МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 10 (658)
Октябрь 2013 г.

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

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

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
П.А. Дмитриев, 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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 25.10.13. Формат 70×108 $^{1}/_{16}$
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 4333

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Митасов В.М., Логунова М.А., Шатохина М.В. Железобетонные балки с организованными трещинами под воздействием длительной нагрузки 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Машкин Н.А., Крутасов Б.В., Бернацкий А.Ф., Крутасова И.Б., Ларичкин В.В. Применение кремнийорганических модификаторов для защиты памятников деревянного зодчества 11

Завадская Л.В., Бердов Г.И., Агалакова Я.С., Шишмакова Е.А. Влияние дисперсных минеральных добавок на структуру и прочность гипсового камня 18

Логанина В.И., Кислицына С.Н., Жегера К.В. Применение синтезированных алюмосиликатов в составе плиточного клея на основе цемента 23

Овчаренко Г.И., Гильмияров Д.И. Взаимосвязь прочности и фазового состава автоклавного известково-зольного камня. Часть I 28

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Щепотин Г.К. Оценка надежности технологического процесса 33

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. Сообщение 2. Эжектирующие свойства ленточного ковшового элеватора 38

Позин Г.М., Уляшева В.М., Киборт И.Д. К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов 48

Шиляев М.И., Пенявский В.В. Влияние порядка компоновки пылеуловителей в каскадные системы на удельные энергозатраты газоочистки 57

Амбросова Г.Т., Функ А.А., Ксенофонтова О.В. Рентабельное и экологически чистое фермерское хозяйство 65

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Принципиальные схемы бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухоподводящей управляющей трубкой и их физико-математическое описание 71

Суворов Д.Г. Структурное строение пневматических машин с возвратно-поступательным движением поршня 82

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Семикин П.П. Классификация типов высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии 91

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Букреев В.И., Дегтярев-мл. В.В. Эволюция свободных волн в замкнутом бассейне с наклонным дном 97

Иванов А.Н. Перспективы применения болтофрикционных соединений элементов из полимерных фиброармированных композитов 104

Герасимов С.И., Жилкин В.А., Власов Г.М., Остроменский П.И. Оценка точности определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций с использованием накладного голографического интерферометра 110

Пантелеев Н.Н., Митасов В.М., Логунова М.А., Себешев В.Г. Расчет железобетонных балок с применением новых деформационных моделей 121

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 10 (658)
Oktober 2013

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,
P.A. Dmitriyev, DSc (Eng), Prof.
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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

© Publisher NSUACE (Sibstrin), 2013

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS

Mitasov V.M., Logunova M.A., Shatokhina M.V. Reinforced concrete beams with specified cracks under the long term load 5

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Mashkin N.A., Krutasov B.V., Bernatsky A.F., Krutasova I.B., Larichkin V.V. The use of silicone for protection of monuments of wooden architecture 11

Zavadskaya L.V., Berdov G.I., Agalakova Ya.S., Shishmakova E.A. Influence of dispersed mineral additives on the structure and strength of gypsum ... 18

Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Zhegera K.V. Use as part of synthesized allumosilicate tile adhesive based on cement 23

Ovcharenko G.I., Gilmiyarov D.I. Relationship of strength and phase composition of the autoclave lime fly-ash stone. Part I 28

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION. AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Shchepotin G.K. Evaluation of reliability of technological process 33

SANITARY ENGINEERING

Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. The ejection of air during overloads of granular materials in a vertical channels with ladles. Message 2. Ejected characteristics of belt-and-bucket elevator 38

Pozin G.M., Ulyasheva V.M., Kibort I.D. To a question of turbulence models applying at a numerical modeling ventilation processes 48

Shilyaev M.I., Penyavsky V.V. Influence of the order of configuration of dust collectors in cascade systems on specific energy consumption of gas purification 57

Ambrosova G.T., Funk A.A., Ksenofontova O.V. Profitable and eco-friendly farming 65

BUILDING AND ROAD MACHINES

Abramenkov D.E., Abramenkov E.A. Schematic diagrams besklapannykh of pneumatic shock mechanisms with the airbringing operating tube and their physical and mathematical description 71

Suvorov D.G. Structural composition of pneumatic machines reciprocating motion of the piston 82

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY

Semikin P.P. Classification of types of high-rise buildings with renewable energy sources 91

SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

Bukreev V.I., Degtyarev-youn. V.V. Evolution of free waves in a closed basin with inclined bottom 97

Ivanov A.N. About the problems of connection elements of polymer fibre reinforced composites 104

Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Vlasov G.M., Ostromensky P.I. Evaluation of strain-stress determination accuracy of structural elements by a superposed holographic interferometer 110

Panteleyev N.N., Mitasov V.M., Logunova M.A., Sebeshev V.G. Analysis of reinforced concrete beams with application of new deformation models 121

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.45

В.М. МИТАСОВ, М.А. ЛОГУНОВА, М.В. ШАТОХИНА

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛКИ С ОРГАНИЗОВАННЫМИ ТРЕЩИНАМИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Представлены исследования, позволившие оценить влияние заранее организованных трещин в железобетонных балках на их жесткость и трещиностойкость при длительном действии нагрузки.

Ключевые слова: заранее организованные трещины, железобетонные балки, жесткость, трещиностойкость, длительное действие нагрузки.

На кафедре ЖБК НГАСУ (Сибстрин) в последние годы были проведены эксперименты по исследованию процесса деформирования железобетонных конструкций с заранее организованными трещинами при кратковременном действии нагрузки [1, 2]. Это направление возникло в результате анализа процессов деформирования железобетонных конструкций с трещинами в рамках энергетической теории сопротивления железобетона [3, 4]. Цель настоящего исследования — выявление особенностей деформирования балок без организованных трещин и с организованными трещинами при длительном воздействии нагрузок.

Для проведения исследований изготовили две серии балок с кубами, призмами, восьмерками. Все элементы изготавливали из бетона одного состава, с одинаковой арматурой и геометрическими размерами для образцов каждого типа.

Балки первой серии испытывали на действие кратковременных нагрузок, второй серии — длительных.

Все образцы изготовлены из мелкозернистого бетона с прочностью, соответствующей классу В20. Арматура класса А-III (А 400) диаметром 8 мм. Организованная трещина образована установкой стальной оцинкованной пластины толщиной 0,5 мм и высотой 20 мм на арматуру в зоне максимального момента.

Балки в сериях 1, 2 рассчитаны на приложение сосредоточенной нагрузки F по центру. Армирование одиночное, защитный слой — 25 мм (рис. 1).

Статическую длительную нагрузку прикладывали с помощью специально разработанной установки, которая представляет собой систему канатных полиспастов, общей кратностью 1:5,55. Фотография установки представлена на рис. 2.

Для регистрации прогибов балок использовали прогибомеры Аистова с ценой деления 0,01 мм. Осадки опор измеряли при помощи индикато-

© Митасов В.М., Логунова М.А., Шатохина М.В., 2013

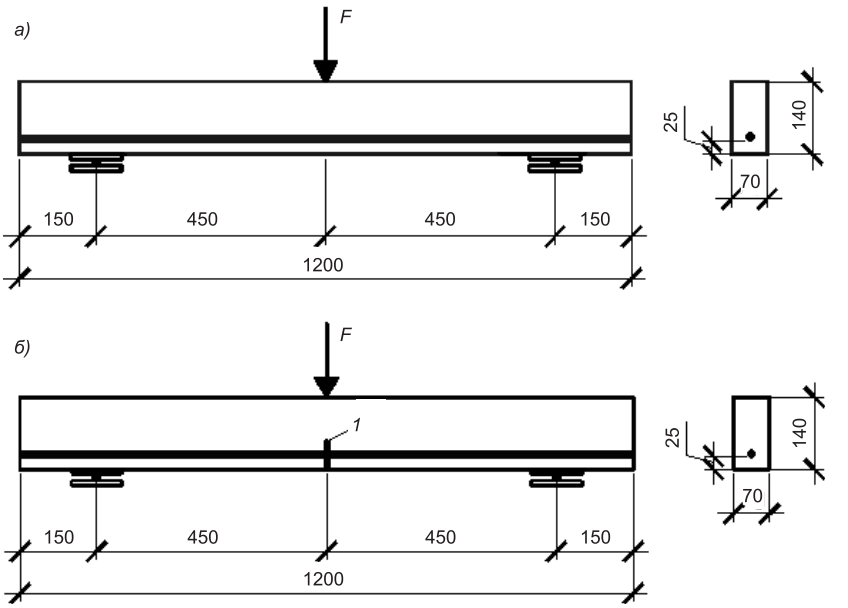


Рис. 1. Схема железобетонной балки

а — без организованных трещин; *б* — с организованной трещиной; *1* — организованная трещина

Рис. 2. Установка для испытания балок

ров часового типа ИЧ с ценой деления 0,01 мм. Относительные деформации фиксировали тензорезисторами с базой 25 мм, а также индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм и базой 260 мм.

