эксперимент с использованием таких программных продуктов, как ANSYS, Star-CD, Fluent и ряда других [2, 3].

Как известно, в основе численного моделирования турбулентных течений воздуха в помещениях с источниками теплоты и примеси лежит численное решение системы основных дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса в форме Навье-Стокса, энергии и примеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j u_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + g\beta(T - T_0) + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\bar{u}'_i \bar{u}'_j), \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j T}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\bar{T}' \bar{u}'_j), \\ \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j C}{\partial x_j} &= \frac{\partial (-\bar{u}'_j C')}{\partial x_i} + J_C, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t$  — время;

$\rho$  — плотность;

$\bar{u}_j$  — компоненты вектора осредненной скорости по осям координат;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;

$(T - T_0)$  — отклонение фактической температуры от фиксированной средней;

$\beta = T^{-1}$  — коэффициент теплового расширения воздуха;

$\bar{P}, \bar{T}, \bar{C}$  — осредненные давление, температура и концентрация примеси;

$$\bar{u}'_i \bar{u}'_j = \frac{\tau_{ij}}{\rho};$$

$\tau_{ij}$  — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса);

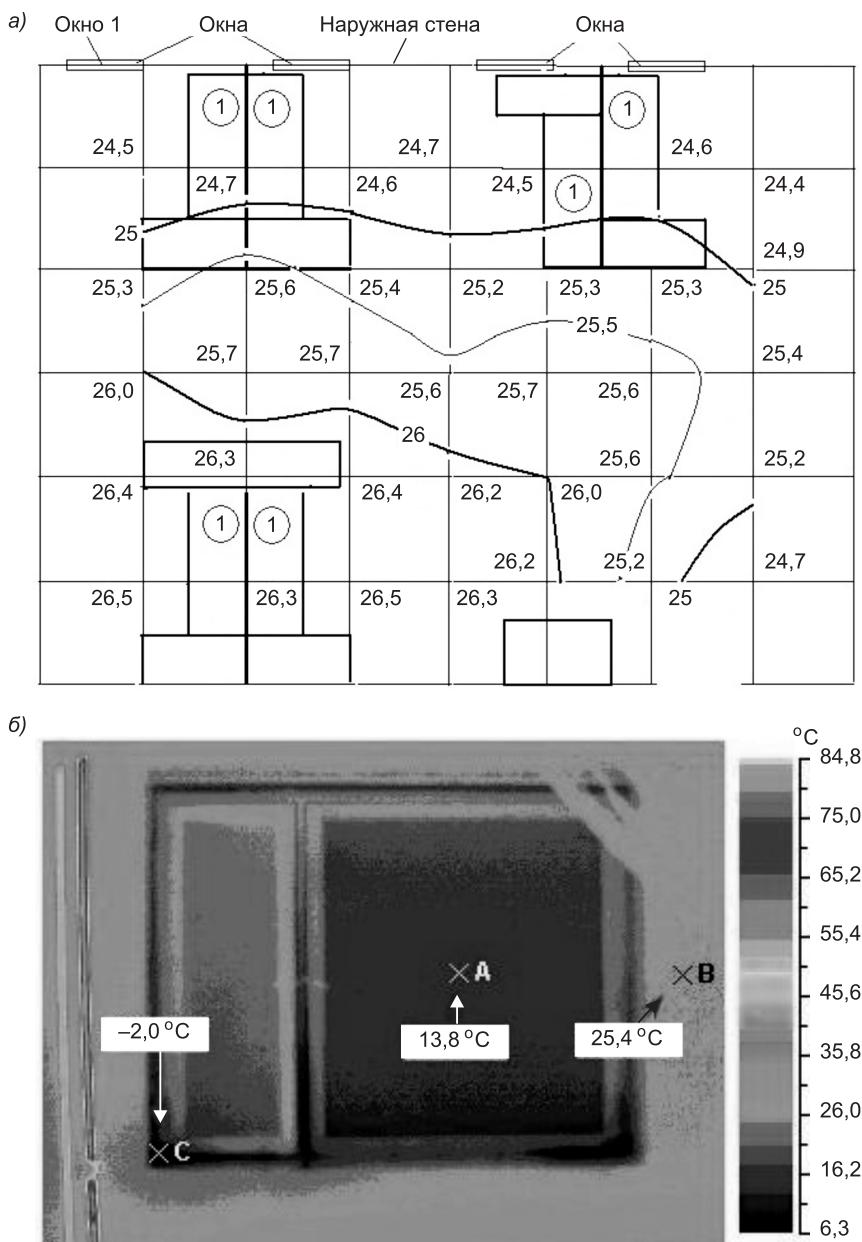


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований распределения температуры воздуха в помещении (а) и термограмма окна 1 (б)

$\rho c_p \overline{u'_j T'}$ ,  $\overline{u'_j C'}$  — дополнительные тепловой поток и поток массы;  
 $u'_i$ ,  $u'_j$ ,  $T'$ ,  $C'$  — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока;

$J_C$  — интенсивность источника примеси.

Уравнения Навье-Стокса, как и любая математическая модель, описывают реальную физическую систему в рамках принятых приближений или допущений. В настоящее время различают два основных подхода моделирования вязких течений:

— прямое численное моделирование (DNS) — решение полных уравнений Навье-Стокса;

— моделирование с использованием осредненных уравнений Навье-Стокса, а именно: по времени (RANS), по пространству (LES), гибридные модификации (DES).

Основной проблемой при решении уравнений Навье-Стокса является моделирование турбулентности. В настоящий момент создано большое количество разнообразных моделей для расчета турбулентных течений [5]. Они отличаются друг от друга сложностью решения и точностью описания течения. Модели классифицируются согласно числу дополнительных дифференциальных уравнений в частных производных (порядок замыкания), которые необходимо решить для получения параметров модели. Это число может изменяться от 0 в случае простейших алгебраических моделей до 12 в случае наиболее сложных моделей рейнольдсовых напряжений.

Преимуществом однопараметрических моделей, в частности модели Спаларта–Аллмареса (SA), является использование только одного дифференциального уравнения для модифицированной кинематической турбулентной вязкости  $\tilde{v}$ :

$$\frac{D\tilde{v}}{Dt} = P^v - D^v + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla \cdot [(v + \tilde{v})] \nabla \tilde{v} + c_{b2} [(\nabla \tilde{v}) \cdot (\nabla \tilde{v})] \} + f_{t1} \Delta U^2, \quad (2)$$

где  $P^v$ ,  $D^v$  — генерационный и деструктивный (дисипативный) члены;  $f_{t1} \cdot \Delta U^2$  — член, предназначенный для инициирования ламинарно-турбулентного перехода в заданной точке (в случае двумерных течений) или на заданной линии (в случае трехмерных течений) на обтекаемой поверхности;  $\sigma$ ,  $c_{b2}$  — эмпирические константы модели;  $\Delta U$  — модуль разности векторов скорости в рассматриваемой точке и в точке перехода.

Для исследования распределения параметров микроклимата использован программный комплекс Star-CD, при этом в качестве примеси принято влагосодержание воздуха.

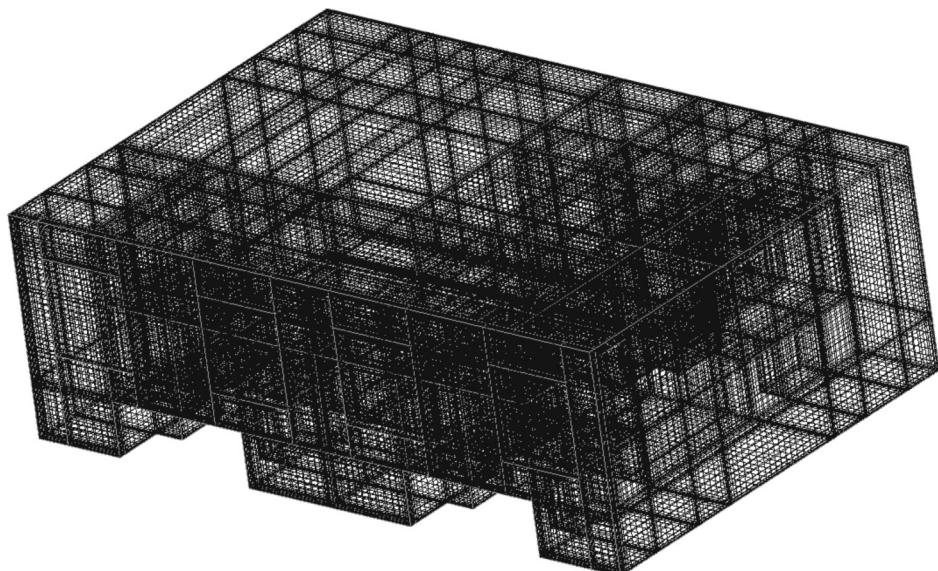


Рис. 3. Расчетная сетка исследуемого помещения

Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным применен метод конечных объемов на структурированной неортогональной несмещенной сетке. Расчетная сетка представлена на рис. 3. Сетка сгущается вблизи твердых границ. Аппроксимация членов уравнений (1), описывающих конвективный перенос количества движения, выполнена по противопоточной схеме первого порядка точности. Коррекция давления проведена по алгоритму SIMPLEC. В качестве граничных условий для скоростей воздуха на стенах заданы, как обычно, условия «прилипания». На поверхностях, через которые имеет место поток теплоты (поверхности оборудования, приборов системы отопления, наружных конструкций), приняты плотности потока тепловой энергии. В приточных отверстиях задавались скорость, температура и влагосодержание воздуха. Системы линейных алгебраических уравнений, полученные в результате дискретизации исходной системы дифференциальных уравнений, решались методом сопряженных градиентов.

На рис. 4 приведены некоторые результаты численного моделирования, которые удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными.

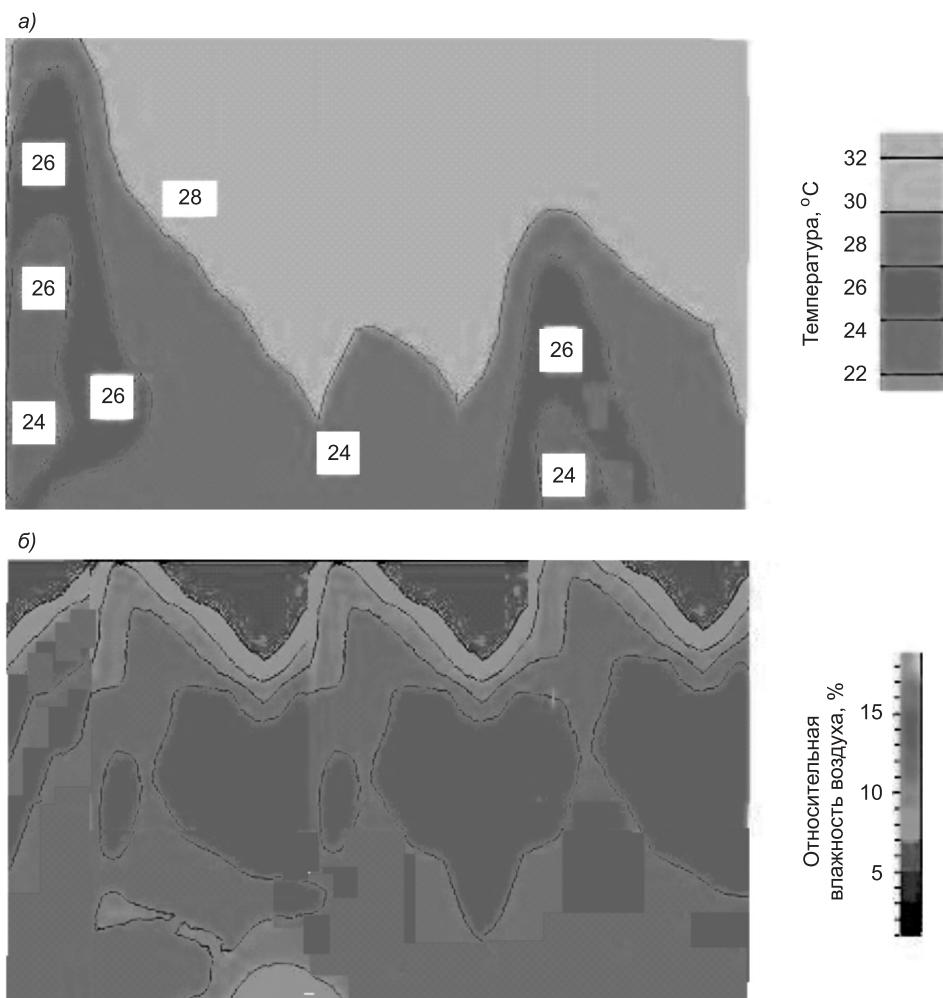


Рис. 4. Результаты численного расчета для исследуемого помещения  
а — температура воздуха; б — относительная влажность воздуха

**Выводы.** Сопоставление результатов численного моделирования с применением модели турбулентности Спаларта–Аллмареса (SA) и экспериментальных исследований параметров воздушной среды офисного помещения подтвердило корректность выбранного метода численного моделирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. У ля ш е в а, В.М. Особенности формирования микроклимата административных помещений в северных климатических условиях [Текст] / В.М. Уляшева, М.А. Канев // Вестн. гражданских инженеров. — 2013. — № 2 (37). — С. 162–166.
2. Г р им и т ли н, А.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, Д.М. Денисихина. — СПб. : АВОК Северо-Запад, 2013. — 192 с.
3. Д ени сихина, Д.М. Численное моделирование неизотермических турбулентных течений в помещениях плавательных бассейнов [Текст] / Д.М. Денисихина // Вестн. гражданских инженеров. — 2014. — № 3 (44). — С. 189–193.

УЛЯШЕВА Вера Михайловна, д-р техн. наук, доц.  
Ухтинский государственный технический университет  
КАНЕВ Михаил Анатольевич, асп.  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 12.08.14

**Ulyasheva Vera Mikhailovna**, doctor of technical sciences, assistant professor, Ukhta State Technical University, Russia  
**Kanев Mikhail Anatolevich**, post-graduate student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

#### **NUMERICAL SIMULATION OF AIR FLOW IN THE ROOM WITH THE AIR-CONDITIONING**

The results of numerical modeling of heat and air conditioning in rooms by using the turbulence model Spalart–Allmares (SA). The justifications applying a one-parameter model of turbulence SA. The analysis of the results of calculations and experimental data.

**Key words:** heat source, microclimate, numerical methods, turbulence model.

#### REFERENCES

1. Ulyasheva, V.M. Features of formation of microclimate administrative offices in northern climates [Text] / V.M. Ulyasheva, M.A. Kanev // Bull. of Civil Engineers. — 2013. — N 2 (37). — P. 162–166.
2. Grimitlin, A.M. Mathematical simulation in designing systems of ventilating and conditioning [Text] / A.M. Grimitlin, T.A. Datsyuk, D.M. Denisikhina. — St.-Petersburg : ABOK Northwest, 2013. — 192 p.
3. Denisikhina, D.M. Numerical simulation of non-isothermal turbulent flows in the areas of swimming pools [Text] / D.M. Denisikhina // Bull. of Civil Engineers. — 2014. — N 3(44). — P. 189–193.

УДК 628.51:622.794

М.И. ШИЛЯЕВ, А.И. ГОРБУНКОВ, А.Р. БОГОМОЛОВ, Е.М. ХРОМОВА

## РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ УГОЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ЕГО ОБЕЗВОЖИВАНИИ В ЦЕНТРИФУГАХ\*

Проведен теоретический анализ процесса обезвоживания угольной суспензии в центрифуге. Из условия равенства центробежных сил и сил поверхностного натяжения, действующих на жидкость в объеме гранулированного слоя рабочего элемента ротора центрифуги, найдена аналитическая зависимость для расчета остаточной концентрации жидкости в центрифугируемом слое. Показано хорошее согласование результатов расчетов, выполненных на основе этой зависимости, с паспортными данными и данными режимных карт промышленных центрифуг типа ФВВ–1001У–01 и ФВВ–1121У–02.

**Ключевые слова:** обезвоживание, угольная суспензия, центрифугирование, коэффициент поверхностного натяжения, коэффициент динамической вязкости, порозность, диаметр угольных частиц, влажность.

**1. Введение.** Проблема обезвоживания угольного концентрата по-прежнему актуальна для углеобогатительных фабрик. Цель данной работы — разработка математической модели обезвоживания его в центрифугах. В качестве опытных данных для проверки модели использовались исследования на углеобогатительных фабриках Кузбасса, где характерным является концентрат коксующихся марок углей: Г, ГЖ, К, КО, ОС. Концентрат представляет собой обогащенный уголь с зольностью 8–10 % против 12–40 % у необогащенного. Все процессы обогащения и большинство вспомогательных процессов проходят в водной среде. В табл. 1 приведено среднее распределение классов крупности концентрата с указанием типов оборудования на углеобогатительных фабриках Кузбасса. Реальные классы крупности на фабриках могут быть малозначительно взаимозасорены.

В табл. 2 дана средняя характеристика различных классов крупности угольных частиц в общем концентрате на ОФ «Анжерская».

**Таблица 1. Классы крупности угольного концентрата и тип обогатительного и обезвоживающего оборудования на ОФ Кузбасса**

Концентрат Класс, мм	Средняя доля участия	Оборудование	
		для обогащения	для обезвоживания
0–0,2(0,5)	20	Флотомашины	Вакуум-фильтры, гипербар-фильтры, термическая сушка
0,2(0,5)–1(2)	10	Сpirальные сепараторы	Неподвижные сита, виброгрохоты, центрифуги, в т.ч. осадительно-фильтрующие, термическая сушка
1(2)–13(18)	35	Отсадочные машины или тя- желосредние гидроциклоны	Виброгрохоты, центрифуги, термическая сушка
13(18)–100(150)	35	Тяжелосредние сепараторы	Виброгрохоты

\* Статья выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0004 ФЦП.

Таблица 2. Средняя характеристика классов крупности частиц в угольном концентрате на ОФ «Анжерская»

Класс, мм	Массовая доля, %	Влажность, %	Зольность, %	Обезвоживающее оборудование
13–100	30	7,5	8,0	Виброгрохот
1–13	35	9,5*	9,0	Виброгрохот + центрифуга «ФВВ-1121У-02» (7 шт.)
0,5–1	17	15,0*	10,0	Виброгрохот + центрифуга «Н-1000» (1 шт.)
0–0,5	18	31,0*	8,0	Вакуум-фильтры «Украина ДУ-80-2,7» (3 шт.) и «Andriz» (2 шт.)
Итого фр. 0–100 мм:	100	13,7*	8,9	—
Итого фр. 0–13 мм (поступает на сушку):	70	16,4*	9,2	—

\* Влажность до термической сушки.

В настоящей работе нас будут интересовать только центрифуги и с теоретической точки зрения их предельные возможности по обезвоживанию угольной суспензии, на которые можно рассчитывать в практических условиях.

**2. Постановка задачи, решение.** Представим рабочий элемент центрифуги в виде ротора, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ , с внутренним диаметром  $D_1 = 2R_1$  и внешним  $D_2 = 2R_2$ , в объеме между которыми помещается гранулированный материал (угольный концентрат). Поры между гранулами заполняет жидкость — вода или водный раствор с пониженными вязкостными характеристиками для повышения эффективности обезвоживания (рис. 1). Гранулы будем считать монодисперсными со средним диаметром распределения их по размерам  $d_a$ . При сформулированных выше условиях требуется найти предельную (остаточную) концентрацию воды в объеме угольного концентрата, удерживающуюся в порах между гранулами.

При этом будем полагать, что основная масса воды без труда выбрасывается из центрифугируемого объема центробежными силами и остается только вода на поверхностях гранул в виде пленки, удерживаемой силами

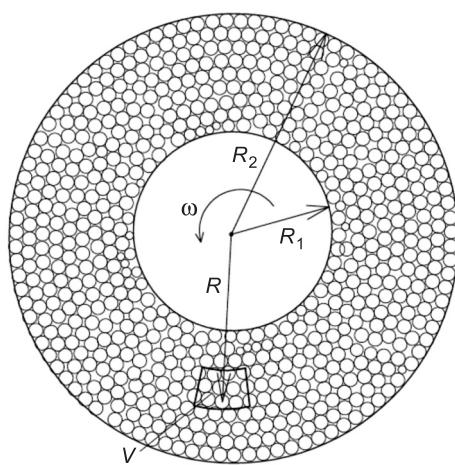


Рис. 1. Схема ротора центрифуги для обезвоживания угольной суспензии

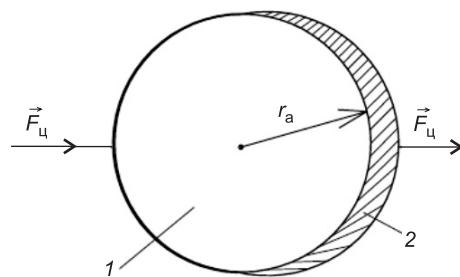


Рис. 2. Схема отрыва пленки жидкости от поверхности гранулы

1 — гранула, 2 — пленка жидкости

поверхностного натяжения. В слое гранулята выделим элементарный объем  $V$ , расстояние до которого от оси вращения  $R$ . Условием предельного обезвоживания в центрифуге поставим равенство центробежных сил, действующих на жидкость на тыльных поверхностях гранул площадью  $S/2$  (рис. 2) в элементарном объеме  $V$ , силам поверхностного натяжения, удерживающим жидкость в виде пленки на этих поверхностях:

$$F_{\text{ц}} = F_{\sigma}, \quad (1)$$

где

$$F_{\text{ц}} = \varepsilon_{\text{ж}} V \rho_{\text{ж}} \omega^2 R; \quad (2)$$

$$F_{\sigma} = \frac{\sigma}{r_a} S, \quad (3)$$

$\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\omega$  — угловая частота вращения ротора,  $1/\text{с}$ ;

$R$  — расстояние от оси вращения по радиусу до элементарного объема  $V$ , м;

$\varepsilon_{\text{ж}}$  — объемная концентрация жидкости в гранулированном слое,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $\text{Н}/\text{м}$ ;

$r_a = d_a / 2$  — радиус гранул, принимаемых сферическими, м;

$S$  — площадь поверхностей гранул в элементарном объеме  $V$ ,  $\text{м}^2$ :

$$S = 4\pi r_a^2 n V, \quad (4)$$

где  $n$  — счетная концентрация гранул,  $1/\text{м}^3$ ;

$4\pi r_a^2$  — площадь поверхности гранулы радиусом  $r_a^2$ ,  $\text{м}^2$ .

Приравнивая (2) и (3) с учетом (4), получим соотношение

$$\varepsilon_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \omega^2 R = 4\pi r_a^2 n \sigma. \quad (5)$$

Счетную концентрацию  $n$  свяжем с порозностью гранулированного слоя  $\varepsilon_{\text{ш}}$ . Очевидно,

$$1 - \varepsilon_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi r_a^3 n, \quad (6)$$

где  $\frac{4}{3} \pi r_a^3$  — объем сферической гранулы,  $\text{м}^3$ . Тогда

$$n = \frac{3}{4} \frac{1 - \varepsilon_{\text{ш}}}{\pi r_a^3}. \quad (7)$$

Перепишем соотношение (5) в виде

$$\varepsilon_{\text{ж}} = 12 \frac{\sigma(1 - \varepsilon_{\text{ш}})}{\rho_{\text{ж}} \omega^2 R d_a^2}. \quad (8)$$

В качестве опытных данных для сравнения теории с экспериментом будем использовать данные из паспортов центрифуг ФВВ-1121У-02 и ФВВ-1001У-01 (табл. 3) и режимной карты к ФВВ-1001У-01 (табл. 4). Сделаем сначала оценку по данным табл. 3 и 4 для ФВВ-1001У-01. Зададим диаметр ротора центрифуги  $2R = 1$  м, крупность обезвоживаемого угля 0,5–13 мм, плотность воды  $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ , коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 0,072 \text{ Н}/\text{м}$ ,  $N = 420 \text{ об}/\text{мин}$ . Примем для плотной упаковки шаров  $\varepsilon_{\text{ш}} = 0,4$  [1], размер гранул среднеквадратичным

Таблица 3. Данные из паспортов к центрифугам ФВВ (фильтрующие вибрационные вертикальные), установленным на ЦОФ «Сибирь» и ОФ «Анжерская»

Наименование	ФВВ-1121У-02	ФВВ-1001У-01
Производительность по исходному продукту, т/ч	Не более 100	Не более 100
Влажность обезвоженного осадка, %	8±0,5	7,1
Частота вращения ротора, об/мин	420	420
Частота колебаний ротора, кол/мин	1600	1600
Размах колебаний, мм	4–6	4–6
Площадь фильтрующей поверхности ротора, м <sup>2</sup>	1,5	1,45
Наибольший диаметр конической части ротора, мм	1120	—
Внутренний диаметр корпуса ротора, мм	—	1000
Мощность электродвигателей, кВт	25,3	25,3
Масса центрифуги с комплектом ЗИП, кг	4080	3475
Габариты:		
длина, мм	2895	2895
ширина, мм	2165	2060
высота, мм	1650	1650

$d_a = \sqrt{0,5 \cdot 13} = 2,55 \text{ мм} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . В соответствии с формулой (8), учитывая  $\omega = \pi N / 30 = 3,14 \cdot 420 / 30 = 44 \text{ 1/c}$ , получим

$$\varepsilon_{\text{ж}} = 12 \frac{0,072(1-0,4)}{10^3(44)^2 0,5(2,55 \cdot 10^{-3})^2} = 0,0824 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 8,24 \% \text{ от общего объема.}$$

Поскольку в табл. 3–4 концентрации воды приведены на единицу массы угольной суспензии, кг/кг, требуется пересчет этой концентрации по формуле [2]

$$\varepsilon'_{\text{ж}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varepsilon_{\text{ш}}}{\varepsilon_{\text{ж}}} \frac{\rho_m}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon'_{\text{ж}}$  — концентрация воды в угольном гранулированном слое, кг/кг;  $\rho_m$  — плотность угля.

Таблица 4. Выписка из режимной карты к ФВВ-1001У-01 (установлена на ЦОФ «Сибирь»)

Наименование	Значение
Производительность по исходному продукту, т/ч	До 80
Крупность обезвоживаемого материала, мм	0,5–13
Содержание класса менее 0,5 мм в питании, %	Не более 20
Содержание класса более 0,5 мм в фугате, %	5–10
Влажность исходного угля, %	20–30
Влажность обезвоженного угля, %	8–12
Содержание твердого в фугате, кг/м <sup>3</sup>	50–60
Количество центрифуг, шт.	8

Принимая  $\rho_m = 1500 \text{ кг} / \text{м}^3$ , при плотной упаковке шаров получим

$$\varepsilon'_{\text{ж}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - 0,4}{0,0824} 1,5} 100 \% = 8,4 \% . \quad (10)$$

В табл. 4 приведено  $\varepsilon'_{\text{ж}} = 8-12 \%$ , в табл. 3  $\varepsilon'_{\text{ж}} = 7,1 \%$ , что в среднем хорошо согласуется с теоретическим результатом (10).

Для параметров центрифуги ФВВ-1121У-02 (см. табл. 3)  $\varepsilon'_{\text{ж}} = 7,6 \%$  при паспортном значении  $8 \pm 0,5 \%$ , что также имеет место хорошее согласие теории и опыта.