Для оценки прочностных свойств бетона были испытаны кубы, призмы и восьмерки в день проведения испытания балок. Проведены испытания кубов на 28-е сутки с момента изготовления конструкции для оценки принадлежности бетона (в соответствии с принятой классификацией).

Опирание балок принимали шарнирным со свободным перемещением одной из опор вдоль оси элемента. Схема расстановки механических приборов и тензорезисторов представлена на рис. 3.

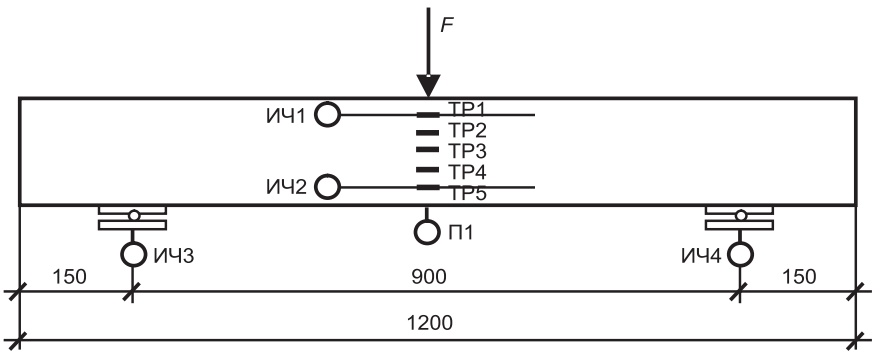


Рис. 3. Схема расположения индикаторов и тензодатчиков по двум сторонам балки

Железобетонные балки были испытаны статической кратковременной и длительной нагрузкой, составляющей 88 % от разрушающей. Кратковременная нагрузка прикладывалась ступенями по 111 кгс. Длительное нагружение осуществлялось в течение 4 дней с помощью гирь массой 20 кг до разрушения образцов.

Во время испытаний производили непрерывное наблюдение за поведением исследуемых образцов (появление трещин, выколов и других повреждений).

В результате обработки экспериментальных данных построены графики прогибов для балок без организованных трещин и с заранее организованной трещиной, испытанных на действие одной сосредоточенной силы при кратковременном (рис. 4) и длительном нагруже-