**Выводы.** В работе получена формула (8) для расчета предельной концентрации воды в угольном грануляте при его обезвоживании в центрифугах, дающая хорошее согласование с паспортными и опытными данными для промышленных центрифуг ФВВ-1121У-02 и ФВВ-1001У-01. В теоретическую формулу для расчета предельной концентрации жидкости в гранулированном материале входят параметры, позволяющие повысить глубину обезвоживания гранулята за счет снижения коэффициента поверхностного натяжения воды с помощью специальных добавок, а также увеличения числа оборотов и диаметра центрифуг.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэроп, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем [Текст] / М.Э. Аэроп, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. — Л. : Химия, 1979. — 176 с.
2. Шиляев, М.И. Интенсификация тепломассообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, А.Р. Богомолов. — Томск : Изд-во ТГАСУ, 2010. — 272 с.

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

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

*ГОРБУНКОВ Алексей Игоревич, инженер-технолог*

*ООО «НПО Завод химреагентов», г. Кемерово*

*БОГОМОЛОВ Александр Романович, д-р техн. наук, проф.*

*Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово*

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

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 15.08.14

**Shilyaev Mikhail Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Gorbunkov Alexey Iгоревич**, process-engineer, «NPO plant chemicals», Kemerovo, Russia

**Bogomolov Alexandre Romanovich**, doctor of technical sciences, professor, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

**Khromova Elena Mikhailovna**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

#### CALCULATION OF MOISTURE LIMIT OF COAL CONCENTRATES WHEN DEWATERING IN CENTRIFUGES

The paper presents a theoretical analysis of the coal slurry dewatering in centrifuge. By equating the centrifugal forces and surface tension forces acting on the fluid in the volume of the granular layer of the working element of the centrifuge rotor, found analytical dependence

for calculating the residual concentration of the liquid layer in the centrifuged is found. The good agreement of the results of calculations carried out on the basis of this dependence is shown, with passport data and the regime of industrial centrifuges card type FVV-1001U-01 and the FVV-1121U-02.

**Key words:** dehydration, coal slurry, centrifugation, the surface tension coefficient, the coefficient of dynamic viscosity, porosity, diameter of coal particle, moisture.

#### REFERENCES

1. Aerov, M.E. Devices with a stationary granular bed [Text] / M.E. Aerov, O.M. Todes, D.A. Narinskiy. — L. : Chemistry, 1979. — 176 p.
  2. Shilyaev, M.I. Intensification heat- and mass transfer in disperse environments at condensation and evaporation [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.R. Bogomolov. — Tomsk : TSUACE, 2010. — 272 p.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, Т.Ю. ВИГОВСКАЯ,  
А.А. КУТУМОВ, Р.Ш. ШАБАНОВ

### ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ В ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМАХ ПНЕВМОУДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ДРОССЕЛЬНЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Рассматривается аналогичность пневмоударных механизмов с дроссельным воздухораспределением с трубчатым выпуском отработавшего воздуха и ступенчатым ударником.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, трубчатый воздухоотвод, камера сетевого воздуха, камера рабочего хода, камера холостого хода, ступенчатый ударник, бародинамика, термодинамика, баромеханика.

Из зарубежной патентной литературы [1, 2] известны технические решения выпуска отработавшего воздуха в пневмоударных механизмах посредством трубок, взаимодействующих с центральным сквозным каналом ударника. Из отечественных публикаций известны, например, пневмоударные механизмы с трубчатым выпуском [3–5] со ступенчатым ударником и тремя рабочими камерами, в которых формируется силовой импульс давления воздуха.

Технические решения [6] представляют практический интерес из-за различных по форме средств выпуска в центральной трубке, позволяющих реализовать многообразие аналогичных пневмоударных механизмов машин любых типоразмеров различного назначения. При этом достаточно одной программы для расчета энергетических и геометрических параметров пневмоударного механизма, оригинальность которого определяется формой исполнения выпускного канала при одинаковом физико-математическом описании рабочего процесса механизма.

Рабочий процесс представленных аналогичных механизмов [6] рассмотрим на примере принципиальной схемы, изображенной на рис. 1.

Сжатый воздух из сети по каналу А с проходным сечением  $\omega_c$  в цилиндре 1 массой  $m_k$  поступает в кольцевую камеру Б с объемом  $V_o$ , откуда по дроссельному каналу-пазу В с проходным сечением  $\omega_{рш}$  на штоковой части цилиндра поступает в кольцевую камеру Г с объемом  $V_{рш}$  рабочего хода и одновременно по каналу-пазу Д с проходным сечением  $\omega_{хп}$  на поршневой части ступенчатого ударника 2, массой  $m_y$  поступает в кольцевую камеру Е с объемом  $V_x$ .

Опорожнение камеры Г осуществляется в зависимости от положения ударника посредством щелевого канала Ж в стержне-трубке З с проход-

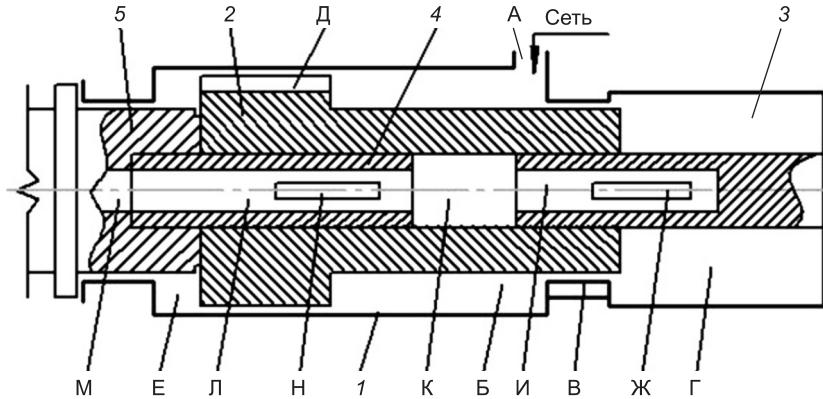


Рис. 1. Принципиальная схема ДПУМ с выпуском в трубке [6]

ным сечением  $\omega_{ap}$ , далее каналу И, центральному каналу К с проходным сечением  $\omega_i > \omega_{ap}$  в ударнике, каналу Л в трубке 4 с проходным сечением  $\omega_l \geq \omega_i$  и каналу М с проходным сечением  $\omega_m \geq \omega_l$  в хвостовике рабочего инструмента 5 в атмосферу или призабойное пространство. Опорожнение камеры Е осуществляется также в зависимости от положения ударника посредством щелевого канала Н с проходным сечением  $\omega_{ax}$  в трубке, канала Л трубы и канала М в хвостовике рабочего инструмента в атмосферу или призабойное устройство.

Под действием разницы силовых импульсов давления со стороны камер Б, Г и Е ударник совершает возвратно-поступательное движение и наносит удары по хвостовику рабочего инструмента.

Стержень-трубка и трубка выполнены по длине, достаточной, чтобы находиться постоянно в центральном канале К ударника, исключая возможные несоосности и ударный характер надвижки ударника на свободные концы трубы и стержня-трубки.

Рассмотрим варианты исполнения форм выпускных каналов, представленные на рис. 2, и их особенности.

Выпускные каналы из камеры рабочего и холостого ходов могут быть выполнены круглой формы, одинаковыми или различными по сечению в стенках трубы на расчетном участке выпуска как со стороны хвостовика рабочего инструмента, так и со стороны торца штоковой части ударника со стороны камеры рабочего хода (см. рис. 2, а).

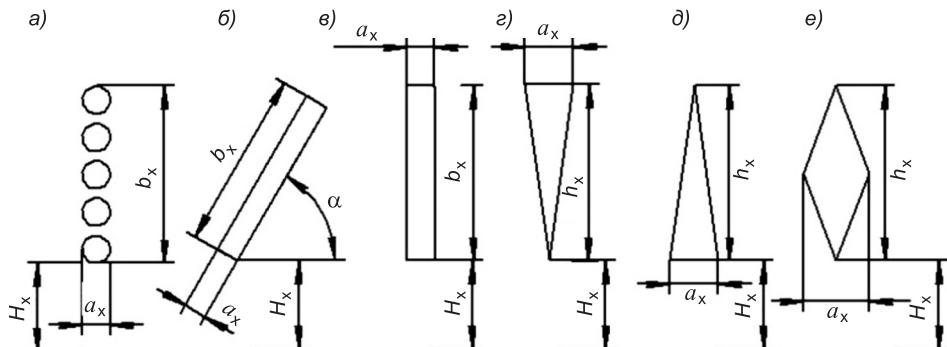


Рис. 2. Обозначения размеров для  $\omega_{ax}$  и  $\omega_{ap}$  (рис. 2, а–е)

Выпускные каналы могут располагаться по образующей поверхности трубы в виде винтового паза.

При таком исполнении выпускных каналов выпуск отработавшего воздуха осуществляется плавно с поддержанием давления воздуха на расчетном уровне, что способствует реализации расчетных значений хода и скорости ударника. К концу холостого хода в камере холостого хода и в конце рабочего хода в камере рабочего хода устанавливается давление, близкое или равное атмосферному, что предопределяет расчетные значения противодавлений со стороны указанных камер. Такой процесс выпуска обусловливается проходными сечениями дросселей впуска в камеры, которые значительно меньше суммарного сечения выпускных каналов.

В техническом решении (рис. 2, б) аналогичный процесс по выпуску осуществляется посредством щелевого канала прямоугольной формы вдоль продольной оси трубы или под углом к ее оси (рис. 2, в).

На рис. 2, г представлено техническое решение щелевого канала выпуска в виде треугольной формы с вершиной, обращенной в сторону хвостовика инструмента, и вершиной, обращенной в противоположную сторону со стороны камеры рабочего хода. На рис. 2, д техническое решение щелевого канала выпуска имеет соответственно противоположное направление вершин треугольников. Оба решения в зависимости от поставленных целей осуществляют плавное начало выпуска и резкое его окончание (рис. 2, г) или начало выпуска резкое и плавное окончание выпуска (рис. 2, д).

Техническое решение щелевого канала ромбической формы (рис. 2, е) позволяет начало и окончание выпуска осуществить плавными с достаточно резким характером выпуска на среднем участке щелевого канала.

Отмеченные технические решения на рис. 2, а–е возможны для осуществления выпуска отработавшего воздуха как со стороны камеры холостого хода, так и со стороны камеры рабочего хода.

Для формы выпускных каналов  $\omega_{ax}$  и  $\omega_{ap}$  из камеры холостого и рабочего ходов обозначения размеров представлены на рис. 2.

Обозначения к рис. 2, 3 и уравнениям рабочего процесса ДПУМ:  
 $a_p$ ,  $a_x$  — ширина щелевого канала выпуска из камеры рабочего и холостого ходов;

$b_p$ ,  $b_x$  — длина щелевого канала выпуска из камеры рабочего и холостого ходов;

$h_p$ ,  $h_x$  — протяженность канала выпуска из камеры рабочего и холостого ходов;

$\alpha$  — угол наклона щели к образующей трубы;

$H_x$  — участок перемещения ударника до закрытия и открытия канала выпуска;

$\Psi_{xb}$ ,  $\Psi_{xp}$ ,  $\Psi_{psh}$ ,  $\Psi_{csh}$ ,  $\Psi_{tn}$  — площади диаметральных зазоров в парах «хвостовик — букса», «поршень — корпус», «шток — корпус», «шток — стержень» и «поршень — трубка»;

$d_n$ ,  $d_{sh}$ ,  $d_p$ ,  $d_c$ ,  $d_t$ ,  $d_u$  — диаметры хвостовика инструмента, штока, поршня, стержня, трубы, внутренней полости цилиндра;

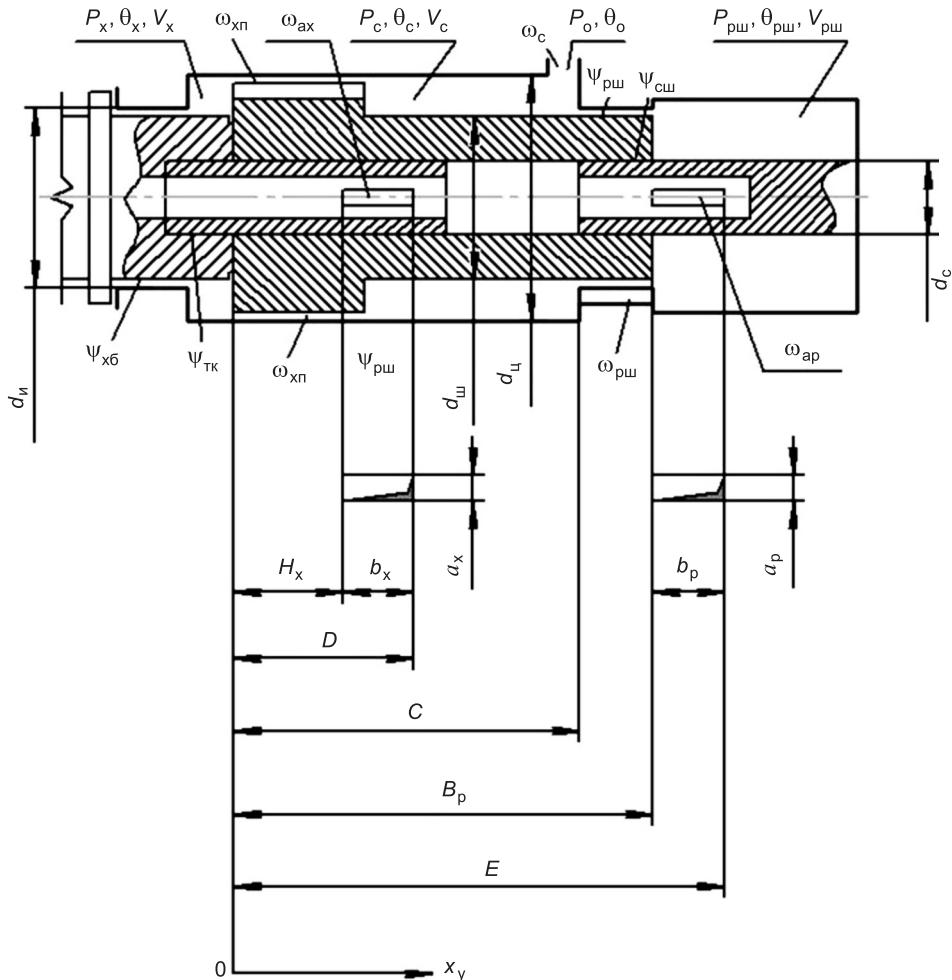


Рис. 3. Расчетная схема ДПУМ по рис. 1 с учетом формы  $\omega_{ax}$  и  $\omega_{ap}$  по рис. 2, а

$D, C, B_p, E$  — длина участка до окончания и начала выпуска из камеры холостого хода, длина до начала стержня—трубки, длина до окончания и начала выпуска из камеры рабочего хода;

$L_y, x_y$  — полная длина и перемещение ударника;

$p_o, p_a, p_{pw}, p_{xp}, p_c$  — давление воздуха в сети, атмосфере, штоковой камере рабочего хода, в поршневой камере холостого хода, в камере сетевого воздуха;

$\theta_o, \theta_a, \theta_{pw}$  — температура воздуха в сети, атмосфере, штоковой камере рабочего хода, в камере холостого хода, в камере сетевого воздуха;

$\Phi_o, \Phi_a, \Phi_{pw}, \Phi_{xp}, \Phi_c$  — бародинамический коэффициент для воздуха в сети, атмосфере, штоковой камере рабочего хода, в поршневой камере холостого хода, в камере сетевого воздуха;

$\Phi_{xb}, \Phi_{xp}, \Phi_{pw}, \Phi_{cp}, \Phi_{tp}$  — бародинамический коэффициент для воздуха в зазорах с площадью  $\Psi_{xb}, \Psi_{xp}, \Psi_{pw}, \Psi_{cp}, \Psi_{tp}$ ;

$W = (2kR/(k - 1))^{1/2}$ , где  $k, R$  — показатель процесса и газовая постоянная;

$F_{xб}, F_{пк}, F_{шк}, F_{шс}, F_{пт}$  — силы трения в парах «хвостовик — букса», «поршень — корпус», «шток — корпус», «шток — стержень» и «поршень — трубка»;

$F_h$  — усилие нажатия на корпус;

$k_y, k_k$  — 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 ударника после и до соударения с хвостовиком инструмента;

$\left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o, \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y$  — скорости корпуса после и до соударения с буртиком инструмента;

$S_x, S_p$  — диаметральное сечение ударника со стороны камеры холостого хода и камеры рабочего хода;

$S_u, S_{ш}, S_{п}, S_c, S_t$  — площади диаметральных сечений хвостовика инструмента, кольцевой части штока ударника, кольца поршневой части ударника, стержня и трубки.

Физико-математическое описание ДПУМ со ступенчатыми ударниками и различной формой выпускных каналов из камер холостых ходов ударника (см. рис. 1–3) представлено уравнениями бародинамической, термодинамической и баромеханическими составляющими.

Указанные уравнения рабочего процесса представлены в следующей записи.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{dp_c}{dt} = \frac{k}{(V_c - x_y S_{kp})} \left[ W(\omega_c \varphi_c - \omega_{pw} \varphi_{pw} - \omega_{xp} \varphi_{xp} \pm \psi_{pw} \varphi_{pw} \pm \right. \\ \left. \pm \psi_{xp} \varphi_{xp}) + p_c \frac{dx_y}{dt} S_{kp} \right], \\ \frac{dp_{pw}}{dt} = \frac{k}{(V_{pw} - x_y S_{kw})} \left[ W(\omega_{pw} \varphi_{pw} \pm \psi_{pw} \varphi_{pw} \pm \psi_{cw} \varphi_{cw} - \right. \\ \left. - \omega_{ap}(x_y) \varphi_{ap}) + p_{pw} \frac{dx_y}{dt} S_{kw} \right], \\ \frac{dp_{xp}}{dt} = \frac{k}{(V_{xp} + x_y S_x)} \left[ W(\omega_{xp} \varphi_{xp} \pm \psi_{xp} \varphi_{xp} \pm \psi_{tp} \varphi_{tp} - \psi_{xb} \varphi_{xb} - \right. \\ \left. - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax}) - p_{xp} \frac{dx_y}{dt} S_x \right], \end{cases} \quad (1)$$

где  $S_{kp} = S_u - S_{kw} - S_c$ ;

$S_{kw} = S_{ш} - S_c$ ;

$S_x = S_u - S_t = S_u - S_c$ ;

$S_t = S_c$ ;

$S_c > \omega_{ap} = \omega_{ax}; \psi_{pw} = \text{const}; \psi_{xp} = \text{const}; \psi_{cw} = \text{const}; \psi_{xb} = \text{const}$ ;

$\omega_c = \text{const}; \omega_{pw} = \text{const}; \omega_{xp} = \text{const}$ .

Ограничения для  $\Phi_{ij}$  и  $\Phi_{ji}$  —

$$\Phi_{ij} \text{ и } \Phi_{ji} = \begin{cases} 0,5288 > p_i / p_j & p_i \cdot \theta_i^{1/2} \cdot 0,298, \\ 0,5288 \leq p_i / p_j & p_i \cdot \theta_i^{1/2} \cdot ((p_i p_j^{-1})^{2/k} - (p_i p_j^{-1})^{k+1/k})^{1/2}, \\ 0,5288 > p_j / p_i & p_j \cdot \theta_j^{1/2} \cdot 0,298, \\ 0,5288 \leq p_j / p_i & p_j \cdot \theta_j^{1/2} \cdot ((p_j p_i^{-1})^{2/k} - (p_j p_i^{-1})^{k+1/k})^{1/2}. \end{cases}$$

Термодинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_c}{dt} = \frac{\theta_c}{(p_c(V_c - x_y S_{kn}))} \left[ W(\omega_c \varphi_c \Omega_c - \omega_{pw} \varphi_{pw} \Omega_{pw} - \omega_{xn} \varphi_{xn} \Omega_{xn} \pm \right. \\ \left. \pm \psi_{pw} \varphi_{pw} \Omega_{pw} \pm \psi_{xn} \varphi_{xn} \Omega_{xn}) + (k-1) p_c \frac{dx_y}{dt} S_{kn} \right], \\ \frac{d\theta_{pw}}{dt} = \frac{\theta_{pw}}{(p_{pw}(V_{pw} - x_y S_{kw}))} \left[ W(\omega_{pw} \varphi_{pw} \Omega_{pw} \pm \psi_{pw} \varphi_{pw} \Omega_{pw} \pm \right. \\ \left. \pm \psi_{cw} \varphi_{cw} \Omega_{cw} - \omega_{ap}(x_y) \varphi_{ap}) + (k-1) p_{pw} \frac{dx_y}{dt} S_{kw} \right], \\ \frac{d\theta_{xn}}{dt} = \frac{\theta_{xn}}{(p_{xn}(V_y + x_y S_x))} \left[ W(\omega_{xn} \varphi_{xn} \Omega_{xn} \pm \psi_{tn} \varphi_{tn} \Omega_{tn} - \right. \\ \left. - \psi_{kb} \varphi_{kb} \Omega_{kb} - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} \Omega_{ax}) - (k-1) p_{xn} \frac{dx_y}{dt} S_x \right]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Ограничения для  $\Omega_{ij}$  и  $\Omega_{ji}$  —

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{cases} \Phi_{ij} > 0 & (k-1), \\ \Phi_{ij} \leq 0 & (k - \theta_i / \theta_j), \\ \Phi_{ji} > 0 & (k-1), \\ \Phi_{ji} \leq 0 & (k - \theta_j / \theta_i). \end{cases}$$

Баромеханическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{P_x S_x - P_p S_p - F_{wk} - F_{pk} - F_{cw} - F_{ty} - F_{kb}}{m_y} \quad \text{при } x_y > 0, \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{P_x S_x - P_p S_p - F_{wk} - F_{pk} - F_{cw} - F_{ty} - F_{kb} - F_h}{m_k} \quad \text{при } x_k > 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Ограничения для  $(dx_y/dt)_o$ ,  $(dx_k/dt)_o$ ,  $(dx_y/dt)_y$ ,  $(dx_k/dt)_y$  —

$$(dx_y/dt)_o = -k_y (dx_y/dt)_y \quad \text{при } x_y \leq 0,$$

$$(dx_k/dt)_o = -k_k (dx_k/dt)_y \quad \text{при } x_k \leq 0.$$

Ограничения для каналов выпуска —

$$\omega_{ap}(x_y) = \begin{cases} 0 & (x_y + L_y) \geq E, \\ 0,5(a_p \cdot b_p) & B_p < (x_y + L_y) < E, \\ (a_p \cdot b_p) & (x_y + L_y) \leq B_p; \end{cases}$$

$$\text{для (а): } \omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} 0 & x_y < H_x, \\ 0,125\pi(d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)_x & D > x_y > H_x, \\ 0,5\pi(d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)_x & x_y > D; \end{cases}$$

$$\text{для (б): } \omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} 0 & x_y < H_x, \\ 0,5(a_x \cdot b_x) \cos \alpha & D > x_y > H_x, \\ (a_x \cdot b_x) \cos \alpha & x_y > (H_x + b_x); \end{cases}$$

$$\text{для (в): } \omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} 0 & x_y < H_x, \\ 0,5(a_x \cdot b_x) & D > x_y > H_x, \\ (a_x \cdot b_x) & x_y > (H_x + b_x); \end{cases}$$

$$\text{для (г): } \omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} 0 & x_y < H_x, \\ 0,25(a_x \cdot h_x) & D > x_y > H_x, \\ 0,5(a_x \cdot h_x) & x_y > (H_x + h_x); \end{cases}$$

$$\text{для (д): } \omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} 0 & x_y < H_x, \\ 0,25(a_x \cdot h_x) & D > x_y > H_x, \\ 0,5(a_x \cdot h_x) & x_y > (H_x + h_x); \end{cases}$$

$$\text{для (е): } \omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} 0 & x_y < H_x, \\ 0,5(a_x \cdot h_x) & D > x_y > H_x, \\ (a_x \cdot h_x) & x_y > (H_x + h_x). \end{cases}$$

При предварительном моделировании рабочего процесса ПУМ для получения экспресс-информации о возможностях конкретного механизма можно в (1), (2) опускать функции, содержащие перетечки  $(\psi_i \varphi_i)$  и  $(\psi_i \varphi_i \Omega_i)$ , а в (3) — силы трения  $F_{шк}$ ,  $F_{пк}$ ,  $F_{сш}$ ,  $F_{ты}$ ,  $F_{хб}$ . С этой же целью дополнительно можно исключить систему (2).

Отметим, что системы уравнений несколько усложняются из-за применения для аналогичных форм выпускных каналов, но это позволяет изменить процесс выпуска отработавшего воздуха из камеры рабочего хода, что для пневмоударных механизмов машин с энергией удара более 1 кДж может оказаться перспективным. При этом количество оригинальных решений существенно увеличится даже при пяти формах выпускных каналов в трубках, а замена укороченных трубок (см. рис. 1) на одну удлиненную [6] повысит прочность трубок выпуска и обеспечит большую устойчивость движения ударника.

Аналогичность технических решений и рабочих процессов пневмоударных механизмов с укороченными и удлиненными трубками выпуска отработавшего воздуха из рабочих камер при изменении форм каналов выпуска подтверждается изображениями (рис. 4, а, б) их принципиальных схем с указаниями признаков-элементов классификации и записью их структурных формул по предложению [7, 8].

Согласно [7, 8] на рис. 4 обозначены и представлены структурные формулы ДПУМ: с укороченными трубкой и трубкой-стержнем выпуска отработавшего воздуха (А) и удлиненной трубкой (Б) при одинаковых формах каналов выпуска:

$a_2$  — средства впуска постоянно открытых дросселем в цилиндре;

$a_{23}$  — средства перепуска, образованные постоянно открытых дросселем на цилиндре и ударнике;

$a_{32}$  — средства перепуска, образованные постоянно открытых дросселем на ударнике и цилиндре;

$b_3$  — средства камеры сетевого давления на третьем уровне;

$c_3$  — средства атмосферной камеры в ударнике;

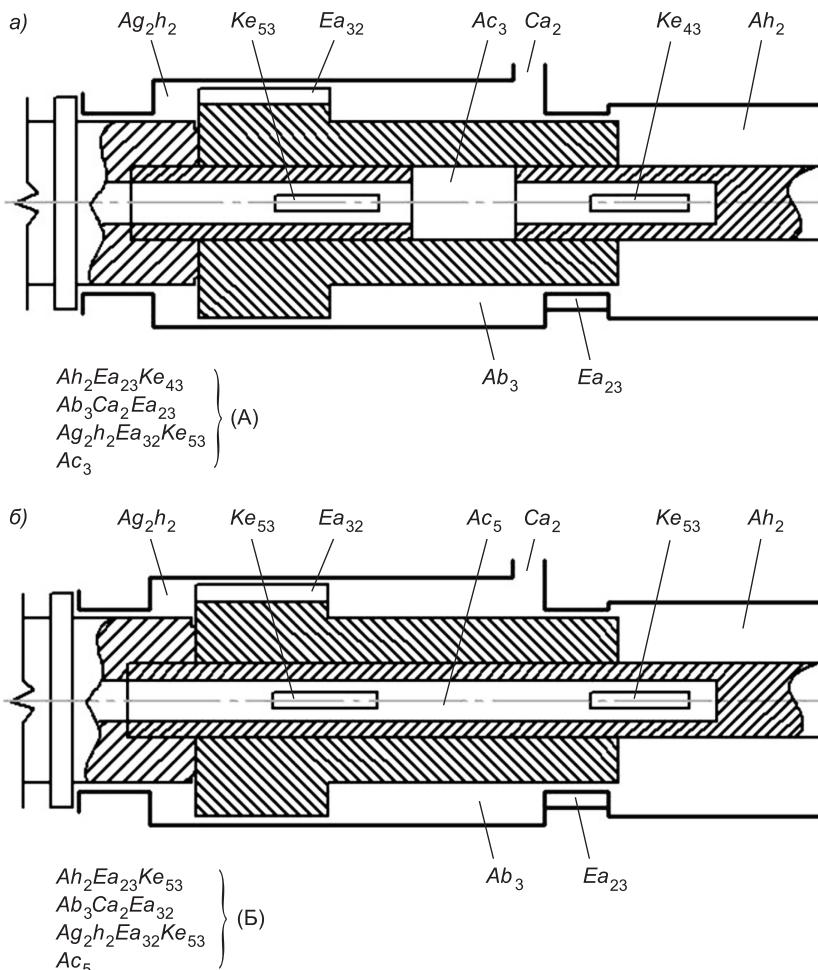


Рис. 4. Структурные формулы аналогичных принципиальных схем пневмоударных механизмов с укороченными (а) и удлиненными (б) трубками

- $c_5$  — средства атмосферной камеры в трубке;  
 $e_{43}$  — средства выпуска на стержне и ударнике;  
 $e_{53}$  — средства выпуска на трубке и ударнике;  
 $A$  — средства формирования силового импульса;  
 $C$  — средства управления наддувом энергоносителя в камеры из сети;  
 $E$  — средства управления перепуском отработавшего энергоносителя в камеры повторного использования в рабочем процессе;  
 $K$  — средства управления выпуском отработавшего воздуха из камер.

Сравнивая структурные формулы, отмечаем, что отличия их признаков-элементов существенного влияния не окажут на бародинамический, термодинамический и баромеханический процессы, поскольку признаки-элементы в (А)  $Ke_{43}$  для стержня-трубки и камеры  $Ac_3$  в канале ударника и в (Б) для трубы  $Ke_{53}$  и камеры  $Ac_5$  в трубке геометрическими размерами практически не отличаются.

**Выводы.** 1. Конструктивное решение камеры атмосферного давления представлено каналом выпуска и практически не является объемом из-за его незначительной протяженности.

2. Основные динамические и конструктивные признаки-элементы рассмотренных ДПУМ не вносят принципиальных различий в расчеты рабочего процесса по количеству, но оригинальны по качеству выпуска, а следовательно, формы выпускных каналов влияют на процесс формирования силового импульса камеры выпуска.

3. Отмеченное по п. 2 следует учитывать дополнительным признаком-элементом конструктивного исполнения формы канала выпуска.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pat. 344483. Dents. Drucklufthammer [Текст] / А. Bailly. Publ. 1921.
2. Pat. 373639. Dents. Drucklufthammer [Текст] / А. Bailly. Publ. 1923.
3. А.с.1534187 СССР. Погружное пневмоударное устройство [Текст] / А.А. Липин, Э.А. Абраменков, В.И. Рукавишников, Д.Э. Абраменков, В.В. Федоров. — Опубл. 1990; Бюл. № 1.
4. А.с.1649090 СССР. Погружное пневмоударное устройство [Текст] / Э.А. Абраменков, А.А. Липин, В.И. Рукавишников, Д.Э. Абраменков, С.А. Зима. — Опубл. 1991; Бюл. № 18.
5. А.с.1781424 СССР. Погружное пневмоударное устройство [Текст] / Э.А. Абраменков, А.А. Липин, Д.Э. Абраменков, С.А. Зима. — Опубл. 1992; Бюл. № 46.
6. А б р а м е н к о в, Д.Э. Динамические и конструктивные признаки средств выпуска в пневмоударных механизмах [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, С.А. Малышев, А.А. Надеин, К.В. Прушковский, С.А. Серохвостов // Изв. вузов. Строительство. — 1999. — № 7. — С. 132–141.
7. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дробесельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: справоч. издание [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : НГУ, 1993. — 430 с.
8. К у т у м о в, А.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: монография [Текст] / А.А. Кутумов, Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2008. — 376 с.

**АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.**  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.**  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

*ВИГОВСКАЯ Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*КУТУМОВ Алексей Анатольевич, директор Рубцовского индустриального института,  
филиала Алтайского государственного технического университета им.  
И.И. Ползунова*

*ШАБАНОВ Рамазан Шабанович, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 11.08.14

**Abramenkov Dmitry Eduardovich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Abramenkov Eduard Alexandrovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Vigovskaya Tatyana Yurevna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kutumov Alexey Anatolyevich**, the director of the Rubtsovsk Industrial Institute, branch of the Altai State Technical University of I.I. Polzunov

**Shabanov Ramazan Shabanovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **GEOMETRICAL ANALOGY IN THE BASIC SCHEMES OF PNEUMOSHOCK MECHANISMS WITH THE THROTTLE AIRDISTRIBUTION**

Analogousness of pneumoshock mechanisms with throttle airdistribution with tubular production of the fulfilled air and the step drummer is considered.

**Key words:** pneumoshock mechanism, tubular air offtake, camera of network air, camera of the working course, idling camera, step drummer, barodynamics, thermodynamics, baromekhanika.

### **REFERENCES**

1. Pat. 344483. Dents. Drucklufthammer [Text] / A. Bailly. Publ. 1921.
2. Pat. 373639. Dents. Drucklufthammer [Text] / A. Bailly. Publ. 1923.
3. A.s.1534187 USSR. Submersible pneumoshock ustroystvo [Text] / A.A. Lipin, E.A. Abramenkov, V.I. Rukavishnikov, D.E. Abramenkov, V.V. Fedorov. — Opubl. 1990; Bull. N 1.
4. A.s.1649090 USSR. Submersible pneumoshock ustroystvo [Text] / E.A. Abramenkov, A.A. Lipin, V.I. Rukavishnikov, D.E. Abramenkov, S.A. Zima. — Opubl. 1991; Bull. N 18.
5. A.s.1781424 USSR. Submersible pneumoshock ustroystvo [Text] / E.A. Abramenkov, A.A. Lipin, D.E. Abramenkov, S.A. Zima. — Opubl. 1992; Bull. N 46.
6. Abramenkov, D.E. Dynamic and constructive signs of means of release in pneumoshock mechanisms [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, S.A. Malyshev, A.A. Nadein, K.V. Prushkovsky, S.A. Serokhvostov // News of Higher Education Institutions. Construction. — 1999. — N 7. — P. 132–141.
7. Abramenkov, E.A. Pneumatic mechanisms of cars of shock action: throttle, jet, bezzolotnikovy, valveless: news of higher edition [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk : NSU, 1993. — 430 p.
8. Kutumov, A.A. Hinged pneumatic hammers for development of frozen soil: monograph [Text] / A.A. Kutumov, E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2008. — 376 p.

**УДК 621.542.001**

**Г.В. ГЛАДЫШЕВ**

## **ПНЕВМОУДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПРОТОЧНЫМИ КАМЕРАМИ**

Рассматривается бестраншейная технология работ для погружения металлических труб, обосновывается выбор ДПУМ (УК) для погружения труб, рассматривается устройство и принцип действия ДПУМ (УК).

**Ключевые слова:** бестраншейная технология, пневмоударный механизм, дроссель, погружение труб, энергия удара, частота ударов, расход воздуха, дополнительные проточныe камеры.

В строительстве важное значение имеет применение современных технологий, которые сокращают сроки и стоимость строительства, уменьшают долю ручного труда и повышают качество строительно-монтажных работ.

Погружение металлических труб по бестраншной технологии является одним из эффективных способов строительства инженерных коммуникаций при их пересечении с различного рода препятствиями — автомобильными и железными дорогами, городскими улицами, а также при ведении работ в стесненных условиях, при точечном строительстве или когда работы ведутся вблизи зданий, введенных в эксплуатацию, аварийных сооружений, в зонах, подверженных оползням.

При открытом способе производства работ приходится прекращать или ограничивать движение транспорта, строить объезды, перекладывать существующие коммуникации, нарушать благоустройство территорий.

При погружении металлических труб по бестраншной технологии (рис. 1) указанные недостатки отсутствуют. Этот способ может быть эффективно использован при строительстве магистральных, разводящих и внутридворовых инженерных сетей.

Погружение металлических труб по бестраншной технологии происходит следующим образом (см. рис. 1).

Под ответственным строительным участком 5 разрабатывается два приемка — подающий 3 и принимающий 7. В подающем приемке располагается пневматическая ударная машина для погружения металлических труб 4, воздушный шланг 2, пневматический компрессор с машинистом-оператором 1.

Из подающего приемка постепенно погружаются секции металлических труб открытым торцом в сторону принимающего приемка. Когда из принимающего приемка выходит крайний торец трубы, работы по погружению трубы останавливаются.

Далее производится очистка трубы от грунта следующим образом. На торец трубы со стороны подающего приемка плотно одевается натрубник 8 с воздушным шлангом. Через натрубник подается сжатый воздух,

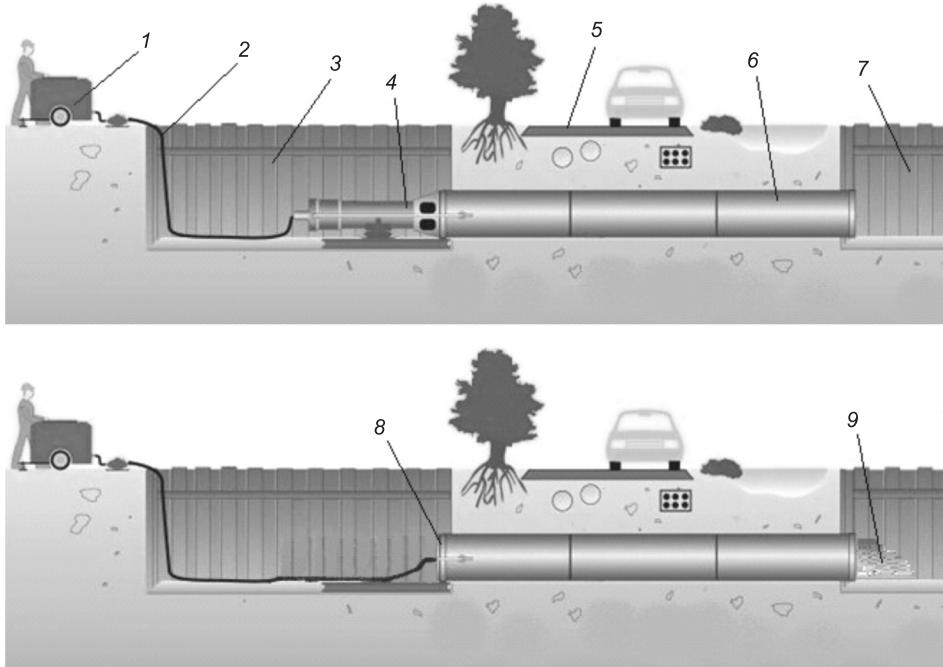


Рис. 1. Технология погружения металлических труб в грунт по бестраншейной технологии  
1 — пневматический компрессор; 2 — воздушный шланг; 3, 7 — приямок; 4 — пневматическая ударная машина для погружения металлических труб; 5 — ответственный строительный участок;  
6 — металлическая труба; 8 — натрубник; 9 — грунт

который постепенно выталкивает грунт 9 из трубы наружу через торец со стороны принимающего приямка.

Рассмотрим устройство и физико-математическое описание рабочего процесса наиболее распространенных принципиальных схем пневматических машин ударного действия [1], применяемых для погружения трубокожухов.

Введем допущения для последующих физико-математических описаний рабочих процессов рассматриваемых пневматических ударных механизмов (далее ПУМ):

- 1) перетечки воздуха между камерами не учитываются;
- 2) учтены только бародинамические и баромеханические составляющие воздуха в камерах;
- 3) индексы при объемах камер бародинамических параметров приняты для каждого ПУМ в соответствии с изображением на рис. 1–5;
- 4) силы трения в движущихся контактируемых парах не учитываются;
- 5) координаты каналов впуска — выпуска опущены и назначаются при конструировании;
- 6) коэффициенты расходов воздуха для всех каналов приняты равными единице и для конкретных конструкций уточняются.

Ограничения для бародинамических параметров по давлению приняты по зависимостям Сен-Венана–Вантцеля: при течении направления воздуха «откуда» (из какой камеры) индекс  $i$ , а при течении направления воздуха «куда» (в какую камеру) индекс  $j$  в соответствии с формулой (1)

$$\Phi_{ji} \equiv \Phi_{ij} = \begin{cases} 0,5283 > p_i / p_j & 0,2588, \\ 0,5283 \leq p_i / p_j & ((p_i / p_j)^{2/k} - (p_j / p_i)^{(1+k)/k})^{1/2}, \\ 0,5283 > p_j / p_i & 0,2588, \\ 0,5283 \leq p_j / p_i & ((p_j / p_i)^{2/k} - (p_i / p_j)^{(1+k)/k})^{1/2}. \end{cases} \quad (1)$$

Все отечественные (табл. 1) и зарубежные (табл. 2) пневматические ударные машины для погружения металлических труб выполнены по единой принципиальной схеме с одной управляемой камерой и бесклапанной системой воздухораспределения.

Отечественные машины производятся Одесским заводом строительно-отделочных машин (ОАО «Одесский завод СОМ») (СО 166), Минским ПО «Строймаш» (ОАО «СТРОЙМАШ») (М200, М400) и Омским аэрокосмическим объединением «Полет» (ПО «ПОЛЕТ» — филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» (г. Москва)) (М200).

В настоящее время типоразмерный ряд пневматических ударных машин для погружения металлических труб производится компанией ОАО «Михневский ремонтно-механический завод».

**Таблица 1. Технические характеристики отечественных пневматических ударных машин для погружения труб-кожухов [1]**

Параметр	СО166	М200	М400
Диаметр трубы, мм	325–630	325–820	426–1020
Длина проходки, м	60	60	60
Средняя скорость проходки, м/ч	0,5–15	0,5–15	0,5–15
Энергия единичного удара, Дж	1000	2000	4000
Частота ударов, Гц	3,3	3,2	2,9
Давление сжатого воздуха, МПа	0,6	0,6	0,6
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	9	10	20
Размеры (без шлангов), мм диаметр длина	240 1710	262 2230	406 2590
Масса, кг	370	710	1400

**Таблица 2. Технические характеристики пневматических ударных машин для погружения металлических труб фирмы «Тракто-Техник (Грундомат)» (Германия) [2]**

Параметр	Геркулес	Гигант	Колосс	Голиаф	Taupус
Диаметр забиваемой трубы, мм	250–500	300–800	500–1000	500–1200	600–2000
Длина проходки, м	60	60	—	—	—
Частота ударов, Гц	5,7	5,2	3,7	3,0	3,0
Давление сжатого воздуха, МПа	0,65	0,65	0,65	0,65	—
Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	8	12	20	35	50
Размеры, мм наружный диаметр длина	220 1850	260 1900	350 2300	450 3200	670 3645
Масса, кг	600	—	1300	2800	4800

В Институте горного дела СО РАН проводятся работы по совершенствованию существующих и по созданию более эффективных машин для забивания труб. Ниже приведен обзор принципиальных схем пневматических ударных машин, которые реализованы в действующих образцах и прошли стендовую или промышленную проверку.

На рис. 2 приведена принципиальная схема бесклапанного пневмоударного механизма, имеющего две управляемые камеры. Устройство состоит из корпуса 2, ударника 3 и хвостовика 1, в котором через амортизатор и втулку установлена воздухораспределительная трубка 5, соединенная посредством шланга с источником сжатого воздуха [3].

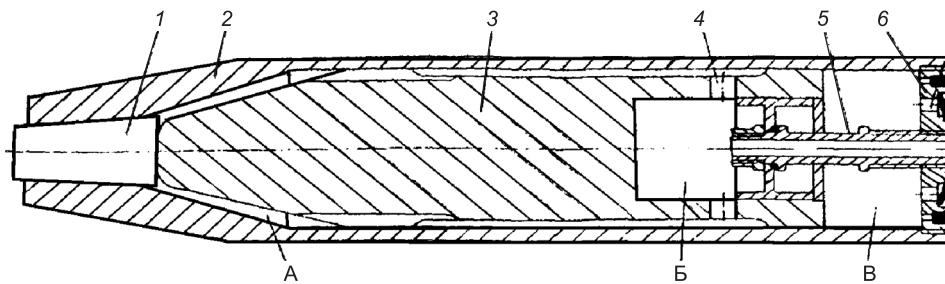


Рис. 2. Принципиальная схема пневматического ударного механизма с двумя управляемыми камерами

Камера В постоянно через каналы 6 сообщена с атмосферой. Впуск воздуха из камеры Б в камеру А и выпуск воздуха из камеры А в камеру В осуществляется в зависимости от положения ударника через канал 4.

При закрепленном золотнике на трубке физико-математическое описание рабочего процесса для ПУМ, представленного на рис. 2, выглядит следующим образом.

Бародинамическая составляющая:

$$\begin{cases} \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{(V_B - x_y S_6)} \left[ W(\omega_c \varphi_c - \omega_4(x_y) \varphi_4) + p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) S_6 \right], \\ \frac{dp_A}{dt} = \frac{k}{(V_A + x_y S_A)} \left[ W(\omega_4(x_y) \varphi_4 - \omega_4(x_y)_x \varphi_4) - p_A \left( \frac{dx_y}{dt} \right) S_A \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{(V_B - x_y (S_B - S_t))} \left[ W(\omega_4(x_y) \varphi_4 - \omega_4(x_y)_x \varphi_4 - \omega_6 \varphi_6) + \right. \\ \left. + p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_B - S_t) \right]. \end{cases} \quad (2)$$

Баромеханическая составляющая для ударника:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{p_A S_A - p_B S_6 - p_B (S_B - S_t)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_0 & \text{при } x_y \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Баромеханическая составляющая для корпуса:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{p_A S_A - p_B S_6 - p_B (S_B - S_t) - F_h}{m_k} & \text{при } x_k > 0, \\ \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o = -k_y \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

В формулах (2)–(4) обозначены:

$p_B, p_A, p_B$  — давление воздуха в сети сжатого воздуха, камерах Б, А, В;

$V_B, V_A, V_B$  — объемы камер Б, А, В;

$x_y, x_k$  — перемещение ударника и корпуса;

$S_B, S_A, S_B, S_6, S_t, S_y$  — площадь диаметрального сечения камер Б, А,

В, трубы, ударника;

$W$  — коэффициент, равный

$$W = \sqrt{\frac{2kR}{k-1}}, \quad (5)$$

$k$  — показатель баро- и термодинамического процесса;

$R$  — газовая постоянная;

$m_y, m_k$  — массы ударника и корпуса;

$k_y$  — коэффициент отскока ударника от хвостовика ПУМ;

$k_k$  — коэффициент отскока корпуса от погружаемой трубы;

$\omega_c, \omega_4, \omega_6$  — проходные сечения каналов впуска — сетевого канала, канала 4, канала 6;

$\varphi_c, \varphi_4, \varphi_6$  — бародинамические функции впуска воздуха из сетевого канала, канала 4, канала 6;

$F_h$  — сила нажатия на корпус.

К недостаткам ПУМ на рис. 2 следует отнести повышенный расход воздуха, обусловленный величиной зазора между корпусом и ударником из-за значительной длины ударника.

На рис. 3 представлена схема бесклапанного пневматического ударного механизма, который имеет три камеры: А — управляемую обратного хода, Б — управляемую прямого хода и В — магистральную. Периодическое сообщение камер А и В обеспечивается радиальным каналом 8 в ударнике,

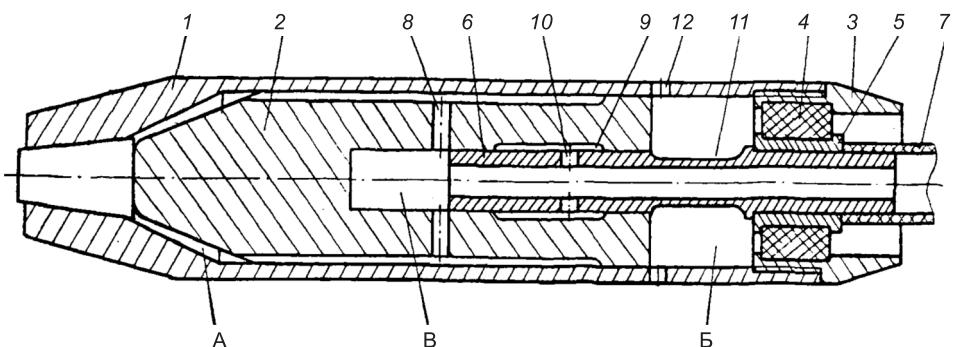


Рис. 3. Принципиальная схема пневматического ударного механизма с двумя управляемыми камерами и магистральной камерой

а камер Б и В — радиальным каналом 10 в трубке 6 и проточками 9, 11, выполненными соответственно в ударнике и трубке. Канал 12 в корпусе периодически сообщает управляемые камеры А и Б с атмосферой [4].

При неподвижной трубке относительно корпуса физико-математическое описание рабочего процесса для ПУМ, представленного на рис. 3, выглядит следующим образом.

Бародинамическая составляющая:

$$\begin{cases} \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{(V_B - x_y(S_y - S_t))} \left[ W(\omega_c \varphi_c - \omega_8(x_y) \varphi_8 - \omega_{10}(x_y) \varphi_{10}) + p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_t) \right], \\ \frac{dp_A}{dt} = \frac{k}{(V_A + x_y S_y)} \left[ W(\omega_8(x_y) \varphi_8 - \omega_{12}(x_y) \varphi_{12}) + p_A \left( \frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{dp_E}{dt} = \frac{k}{(V_E - x_y(S_y - S_t))} \left[ W(\omega_{10}(x_y) \varphi_{10} - \omega_{12}(x_y) \varphi_{12}) - p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_t) \right]. \end{cases} \quad (6)$$

Баромеханическая составляющая для ударника:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{p_A S_y - p_B (S_y - S_t) - p_E (S_y - S_t)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_o = -k_y \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o & \text{при } x_y \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Баромеханическая составляющая для корпуса:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{p_A S_y - p_B (S_y - S_t) - p_E (S_B - S_t) - F_h}{m_k} & \text{при } x_k > 0, \\ \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o = -k_k \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

В формулах (6)–(8) обозначены:

$p_B, p_A, p_E$  — давление воздуха в сети сжатого воздуха, камерах В, А, Б;  
 $V_B, V_A, V_E$  — объемы камер В, А, Б;

$S_t, S_y$  — площадь диаметрального сечения трубы, ударника;

$\omega_c, \omega_8, \omega_{10}, \omega_{12}$  — проходные сечения каналов впуска — сетевого канала, каналов 8, 10, 12;

$\varphi_c, \varphi_8, \varphi_{10}, \varphi_{12}$  — бародинамические функции впуска воздуха из сетевого канала, каналов 8, 10, 12.

К недостаткам ПУМ на рис. 3 следует отнести повышенный расход воздуха и его боковой выхлоп, усложняющий защиту камер от попадания пыли и грязи и снижающий долговечность корпуса.

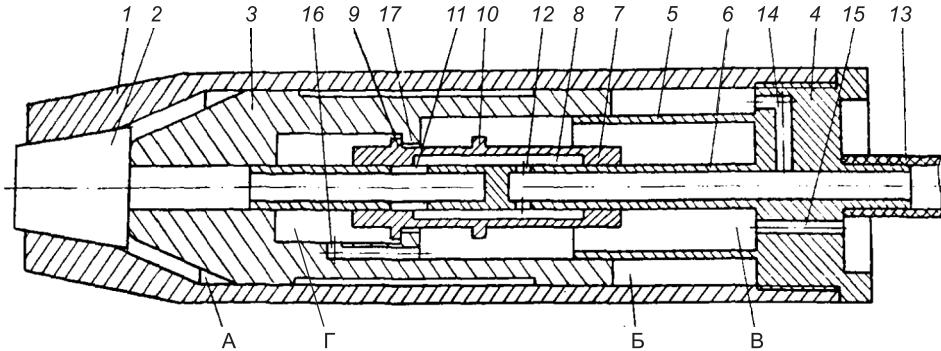


Рис. 4. Пневматический ударный механизм с кинематически связанным ударником с золотником

На рис. 4 приведена принципиальная схема пневматического ударного механизма, в системе воздухораспределения которого имеется золотник, кинематически связанный с ударником [5].

Устройство состоит из корпуса 1 с наковальней 2, ударника 3 с осевым каналом и хвостовика 4. Левая часть хвостовика выполнена в виде двух коаксиальных втулок 5 и 6. Между внутренней поверхностью корпуса, ударником и втулками 6, 5 образованы управляемая А и магистральная Б камеры. На втулке 6, установленной в осевом канале ударника, расположен подвижный золотник 7, имеющий проточку 8 и два упора 9, 10. Втулка 6 снабжена радиальными каналами 11, 12 и имеет перемычку, расположенную между этими каналами. Пространство между втулками хвостовика и ударником является выхлопной камерой В. Осевой канал хвостовика соединен с источником сжатого воздуха посредством шланга 13. В хвостовике также выполнены каналы 14 и 15, сообщающие соответственно камеру Б с магистралью сжатого воздуха и камеру В с атмосферой. Ударник имеет каналы 16, периодически сообщающие камеры А и Б и выступ 17, расположенный между упорами 9 и 10 золотника 7.

При подвижном золотнике относительно ударника и трубки физико-математическое описание рабочего процесса для ПУМ, представленного на рис. 4, выглядит следующим образом.