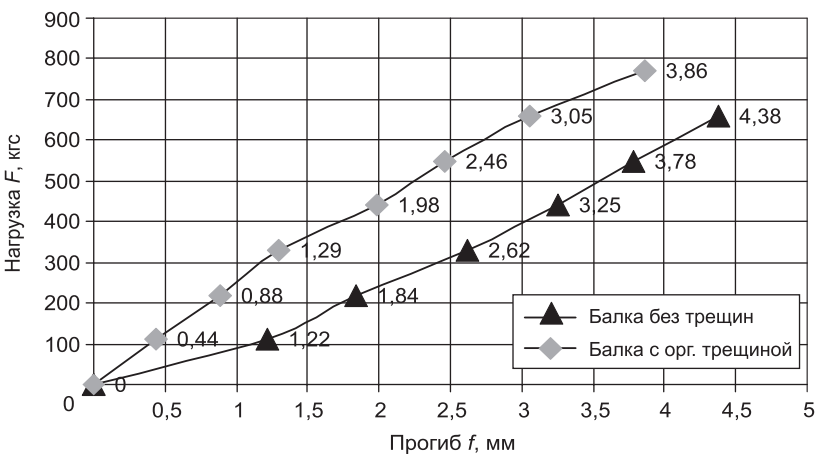


Рис. 4. Прогиб балок при кратковременном нагружении

Значения прогибов в балках, испытанных при длительном нагружении

№ образца	Время t, ч	Прогиб, мм	Количество трещин, шт.	Высота трещины над пластиной, см	Усилие, кгс
Образец 1 (с организованной трещиной)	0	0	4	0,7	706
	0,17	3,04	9	3,7	
	0,33	3,09	9	3,9	
	0,5	3,11	9	4,1	
	1	3,14	9	4,4	
	2	3,17	10	4,5	
	3	3,19	10	4,5	
	24	3,24	10	4,6	
	25	3,25	10	4,6	
	26	3,25	10	4,6	
	27	3,25	10	4,63	
	28	3,255	10	4,63	
	58	3,27	10	4,7	
	59	3,27	10	4,7	
	60	3,27	10	4,75	
	62	3,27	10	4,9	
	86	3,275	10	4,9	
	87	3,28	10	4,9	
	88	3,28	10	5	
	89	3,28	10	5	
Образец 2 (без организованных трещин)	0	0	2	1,2	706
	0,17	3,98	11	4,2	
	0,33	4,07	11	4,8	
	0,5	4,16	12	5,2	
	1	4,25	12	5,4	
	2	4,33	12	5,4	
	3	4,40	13	5,5	
	24	4,48	13	5,5	
	25	4,50	13	5,5	
	26	4,52	13	5,55	
	27	4,54	13	5,55	
	28	4,55	13	5,55	
	58	4,55	13	5,6	
	59	4,555	13	5,6	
	60	4,56	13	5,6	
	62	4,56	13	5,7	
	86	4,56	13	5,7	

нии (рис. 5). Составлена таблица изменения прогибов и высоты трещины во времени.

Для балок, испытанных при длительном нагружении, было установлено следующее.

— В балках без организованных трещин образовалось 13 трещин; разрушение произошло спустя 86 ч с момента приложения нагрузки. Максимальный прогиб составил 45,6 мм, максимальная высота трещины — 57 мм. Деформирование балок характеризуется плавным уменьшением сжатой зоны с течением времени, но значительным поворотом сечений в процессе деформирования. Разрушение произошло в сечении под приложенной силой.

— В балках с заранее организованной трещиной образовалось 10 трещин; разрушение произошло спустя 89 ч с момента приложения нагрузки. Максимальный прогиб составил 32,8 мм, максимальная высота трещины — 50 мм. Деформирование балок характеризуется плавным уменьшением сжатой зоны с течением времени и незначительным поворотом сечений в процессе деформирования. Разрушение произошло в сечении под приложенной силой.

Выводы. 1. Проведенные исследования показали, что характер деформирования балок с заранее организованными трещинами при длительном действии нагрузок качественно отличается от аналогичных балок со стохастическими трещинами более «мягким характером деформирования», т.е. отсутствуют (либо незначительны) динамические колебания.

2. Результаты испытаний железобетонных балок показали, что балки с организованными трещинами при длительном нагружении обладают