Бародинамическая составляющая:

$$\begin{cases} \frac{dp_8}{dt} = \frac{k}{V_8} [W(\omega_{12}\varphi_{12} - \omega_{11}(x_3)\varphi_{11})], \\ \frac{dp_A}{dt} = \frac{k}{(V_A + x_y(S_y - S_t))} \left[ W(\omega_{11}(x_3)\varphi_{11} - \omega_{11}(x_y)\varphi_{11}) - p_A \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_t) \right], \\ \frac{dp_\Gamma}{dt} = \frac{k}{(V_\Gamma - x_y(S_\Gamma - S_t - S_3))} \left[ W(\omega_{11}(x_3)\varphi_{11} - \omega_{16}(x_3)\varphi_{16}) + p_\Gamma \left( \frac{dx_3}{dt} \right) (S_\Gamma - S_t - S_3) \right], \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{(V_B - x_y(S_B - S_T))} \left[ W(\omega_{16}(x_3)\varphi_{16} - \omega_{15}\varphi_{15}) + \right. \\ \left. + p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_B - S_T) \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{(V_B - x_y S_{ky})} \left[ W(\omega_{14}\varphi_{14}) + p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) S_{ky} \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Баромеханическая составляющая для основной части ударника:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = (p_A(S_y - S_t) + p_\Gamma(S_\Gamma - S_t - S_3) - p_B S_{ky} - \\ - p_B(S_y - S_{ky} - S_3 - S_t)) / m_y \quad \text{при } x_y > 0, \\ \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_o = -k_y \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o \quad \text{при } x_y \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

Баромеханическая составляющая для кинематически связанных ударника:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_3}{dt^2} = (p_\Gamma(S_\Gamma - S_t) - p_B(S_B - S_t)) / m_3 \quad \text{при } x_3 > 0, \\ \left( \frac{dx_3}{dt} \right)_o = -k_3 \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_3 \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

Баромеханическая составляющая для корпуса:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_k}{dt^2} = (p_A(S_y - S_t) + p_\Gamma(S_\Gamma - S_3 - S_t) - p_B S_{ky} - \\ - p_B(S_y - S_{ky} - S_3 - S_t) - F_h) / m_k \quad \text{при } x_k > 0, \\ \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o = -k_k \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (12)$$

В формулах (9)–(12) обозначены:

$p_8, p_A, p_\Gamma, p_B, p_B$  — давление воздуха в сети сжатого воздуха, камерах 8, А, Г, В, Б;

$V_8, V_A, V_\Gamma, V_B, V_B$  — объемы камер 8, А, Г, В, Б;

$S_t, S_y, S_\Gamma, S_3, S_B, S_{ky}$  — площадь диаметрального сечения трубы, ударника, камеры Г, кинематически связанных ударника, камеры В, кинематически связанных корпуса;

$\omega_{12}, \omega_{11}, \omega_{16}, \omega_{15}, \omega_{14}$  — проходные сечения каналов впуска — сетевого канала, каналов 12, 11, 16, 15, 14;

$\Phi_{12}, \Phi_{11}, \Phi_{16}, \Phi_{15}, \Phi_{14}$  — бародинамические функции впуска воздуха из сетевого канала, каналов 12, 11, 16, 15, 14;

$m_y, m_3$  — массы основной части ударника и кинематически связанныго ударника;

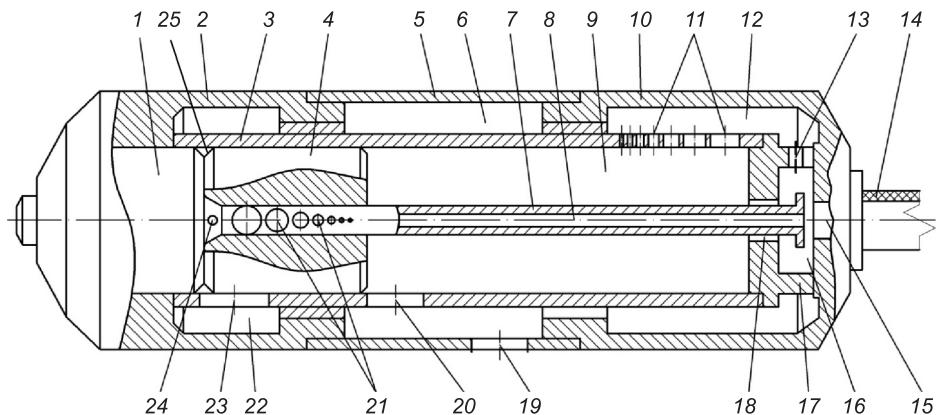
$k_y, k_3$  — коэффициент отскока основной части ударника и кинематически связанного ударника;

$x_y, x_3$  — перемещение основной части ударника и кинематически связанного ударника.

К недостаткам ПУМ на рис. 4 следует отнести наличие механических связей в средствах управления впуском, а также зависимость длины ударника от длины его хода.

Таким образом, опыт создания мощных (с энергией удара 1000–2000 Дж) пневматических ударных машин для погружения металлических труб, в основе которых положены иные принципиальные схемы и системы воздухораспределения, пока не увенчался успехом.

Перечисленных недостатков лишена машина (рис. 5) с дроссельным воздухораспределением [6]. Учитывая это, она принята в качестве базовой при рассмотрении вопросов совершенствования погружения металлических труб в грунт.



*Рис. 5. Пневматический ударный механизм с дроссельным воздухораспределением*

Исследование дроссельных пневматических ударных механизмов (ДПУМ) — нового класса пневматических ударных механизмов (ПУМ) посвящены работы: Э.А. Абраменкова, Д.Э. Абраменкова, Н.А. Клушкина, А.М. Петреева, а также А.Г. Богаченкова, Т.Ю. Виговской, С.В. Гаршина, А.С. Дедова, В.Ф. Корчакова, А.А. Липина, Л.Л. Лысенко, Г.Ф. Тимофеева, Р.Ш. Шабанова, В.В. Чичканова и др.

Устойчивость рабочего цикла ДПУМ (УК) с дополнительным проточным управляемым объемом рабочих камер 9 обеспечивается соблюдением герметичности посадок между камерами 12 и 9 при сохранении проходного сечения дроссельного калиброванного радиального канала 13 [6].

Выполнение дополнительных дроссельных каналов калиброванными позволяет обеспечивать расчетное давление воздуха в камере 9 при перекрытом фигурном канале 11 ударником 4, а при сообщении камеры 9 с атмосферой посредством каналов 19 и 20, расход воздуха калиброванным каналом не будет превышать расчетного с учетом расхода воздуха кольцевым каналом 18 [6–9]. Указанное позволяет без увеличения общего расхода воздуха со стороны камеры 9 увеличить импульс давления воздуха и предударную скорость ударника 4 по хвостовику 1 инструмента.

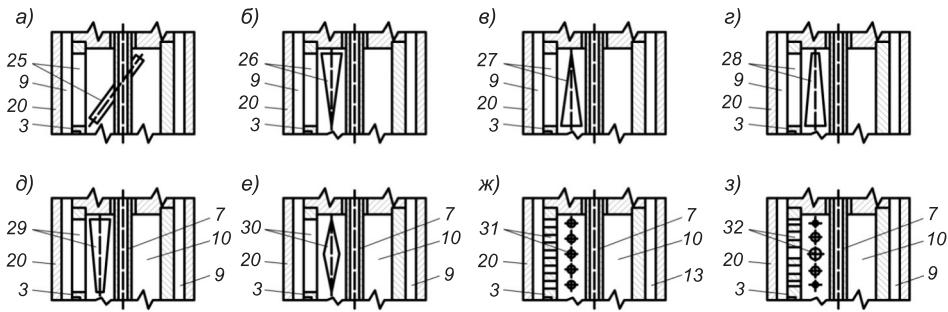


Рис. 6. Варианты исполнения фигурных перепускных каналов

Предложенные варианты исполнения фигурных перепускных каналов 11 и 21 (рис. 6), либо 25 (рис. 6, а), либо 26 (рис. 6, б), либо 27 (рис. 6, в), либо 28 (рис. 6, г), либо 29 (рис. 6, д), либо 30 (рис. 6, е), либо 31 (рис. 6, ж), либо 32 (рис. 6, з) в стенке цилиндра на участке длиной, равной посадочной длине ударника 4, ограниченной его торцевыми кромками по образующей цилиндра, позволяют управлять противодавлением в камере 12 за счет уменьшения проходного сечения кольцевого канала 13, переадресовав уменьшенную часть воздуха камере 12 посредством дроссельного калиброванного канала 13 [6].

Снижение или увеличение противодавления в камере 9 позволяет также изменять величину хода ударника 4 при том же расчетном импульсе давления воздуха со стороны камеры 22 холостого хода, при холостом ходе ударника изменять длину участка его разгона без увеличения времени цикла, поскольку время рабочего хода ударника увеличивается за счет изменяемого импульса со стороны камеры дополнительного объема [6–9], что будет способствовать увеличению ударной мощности и снижению удельного расхода воздуха дроссельной пневмоударной машиной для погружения труб-кожухов.

Выполнение фигурных каналов перепуска (рис. 6, а–з) может дать различные эффекты в формировании силового импульса воздуха со стороны камеры рабочего хода: в виде прямоугольника со сторонами, параллельными образующей цилиндра (см. рис. 5), предопределяет последовательное изменение проходного сечения канала, скорости и координаты положения ударника [6–9]; выполнение канала перепуска в виде наклонного сквозного паза 25 под углом винтовой линии (см. рис. 6, а) предопределяет последовательное изменение проходного сечения канала в зависимости от величины угла винтовой линии, ширины паза, скорости и координаты положения ударника [6–9]; выполнение канала перепуска в виде треугольника 26 с меньшим основанием со стороны крышки (рис. 6, б) предопределяет последовательное изменение проходного сечения канала в зависимости от величины углов при основании, скорости и координаты положения ударника; выполнение канала перепуска в виде треугольника 27 острый углом в вершине со стороны крышки (рис. 6, в) предопределяет изменение проходного сечения канала в зависимости от угла между сторонами треугольника при вершине, скорости и координаты положения ударника [6–9]; выполнение канала перепуска в виде трапеции 28 с одинаковыми либо разными углами при большом основании со стороны крышки (рис. 6, г) предопределяет последовательное изменение проход-

ного сечения канала в зависимости от углов при основании, скорости и координаты положения удара; выполнение канала перепуска в виде трапеции 29 с одинаковыми или разными углами при большем основании со стороны выпускных каналов (рис. 6, *д*) предопределяет последовательное изменение проходного сечения канала в зависимости от углов при основании, скорости и координаты положения удара; выполнение канала перепуска в виде ромба 30 с большей диагональю параллельной образующей цилиндра 28 (рис. 6, *е*) либо под острым углом у образующей цилиндра предопределяет последовательное изменение проходного сечения канала в зависимости от величины острых углов, скорости и координаты положения удара; выполнение канала перепуска в виде круглых отверстий (перфораций) 31 одинакового либо разного сечения, вписанных в прямоугольник (рис. 6, *ж*), либо треугольник, либо трапецию, либо ромб 32 с большей диагональю вдоль образующей цилиндра (рис. 6, *з*), либо расположенных по винтовой линии, предопределяют последовательное изменение проходного сечения канала в зависимости от площадей сечения перфораций, скорости и координаты положения удара.

Физико-математическое описание рабочего процесса для ПУМ, представленного на рис. 5, выглядит следующим образом.

Бародинамическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_{16}}{dt} = \frac{k}{V_{16}} [W(\omega_{15}\varphi_{15} - \omega_{13}\varphi_{13} - \omega_{18}\varphi_{18} - \omega_{21}(x_y)\varphi_{21} - \omega_{24}\varphi_{24})], \\ \frac{dp_{12}}{dt} = \frac{k}{V_{12}} [W(\omega_{13}\varphi_{13} - \omega_{11}(x_3)\varphi_{11})], \\ \frac{dp_9}{dt} = \frac{k}{(V_9 - x_y(S_y - S_t))} \left[ W(\omega_{11}(x_y)\varphi_{11} + \omega_{18}\varphi_{18} - \omega_{20}(x_y)\varphi_{20}) + \right. \\ \left. + p_9 \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_t) \right], \\ \frac{dp_{25}}{dt} = \frac{k}{(V_{25} + x_y(S_y - S_t))} \left[ W(\omega_{21}(x_y)\varphi_{21} - \omega_{23}(x_y)\varphi_{23} + \omega_{24}\varphi_{24} - \right. \\ \left. - \omega_{20}(x_y)\varphi_{20}) - p_{23} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_t) \right], \\ \frac{dp_{22}}{dt} = \frac{k}{V_{22}} [W(\omega_{23}(x_y)\varphi_{23} - \omega_{23}(x_y)_x\varphi_{23})], \\ \frac{dp_6}{dt} = \frac{k}{V_6} [W(\omega_{20}(x_y)\varphi_{20} - \omega_{19}(x_y)\varphi_{19} + \omega_{20}(x_y)_x\varphi_{20} - \omega_{19}(x_y)_x\varphi_{19})]. \end{array} \right. \quad (13)$$

Баромеханическая составляющая для удара:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{d^2x_y}{dt^2} = (p_{25}(S_y - S_t) - p_9(S_y - S_t)) / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_o = -k_y \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y & \text{при } x_y \leq 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

Баромеханическая составляющая для корпуса:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_k}{dt^2} = (p_{25}(S_y - S_t) - p_9(S_y - S_t) - F_h) / m_k & \text{при } x_k > 0, \\ \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_o = -k_k \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

В формулах (13)–(15) обозначены:

$p_{16}, p_{12}, p_9, p_{25}, p_{22}, p_6$  — давление воздуха в сети сжатого воздуха, камерах 16, 12, 9, 25, 22, 6;

$V_{16}, V_{12}, V_9, V_{25}, V_{22}, V_6$  — объемы камер 16, 12, 9, 25, 22, 6;

$S_t, S_y$  — площадь диаметрального сечения трубы, ударника;

$\omega_{15}, \omega_{13}, \omega_{18}, \omega_{21}, \omega_{24}, \omega_{11}, \omega_{23}, \omega_{24}$  — проходные сечения каналов впуска — сетевого канала, каналов 15, 13, 18, 21, 24, 11, 23, 24;

$\Phi_{15}, \Phi_{13}, \Phi_{18}, \Phi_{21}, \Phi_{24}, \Phi_{11}, \Phi_{23}, \Phi_{24}$  — бародинамические функции выпуска воздуха из сетевого канала, каналов 15, 13, 18, 21, 24, 11, 23, 24;

Целесообразность и перспективность применения ДПУМ в пневматических молотках подтверждается физико-математическим описанием рабочих процессов рассмотренных принципиальных схем ПУМ: меньшим количеством и более простым конструктивным исполнением признаков — элементов структур, определяющих надежность работы системы. Например, по схеме на рис. 2 каналы 4 в стенке ударника 3 конструктивно просты, но они предусмотрены для впуска и выпуска отработавшего воздуха из камеры А. В соответствии с процессами впуска они будут удовлетворять процессу наполнения камеры А, но для процесса выпуска каналы потребуют большего проходного сечения и, следовательно, будет нарушаться количественно и качественно рабочий процесс машины. Аналогичный недостаток и у механизмов по схемам на рис. 3 и 4. У механизма на схеме 5 этот недостаток отсутствует.

**Вывод.** Машина с дроссельным воздухораспределением имеет предельно простую компоновку в сравнении с другими типами пневматических машин ударного действия. Все детали машины с дроссельным воздухораспределением конструктивно просты и технологичны в изготовлении и позволяют получить большую длину хода, не зависящую от длины ударника. Впуск сжатого воздуха в камеры рабочего и холостого хода осуществляется через постоянно открытые дроссели-каналы в камеру выпуска. Процессы сжатия и расширения в соответствующих камерах протекают при одновременном постоянном поступлении сетевого воздуха. Улучшение расходных характеристик у подобных машин существенно зависит от правильного выбора соотношения между объемами рабочих камер и проходными сечениями дросселей, а также их координат.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурков, К.С. Пневмопробойники [Текст] / К.С. Гурков, В.В. Клименко, А.Д. Костылев и др. — Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1990. — 217 с.
2. Проспект фирмы «Тракто-Техник (Грундомат)», Германия.
3. Назаров, Н.Г. Повышение ударной мощности машины [Текст] / Н.Г. Назаров // Горные машины. — Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1980. — С. 14–20.

4. Клименко, В.В. Пути повышения энергии удара машин для забивания труб при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций [Текст] / В.В. Клименко, В.П. Гелета, Б.Н. Смоляницкий // Механика горных пород. Горное и строительное машиноведение. Технология горных работ. — Новосибирск : ИГД СО РАН, 1993. — С. 76–79.
5. Гелета, В.П. К вопросу создания пневмоударных устройств повышенной мощности для забивания труб [Текст] / В.П. Гелета, Н.Д. Сырямин // Виброударные процессы в строительном производстве. — Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1986. — С. 15–22.
6. Пат. № 2417874 РФ. Пневматический молот с дроссельным воздухораспределением [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Г.В. Гладышев, В.Ю. Еременко и др. — БИ. — 2011. — № 13.
7. Абраменков, Д.Э. Теория дроссельных пневматических механизмов и разработка типоразмерного ряда ручных машин ударного действия для строительства [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Д.Э. Абраменков. — Омск, 2004. — 45 с.
8. Абраменков, Д.Э. Управляемые камеры с присоединенным объемом в дроссельном пневмоударном механизме [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Г.В. Гладышев, А.А. Кутумов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 8. — С. 89–94.
9. Абраменков, Д.Э. Бародинамические параметры средств стабилизации энергоснабжения пневмоударного механизма с дроссельным воздухораспределением [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Г.В. Гладышев, А.А. Кутумов, А.В. Трегубенко // Труды НГАСУ. — 2009. — Т. 12, № 2 (45). — С. 11–24.

ГЛАДЫШЕВ Григорий Владимирович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено 22.08.14

**Gladyshev Grigoriy Vladimirovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **PNEUMOSHOCK MECHANISM WITH FLOWING OPERATED CHAMBERS OF VOLUME ATTACHED**

Considered trenchless technology works for dipping metal pipes, the selection of throttle pneumatic percussion mechanism with flowing operated chambers for immersion tubes, discusses the structure and principle of operation throttle pneumatic percussion mechanism with flowing operated chambers.

**Key words:** trenchless technology, air percussion mechanism, throttle, dip pipes, impact energy, impact rate, air flow, more flow cells.

## **REFERENCES**

1. Gurkov, K.S. Air Punches [Text] / K.S. Gurkov, V.V. Klimenko, A.D. Kostylev, etc. — Novosibirsk : IGD SO AN USSR, 1990. — 217 p.
2. The prospectus of the company «Tracto-Technik (Grundomat)», Germany.
3. Nazarov, N.G. The increase in the stroke capacity of the machine [Text] / N.G. Nazarov // Mining machinery. — Novosibirsk : IGD SO AN USSR, 1980. — P. 14–20.
4. Klimenko, V.V. Ways of increasing the impact energy machines for clogging pipes in trenchless laying of underground utilities [Text] / V.V. Klimenko, V.P. Geleta, B.N. Smolyanitskiy // Collection of rock mechanics. Mining and construction engineering. Technology mining. — Novosibirsk : IGD SO RAN, 1993. — P. 76–79.

5. Geleta, V.P. To the creation of the air percussion devices increased powerfully-nities for clogging pipes [Text] / V.P. Geleta, N.D. Suryamin // Vibro-impact processes in the construction industry. — Novosibirsk : IGD SO AN USSR, 1986. — P. 15–22.
  6. Pat. N 2417874 of the Russian Federation. Pneumatic hammer with throttle distribution [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, G.V. Gladyshev, V.Yu. Eremenko and others. — BI. — 2011. — N 13.
  7. Abramenkov, D.E. Theory throttle pneumatic mechanisms and develop standard series manual hammers for construction [Text]: author. dis. ... d-ra tech. sciences / D.E. Abramenkov. — Omsk, 2004. — 45 p.
  8. Abramenkov, D.E. Controlled cameras with attached volume in the throttle chamber of the pneumatic impact mechanism [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, G.V. Gladyshev, A.A. Kutumov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 8. — P. 89–94.
  9. Abramenkov, D.E. Barodynamics tool settings stabilization energy carrier air percussion mechanism with throttle distribution [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, G.V. Gladyshev, A.A. Kutumov, A.V. Tregubenko // Proceedings of NSUACE. — 2009. — Vol. 12, N 2 (45). — P. 11–24.
-

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 72.01:624.074.4

В.А. КОРОТКИЙ, Е.А. УСМАНОВА

### КРИВЫЕ ВТОРОГО ПОРЯДКА В ЗАДАЧАХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБОЛОЧЕК

Предложен графоаналитический алгоритм формирования гладкой поверхности, опирающейся на замкнутый четырехзвенный контур, содержащий сегменты конических сечений. Для геометрического моделирования поверхности используется однопараметрическое множество кривых второго порядка с переменным эксцентрицитом.

Ключевые слова: гладкая оболочка, кинематический способ, образующая переменной формы, соприкасающийся цилиндроид, соприкасающийся коноид.

Исследования в области моделирования архитектурных поверхностей (оболочек), удовлетворяющих заранее заданным условиям формообразования или эстетическим критериям, в последнее время заметно сменяются в направлении использования средств и методов вычислительной геометрии, алгоритмы которой положены в основу математических ядер современных отечественных и зарубежных САПР. В частности, известно множество аналитических решений задачи «натягивания» поверхности на трех- или четырехзвенные пространственные контуры с применением различных вариантов бикубической сплайн-аппроксимации (поверхности Кунса, Безье и др.) и последующей табуляцией точек полученной поверхности [1].

Тем не менее при формировании однозначно заданных поверхностей, не имеющих больших градиентов по отношению к некоторой базовой плоскости, графические или графоаналитические алгоритмы могут оказаться предпочтительнее вычислительных методов [2]. Особенный практический интерес представляет задача натягивания оболочки на замкнутый контур, образованный сегментами конических сечений (в силу их простоты и хорошей изученности). Покажем, что в этом случае поверхность оболочки может быть построена с помощью кривых второго порядка в качестве основных формообразующих элементов.

Пусть дан прямоугольный в плане пространственный замкнутый контур  $ABCD$ , фронтальные звенья  $AB$  и  $CD$  которого — дуги кривых второго порядка, а боковые звенья  $AD$  и  $BC$  — произвольные гладкие кривые (рис. 1, a). Требуется построить непрерывную гладкую (не имеющую изломов) поверхность, проходящую через данный замкнутый контур.

Для решения задачи предлагается использовать кинематический способ формирования поверхности, в соответствии с которым кривая  $k^2$ , называемая образующей, скользит по направляющим  $AD$  и  $BC$ , плавно из-

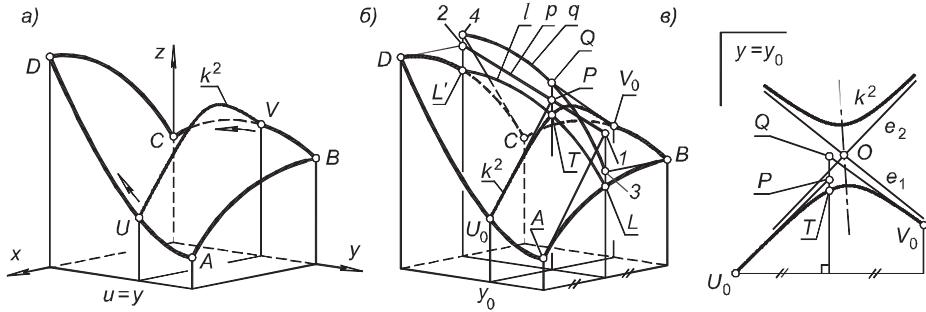


Рис. 1. Определитель поверхности

а — опорный контур; б — дополнительные условия; в — сечение  $y = \text{const}$

меняя свою форму от дуги конического сечения  $AB$  до дуги  $CD$ . Непрерывный ряд последовательных положений образующей формирует конструируемую поверхность.

Потребуем, чтобы образующая  $k^2$  во всех своих положениях была кривой второго порядка. Кривая второго порядка на плоскости обладает пятью степенями свободы. Для ее однозначного определения требуется зафиксировать пять элементов (точек и касательных, инцидентных данной кривой), поэтому для управления формой образующей  $k^2$  следует указать пять условий, определяющих положение этих элементов (точек и касательных) в зависимости от некоторого параметра  $u$ . Конструируемая поверхность имеет прямоугольное в плане основание, ориентированное по осям  $x$  и  $y$  декартовой системы координат, поэтому в качестве параметра  $u$  может быть принята координата  $y$ . Каждому значению параметра  $u = y$  должна соответствовать единственная образующая  $UV = k^2$ , лежащая в плоскости, параллельной фронтальной плоскости  $xz$  (см. рис. 1, а).

Форма образующей зависит от параметра  $u$  следующим образом. Данному значению параметра  $u = y_0$  соответствуют две точки  $U_0, V_0$  на боковых направляющих звеньях  $AD$  и  $BC$ , через которые должна пройти образующая  $k^2$ . Это условие уменьшает степень свободы образующей на две единицы. Задавая в точках  $U_0, V_0$  касательные к  $k^2$ , «отнимаем» у нее еще две степени свободы. Чтобы зафиксировать единственную оставшуюся степень свободы, следует указать какую-либо дополнительную направляющую  $l$ , которая назначается в соответствии с архитектурными (техническими, эстетическими) требованиями, предъявляемыми к конструируемой поверхности. Пусть, например, оболочка, натягиваемая на контур  $ABCD$ , должна пройти через срединную направляющую  $l = LL'$ , плоскость которой параллельна плоскостям боковых звеньев контура (рис. 1, б).

Чтобы задать касательные к образующей  $k^2$  во всех точках направляющих  $AD$  и  $BC$ , укажем две вспомогательные линейчатые поверхности  $\eta, \psi$  с плоскостью параллелизма  $xz$  и с направляющими  $AD, p$  и  $BC, q$ . В частности, если  $p$  — прямая линия, а  $q$  — гладкая кривая, то  $\eta(AD, p)$  — коноид, а  $\psi(BC, q)$  — цилиндроид. Потребуем, чтобы конструируемая оболочка касалась коноида  $\eta$  в точках звена  $AD$  и цилиндра  $\psi$  в точках звена  $BC$ . Это требование обеспечивает однозначность определения касатель-

ных к образующей  $k^2$  в точках  $U, V$ , «пробегающих» по боковым звеньям  $AD$  и  $BC$  опорного контура.

Направляющие линии  $p, q$  вспомогательных поверхностей  $\eta$  и  $\psi$  могут быть назначены с большой степенью произвола, но при обязательном соблюдении следующего условия: точки 1 и 2 пересечения направляющей  $p$  с плоскостями фронтальных звеньев  $AB$  и  $CD$  должны быть инцидентны касательным, проведенным к этим звеньям в узлах  $A$  и  $D$ , а точки 3, 4 пересечения направляющей  $q$  с плоскостями фронтальных звеньев должны быть инцидентны касательным к звеньям  $AB, CD$  в узлах  $B$  и  $C$ . В этом случае множество прямолинейных образующих вспомогательного конуса  $\eta$  включает в себя касательные к звеньям  $AB$  и  $CD$  в узлах  $A, D$ , а множество образующих цилиндроида  $\psi$  включает в себя касательные к этим же звеньям в узлах  $B, C$ . Выполнение указанного условия необходимо для того, чтобы однопараметрическое множество образующих  $k^2$  конструируемой оболочки включало в себя фронтальные звенья  $AB, CD$  опорного контура. Изменяя форму и положение кривых  $p$  и  $q$ , можно управлять «полнотой» конструируемой оболочки подобно тому, как посредством изменения положения управляющих точек осуществляется редактирование поверхности Безье.

Таким образом, графическая часть определителя поверхности состоит из замкнутого контура  $ABCD$ , направляющей  $l = LL'$  и двух вспомогательных линейчатых поверхностей  $\eta(AD, p)$  и  $\psi(BC, q)$ , касающихся конструируемой оболочки вдоль боковых звеньев контура. Покажем, что этими условиями полностью определена единственная поверхность. Противоволному значению параметра  $u = y_0$  отвечают точки  $U_0, V_0$  на боковых звеньях контура, две касательные  $U_0P$  и  $V_0Q$  в этих точках (здесь  $P$  и  $Q$  — точки пересечения линий  $p, q$  с плоскостью  $y = y_0$ ) и точка  $T$  пересечения направляющей  $l = LL'$  с плоскостью  $y_0$  (см. рис. 1, б). В плоскости  $y = y_0$  получаем пять элементов (три точки  $U_0, V_0, T$  и две касательные  $U_0P$  и  $V_0Q$ ), полностью определяющие единственную кривую второго порядка — образующую  $k^2$  конструируемой оболочки (рис. 1, в). Коника  $k^2$ , ее центр  $O$ , главные диаметры и асимптоты  $e_1, e_2$  автоматически определяются с помощью специализированного программного средства [3, 4].

Изменяя параметр  $u = y$ , получаем однопараметрическое множество кривых второго порядка  $k^2$ , которые формируют непрерывную поверхность, проходящую через заданный контур  $ABCD$ . Действительно, если  $u = y_A$ , где  $y_A$  — координата  $y$  узла  $A$ , то точки  $A, B, L$  и касательные  $A_1, B_3$  определяют коническое сечение  $ALB$  — фронтальное звено заданного контура. Аналогично, если  $u = 0$ , получаем другое фронтальное звено данного контура — кривую второго порядка  $DL'C$ . Следовательно, образующая  $k^2$ , скользя по боковым звеньям контура, непрерывно меняет свою форму от сегмента конического сечения  $ALB$  до сегмента  $DL'C$ , оставаясь во всех промежуточных положениях кривой второго порядка.

Таким образом, конструируемая поверхность определяется не двупараметрическим множеством табулированных точек (как это реализуется в случае применения бикубической интерполяции), а однопараметрическим множеством кривых второго порядка  $k^2$ . Между точками плана обо-

лочки (плоскости  $xy$ ) и точками самой оболочки устанавливается взаимно-однозначное соответствие, что доказывает ее непрерывность и однозначность. Гладкость оболочки, понимаемая как наличие единственной касательной плоскости в любой точке поверхности (дифференцируемость), есть следствие гладкости управляющих элементов графической части определителя поверхности (управляющих линий и соприкасающихся поверхностей).

Рассмотрим три варианта формирования поверхности — с выпуклой (рис. 2, а), прямолинейной (рис. 2, б) и вогнутой (рис. 2, в) дополнительной направляющей  $l$ , плоскость которой параллельна плоскостям боковых звеньев  $AD$ ,  $BC$  исходного контура. В соответствии с вышеописанным алгоритмом во всех вариантах получается непрерывная гладкая поверхность, образованная однопараметрическим множеством кривых второго порядка, изменяющих свою форму от дуги эллипса  $AB$  до дуги  $CD$ .

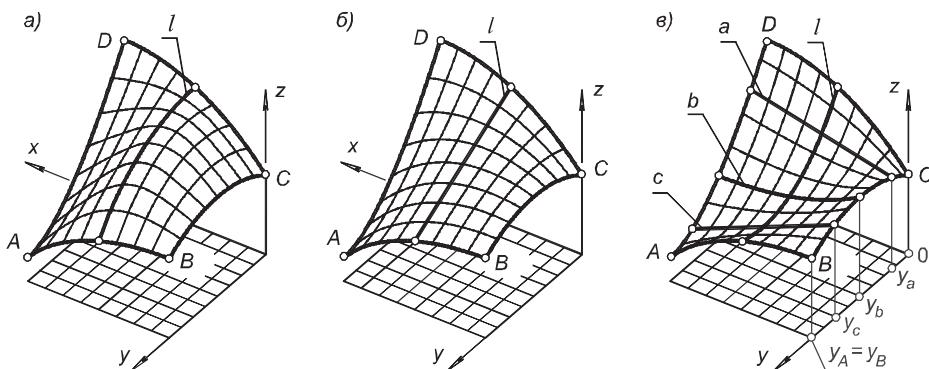


Рис. 2. Оболочка на замкнутом контуре

а — выпуклая направляющая; б — прямолинейная направляющая; в — вогнутая направляющая

Заметим, что поверхность с вогнутой направляющей содержит две кривые второго порядка, выродившиеся в прямолинейные образующие  $a$  и  $c$  (см. рис. 2, в). Очевидно, наличие прямолинейных элементов в каркасе поверхности следует считать ее технологическим преимуществом.

Поставленная задача может быть решена с помощью стандартной процедуры двумерной сплайн-аппроксимации (loft, лофтинг, «по сечениям»), имеющейся в любой графически ориентированной САПР. Для этого достаточно указать звенья  $AB$  и  $CD$  как направляющие, а кривые  $AD$ ,  $l$ ,  $BC$  как сечения искомой поверхности и обратиться к процедуре loft.

Выполним сравнение результатов геометрического моделирования оболочки, сформированной двумя способами: 1) с помощью вычислительной команды loft; 2) с помощью вышеописанного графического алгоритма. Для сравнения выберем оболочку с вогнутой направляющей, выполним ее моделирование указанными способами и сравним профили полученных поверхностей в фронтальных плоскостях  $y = y_a$ ,  $y = y_b$ ,  $y = y_c$ , проходящих через образующие  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Согласно предложенному в статье графическому алгоритму, в сечениях  $y = y_a$ ,  $y = y_c$  содержатся прямолинейные образующие  $a$ ,  $c$ . Но loft-процедура их «не замечает», а формирует поверхность, у которой в этих сечениях возникают заметные осцилляции  $a'$  и  $c'$  (рис. 3), что следует считать технологическим и эсте-

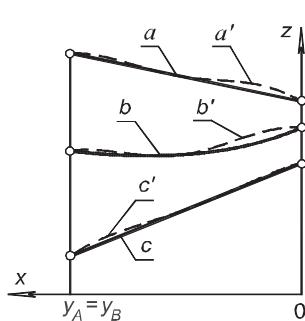


Рис. 3. Сравнение профилей

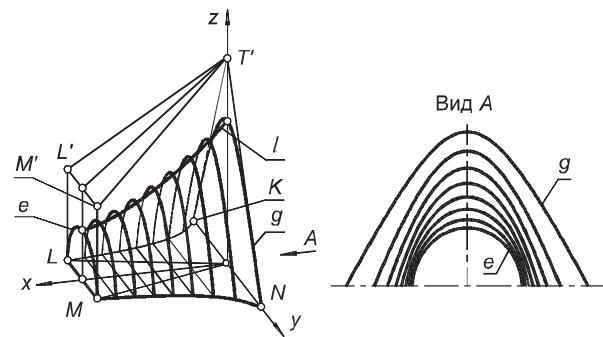


Рис. 4. Архитектурная оболочка

тическим недостатком оболочки, сконструированной с применением лофтинга. В произвольном сечении  $y = y_b$  также отмечаются нежелательные «волны»  $b'$  вместо сегмента  $b$  кривой второго порядка.

**Пример 1. Архитектурная оболочка.** Требуется построить поверхность, опирающуюся на плоский контур  $MNKL$  и проходящую через сегменты эллипса  $e$  и гиперболы  $g$ , лежащие в профильных плоскостях. В плоскости симметрии  $zx$  указана коньковая (водораздельная) линия  $l$  конструируемой поверхности (рис. 4).

Поверхность образована движением образующей (кривой второго порядка), скользящей по направляющей  $l$  и плавно изменяющей свою форму от гиперболы  $g$  до эллипса  $e$ . Три точки образующей, лежащие на направляющих  $MN, KL, l$  (три степени свободы), определяются значением параметра  $u = x$ . Для фиксации двух оставшихся степеней свободы указываем симметрично расположенные коноиды  $\eta(MN, M'T')$  и  $\psi(KL, L'T')$  с плоскостью параллелизма  $yz$ , соприкасающиеся с конструируемой оболочкой вдоль сторон  $MN, KL$  основания. Прямолинейные образующие  $M'T'$  и  $L'T'$  соприкасающихся коноидов проходят через точку  $T'$  пересечения касательных к входному опорному контуру  $g$  и через точки  $M', L'$  на вертикальных касательных к выходному контуру  $e$ . При изменении положения точек  $M', L'$  меняется «полнота» конструируемой оболочки.

**Пример 2. Эллиптический купол.** Выполним построение гладкой оболочки, опирающейся на прямоугольное основание  $TUVW$  и проходящей через коньковую линию — полуэллипс  $g_0$  (полуэллипс — дуга эллипса, ограниченная противолежащими вершинами). Поверхность формируется при плоскопараллельном перемещении полуэллипса  $e$  по направляющей  $g_0$ . Соприкасающиеся линейчатые поверхности  $\eta, \psi$ , задающие касательные к образующей  $e$  вдоль сторон  $TU$  и  $VW$ , вырождаются в вертикальные плоскости. Кривая  $e$  изменяет свою форму от конькового полуэллипса  $e_0$  до прямой  $TW$  или  $UV$  (рис. 5, а).

Поверхность содержит два семейства образующих. Первое семейство состоит из полуэллипсов  $e$  переменного эксцентриситета, опирающихся на стороны  $TU$  и  $VW$  основания. Чтобы найти образующие второго семейства, рассмотрим сечение поверхности произвольной плоскостью, параллельной фронтальной плоскости  $zx$ . Такая плоскость пересекает сетку кривых  $e$  в точках 1, 2, ... . Покажем, что эти точки принадлежат эллипсу. Действительно, проекции  $e_{03}, e_{3}, \dots$  кривых  $e_0, e$  на профильную плоскость  $zy$  образуют пучок конических сечений с четырьмя попарно

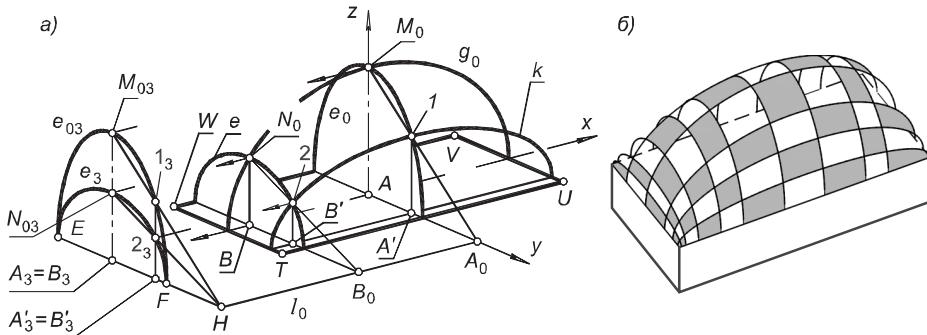


Рис. 5. Эллиптический купол на прямоугольном фундаменте

а — схема построения; б — аксонометрия

совпадшими базисными точками  $E, F$ . Произвольная коника  $e_3$  этого пучка находится в ортогонально-перспективном родстве с проекцией  $e_0$ , поэтому соответственные прямые  $M_{03}-I_3, N_{03}-2_3, \dots$  пересекаются в одной и той же точке  $H$  на оси родства, проходящей через двойные базисные точки  $E, F$  пучка. Кривые  $e_0, e$  и их проекции  $e_{03}, e_3$  конгруэнтны, поэтому точки  $H, A_0 = (M_0-1) \cap xy, B_0 = (N_0-2) \cap xy$  лежат на одной прямой  $l_0$ . Прямые  $M_0A_0, N_0B_0, \dots$  представляют собой образующие прямого клина с направляющими  $g_0, l_0$  и плоскостью параллелизма  $zy$ . Как известно, в сечении поверхности клина плоскостью, параллельной плоскости направляющего эллипса  $g_0$ , образуется эллипс. Следовательно, кривая  $k$ , несущая ряд точек  $1, 2, \dots$ , является эллипсом. Таким образом, множество полуэллипсов в пучке плоскостей, параллельных фронтальной плоскости  $xz$ , составляет второе семейство линий каркаса поверхности. Поскольку поверхность образована двумя семействами дуг эллипсов, то она может быть названа эллиптическим куполом. Поверхность купола образует сопряжение первого порядка гладкости с вертикальными стенами прямоугольного фундамента (рис. 5, б).

Покажем, что рассматриваемая поверхность описывается алгебраическим уравнением четвертого порядка. Принимая  $TU = VW = 2a_0$ ,  $UV = TW = 2b_0$  и обозначив высоту купола  $AM_0 = c_0$ , запишем уравнение образующей  $k$  в виде:  $\frac{x^2}{a_0^2} + \frac{y^2}{b_0^2} + \frac{z^2}{c_0^2} - \frac{x^2}{a_0^2} \frac{y^2}{b_0^2} = 1$ , где параметр  $c^2 = b_0^2(1 - y^2/b_0^2)$  изменяется от  $c_0^2$  (при  $y = 0$ ) до нуля (при  $y = \pm b_0$ ). Подставляя последнее выражение в уравнение образующей  $k$ , получаем уравнение поверхности купола:

$$\frac{x^2}{a_0^2} + \frac{y^2}{b_0^2} + \frac{z^2}{c_0^2} - \frac{x^2}{a_0^2} \frac{y^2}{b_0^2} = 1. \quad (1)$$

Из (1) следует, что сечение поверхности плоскостью  $z = 0$  распадается на две пары параллельных прямых:  $x = \pm a, y = \pm b$  (что соответствует форме прямоугольного основания). В сечениях вертикальными плоскостями  $x = a$  или  $y = b$  ( $a \leq a_0, b \leq b_0$ ) получаем два семейства эллипсов переменного эксцентрицитета. Перемещая начало координат в угловую точку  $W$  и пренебрегая в бесконечно малой окрестности этой точки слагаемыми третьего и четвертого порядков малости, получаем вместо уравнения (1) уравнение  $z^2/c_0^2 = 4xy/a_0b_0$ , описывающее поверхность эллиптического конуса с осью  $y = x, z = 0$  и вершиной в точке  $W$ . Таким образом, в малой

окрестности угловой точки поверхность эллиптического купола с уравнением (1) близка к конической поверхности второго порядка.

**Вывод.** Предложен графоаналитический способ геометрического моделирования поверхностей, в соответствии с которым поверхность формируется как однопараметрическое множество сегментов конических сечений с переменным эксцентрицитетом. Способ может найти применение при проектировании архитектурных оболочек неканонических форм.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованов, Н.Н. Геометрическое моделирование: науч. изд. [Текст] / Н.Н. Голованов. — М. : Изд-во физ.-мат. литературы, 2012. — 472 с.
2. Михайленко, В.Е. Формообразование оболочек в архитектуре [Текст] / В.Е. Михайленко, В.С. Обухова, А.Л. Подгорный. — Киев : Изд-во «Будівельник», 1972. — 205 с.
3. Короткий, В.А. Синтетические алгоритмы построения кривой второго порядка [Текст] / В.А. Короткий // Вестн. компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11. — С. 20–24.
4. Короткий, В.А. Построение кривой второго порядка, проходящей через данные точки и касающейся данных прямых: свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611961 от 04.03.2011; заявл. 13.01.2011.

*КОРОТКИЙ Виктор Анатольевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ospolina@mail.ru  
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск  
УСМАНОВА Екатерина Александровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail:  
Cat\_rin86@mail.ru  
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Получено 04.08.14

**Korotkiy Victor Anatol'evich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ospolina@mail.ru, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
**Usmanova Ekaterina Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: Cat\_rin86@mail.ru, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

## CURVES OF THE SECOND ORDER IN THE TASKS SHAPING ARCHITECTURAL MEMBRANES

Proposed graphic-analytical algorithm for the formation of a smooth surface, based on a closed four-stage circuit, containing segments of conic sections. For geometric surface modeling used a one-parameter set of curves of the second order with variable eccentricity.

**Key words:** smooth shell, kinematic method, forming a variable form, contact the cylindroid, touching conoid.

## REFERENCES

1. Golovanov, N.N. Geometrical modeling [Text] / N.N. Golovanov. — M. : Izd-vo fiziko-matematičeskoy literatury, 2012. — 472 s.
2. Mihaylenko, V.E. Forming of shells in architectur /[Text] / V.E. Mihaylenko, V.S. Obuhova, A.L. Podgorniy. — Kiev : Budivelnik, 1972. — 205 p.
3. Korotkiy, V.A. Synthetic algorithms of construction of the second order [Text] / V.A. Korotkiy // Bulletin of the computer and information technology. — 2014. — N 11. — P. 20–24.
4. Korotkiy, V.A. Building a conic curve passing through these points and data concerning direct (computer program): Certificate of state registration N 2011611961, registration date 04.03.2011, date of application 13.01.2011.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

УДК 662.612

А.В. ФЕДОРОВ, П.А. ФОМИН,  
Д.А. ТРОПИН, ДЖ. ЧЕН

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ВЗРЫВА И СМЯГЧЕНИЕ ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ В СИЛАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

Последние десятилетия отмечены все возрастающим интересом к проблемам взрывопожаробезопасности различных экзотических газов, которые в том числе используются в полупроводниковой и оптоволоконной промышленности. Ниже мы коснемся вопросов безопасности, которые возникают при работе с газом силан в промышленных сооружениях, содержащих технические устройства, использующие в качестве рабочих тел силан и его производные. Ранее в литературе [1, 2] проф. Дж. Чен описал случай катастрофического взрыва силана в производственном помещении в г. Каошионге, Тайвань. При этом зданию был нанесен определенный ущерб. Поэтому тема исследования параметров взрыва силана является безусловно актуальной. В работе рассчитываются параметры взрывов, волн Чепмена–Жуге и относительный размер детонационной ячейки в стехиометрической смеси силан — воздух с химически инертными микрочастицами ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Для вычисления индукционного периода химической реакции в силано-воздушных смесях при повышенных исходных параметрах используется представление Аррениуса. На этой основе оценивается размер детонационных ячеек в стехиометрической смеси силан — воздух. Показано, что ячеистая структура детонации является регулярной. Найдена минимальная массовая доля конденсированной фазы, полная масса и характерный размер облака микрочастиц, кото-

UDC 662.612

A.V. FEDOROV, P.A. FOMIN,  
D.A. TROPIN, JENQ-RENN CHEN

### MODELLING OF EXPLOSION HAZARD AND EXPLOSION MITIGATION IN SILANE-AIR MIXTURES

Recent decades have seen a growing interest in the problems of explosive- and fire-safety of various exotic gases that used in the semiconductor and electronics industries. Below we touch on some safety issues that arise when working with the silane in industrial plants, containing technical devices used a gas silane and its derivatives as the working bodies. In the literature [1, 2] prof. J. Chen described the case of a catastrophic explosion of saline in the production area in Kaohsiung, Taiwan. In this case, the building has suffered some damage. Therefore, the problem of the explosion parameters investigation is certainly relevant. Parameters of instantaneous explosions, Chapman-Jouguet detonation wave and relative detonation cell size in a stoichiometric silane-air mixture with chemically inert microparticles ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) are calculated. Arrhenius formula for calculating the induction period of chemical reaction in silane-air mixtures at elevated initial parameters is proposed. The detonation cell size in stoichiometric silane-air mixture is estimated. It is shown that the detonation cell structure is regular. The minimal mass fraction of condensed phase, the total mass and the characteristic size of the cloud of the microparticles, which

© Федоров А.В., Фомин П.А., Тропин Д.А., Чен Дж., 2014

рые необходимы для успешного подавления многофронтовой детонационной волны в стехиометрической смеси силан — воздух. Кроме того, рассчитаны пределы воспламенения силано-кислородных смесей. Результаты расчетов удовлетворительно коррелируют с имеющимися экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** силан, предел воспламенения, взрыв, детонация, детонационная ячейка, смягчения взрыва, подавление детонации, инертные частицы.

**1. Введение.** Итак, силан является одним из наиболее широко используемых газовых источников кремния в полупроводниковой и оптоволоконной промышленности и имеет непредсказуемые возможности для зажигания [1, 2]. Силано-воздушные смеси могут самовоспламеняться даже при комнатной температуре. Вероятность взрыва зависит от широкого диапазона параметров.

Это обуславливает необходимость определения взрывопожароустойчивости промышленных зданий и сооружений, в которых протекают производственные процессы, связанные с этим газом. Здесь возникают такие вопросы: первый связан с определением параметров взрыва, детонации, скорости горения и другого данного газа, второй — со способами предотвращения, ослабления и подавления последствий взрыва. Немаловажен и третий вопрос, вопрос проектирования специализированных промышленных сооружений, выдерживающих подобные катастрофические взрывы.

Набор и значения этих параметров не были систематически исследованы. В частности, вероятность взрыва смеси силан — воздух зависит от температуры, скорости смеси, влажности окружающей среды и т.д. Таким образом, силано-воздушные смеси являются источником постоянной опасности взрыва. Это подчеркивает важность исследования взрыва и детонации параметров силано-воздушных смесей для решения соот-

are necessary for successive suppression of a multi-front detonation wave in a stoichiometric silane-air mixture, are estimated. Ignition limits of silane-oxygen mixtures are calculated. Results of calculations satisfactory correlate with available experimental data.

**Key words:** silane, ignition limits, explosion, detonation, detonation cell, explosion mitigation, detonation suppression, inert particles.

**1. Introduction.** Silane is one of the most widely used silicon source gases in the semiconductor industry and has unpredictable ignition behavior [1, 2]. Silane-air mixture is able to self-ignition even at room temperature. The probability of an explosion depends on a wide range of parameters. The set and the value of the parameters have not been systematically investigated. For example, silane-air explosion probability depends on the temperature, velocity of the mixture, ambient humidity, etc. Thus, silane-air mixtures are the source of permanent explosion hazard. This emphasizes the importance of investigation of explosion and detonation parameters of silane-air mixtures to solve the corresponding problems of explosion safety.

This necessitates the definition of explosive-, fire-resistance of industrial buildings and structures, in which the production processes associated with this gas take place. This raises the following questions: the first one is related to the definition of the parameters of the explosion, detonation, burning rate and others. The second one connects with ways to prevent, reduce and suppress the effects of the explosion. Also important and the third question, the question of designing specialized industrial buildings that can with-

ветствующих задач взрывобезопасности промышленных зданий и сооружений.

Добавление химически инертных твердых частиц является очень эффективным способом для управления и подавления газовых взрывов. В технике безопасности взрывных явлений химически инертные частицы могут быть использованы для модификации и ослабления взрывных процессов в силено-воздушных смесях. К сожалению, влияние частиц на процессы взрыва в смесях силана с окисляющими агентами не были исследованы до сих пор. Здесь следует рассмотреть следующие вопросы. Каковы (*i*) параметры Чепмена–Жуге (Ч.–Ж.) волн детонации в смеси газ — частицы и (*ii*), каковы минимальная общая массы и характерный размер облака частиц перед фронтом волны, которые необходимы для успешного подавления детонации?

Размер ячейки детонационной волны является одним из наиболее важных параметров для оценки детонационной опасности газовых смесей, в дополнение к критической энергии прямого инициирования детонационной волны (ДВ), геометрических пределов распространения ДВ и т.д. К сожалению, размер ячейки детонационной волны в чистых силено-воздушных смесях и в их смесях с инертными частицами не измерялся экспериментально и не оценивался теоретически. Кроме того, неясно, является ли структура ячеистой детонации регулярной или нет?

Параметры взрывов газовых и смесей силана и частиц могут быть использованы для оценки давления и температуры, нагрузок на вмещающие границы (стены промышленных зданий и сооружений, взрыв при постоянном объеме), позволяют оценить температуру адиабатического пламени (взрыв при постоянном давлении). Такие расчеты для смесей силан — воздух и силан — воздух — химически инертные частицы также не представлены в литературе.

stand such catastrophic explosions.

An addition of chemically inert solid particles is very effective way to control and suppression of gaseous explosions. In explosion safety engineering, chemically inert particles can be used to modify and quench explosion processes in silane-air mixtures. Unfortunately, the influence of the particles on explosion processes in these silane-based mixtures has not been investigated up to now. The following questions need to be considered. What are (*i*) the parameters of the Chapman–Jouguet (C.–J.) detonation wave in a gas-particles mixture and (*ii*) what is the minimum total mass and characteristic size of the cloud of particles ahead of the wave front, that are necessary for successive detonation suppression?

Detonation cell size is one of the most important parameters for estimating the detonation hazard of gaseous mixtures, in addition to the critical energy of direct initiation of a detonation wave (DW), geometrical limits of DW propagation etc. Unfortunately, the detonation cell size in pure silane-air mixtures and in silane-based gas-particles mixtures was not measured experimentally and estimated theoretically. Additionally, it is unclear, is the detonation cell structure regular or not?

Parameters of instantaneous explosions of gaseous and gas-particles mixtures can be used to estimate the pressure and temperature loading on rigid walls, caused by explosion of a gas cabinet (explosion at constant volume) and estimate the adiabatic flame temperature (explosion at constant pressure). Such calculations for silane-air and silane-air-chemically inert particles mixtures are not presented in literature.

Одной из наиболее важных инженерных задач взрывобезопасности является оценка давления взрыва, возникающего при катастрофическом взрыве облака газовой смеси, образованной при истечении горючего газа из баллона высокого давления и его смешивание с окружающей атмосферой. Эти исследования проводились в широком диапазоне параметров водород-кислородных и углеводород-кислородных смесей. Соответствующая формула для вычисления пространственного профиля давления в зависимости от типа и массы топлива получена в [3]. Как показали недавние эксперименты, такие формулы не всегда применимы к силано-воздушным смесям [4].

Одна из причин этого несоответствия, по нашему мнению, может состоять в том, что одним из основных продуктов взрыва силано-воздушной смеси являются молекулы  $\text{SiO}_2$ . Расширение продуктов взрыва приводит к конденсации этих молекул. Это вызывает изменение показателя адиабаты смеси и молярной массы газа, а также ведет к дополнительному выделению тепла, связанного с фазовым переходом. Другая возможная причина может быть связана с тем, что диапазон между верхним и нижним пределами воспламенения силана значительно шире, чем у типичных углеводородов. В результате процент силана, испытывающего взрывное превращение, значительно выше, чем соответствующее значение в случае типичных углеводородов.

Пределы воспламенения силано-кислородных смесей при нормальных и низких давлениях и низких температурах являются очень важными параметрами их взрывной безопасности. К сожалению, расчеты, представленные в литературе, не позволяют объяснить зависимость пределов воспламенения от температуры и давления. Кроме того, возникает вопрос:

One of the most important engineering problems of explosion safety is the estimation of explosion pressure arising during explosion of a cloud of gaseous mixture formed by 1 of a combustible gas from a high pressure cylinder and its mixing with the ambient atmosphere. These studies were carried out for a wide range of hydrogen-oxygen and hydrocarbon-oxygen mixtures. The corresponding formula for the calculation of the spatial profile of pressure depending on the type and mass of fuel are obtained [3]. As it is shown by recent experiments, such formulas are not always applicable to silane-air mixtures [4].

One of the reasons of this discrepancy, in our opinion, may consist in the fact that one of the main products of the explosion of silane-air mixture are  $\text{SiO}_2$  molecules. Expansion of explosion products leads to condensation of these molecules. This leads to a change in the adiabatic index of the mixture and the molar mass of the gas, and also leads to additional heat release, associated with the phase transition. Another possible reason may be related to the fact that the range between the upper and lower flammable limits of silane significantly wider than that of typical hydrocarbons. As a result, the percentage of silane, experiencing explosive conversion, is significantly higher than the corresponding value in case of typical hydrocarbons.

Ignition limits of silane-oxygen mixtures at normal and low pressures and low temperatures are the very important parameters of explosion safety of silane-oxygen mixtures. Unfortunately, calculations, presented in the literature, do not allow explaining the dependence of the ignition limits on temperature and pressure. Moreover, the question: which kinetic schemes are the

какие кинетические схемы неравновесных химических превращений наиболее адекватные для расчета самовоспламенения силана?

**2. Параметры взрыва при постоянном объеме и давлении в силано-воздушной смеси с химически инертными микрочастицами.** Модель химического равновесия, представленная в [5], была использована для расчета параметров взрывов при постоянном давлении и температуре и детонационных волн в силано-воздушных смесях с химически инертными микрочастицами ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Это позволяет учитывать изменение термодинамических параметров двухфазной смеси за счет увеличения массовой доли конденсированной фазы и сдвигом химического равновесия. Согласно этой модели, конденсированная фаза считается несжимаемой. Частицы находятся в механическом и тепловом равновесии с газом (т.е. скорости и температуры газа и частиц равны). Парциальное давление, общий объем частиц и давление насыщенных паров конденсированной фазы пренебрежимо малы.  $\rho_c = \alpha / (1 - \alpha) \cdot \rho$ , где  $\rho$  — плотность газа,  $\rho_c$  — объемная плотность конденсированной фазы,  $\alpha$  — массовая доля конденсированной фазы в смеси газ — частицы. Удельная внутренняя энергия газа  $U$  в состоянии химического равновесия описывается уравнением

$$U(T, \mu) = [3/4 \cdot (\mu/\mu_a + 1) + 3/2 \cdot (\mu/\mu_a - 1)\theta/T / (\exp(\theta/T) - 1)]RT/\mu + E(1/\mu - 1/\mu_{\min}),$$

и молярная масса газовой смеси  $\mu$  рассчитывается путем решения алгебраического уравнения химического равновесия

$$\rho/\mu \cdot (1 - \mu/\mu_{\max})^2 \exp(E/\mathfrak{R}T) / (\mu/\mu_{\min} - 1) = AT^{3/4} / 4K_+ \cdot (1 - \exp(-\theta/T))^{3/2},$$

где  $T$  — температура газа;

most adequate for calculation of self ignition of silane is still open?