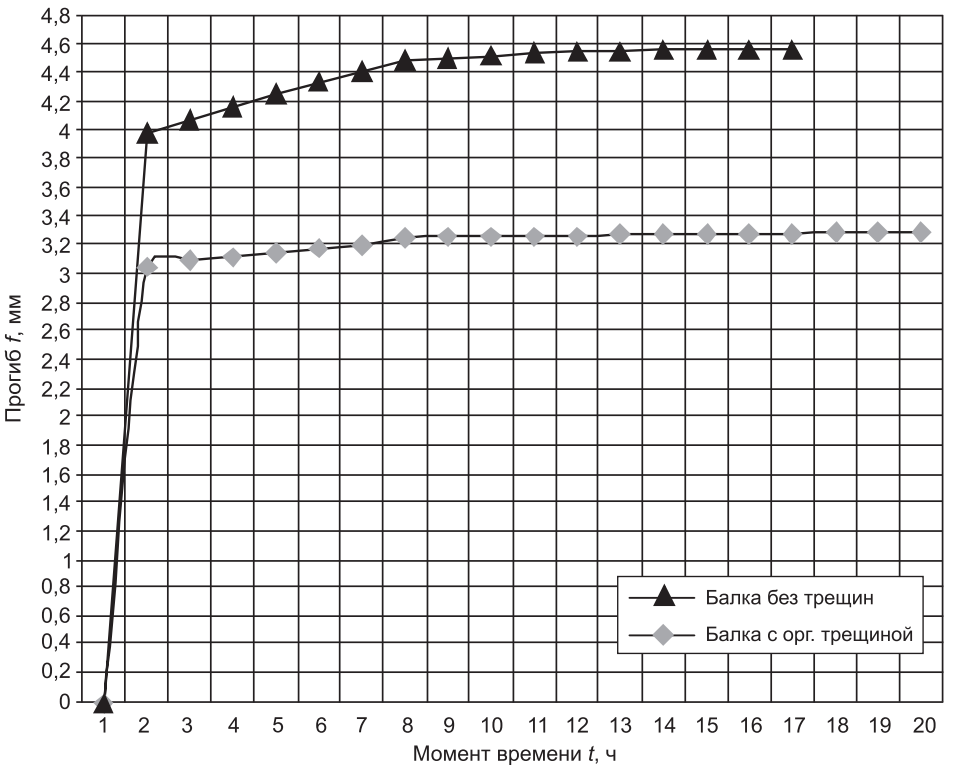


Рис. 5. Прогиб балок при длительном нагружении

меньшим прогибом и кривизной в отличие от балок со стохастически образующимися трещинами.

3. Высота сжатой зоны при длительном нагружении балок с организованными трещинами уменьшается более плавно, а поворот сечения в процессе деформирования носит незначительный характер в отличие от балок без организованных трещин.

4. Деформации в растянутой зоне в балках с организованными трещинами на 37 %, а высота трещины на 14 % меньше, чем в балках со стохастически образующимися трещинами.

5. Результаты исследований показали, что установка организованных трещин может иметь экономический эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митасов, В.М. Напряженно-деформированное состояние железобетонных балок с организованными трещинами [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев, Н.С. Пичкурова // Вестн. РААСН. — 2008. — Т. 1, № 13. — С. 222–227.
2. Логунова, М.А. Экспериментальные исследования бетонных балок без организованных трещин и с заранее организованными трещинами [Текст] / М.А. Логунова, А.С. Пешков // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 1. — С. 116–120.
3. Митасов, В.М. Основные положения теории сопротивления железобетона (энергетический вариант) [Текст] / В.М. Митасов. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2010. — 168 с.
4. Митасов, В.М. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 3–8.

МИТАСОВ Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф.: E-mail: mitassovv@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ЛОГУНОВА Мария Александровна, канд. техн. наук; E-mail: m-nblack@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ШАТОХИНА Маргарита Васильевна, магистр; E-mail: margosha_1@inbox.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 12.08.13

Mitasov Valeriy Mihailovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mitassovv@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Logunova Mariya Alexandrovna, candidate of technical sciences; E-mail: m-nblack@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Shatokhina Margarita Vasilievna, master of technics and technology; E-mail: margosha_1@inbox.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SPECIFIED CRACKS UNDER THE LONG TERM LOAD

The paper presents the research allowed to estimate influence of specified cracks in reinforced concrete beams on their rigidity and strength under the long term load.

K e y w o r d s: specified cracks, reinforced concrete beams, rigidity, crack-resistance, long term load action.

REFERENCES

1. M i t a s o v, V.M. Stress-strain state of reinforced concrete beams with specified cracks [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adishchev, N.S. Pichkurova // Bulletin of RAACS. — 2008. — Vol. 1, N 13. — P. 222–227.
2. L o g u n o v a, M.A. Experimental research of concrete beams without cracks and with specified cracks [Text] / M.A. Logunova, A.S. Peshkov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 1. — P. 116–120.
3. M i t a s o v, V.M. Main regulations of reinforced concrete strength theory (energy option) [Text] / V.M. Mitasov. — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2010. — 168 p.
4. M i t a s o v, V.M. Main regulations of energy theory of reinforced concrete strength [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adishchev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 3–8.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.11:725.004.4

Н.А. МАШКИН, Б.В. КРУТАСОВ, А.Ф. БЕРНАЦКИЙ, И.Б. КРУТАСОВА, В.В. ЛАРИЧКИН

ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПАМЯТНИКОВ ДЕРЕВЯННОГО ЗОДЧЕСТВА

Рассмотрены вопросы защиты памятников деревянного зодчества с использованием технологий модифицирования древесины. В качестве эффективных защитных средств для древесины предложены защитные составы на основе кремнийорганических соединений, наносимые на поверхность древесины методом пульверизации.

Ключевые слова: памятники деревянного зодчества, модифицирование древесины, кремнийорганические соединения, атмосферостойкость, долговечность.