**2. Parameters of explosion at constant volume and pressure in silane-air mixture with chemically inert micro-particles.** The model of chemical equilibrium, presented by [5], has been used to calculate the parameters of explosions at constant pressure and temperature and detonation waves in silane-air mixtures with chemically inert microparticles ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). It allows us to take into account the change of thermodynamic parameters of two-phase mixture owing to an increase of mass fraction of condensed phase and shift of chemical equilibrium. According to this model, condensed phase assumed to be incompressible. The particles are in mechanical and heat equilibrium with the gas (i.e. the velocity and temperature of gas and particles are equal). The partial pressure and total volume of particles and the pressure of saturated vapors of condensed phase are negligible small;  $\rho_c = \alpha / (1 - \alpha) \cdot \rho$ , where  $\rho$  is the gas density,  $\rho_c$  is the volume density of condensed phase,  $\alpha$  is the mass fraction of condensed phase in gas-particles mixture. Specific internal energy of gas  $U$  in the state of chemical equilibrium is described by equation

and molar mass of gaseous mixture  $\mu$  is calculated by algebraic equation of chemical equilibrium

where  $T$  is the gas temperature;

$\mu_a$ ,  $\mu_{\min}$ ,  $\mu_{\max}$  — молярные массы газа в атомарных, полностью диссоциированных и полностью рекомбинированных состояниях;

$\theta$  — эффективная температура возбуждения колебательных степеней свободы молекул;

$E$  — средняя энергия диссоциации продуктов реакции;

$A$ ,  $K_+$  — константы скорости диссоциации и рекомбинации обобщенных продуктов реакции;

$R$  — универсальная газовая постоянная.

Параметры  $\mu$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_{\min}$  и  $\mu_{\max}$  соответствуют газовой фазе. Алгоритм вычисления констант модели химического равновесия был представлен в [5, 6]. Предполагалось, что в момент времени немедленно после взрыва при постоянном давлении  $P$  или объеме  $V$  химический состав газа соответствует состоянию химического равновесия. Характеристики взрыва были рассчитаны с помощью системы алгебраических уравнений химического равновесия, уравнения состояния идеального газа и баланса внутренней энергии (если  $\rho = \text{const}$ ) или энталпии (если  $P = \text{const}$ ).

Результаты расчетов для стехиометрической смеси силана и воздуха показаны на рис. 1. Индекс «0» соответствует начальному состоянию. Следует отметить, что давление взрыва при постоянном объеме и температуре взрыва при постоянном давлении в силано-воздушной смеси (рис. 1) сопоставимы с соответствующими значениями стехиометрических водород-воздушных и ацетилен-воздушных смесей [7]. Это указывает на высокую взрывную способность силано-воздушных смесей. Результаты расчетов, представленные на рис. 1, б, могут быть использованы для оценки давления и температуры, а также нагрузки на ограничивающие стенки, вызванные взрывом смесей на основе силана в ограниченных объемах промышленных сооружений [8].

$\mu_a$ ,  $\mu_{\min}$ ,  $\mu_{\max}$  are the molar masses of gas in the atomic, completely dissociated and completely recombinated states;

$\theta$  is the effective temperature of excitation of the vibrational degrees of freedom of the molecules;  $E$  is the average energy of dissociation of the reaction products;

$A$ ,  $K_+$  are the rate constants of dissociation and recombination of the generalized reaction products;

$R$  is the universal gas constant.

Parameters  $\mu$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_{\min}$  and  $\mu_{\max}$  correspond to the gaseous phase. The algorithm for calculating the constants of the model of chemical equilibrium was presented by [5, 6].

It was assumed that in the moment in time after explosion at constant pressure  $P$  or volume  $V$  the chemical composition of the gas corresponds to the state of chemical equilibrium. Parameters of the explosions were calculated by the systems of algebraic equations of chemical equilibrium, state of an ideal gas and balance of internal energy (if  $\rho = \text{const}$ ) or enthalpy (if  $P = \text{const}$ ).

Results of calculations for stoichiometric silane-air mixture are shown in fig. 1. Subscript «0» corresponds to the initial state. Note that the pressure of explosion at constant volume and the temperature of explosion at constant pressure in the silane-air mixture (fig. 1) are comparable with corresponding values of stoichiometric hydrogen-air and acetylene-air mixtures [7]. This indicates the high explosion hazard of silane-air mixtures. Results of calculations, presented in fig. 1, b can be used to estimate the pressure and temperature loading on rigid walls, caused by explosion of silane-based mixtures in a gas cabinet [8].

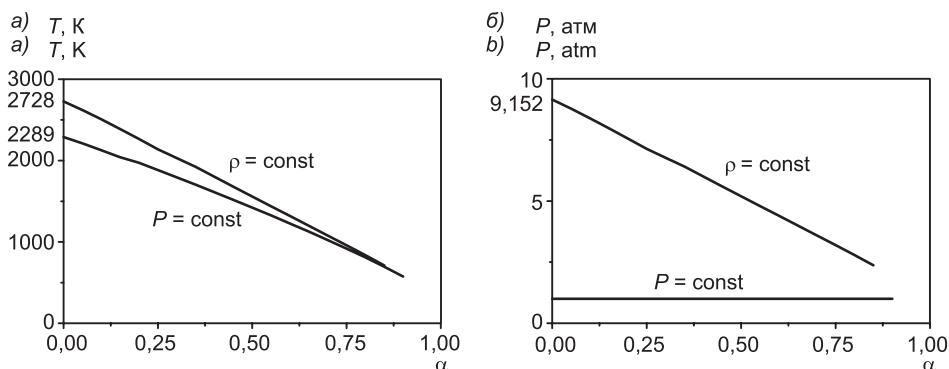


Рис. 1. Температура (а) и давление (б) взрыва при постоянном давлении и объеме в стехиометрической смеси силана и воздуха с микрочастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  $T_0 = 293$  К,  $P_0 = 1$  атм

Fig. 1. Temperature (a) and pressure (b) of the explosions at constant pressure and volume in stoichiometric silane-air mixture with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  microparticles.  $T_0 = 293$  K,  $P_0 = 1$  atm

Как видно из рис. 1, а, б, температура и давление взрыва уменьшаются, если массовая доля конденсированной фазы возрастает. Таким образом, добавление микрочастиц может быть использовано, чтобы контролировать и снижать параметры взрыва в газовых смесях на основе силана.

**3. Параметры детонационной волны в аэродисперсной смеси.** Модель [5] используется для расчета параметров в плоскости Ч.-Ж. ДВ для стехиометрической смеси силан — воздух и микрочастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Далее для расчета параметров одномерной ДВ без потерь в смеси газа и частиц используются следующие общепринятые предположения. А именно: структура волны соответствует модели Зельдович — Неймана — Деренга и газы в точке Ч.-Ж. находятся в состоянии химического равновесия. Как и в предыдущем алгоритме расчета взрывов частицы и газ смеси находятся в механическом и тепловом равновесии. Общий объем частиц и давление насыщенного пара конденсированной фазы пренебрежимо малы. Одномерное моделирование распространения ДВ через облако химически инертных частиц в рамках двухскоростной двухтемпературной

As can be seen from fig. 1, a, b, the temperature and pressure of explosions decrease if the mass fraction of the condensed phase increases. Therefore, the addition of microparticles can be used to control and mitigate explosions in silane-based gaseous mixtures.

**3. Parameters of detonation wave in gas-particles mixture.** The model of [5] are used to calculate the parameters of a C.-J. DW in a stoichiometric silane-air mixture with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  microparticles. The following generally accepted assumptions are used to calculate the parameters of a one-dimensional DW without losses in gas-particle mixture. The structure of the wave corresponds to Zel'dovich-von Neumann-Doering model and the gas in C.-J. point is in the state of chemical equilibrium. As in the above algorithm for calculating explosions of the gas-particles mixtures, the condensed phase is assumed to be in mechanical and heat equilibrium with the gas; the total volume of particles and the saturated vapor pressure of the condensed phase are negligible small. One dimensional modeling of DW propagation through a cloud of chemically inert particles in a two-velocity two-tem-

модели механики гетерогенных сред были представлены в [9, 10].

В результате замкнутая система алгебраических уравнений для расчета параметров волны Ч.-Ж. включает в себя законы сохранения массы, импульса и энергии, уравнения состояния, уравнения химического равновесия и само определение состояния Ч.-Ж. Мы используем явную алгебраическую формулу для расчета показателя адиабаты в двухфазной смеси в состоянии химического равновесия  $\gamma(T, \mu, \alpha)$ , представленную в [5]. Результаты расчетов приведены на рис. 2,  $u_D$  является скоростью детонационной волны.

Параметры газа за лидирующим ударным фронтом детонационной волны (параметры пика фон Неймана) рассчитываются по замкнутой системе алгебраических уравнений, которая включает в себя законы сохранения массы, импульса и энергии и

perature formulation were presented by [9, 10].

The closed system of algebraic equations for calculation C.-J. parameters of the wave includes the laws of conservation of mass, momentum and energy, equation of state, equation of chemical equilibrium and C.-J. condition. We use the explicit algebraic formula for calculating the adiabatic index of the two-phase mixture in the state of chemical equilibrium  $\gamma(T, \mu, \alpha)$ , presented by [5]. Results of calculations are shown in fig. 2,  $u_D$  is the velocity of detonation wave.

The gas parameters behind the leading shock front of detonation wave (von Neumann spike parameters) are calculated by the closed system of algebraic equations, which includes the laws of conservation of the mass, momentum and

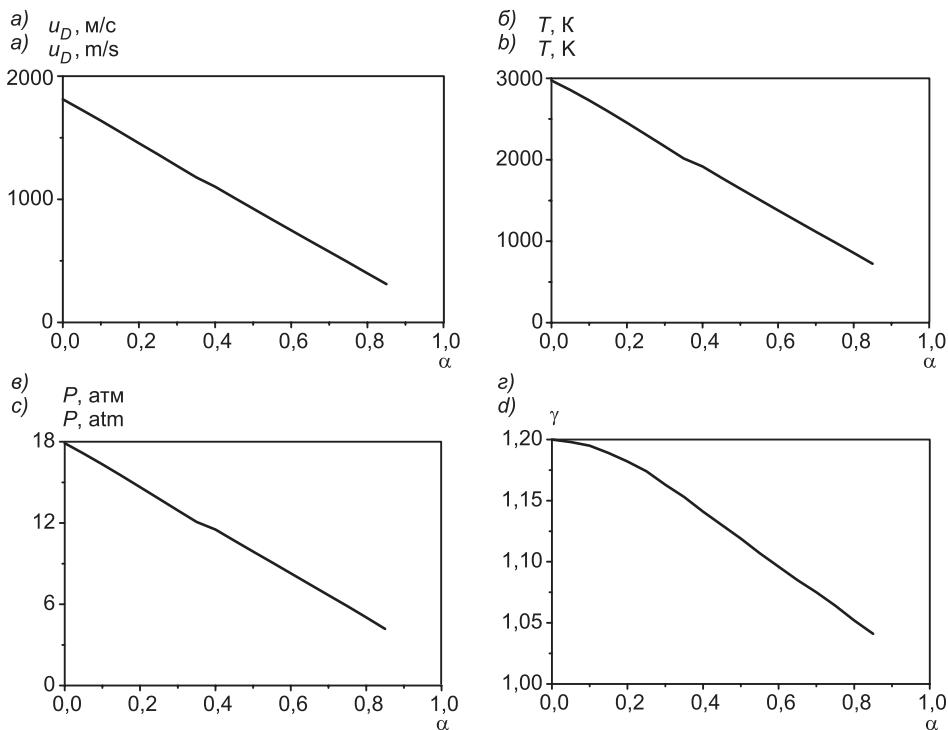


Рис. 2. Параметры Чепмена–Жуге детонационной волны в стехиометрической смеси сиан — воздух с микрочастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
 $T_0 = 293$  К,  $P_0 = 1$  атм

Fig. 2. Chapman–Jouguet parameters of detonation wave in stoichiometric silane — air mixture with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  microparticles.  
 $T_0 = 293$  K,  $P_0 = 1$  atm

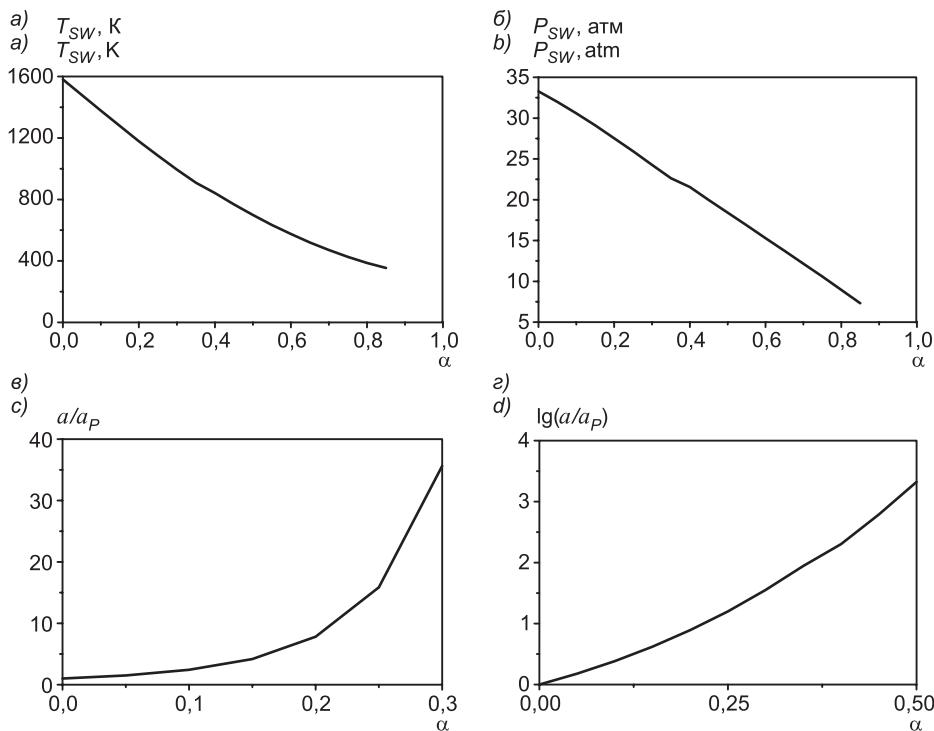


Рис. 3. Параметры в пике Неймана и относительный размер ячейки детонационной волны в стехиометрической силано-воздушной смеси с микрочастицами  $Al_2O_3$ .  $T_0 = 293$  К,  $P_0 = 1$  атм

уравнения состояния. Результаты расчетов приведены на рис. 3, а, б. Нижний индекс «SW» соответствует параметрам за лидирующим ударным фронтом ДВ.

Как видно из рис. 2 и 3, а, б, добавление микрочастиц может быть использовано для контроля и ослабления ДВ в силановых газовых смесях, поскольку увеличение массовой доли конденсированной фазы приводит к уменьшению скорости, давления и температуры волны. Увеличение массовой доли конденсированной фазы приводит к уменьшению показателя адиабаты смеси. Если массовая доля увеличивается от 0 до 0,85, значение  $\gamma$  уменьшается от 1,2 до 1,025 (см. рис. 2, г). Отметим, что расширение продуктов взрыва приводит к конденсации  $SiO_2$ . Такая конденсация и соответствующее изменение показателя адиабаты должны

Fig. 3. Von Neumann spike parameters and relative cell size of detonation wave in stoichiometric silane-air mixture with  $Al_2O_3$  microparticles.  $T_0 = 293$  K,  $P_0 = 1$  atm

energy and the equation of state. The results of calculations are shown in fig. 3, a, b. Subscript «SW» correspond to parameters behind the leading shock front of DW.

As can be seen from fig. 2 and 3, a, b, the addition of microparticles can be used to control and mitigate DWs in silane-based gaseous mixtures, because an increase of mass fraction of the condensed phase leads to a decrease of the velocity, pressure and temperature of the wave. An increase of the mass fraction of the condensed phase leads to a decrease of adiabatic index of the mixture. If the mass fraction of the particles increased from 0 to 0,85, the value  $\gamma$  decreased from 1,2 to 1,025 (fig. 2, d). Note, that expansion of explosion products leads to  $SiO_2$  condensation. Such condens-

быть приняты во внимание при оценках параметров соответствующей взрывной волны.

**4. Расчет размера детонационной ячейки в стехиометрической силано-воздушной газовой смеси.** Для того, чтобы рассчитать размер ДВ, была предложена Аррениусская зависимость для расчета индукционного периода химической реакции  $\tau$  в силано-воздушных смесях при высоких давлениях и температурах:

$$\tau = 1,37 \cdot 10^{-10} (P / P_*)^{-0.47} \xi_{\text{SiH}_4}^{-0.84} \xi_{\text{O}_2}^{-0.07} \exp(9695 / T),$$

где  $\xi_{\text{SiH}_4}$  и  $\xi_{\text{O}_2}$  — массовые концентрации силана и кислорода,  $P_* = 1$  атм.

Для этих целей использовался детальный кинетический механизм горения силана и рассчитан процесс воспламенения силана. Эта формула и модель детонационной ячейки [11] используется для оценок продольных и поперечных размеров детонационной ячейки в чистой газовой смеси (без микрочастиц):

$$b_P = 4 \frac{E_a}{RT_{SW}} u_D \tau_{SW}, \quad a_P = 0,6 b_P.$$

Здесь  $b$  и  $a$  — продольный и поперечный размеры ячейки; индекс « $P$ » относится к чистому газу;  $E_a$  — энергия активации.

В соответствии с настоящими расчетами для стехиометрической силано-воздушной смеси  $b_P = 3,3$  см и  $a_P = 2$  см. Такие малые размеры ячейки показывают, что детонационная опасность смеси очень высокая.

Характерная энергия прямого инициирования детонационной волны в газовых смесях может быть просто оценена явными алгебраическими формулами, если известен размер детонационной ячейки [12, 13].

Известно, что регулярная ячеистая структура детонационной вол-

sation and corresponding change of adiabatic index should be taken into account in estimation parameters of corresponding blast wave.

**4. Calculation of detonation cell size in a stoichiometric silane-air gaseous mixture.** In order to calculate the size of DW, Arrhenius formula for calculation induction period of chemical reaction  $\tau$  in silane-air mixtures at elevated pressures and temperatures has been proposed:

where  $\xi_{\text{SiH}_4}$  and  $\xi_{\text{O}_2}$  are the molar fractions of silane and oxygen,  $P_* = 1$  atm.

For this purpose the detail chemical kinetic mechanism of silane combustion is used and the process of silane ignition is calculated. This formula and the [11] model of a detonation cell are used to estimate the longitudinal and transverse detonation cell sizes in pure gaseous mixture (without microparticles):

$$b_P = 4 \frac{E_a}{RT_{SW}} u_D \tau_{SW}, \quad a_P = 0,6 b_P.$$

Here  $b$  and  $a$  are longitudinal and transverse cell sizes; index « $P$ » corresponds to pure gas; and  $E_a$  is the energy of activation.

According to the present calculations, for a stoichiometric silane-air mixture  $b_P = 3,3$  cm and  $a_P = 2$  cm. Such small values of the cell sizes indicate that the detonation hazard of the mixture is very high.

The characteristic energy of direct initiation of a detonation wave in gaseous mixtures can be easily estimated via explicit algebraic formulas if the detonation cell size is known [12, 13].

It is known that a regular cellular structure of the detonation

ны, которая характеризуется симметричными поперечными волнами и малой дисперсией размера ячейки, соответствует низкой энергии активации в формуле для периода индукции. Смесями с регулярной ячеистой структурой являются, например, водород-кислородные смеси. В противоположность, нерегулярная структура детонационной волны соответствует большим значениям энергии активации. Нерегулярная структура детонационной волны (например, в метано-кислородной смеси) включает асимметричные основные поперечные волны, иерархию вторичных поперечных волн и большую дисперсию размера детонационной ячейки. Как может быть видно из формулы, приведенной выше для расчета индукционного периода в силано-воздушных смесях, энергия активации сравнима с соответствующим значением для водород-кислородной смеси. Поэтому мы ожидаем, что ячеистая структура детонационной волны в силано-воздушной смеси будет регулярной.

Обычно в случае истечения газообразного силана из цилиндра только дефлаграционный (недетонационный) режим горения был зарегистрирован [14]. Но известно, что система препятствий может существенно ускорить переход дефлаграции в многофронтовую детонацию, если характерный масштаб препятствий и расстояния между ними сравнимы с размером детонационной ячейки [12, 13]. Поэтому в случае истечения силана в область с некоторой системой препятствий возможна детонация силано-воздушного облака, если характерные масштабы препятствий и промежутков между ними сравнимы с размером детонационной ячейки стехиометрической силано-воздушной смеси ( $a_p = 2$  см, см. выше). Такая возможность должна приниматься во внимание в соответствующих оценках детонационных опасностей. Для того, чтобы

wave, which is characterized by a symmetrical transverse waves and small cell size dispersion, corresponds to the low activation energy in the formula of the induction period. Among the mixtures with a regular cellular structure are, for example, hydrogen-oxygen mixtures. In contrast, the irregular structures of detonation wave correspond to large values of the activation energy. Irregular structure of detonation wave (for example, in methane-oxygen mixture) includes asymmetric main transverse waves, the hierarchy of secondary transverse waves and big dispersion of detonation cell sizes. As can be seen from the above formula for calculating the induction period in silane-air mixtures, the activation energy is comparable with the corresponding value for oxygen-air mixtures. Therefore, we should expect that the cellular structure of a detonation wave in silane-air mixtures will be regular.

Typically, in the case of silane leak from a gas cylinder, only the deflagration (not detonation) mode of explosion was registered [14]. But it is known that a system of obstacles can essentially accelerate transition of deflagration into multi-front detonation if characteristic scales of obstacles and distances between them are comparable with the detonation cell size [12, 13]. Therefore in the case of silane leak into an area with some system of obstacles, detonation of silane-air cloud is possible, if the characteristic scales of the obstacles and the gaps between them are comparable with the detonation cell size of the stoichiometric silane-air mixture ( $a_p = 2$  cm, see above). Such possibility should be taken into account in the corresponding estimations of detonation hazard. In

предотвратить детонационный режим горения, вызванный истечением силана в воздух, необходимо избежать загромождения пространства (в которое возможна утечка силана) маленькими (размером несколько сантиметров) препятствиями. Однако, если необходимо создать детонационную волну в силано-воздушных смесях для исследований, должна быть использована система препятствий с надлежащими характерными масштабами для ускорения перехода горения в детонацию. Прямое инициирование детонационной волны в силано-воздушных смесях интенсивным энерговыделением также может быть использовано.

**5. Оценка размера детонационной ячейки в смеси газ — частицы.** В соответствии с моделью [11] детонационной ячейки в газовых смесях и алгоритмом, представленным в [5], используется следующая формула для относительного размера ячейки ДВ в смесях газ — частицы:

$$a / a_p = b / b_p = u_D / u_{Dp} \cdot \rho_{SW} / \rho_{SWp} \cdot T_{SW} / T_{SWp} \times \\ \times \exp(E_a / R \cdot (1 / T_{SW} - 1 / T_{SWp})).$$

Результаты расчетов этого безразмерного параметра ячейки показаны на рис. 3, в, г.

**6. Подавление детонационной волны: критические параметры облака микрочастиц.** В соответствии с алгоритмом, представленным в [5], использовались следующие критические условия распространения ДВ в трубе:  $a = \pi d$ ;  $d$  — диаметр трубы. Оценены минимальная полная масса микрочастиц  $M$  и характерный размер облака  $H$ , которые необходимы для подавления детонации. Предполагается, что  $H \approx 3b$ . Поэтому  $M = \pi d^2 / 4 \cdot \rho c_0 H = = \pi d^2 / 4 \cdot \alpha / (1 - \alpha) \cdot \rho_0 3b$ . Например, в стехиометрической силано-воздушной смеси при нормальных условиях для  $d = 10$  см и  $d = 50$  см критиче-

order to prevent detonation mode of explosion caused by silane leaks into air, it is necessary to avoid blocking up of a space (in which leakage of silane is possible) by small (a few centimeters in size) obstacles. However, if it is necessary to create a detonation wave in silane-air mixtures for investigations, a system of obstacles with the proper characteristic scales for acceleration deflagration-to-detonation transition should be used. Direct initiation of detonation wave in silane-air mixtures via intensive energy release can be used too.

**5. Estimation of the detonation cell size in the gas-particles mixture.** According to model [11] of detonation cell in gaseous mixtures and the algorithm, presented by [5], the following formula for the relative cell size of DWs in gas-particles mixtures is used:

Results of calculations of this dimensionless cell size are shown on fig. 3, c, d.

**6. Detonation wave suppression: critical parameters of the cloud of microparticles.** According to the algorithm, presented by [5], the following critical condition of DW propagation in a tube is used:  $a = \pi d$ ;  $d$  is the tube diameter. The minimal total mass of the microparticles  $M$  and characteristic size of the cloud  $H$ , which are necessary for detonation suppression are estimated. It is assumed that  $H \approx 3b$ . Therefore  $M = \pi d^2 / 4 \cdot \rho c_0 H = = \pi d^2 / 4 \cdot \alpha / (1 - \alpha) \cdot \rho_0 3b$ . For example, in a stoichiometric silane-air mixture at normal conditions for  $d = 10$  cm and  $d = 50$  cm

ский размер ячейки и относительный размер ячейки:  $a = 31,4$  см,  $b = 53,4$  см,  $a/a_p = 15,7$  и  $a = 157$  см,  $b = 267$  см,  $a/a_p = 78,5$  соответственно. Соответствующие критические массовые доли частиц  $\alpha = 0,25$  и  $\alpha = 0,34$  (рис. 3, в, г). Поэтому  $M = 5,37$  г,  $H = 160$  см и  $M = 1043$  г,  $H = 801$  см соответственно.

**7. Пределы воспламенения силано-кислородных смесей при низких давлениях и температурах.** Рассмотрим задачу о воспламенении смеси силана и кислорода ( $30\% \text{ SiH}_4 + 70\% \text{ O}_2$ ;  $\xi_{\text{SiH}_4} = 0,3$ ,  $\xi_{\text{O}_2} = 0,7$ ) при низких давлениях ( $p \in [0,2; 1]$  атм) и температурах ( $T \in [350, 500]$  К). Эта задача сводится к решению задачи Коши для системы кинетических уравнений, представленных в [15]. Результаты экспериментов и теоретические расчеты представлены на рис. 4. Для начальных условий, которые соответствуют точкам, лежащим слева от кривых, нет воспламенения. Для начальных условий, которые соответствуют точкам, лежащим справа от кривых, имеет место воспламенение. Кривые и экспериментальные данные представляют так называемый «полуостров воспламенения».

Наши расчеты соответствуют кривым с круглыми маркерами. Штриховые кривые относятся к расчетам [16]. Дополнительно на рис. 4 представлены экспериментальные данные Хартмана и др. (см. работу Кондо и др.) [16] (квадратные маркеры, назовем их эксперименты 1) и экспериментальные данные Хартмана и др. [17] (треугольные маркеры, назовем их эксперименты 2). И наконец, на рис. 4 представлены экспериментальные данные Шантаровича [18] (сплошная кривая).

Видно, что при давлениях менее чем 0,2 атм имеется значительное расхождение между экспериментами 1 и экспериментами 2 (рис. 4).

the critical cell sizes and the relative cell size are:  $a = 31,4$  cm,  $b = 53,4$  cm,  $a/a_p = 15,7$  and  $a = 157$  cm,  $b = 267$  cm,  $a/a_p = 78,5$  respectively. The corresponding critical mass fractions of the particles are  $\alpha = 0,25$  and  $\alpha = 0,34$  (fig. 3, c, d). Therefore  $M = 5,37$  g,  $H = 160$  cm and  $M = 1043$  g,  $H = 801$  cm respectively.

**7. Ignition limits of silane-oxygen mixtures at low pressures and temperatures.** Let's consider the problem of ignition of silane-oxygen mixture ( $\xi_{\text{SiH}_4} = 0,3$ ,  $\xi_{\text{O}_2} = 0,7$ ) at low pressure ( $p \in [0,2; 1]$  atm) and temperatures ( $T \in [350, 500]$  K). This problem is reduced to the solution of the Cauchy problem for the system of kinetic equations, presented by [15]. Results of experimental measurements and theoretical calculations of ignition limits are shown in fig. 4. For the initial conditions, which correspond to the points, lying to the left of the curves, there is no ignition. For the initial conditions, lying to the right of the curves, ignition takes place. The curves and experimental data indicate so-called «Ignition Peninsula».

Our calculations correspond to the curve with circular markers. Dashed curve shows the calculations of [16]. Additionally, experimental data of Hartman et al., cited by Kondo et al. [16] (square markers, let's call them as Experiments-1) and Hartman et al. [17] (triangular markers, let's call them as Experiments-2) are shown. And finally, experimental data of Shantarovich [18] (solid curve) are presented.

It is seen that at pressures less than 0,2 atm, there is a significant discrepancy between Experiments-1 and Experiments-2 (fig. 4).

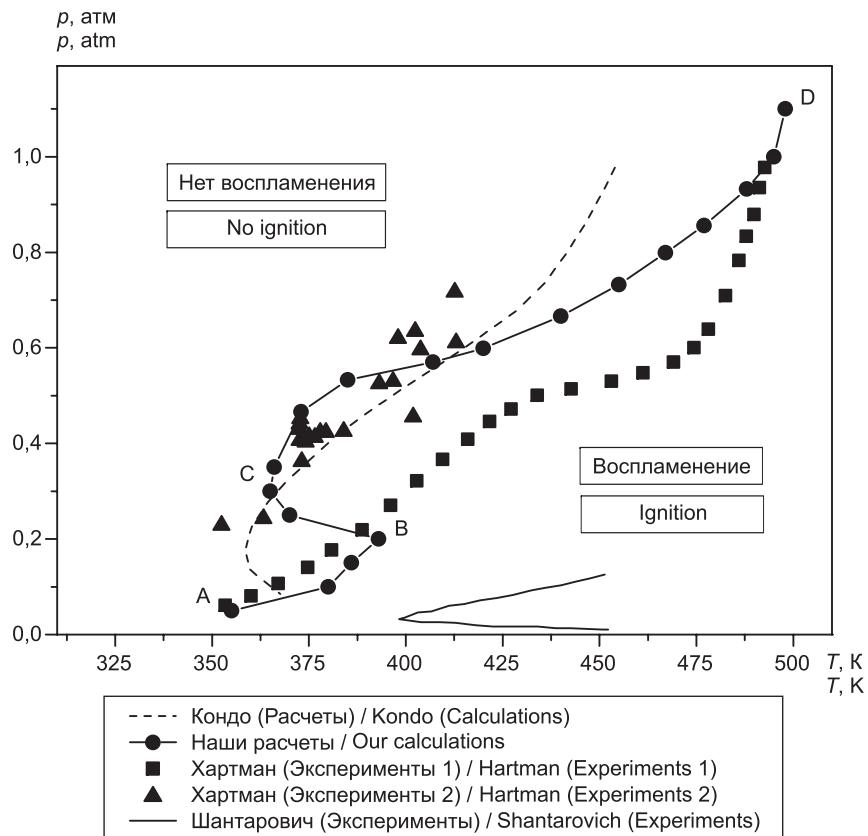


Рис. 4. Пределы воспламенения смеси 30 %  
 $\text{SiH}_4 + 70 \% \text{O}_2$

Расчеты Кондо и др. (2000) расходятся с экспериментами 1 (квадраты). Авторы объясняют это расхождение тем, что не учитываются реакции гибели радикалов на стенках сосуда. Но эти расчеты довольно хорошо описывают эксперименты 2 (треугольники) (см. рис. 4).

Однако наши расчеты при низких давлениях (от 0,6 до 0,2 атм) и низких температурах (от 360 до 420 К) также удовлетворительно описывают эксперименты 2, а при более высоких параметрах (давление более 0,8 атм и температура более 420 К) приближаются к значениям экспериментов 1. Тенденция сближения наших расчетных данных и данных эксперимента 1 начинается с давлений, больших чем 0,6 атм. При давлениях менее 0,2 атм и температуре меньше 360 К наши рас-

Fig. 4. Ignition limits of mixture 30 %  
 $\text{SiH}_4 + 70 \% \text{O}_2$

The calculations of Kondo et al. (2000) diverge with Experiments-1 (squares). The authors explain this discrepancy by the fact that termination of the radicals on the wall was not taken into account. But these calculations describe Experiments-2 (triangles) (fig. 4) quite good.

However, our calculations at low pressures (from 0,6 to 0,2 atm) and low temperatures (from 360 to 420 K) is also satisfactorily describe 2nd series of experiments, and at higher parameters (pressure greater than 0,8 atm and a temperature greater than 420 K) are close to the values of 1st series of experiments. The trend of convergence of our calculated data and the data of experiments 1 begins with a pressure greater than 0,6 atm. At pressures

четыре повторяют эксперименты 1. То есть общим свойством полученного расчетного полуострова является то, что при различных давлениях описываются нижняя и верхняя части данных эксперимента 1, а в промежуточной области имеется переход от данных эксперимента 2 к данным эксперимента 1. Тем самым можно высказать предположение о возможном существовании верхнего полуострова в виде кривой BCD и части AB, соответствующей возможно второму полуострову. Этот нижний полуостров напоминает полуостров [18], различаясь количественно.

Кроме того, наклон кривой в наших расчетах соответствует наклону кривой в экспериментах 2 при давлениях выше 0,3 атм и ниже 0,2 атм. Таким образом кинетика [15] удовлетворительно описывает две серии экспериментальных данных в диапазоне давлений [0,05; 1,1] атм и температур [350, 500] К и позволяет обнаружить соответствующие верхние и нижние пределы воспламенения.

**8. Выводы.** Оценен размер детонационной ячейки в стехиометрической силано-воздушной смеси. Показано, что этот размер того же порядка величины, что и размер ячейки в стехиометрической водород-воздушной и ацетилен-воздушной смесях. Это четко показывает высокую детонационную опасность силано-воздушных смесей. Показано, что структура детонационной ячейки в силано-воздушных смесях регулярная.

Результаты расчетов параметров Чепмена-Жуге детонационной волны, относительный размер детонационной ячейки, взрывы при постоянных давлениях и объеме силано-воздушной смеси с микрочастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и критические условия для подавления ДВ впрыском микрочастиц могут быть использованы для решения соответствующих проблем безопасности взрывов.

Рассчитаны пределы воспламенения силано-кислородных смесей. Резуль-

below 0,2 atm and temperatures less than 360 K, our calculations repeated the 1st series of experiments. That is, a general property resulting calculated peninsula is that at different pressures it describes lower and upper parts of the data in experiments 1, and, in the intermediate region has the transition from the experimental data 1 to the data of experiments 2. Thus we can assume the possible existence of the Upper Peninsula as a curve BCD, and AB part, corresponding to a possible second peninsula. This Lower Peninsula resembles [18] Peninsula, differing quantitatively.

Moreover, the slope of the curve in our calculations corresponds to the slope of the curve in the 2nd series of experiments at pressures greater than 0,3 atm and less than 0,2 atm. Thus the kinetics of [15] describes satisfactorily two series of experimental data in the range of pressure [0,05; 1,1] atm and temperatures [350, 500] K and allows to detect the respective upper and lower limits of ignition.

**8. Conclusions.** The detonation cell size in stoichiometric silane-air mixture has been estimated. It is shown that this size is of the same order of magnitude as the cell size in stoichiometric hydrogen-air and acetylene-air mixtures. This clearly indicates a high detonation hazard of silane-air mixtures. It is shown that detonation cell structure in silane-air mixtures is regular.

Results of calculations of C.-J. parameters of DW, relative detonation cell size, explosions at constant pressure and volume of the silane-air mixture with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  microparticles and critical conditions for DW suppression by the injection of microparticles can be useful for solving corresponding problems of explosion safety.

зультаты расчетов удовлетворительно описывают доступные экспериментальные данные. Показано, что кинетическая схема Ч. Вестбрука (70 прямых и 70 обратных реакций, 25 компонент) вполне адекватна для расчетов самовоспламенения силана при нормальных и низких давлениях и низких температурах в сравнении с более массивными кинетическими схемами.

**Благодарности.** Работа поддержана Сибирским отделением Российской академии наук и Национальным советом по науке Тайваня в рамках совместного научного проекта и Министерством образования и науки Российской Федерации (проект № 211, задача № 2014/140).

**Acknowledgements.** This study was financially supported by Siberian Branch of Russian Academy of Sciences and National Science Council of Taiwan in the frames of joint research collaborative project and Ministry of Education and Science (project number 211, the task № 2014/140).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Chen, J.R. Analysis of a silane explosion in a photovoltaic fabricant plant [Текст] / J.R. Chen, H.Y. Tsai, S.K. Chen, H.R. Pan, S.C. Hu, C.C. Shen, C.M. Kuan, Y.C. Lee, C.C. Wu // Process Safety Progress. — 2006. — Vol. 25. — P. 237–244.
- Chang, Y.Y. Revising of a silane explosion in a photovoltaic fabrication plant [Текст] / Y.Y. Chang, D.J. Peng, H.C. Wu, C.C. Tsaur, C.C. Shen, H.Y. Tsai, J.R. Chen // Process Safety Progress. — 2007. — Vol. 26. — P. 155–157.
- Гельфанд, Б.Е. Барометрическое действие взрывов [Текст] / Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников // Санкт-Петербург, Астерион, 2006.
- Ngai, E.Y. CGA G-13 large-scale silane release test. Part II. Unconfined silane-air explosions [Текст] / E.Y. Ngai, R. Fuhrhop, J.-R. Chen, J. Chao, C.R. Bauwens, C. Mjelde, G. Miller, J. Sameth, J. Borzio, M. Telegenhoff, B. Wilson // Proceedings of the Tenth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (X ISHPMIE). — Norway, Bergen : GexCon AS, 2014. — P. 937–949.
- Fomin, P.A. Effect of chemically inert particles on parameters and suppression of detonation in gases [Текст] / P.A. Fomin, J.-R. Chen // Combustion, Explosions and Shock Waves. — 2009. — Vol. 45, N 3. — P. 303–313.

Ignition limits of silane-oxygen mixtures are calculated. Results of calculations satisfactory correlate with available experimental data. It is shown, which kinetic schemes are the most adequate for calculation self-ignition of silane at normal and low pressures and low temperatures.

## REFERENCES

- Chen, J.R. Analysis of a silane explosion in a photovoltaic fabricant plant [Text] / J.R. Chen, H.Y. Tsai, S.K. Chen, H.R. Pan, S.C. Hu, C.C. Shen, C.M. Kuan, Y.C. Lee, C.C. Wu // Process Safety Progress. — 2006. — Vol. 25. — P. 237–244.
- Chang, Y.Y. Revising of a silane explosion in a photovoltaic fabrication plant [Text] / Y.Y. Chang, D.J. Peng, H.C. Wu, C.C. Tsaur, C.C. Shen, H.Y. Tsai, J.R. Chen // Process Safety Progress. — 2007. — Vol. 26. — P. 155–157.
- Gel'fand, B.E. Baro-thermal action of explosions (Barotermicheskoe deystvie vzryvov) [Text] / B.E. Gel'fand, M.V. Sil'nikov // Saint-Petersburg, Asterion, 2006.
- Ngai, E.Y. CGA G-13 large-scale silane release test. Part II. Unconfined silane-air explosions [Text] / E.Y. Ngai, R. Fuhrhop, J.-R. Chen, J. Chao, C.R. Bauwens, C. Mjelde, G. Miller, J. Sameth, J. Borzio, M. Telegenhoff, B. Wilson // Proceedings of the Tenth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (X ISHPMIE), GexCon AS, Bergen, Norway. — 2014. — P. 937–949.
- Fomin, P.A. Effect of chemically inert particles on parameters and suppression of detonation in gases [Text] / P.A. Fomin, J.-R. Chen // Combustion, Explosions and Shock Waves. — 2009. — Vol. 45, N 3. — P. 303–313.

6. Fomin, P.A. Model of chemical reaction kinetics for calculating detonation processes in gas and heterogeneous mixtures containing hydrogen peroxide [Текст] / P.A. Fomin, A.V. Trotsyuk, A.A. Vasil'ev, K. Mitropetros, H. Hieronymus, D. Roekaerts // Combustion Science and Technology. — 2006. — Vol. 178, N 5. — P. 895–919.
7. Nikolaev, Yu.A. Analysis of equilibrium flows in detonation waves in gases [Текст] / Yu.A. Nikolaev, M.E. Topchiyan // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 1977. — Vol. 13, N 3. — P. 327–338.
8. Ngai, E.Y. Field test of release, ignition, and explosion from silane cylinder valve and gas cabinet [Текст] / E.Y. Ngai, K.P.P. Huang, J.R. Chen, C.C. Shen, H.Y. Tsai, S.K. Chen, S.C. Hu, P.Y. Yeh, C.D. Liu, Y.Y. Chang, D.J. Peng, & H.C. Wu // Process Safety Progress. — 2007. — Vol. 26, N 4. — P. 265–282.
9. Fedorov, A.V. Mathematical Analysis of Detonation Suppression by Inert Particles [Текст] / A.V. Fedorov, P.A. Fomin, V.M. Fomin, D.A. Tropin, J.R. Chen. — Taiwan, Kaohsiung : Kao Tech Publishing, 2012. — 144 p.
10. Fedorov, A.V. Modeling of detonation wave propagation through a cloud of particles in a two-velocity two-temperature formulation [Текст] / A.V. Fedorov, D.A. Tropin // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2013. — Vol. 49, N 2. — P. 178–187.
11. Vasil'ev, A.A. Model of the nucleus of a multifront gas detonation [Текст] / A.A. Vasil'ev, Yu.A. Nikolaev // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 1976. — Vol. 12, N 5. — P. 667–674.
12. Vasil'ev, A.A. Detonation waves in gases [Текст] / A.A. Vasil'ev, V.V. Mitrofanov, M.E. Topchiyan // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 1987. — Vol. 23, N 5. — P. 605–623.
13. Nikolaev, Yu.A. Gas detonation and its application in engineering and technologies (review) [Текст] / Yu.A. Nikolaev, A.A. Vasil'ev, B.Yu. Ul'yanitskii // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2003. — Vol. 39, N 4. — P. 382–410.
14. Fuhrhop, R. CGA G-13 Large-Scale Silane Release Tests. Part II. Silane Vapor Cloud Explosion Overpressure Measurement [Текст] / R. Fuhrhop, E.Y. Ngai, J.R. Chen, J. Chao, C.R. Bauwens, C. Mjelde, G. Miller,
6. Fomin, P.A. Model of chemical reaction kinetics for calculating detonation processes in gas and heterogeneous mixtures containing hydrogen peroxide [Text] / P.A. Fomin, A.V. Trotsyuk, A.A. Vasil'ev, K. Mitropetros, H. Hieronymus, D. Roekaerts // Combustion Science and Technology. — 2006. — Vol. 178, N 5. — P. 895–919.
7. Nikolaev, Yu.A. Analysis of equilibrium flows in detonation waves in gases [Text] / Yu.A. Nikolaev, M.E. Topchiyan // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 1977. — Vol. 13, N 3. — P. 327–338.
8. Ngai, E.Y. Field test of release, ignition, and explosion from silane cylinder valve and gas cabinet [Text] / E.Y. Ngai, K.P.P. Huang, J.R. Chen, C.C. Shen, H.Y. Tsai, S.K. Chen, S.C. Hu, P.Y. Yeh, C.D. Liu, Y.Y. Chang, D.J. Peng & H.C. Wu // Process Safety Progress. — 2007. — Vol. 26, N 4. — P. 265–282.
9. Fedorov, A.V. Mathematical Analysis of Detonation Suppression by Inert Particles [Text] / A.V. Fedorov, P.A. Fomin, V.M. Fomin, D.A. Tropin, J.R. Chen // Kao Tech Publishing, Kaohsiung, Taiwan. — 2012. — 144 p.
10. Fedorov, A.V. Modeling of detonation wave propagation through a cloud of particles in a two-velocity two-temperature formulation [Text] / A.V. Fedorov, D.A. Tropin // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2013. — Vol. 49, N 2. — P. 178–187.
11. Vasil'ev, A.A. Model of the nucleus of a multifront gas detonation [Text] / A.A. Vasil'ev, Yu.A. Nikolaev // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 1976. — Vol. 12, N 5. — P. 667–674.
12. Vasil'ev, A.A. Detonation waves in gases [Text] / A.A. Vasil'ev, V.V. Mitrofanov, M.E. Topchiyan // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 1987. — Vol. 23, N 5. — P. 605–623.
13. Nikolaev, Yu.A. Gas detonation and its application in engineering and technologies (review) [Text] / Yu.A. Nikolaev, A.A. Vasil'ev, B.Yu. Ul'yanitskii // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2003. — Vol. 39, N 4. — P. 382–410.
14. Fuhrhop, R. CGA G-13 Large-Scale Silane Release Tests. Part II. Silane Vapor Cloud Explosion Overpressure Measurement [Text] / R. Fuhrhop,

- J. Sameth, J. Borzio, M. Telgenhoff, B. Wilson // Poster, 7th International Fire and Explosion Hazards Conference. — Providence, RI, May 6 2013.
15. Britten, J.A. A Numerical Study of Silane Combustion [Текст] / J.A. Britten, J. Tong, C.K. Westbrook // Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh. — 1990. — P. 195–202.
16. Kondo, S. A Numerical Study of Low Temperature Silane Combustion [Текст] / S. Kondo, K. Tokuhashi, A. Takahashi, M. Kaise // Combustion Science and Technology. — 2000. — Vol. 159. — P. 391–406.
17. Hartman, J.R. Stoichiometry and Possible Mechanism of  $\text{SiH}_4\text{-O}_2$  Explosions [Текст] / J.R. Hartman, J. Famili-Ghiriba, M.A. Ring, H.E. O'Neil // Combustion and Flame. — 1987. — Vol. 68. — P. 43–56.
18. Shantarovich, P.S. // Acta Physicochim URSS. — 1937. — Vol. 6. — P. 65.
- E.Y. Ngai, J.R. Chen, J. Chao, C.R. Bauwens, C. Mjelde, G. Miller, J. Sameth, J. Borzio, M. Telgenhoff, B. Wilson // Poster, 7th International Fire and Explosion Hazards Conference, Providence, RI, May 6 2013.
15. Britten, J.A. A Numerical Study of Silane Combustion [Text] / J.A. Britten, J. Tong, C.K. Westbrook // Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990. — P. 195–202.
16. Kondo, S. A Numerical Study of Low Temperature Silane Combustion [Text] / S. Kondo, K. Tokuhashi, A. Takahashi, M. Kaise // Combustion Science and Technology. — 2000. — Vol. 159. — P. 391–406.
17. Hartman, J.R. Stoichiometry and Possible Mechanism of  $\text{SiH}_4\text{-O}_2$  Explosions [Text] / J.R. Hartman, J. Famili-Ghiriba, M.A. Ring, H.E. O'Neil // Combustion and Flame. — 1987. — Vol. 68. — P. 43–56.
18. Shantarovich, P.S. // Acta Physicochim URSS. — 1937. — Vol. 6. — P. 65.

ФЕДОРОВ Александр Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ФОМИН Павел Аркадьевич, канд. физ.-мат. наук

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

ТРОПИН Дмитрий Анатольевич, канд. физ.-мат. наук

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЧЕН Джэнк-Ренн, проф., доктор наук (физики и математики), декан инженерного факультета

Национальный Гаосюнский первый университет науки и технологии, Гаосюн, Тайвань

FEDOROV Alexander Vladimirovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of laboratory Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

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

FOMIN Pavel Arkad'yevich, candidate of physical and mathematical sciences, Lavrent'yev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

TROPIN Dmitriy Anatol'yevich, candidate of physical and mathematical sciences, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

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

CHEN Jenq-Renn, professor, doctor of sciences (Physics and Mathematics), dean of college of engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan

УДК 539.3

А.Г. ДЕМЕШКИН, В.Д. КУРГУЗОВ

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВА УПРУГОЙ БАЛКИ, ЧАСТИЧНО ПРИКЛЕЕННОЙ К ЖЕСТКОЙ ПЛИТЕ\*

Исследовано распространение трещины по границе раздела разнородных материалов. Построена компьютерная модель, описывающая процесс отрыва упругой балки, частично приклеенной к жесткой плите. Проведена верификация компьютерной модели путем со-поставления численных результатов с экспериментальными данными отрыва балок из оргстекла, стеклопластика и алюминия, приклеенных эпоксидной смолой к жесткой пли-те из прозрачного оргстекла. Получена зависимость критической нагрузки от длины зоны отслоения. Проведено сравнение аналитических, расчетных и экспериментальных резуль-татов. Показано, что предложенная компьютерная модель неадекватно описывает реаль-ный процесс отрыва балки от плиты, поэтому необходим учет динамических эффектов, возникающих в задачах отслоения.

Ключевые слова: упругая балка, жесткая плита, контактная задача, отслоение.

**Введение.** В работе [1] рассмотрена контактная задача об отрыве упругой балки, частично приклейенной к жесткой плите. Поверхность контакта состоит из чередующихся участков, на которых балка приклес-на и не приклена к жесткому основанию. К одному из торцов балки при-ложена монотонно возрастающая поперечная нагрузка, при достижении предельного значения которой начинается отрыв балки от основания на прикленных участках. Возникает зона отслоения с неизвестной грани-цей, подлежащей определению в ходе решения задачи.

Математическая модель деформирования упругой балки, приклейен-ной к жесткому основанию [1], основана на уравнениях изгиба упругого слоя [2–4]. Балка представляется в виде совокупности структурных эле-ментов (отслоенные, приклейные и неприклейные участки), связи меж-ду которыми определяются из условий сопряжения. Задание граничных условий общего вида на лицевых поверхностях без понижения дифферен-циального порядка уравнений позволяет корректно сформулировать ус-ловиястыковки структурных элементов разных типов и определить гра-ничу зоны отслоения. На поверхностяхстыковки структурных элементов задавались условия непрерывности усилий, моментов, перемещений и уг-лов поворота. Сформулирован силовой критерий отрыва балки от жест-кого основания, характеризующий прочностные свойства клеевого слоя, полу-чены аналитические зависимости размеров зоны отслоения от вели-чины приложенной нагрузки.

К недостаткам математической модели [1] можно отнести положен-ное в ее основу предположение о том, что продольные смещения и уси-лия в балке не являются определяющими в данной задаче и ими можно пренебречь. Ниже данная задача решается в геометрически нелинейной постановке с использованием общих уравнений механики деформируемо-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаменталь-ных исследований (код проекта 14-08-00113).

го твердого тела<sup>1</sup>. Анализ напряженно-деформированного состояния балки проводится методом конечных элементов с использованием пакета конечно-элементного анализа MSC.Marc 2012.

**Постановка задачи.** Балка единичной ширины, толщины  $2h$  и длины  $l$  частично приклеена к жесткой плите (рис. 1). На торце  $x = 0$  приложена поперечная сила  $Q_0$ . В начальный момент контактная поверхность состоит из последовательности приклеенных и неприклеенных к основанию участков (на рис. 1 приклеенные участки отмечены штриховкой). При монотонном возрастании величины  $Q_0$  наступает момент, когда нагрузка достигает критического значения  $Q_0 = Q_*$ , и происходит отрыв балки от плиты. Возникает зона отслоения  $0 \leq x \leq l_*$  (рис. 2), которая по мере увеличения нагрузки продвигается вправо, пробегая последовательно приклеенные и неприклеенные участки. Задача состоит в том, чтобы найти зависимость критической нагрузки  $Q_*$  от длины зоны отслоения  $l_*$ . Аналитическое решение этой задачи с использованием упрощающих предположений приведено в [1].



Рис. 1. Схема нагружения упругой балки, частично приклеенной к жесткой плите



Рис. 2. Возникновение зоны отслоения при отрыве балки от плиты

**Численное моделирование.** Компьютерная 2D-модель представляет собой балку длиной  $l = 200$  мм и толщиной  $2h = 3$  мм в условиях плоского напряженного состояния (см. рис. 1). Балка частично приклеена к жесткому основанию, имеется три приклеенных и три неприклеенных чередующихся участка, границы которых находятся в точках 40, 85, 125, 149, 194 мм. На границе «неприклеенный участок — основание» ставятся условия контакта без трения деформируемого тела (балка) и жесткого тела (основание), на границе «приклеенный участок — основание» заданы условия склейки (контакт без проскальзывания или жесткий контакт), т.е. решается контактная задача механики деформируемого твердого тела. Материал балки подчиняется закону Гука, в качестве мер напряжений и деформаций принимаются тензор напряжений Коши–Грина и тензор конечных деформаций Грина–Лагранжа. Рассматривались три материала балки: алюминий, стеклопластик, оргстекло. Механические характеристики материалов модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  приведены в таблице. Расчетная область покрывалась сеткой из 600 восьмиузловых квадратных элементов с квадратичной аппроксимацией перемещений, размер элемента 1 мм. Расчет производился в квазистатической постановке с использованием пакета конечно-элементного анализа MSC.Marc 2012. Деформиро-

Параметр	Алюминий	Стеклопластик	Оргстекло
$E$ , МПа	70000	28000	3000
$\nu$	0,27	0,25	0,35

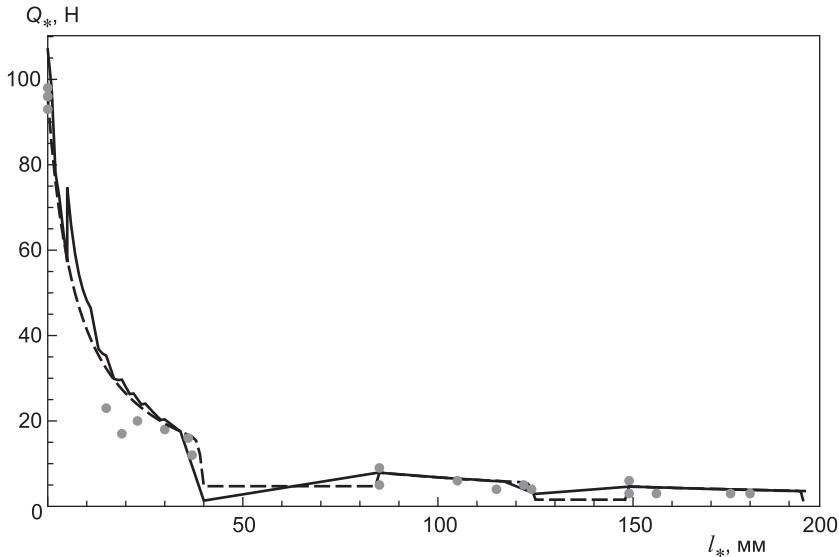
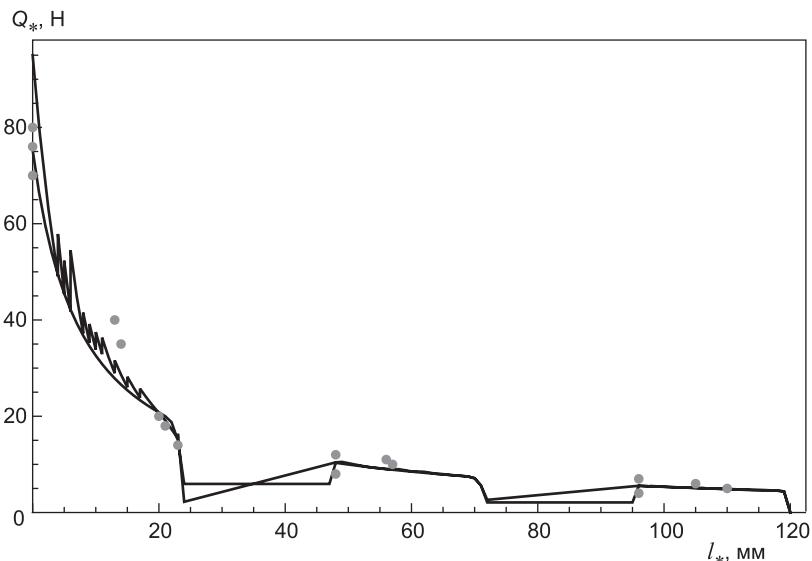
<sup>1</sup> Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

вание балки осуществлялось в режиме жесткого нагружения: к левому торцу балки прикладывалось монотонно возрастающее вертикальное перемещение  $V_0$ , возникающее при этом поперечное усилие  $Q_0$  вычислялось в процессе решения задачи.

**Описание эксперимента.** Экспериментальные исследования отрыва частично приклеенной упругой балки от жесткого основания подробно описаны в [1]. Образцы из оргстекла, стеклопластика или алюминия толщиной  $2h = 3$  мм, шириной  $b = 10$  мм и длиной  $l = 300$  мм приклеивались эпоксидной смолой к жесткой плите из оргстекла, что позволяло визуально с достаточной точностью определить длину зоны отслоения образца. Размеры образцов, шероховатость приклеиваемых поверхностей, усилие и время склеивания во всех экспериментах были одинаковыми. Для каждого вида материала эксперимент повторялся не менее трех раз. Схема эксперимента показана на рис. 1. Образец нагружался приложенной на левом торце силой  $Q_0$ , которая измерялась с помощью динамометра, соответствующая ей длина зоны отслоения  $l_*$  определялась визуально. Плита выполнена из прозрачного оргстекла, поэтому граница зоны отслоения четко видна: прозрачный kleевой слой из эпоксидной смолы в зоне отслоения становится мутным и покрывается мелкими трещинами.

В начальный момент наблюдается следующая картина: нагрузка возрастает до некоторого критического значения  $Q_*$ , причем зона отслоения не образуется ( $l_* = 0$ ). При  $Q_0 = Q_*$  происходит резкое уменьшение нагрузки при быстром увеличении размеров зоны отслоения. В силу быстротечности процесса граница зоны отслоения  $l_*$  практически мгновенно проскаивает непроклеенный участок и останавливается в начале следующего приклеенного участка, в этот момент удается зафиксировать нагрузку. Для дальнейшего продвижения границы зоны отслоения нагрузка снова увеличивается при постоянной величине  $l_*$  и по достижении следующего критического значения происходит страгивание трещины, граница зоны отслоения опять продвигается вперед с одновременным падением нагрузки. Далее процесс повторяется, причем на последующих приклеенных участках значение критической нагрузки  $Q_*$  убывает.

**Полученные результаты.** На рис. 3–5 приведены теоретические и экспериментальные зависимости критической нагрузки  $Q_*$  (Н) от длины зоны отслоения  $l_*$  (мм) для алюминия, стеклопластика и оргстекла соответственно. Штриховые линии получены по формулам математической модели [1], сплошные — результат компьютерного моделирования, серые точки — данные эксперимента. Границы приклеенных и неприклеенных участков для алюминия и оргстекла находятся в точках 40, 85, 125, 149 и 194 мм, для стеклопластика — в точках 24, 48, 72, 96 и 120 мм. Предел прочности kleевого соединения  $\sigma_0$  определялся по формуле (31) работы [1] непосредственно из проведенных экспериментов по значению критической нагрузки  $Q_*$  в начальный момент, когда  $l_* = 0$ . В точках разрыва зависимости  $Q_* = Q_*(l_*)$ , полученной в математической модели [1] ( $l_* = 85, 149$  мм для алюминия и оргстекла,  $l_* = 48, 96$  мм для стеклопластика), нижняя экспериментальная точка относится к значению функции слева, верхняя — к значению функции справа, причем эти значения получены осреднением данных трех экспериментов. В начальный момент

Рис. 3. Теоретические и экспериментальные зависимости  $Q_*$  от  $l_*$  для алюминияРис. 4. Теоретические и экспериментальные зависимости  $Q_*$  от  $l_*$  для стеклопластика

( $l_* = 0$ ) на рис. 3–5 приведены три значения критической нагрузки  $Q_*$ , полученные в экспериментах.

Анализ приведенных на рис. 3–5 результатов позволяет выявить следующие отличия математической модели [1] (штриховые кривые) от компьютерной модели (сплошные кривые). На первом приклеенном участке штриховые кривые монотонно убывают, в то время как сплошные кривые немонотонны на всех рисунках, т.е. трещина отрыва распространяется по kleевому соединению скачками. При интегрировании уравнений равновесия в конечно-элементном анализе используется пошаговая процедура с аддитивным выбором шага по времени (под временем в квазистатических задачах понимается некоторый монотонно возрастающий параметр

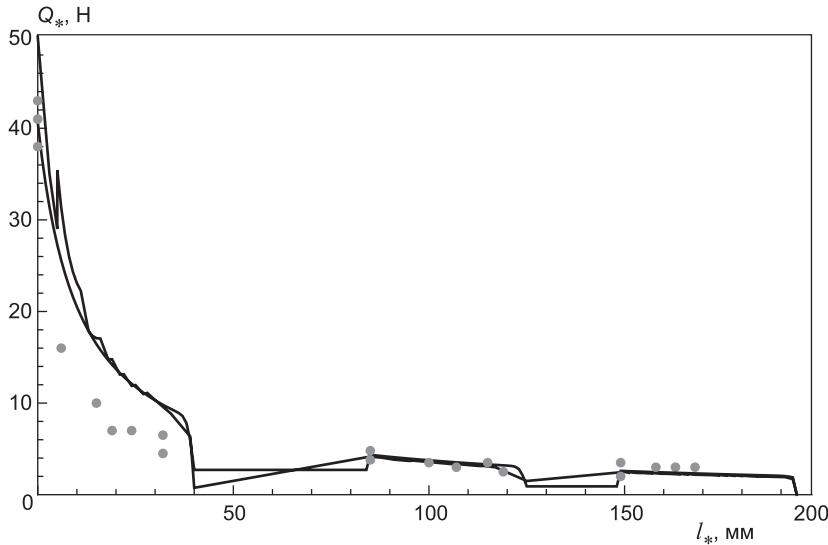


Рис. 5. Теоретические и экспериментальные зависимости  $Q_*$  от  $l_*$  для оргстекла

нагружения, в данном случае вертикальное перемещение  $V_0$ , приложенное к левому торцу балки). При достижении нормальными напряжениями в зоне контакта предела прочности  $\sigma_0$  происходит продвижение трещины на один элемент (на 1 мм) в силу дискретности сетки конечных элементов, критическая нагрузка  $Q_*$  падает. На следующем шаге по времени нагрузка возрастает, через 1–2, редко 3 шага напряжения достигают предела прочности, трещина продвигается на один элемент, нагрузка снова падает. Как показывают расчеты на последовательности измельчающихся сеток (размер элемента 1, 0,5, 0,25 мм), немонотонный характер зависимости  $Q_* = Q_*(l_*)$  сохраняется, поскольку отражает физическую сущность моделируемого процесса. В наибольшей степени на эффект скачкообразного продвижения трещины влияет скорость возрастания внешней нагрузки: при очень медленном нагружении этот эффект будет исчезающе мал, что соответствует переходу от квазистатической постановки к статической. Квазистатический подход занимает промежуточное место между статическим и динамическим. В квазистатической постановке трещина продвигается скачкообразно с немонотонной зависимостью критической нагрузки от длины зоны отслоения. Для более реального описания процесса отрыва балки от жесткой плиты необходим учет возникающих при этом динамических эффектов.

На неприклеенных участках зависимость  $Q_* = Q_*(l_*)$  в математической модели [1] постоянна, а в компьютерной модели растет по линейному закону, поскольку возрастающая вследствие роста внешней нагрузки энергия деформирования расходуется на изгиб балки. На рис. 6 показана

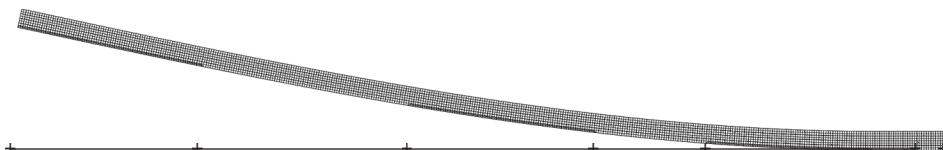


Рис. 6. Деформированная конфигурация балки из алюминия в масштабе 1:1 для перемещения  $V_0 = 26$  мм

деформированная конфигурация балки из алюминия при  $V_0 = 26$  мм, полученная в расчете. Светлым цветом выделены отслоившиеся участки, прямой линией показано жесткое основание, крестиками помечены границы участков, трещина до конца балки не дошла.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показывает, что математическая и компьютерная модели приближенно описывают отрыв балки, частично приклеенной к жесткой плите. Квазистатическая модель неадекватно воспроизводит реальный процесс отрыва балки от плиты, поэтому необходим учет динамических эффектов, возникающих в задачах отслоения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демешкин, А.Г. Об отрыве балки, частично приклейной к жесткой плите [Текст] / А.Г. Демешкин, В.Д. Кургузов // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 7. — С. 4–13.
2. Дергилева, Л.А. Метод решения плоской контактной задачи для упругого слоя [Текст] / Л.А. Дергилева // Динамика сплошной среды / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. — Новосибирск, 1976. — Вып. 25. — С. 24–32.
3. Алексеев, А.Е. Изгиб трехслойной ортотропной балки [Текст] / А.Е. Алексеев // ПМТФ. — 1995. — Т. 36, № 3. — С. 158–166.
4. Алексеев, А.Е. Об отрыве балки, приклейной к жесткой плите [Текст] / А.Е. Алексеев, А.Г. Демешкин // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 4. — С. 151–158.

ДЕМЕШКИН Александр Григорьевич, канд. физ.-мат. наук, доц.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск  
КУРГУЗОВ Владимир Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail:kurguzov@hydro.nsc.ru

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 21.08.14

**Demeshkin Alexander Grigorievich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

**Kurguzov Vladimir Dmitrievich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail:kurguzov@hydro.nsc.ru, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

#### COMPUTER MODELING OF A BEAM SEPARATION PARTIALLY PASTED TO THE RIGID PLATE

Crack propagation on the interface of nonhomogeneous materials is investigated. The numerical solution of a problem on a separation of the elastic beam which has been partially pasted to a rigid plate is received. Experimental researches of a separation of beams from plexiglas, fibreglass and the aluminum pasted by epoxy to a rigid plate from transparent plexiglas that allowed with a sufficient accuracy to define length of peeling zone are conducted. Dependence of critical loading on length of peeling zone is received. Comparison of theoretical and experimental results is carried out. It is shown that the offered mathematical model adequately describes real process of a separation of a beam from a plate.

Key words: elastic beam, rigid plate, contact problem, separation.

REFERENCES

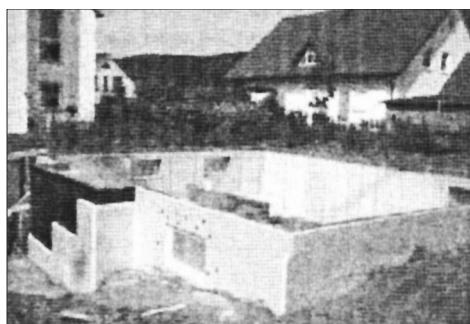
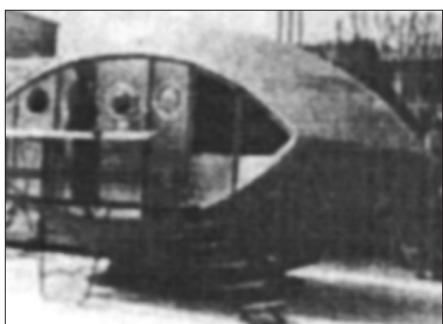
1. Demeshkin, A.G. About beam separation partially pasted to the rigid plate [Text] / A.G. Demeshkin, V.D. Kurguzov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 7. — P. 4–13.
  2. Dergileva, L.A. The method of the solution of a plane contact problem for an elastic layer [Text] / L.A. Dergileva // Dinamika sploshnoy sredy / AS USSR. Siberian Branch. Institute of hydrodynamics. — Novosibirsk, 1976. — N 25. — P. 24–32.
  3. Alekseev, A.E. Bend of a three-layer orthotropic beam [Text] / A.E. Alekseev // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 1995. — Vol. 36, N 3. — P. 158–166.
  4. Alekseev, A.E. About beam separation pasted to the rigid plate [Text] / A.E. Alekseev, A.G. Demeshkin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2003. — Vol. 44, N 4. — P. 151–158.
-

## НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### НОВЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА\*

Использование композитов — сталефибробетонов и строительных конструкций на их основе, а также разработка и использование гибридных конструкций является перспективным направлением в мировой строительной практике. В 2014 г. вышла в свет монография «Сталефибробетон и конструкции на его основе» доктора технических наук, профессора Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I К.В. Талантовой и инженера Н.М. Михеева, в которой представлены результаты многолетних экспериментально-теоретических исследований сталефибробетона и конструкций на его основе, выполненных авторами.

Сталефибробетон (СФБ) как композиционный материал, состоящий из хрупкой бетонной матрицы, стальных волокон конечной длины и специфической межкомпонентной фазы, обладает по сравнению с традиционными бетоном и железобетоном, помимо прочего, высокими физико-механическими характеристиками, которые можно регулировать в широких пределах, что определяет целесообразность его применения в разных областях строительства как в России, так и за рубежом (см. рисунки).



В монографии представлена концепция создания сталефибробетона, а также сталефибробетонных и сталефиброжелезобетонных конструкций с заранее заданными характеристиками на основе единого системного комплексного итерационного процесса проектирования сначала материала, исходя из общих представлений о напряженно-деформированном состоянии конструкций, а затем конструкций с учетом свойств уже запроектированного материала.

Интересными для специалистов могут быть приведенные результаты широкомасштабных экспериментальных исследований лабораторных и натурных образцов сталефибробетона, сталефибробетонных и сталефи-

\* Талантова К.В., Михеев Н.М. Сталефибробетон и конструкции на его основе. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. 276 с.

режелезобетонных конструкций с изменением в широком диапазоне большого числа варьируемых параметров — состав бетона, типа стальных фибр, технологических факторов, процента фибрового армирования, геометрии и размеров сечений элементов, их напряженно-деформированного состояния, вида и продолжительности внешних воздействий.

В книге обобщены данные по проектированию и изготовлению конструкций на основе сталефибробетона, полученные в результате многочисленных экспериментально-теоретических исследований. Даны классификация СФБ по прочности, относительные коэффициенты расхода фибры, коэффициенты надежности по СФБ, правила управления характеристиками СФБ в соответствии с напряженно-деформированным состоянием и условиями эксплуатации разрабатываемой конструкции. Представлены отечественные, в том числе авторские, и зарубежные разработки конструкций разного назначения на основе СФБ, обладающие более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с типовыми аналогами.

Книга предназначена для инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных и строительных организаций. Она может быть полезна студентам строительных специальностей старших курсов, магистрантам и аспирантам.

**От редакции**

---

## ОЧЕНЬ ПОЛЕЗНЫЕ КНИГИ ПО ГЕОТЕХНИКЕ

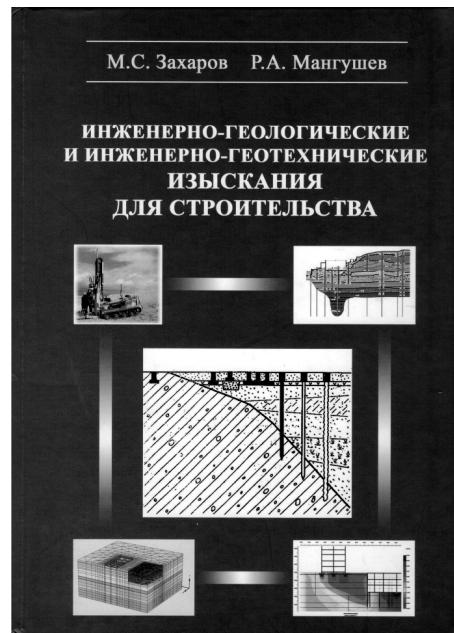
Экономичность, надежность и безопасность современного строительства во многом определяется устройством оснований и фундаментов зданий и сооружений. Стоимость возведения фундаментов и подземных частей сооружений в неблагоприятных инженерно-геологических условиях нередко превышает 20...30 % общей стоимости объектов. До 80 % случаев нарушения эксплуатационной пригодности сооружений и возникновения аварийных ситуаций происходит из-за ошибок, допущенных при проектировании и строительстве оснований и фундаментов.

В свою очередь, проектирование оснований и подземных конструкций строительных объектов в значительной степени зависит от умения инженеров-строителей правильно оценить инженерно-геологические условия площадки строительства и территории, достоверность использованных геологами методов изысканий и правильность интерпретации полученных результатов испытаний грунтов. Это крайне необходимо для учета совместной работы грунтов основания с фундаментами и надземными конструкциями, выбора методов производства работ нулевого цикла.

Современные комплексные инженерные изыскания помимо традиционных геологических вопросов, которые относятся к инженерной геологии (как раздела геологической науки) и, как правило, изучаются и выполняются на практике инженерами-геологами, содержат достаточно большой объем геотехнических исследований, требующих специальной технической (не геологической) подготовки. Они должны изучаться и выполняться инженерами-геотехниками (строителями). Основы геотехнических изысканий, полевых испытаний грунтовых оснований и соответствующие им расчеты относятся к дисциплинам «механика грунтов», «основания и фундаменты».

В 2014 г. для студентов, обучающихся по бакалаврским и магистерским программам по направлению подготовки «Строительство», выпущено учебное пособие «Инженерно-геологические и инженерно-геотехнические изыскания для строительства» (авторы М.С. Захаров, Р.А. Мангушев, под ред. профессора Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2014. 176 с.).

В книге представлена концепция рассмотрения инженерных изысканий как единого взаимосвязанного комплексного процесса для учета совместной работы грунтовых оснований с подземными и надземными конструкциями сооружений и производства инженерных работ. Изложены основы организации комплекс-



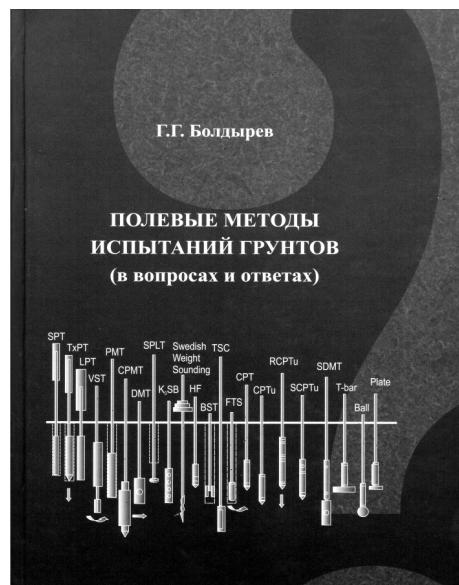
ных инженерных изысканий для строительства и подробно рассмотрены основные методы и технология проведения инженерно-геологических и геотехнических изысканий для разных стадий проектирования и строительства, включая геотехнический мониторинг. Описаны требования к камеральной обработке и интерпретации полученных результатов, представлению отчетных материалов.

Учебное пособие содержит сведения об основных актуализированных нормативно-технических документах, регламентирующих процесс инженерных изысканий. Особо следует отметить приведенный в приложении к пособию словарь инженерно-геологических и геотехнических терминов.

Данное учебное пособие органически дополняют вышедшие несколько ранее научные издания Г.Г. Болдырева «Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса» (Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.) и «Полевые методы испытаний грунтов (В вопросах и ответах)» (Саратов: Изд-во «РАТА», 2013. 356 с.).

В них профессор Г.Г. Болдырев на основе обстоятельного анализа и обобщения многочисленных отечественных и преимущественно зарубежных публикаций за последние 30–50 лет изложил основные методы испытаний грунтов; используемые приборы и специальное оборудование (включая применяемые современные информационно-измерительные системы); рекомендации по интерпретации и использованию получаемых результатов. Следует отметить, что библиографический список рассмотренных в первой книге источников содержит 589 публикаций, из них на русском языке — 113 и соответственно во второй — 378 (в том числе 130 отечественных) работ.

В фундаментальной монографии «Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса» подробно проанализировано поведение песчаных и глинистых грунтов в процессе их непрерывного деформирования. Показано влияние вида напряженного состояния на прочностные и деформационные параметры грунтов. Рассмотрены особенности используемого для испытаний оборудования и методик проведения исследований на получаемые результаты. Подробно представлены ре-



зультаты испытаний грунтов в приборах различной конструкции. Проанализирована зависимость между методами проектирования оснований сооружений и методами определения параметров грунтов. Даны рекомендации по применению рассмотренных методов испытаний и использованию получаемых данных при решении конкретных задач геотехники и фундаментостроения.

Значительный интерес представляет описание специальных исследований грунтов на уникальном зарубежном оборудовании, редко применяемых при стандартных изысканиях.

Книга «Полевые методы испытаний грунтов (В вопросах и ответах)» более подробно в форме вопросов и ответов раскрывает основные методы полевых исследований дисперсных грунтовых оснований: статическое и динамическое зондирование; испытания дилатометрами, плоским и винтовым штампами; буровое и динамометрическое зондирование; испытания прессиометрами и методом лопастного среза; геофизические методы исследований. Полнота изложения материала позволяет использовать книгу в качестве практического пособия при подготовке и выполнении полевых испытаний.

Особую ценность имеет раздел, посвященный интерпретации результатов полевых испытаний. Он включает материал по определению деформационных характеристик грунтов, параметров прочности и коэффициента переуплотнения. В условиях практически отсутствия на русском языке руководств и рекомендаций по полевым методам исследований грунтов монография позволяет расширить сферу их применения и повысить достоверность оценки инженерно-геологических условий площадки строительства.

Публикация данных книг ликвидирует значительный пробел в отечественной геотехнической литературе последней четверти века, посвященной как вопросам испытаний грунтов, описанию современных методов, приборов и оборудования, так и, главное, способам интерпретации результатов испытаний, применяемых в России и за рубежом. Все три книги отличаются хорошим изложением и оформлением. Они снабжены большим количеством уникального справочного и иллюстративного материала, включая цветные рисунки и фотографии, оригинальные схемы и данные из новейшей геотехнической литературы.

Учебное пособие М.С. Захарова и Р.А. Мангушева, монографии Г.Г. Болдырева являются хорошим учебным и справочным материалом для подготовки не только бакалавров и магистров по специальности «Строительство», но и специалистов по специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» специализации «Строительство подземных сооружений». Они будут полезны аспирантам, слушателям курсов повышения квалификации, а также инженерно-техническим работникам изыскательских и проектных организаций, специализирующихся в области геотехники.

*НУЖДИН Л.В., профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией динамики оснований и фундаментов Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*

## **ГИПСОВАЯ ШПАТЛЕВОЧНАЯ СМЕСЬ**

**В НГАСУ (Сибстрин) разработаны составы сухих и гипсовых шпатлевочных смесей двух видов: выравнивающей и финишной. Смеси могут применяться для отделки поверхностей в сухих помещениях с нормальной влажностью для выравнивания стен и потолков, доведения поверхности до глянца перед нанесением декоративных покрытий, подготовки под окраску или оклейку, заделки трещин и раковин, заполнения стыков железобетонных изделий и гипсокартонных листов, монтажа и заделки стыков пазогребневых плит.**

**Условия применения — для внутренних работ.**

**Температура помещения и основания — не ниже +5 °С.**

**Оптимально подобранный состав и комплекс добавок обеспечивает высокие технические характеристики смесей, не уступающие зарубежным аналогам, при этом используется только отечественное сырье, что обеспечивает экономичность и конкурентоспособность продукта.**

### **ПРЕИМУЩЕСТВА ПРЕДЛОЖЕНИЯ:**

- высокая удерживающая способность;
- штукатурный раствор не расслаивается и не обезвоживается даже на пористых, хорошо впитывающих влагу основаниях, при температуре до 35 °С;
- расход предлагаемых смесей в 2–3 раза меньше, чем традиционных цементно-песчаных штукатурных смесей;
- затвердевшая шпатлевка за счет своей микроструктуры обладает способностью «дышать», является паропроницаемой и способствует созданию в помещении благоприятного микроклимата;
- продукт изготовлен из экологически чистых, безопасных для здоровья человека материалов;
- защищает поверхности сгораемых материалов (ДСП, пенополистирол и т.п.) от воздействия огня.

**Разработчик: Безбородов В.А., канд. техн. наук, доц.**

**630086 г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).**

**E-mail: ntio@sibstrin.ru**

**Internet: www.sibstrin.ru**

**Тел./факс: (383) 266-28-89**

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
  - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подпись автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список;

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и **e-mail** авторов;

— **название статьи на английском языке**;

— **аннотация на английском языке**;

— **ключевые слова на английском языке**;

— **библиографический список на английском языке**.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. **Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.)** набираются **прямым шрифтом**. **Латинские буквы** набирать **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), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2014 г. — из расчета 800 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2014 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции  
Теория инженерных сооружений  
Строительные материалы и изделия  
Экономика и организация строительства  
Автоматизация и технология строительного производства  
Гидротехническое строительство  
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов  
Строительные и дорожные машины  
Научные проблемы архитектуры и экологии  
Научно-методический В лабораториях вузов  
Внедрение научных достижений в производство  
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2700 р.

Цена отдельного номера — 450 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами  
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**  
**№ 9–10 (669–670) 2014**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*