К началу XXI в. уничтожение памятников деревянного зодчества приобрело катастрофический характер. Часть таких зданий уничтожается в результате непродуманной застройки, часть — за счет атмосферных факторов и времени (старение и деградация древесины). Можно предположить, что без специальных мер в ближайшие годы в сельской местности они могут исчезнуть практически полностью, лишь за исключением церквей и часовен, перенесенных в музеи под открытым небом.

Самым большим и уникальным заповедником народного деревянного зодчества является Русский Север. Однако богаты архитектурными памятниками и такие русские города, как Суздаль, Томск, Иркутск. Новосибирск достаточно молодой город и имеет небольшое количество памятников деревянного зодчества. Но и для него актуальна проблема спасения того немногого, что еще осталось от деревянного зодчества (рис. 1–4).

Основная задача сохранения памятников деревянного зодчества — увеличение долговечности сроков службы древесины, сохранения ее механических свойств. В условиях переменной влажности и при отсутствии надлежащего своевременного ремонта памятники постепенно разрушаются. Разрушение древесины под действием окружающей среды и микроорганизмов может быть приостановлено с помощью различных консервирующих средств.

Известно большое количество консервантов древесины, но ухудшение экологической обстановки, загрязненности атмосферы городов вынуждает искать новые эффективные защитные составы.

© Машкин Н.А., Крутасов Б.В., Бернацкий А.Ф., Крутасова И.Б., Ларичкин В.В., 2013

Рис. 1. Здание в Новосибирске

Водные растворы антисептиков наносят на поверхность древесины гидро- или краскопультами, а органические антисептики в органических растворителях — посредством кратковременного погружения элементов в ванну, а также кистью. Водорастворимыми антисептиками обрабатывают элементы жилых, общественных и промышленных зданий: каркас, щиты, обшивка со стороны утеплителя, настил пола под паркет и др.

Водные антисептические растворы наносятся на поверхность древесины обычно два раза (с перерывом 2–4 ч), расход раствора на 1 м^2 поверхности составляет 0,6–0,8 л, что соответствует, например, расходу сухой соли фтористого натрия 18–24 г/м^2.

Рис. 2. Спасо-Зашиверская церковь (около 1700 г., Новосибирск). Академгородок. Музей под открытым небом

При таком способе антисептик проникает в древесину на глубину 1–2 мм. После нанесения антисептика поверхность древесины должна быть просушена.

Из других способов антисептирования, применяемых на практике, нужно отметить следующие [1].

Диффузионный способ — это введение концентрированных кашицеобразных водных растворов антисептических солей или прессованных патронов из этих солей в специально просверленные в древесине отверстия. Этот способ применя-

Рис. 3. Спасо-Зашиверская церковь. Фрагмент

Рис. 4. Деревянное здание в Томске

ется, например, для пропитки нижних венцов рубленых стен, оголовьев свободно стоящих столбов или других элементов, ослабление сечений которых отверстиями не вызывает нарушений их устойчивости или требуемой прочности. Отверстия диаметром 10–12 мм и глубиной 80–100 мм должны располагаться на расстоянии 100–150 мм, отверстия сверху могут оставаться открытыми или закрываться деревянными пробками.

Существует способ по *использованию различных газов* с целью стерилизации деревянных конструкций. Этот способ представляет большой интерес при ремонтных работах, когда невозможна разборка конструкций, а также при обработке вновь построенных зданий в случаях, когда

есть опасение, что были уложены пораженные грибом материалы. Обработка таких зданий газом обеспечит их стерилизацию и уменьшит возможность развития гниения.

Существуют и другие, реже применяемые способы, связанные с предварительной разборкой деревянного здания. В каждом конкретном случае выбирается способ и составы, наиболее целесообразные для сохранения памятников с учетом экологических проблем не только прямой, но и косвенной экологической безопасности материала для памятника.

Данная проблема представляет важность и для памятников деревянного зодчества г. Новосибирска, особенностью которых является достаточно высокая степень сохранности, так как они имеют возраст около 100 лет.

В НГАСУ (Сибстрин) проводятся исследования методов защиты памятников деревянного зодчества с использованием технологий модифицирования древесины с использованием синтетических полимеров (фенолоформальдегидных, эпоксидных и др.) [2].

Значительный опыт модифицирования древесины с целью повышения ее стойкости и долговечности в различных средах позволил в качестве основных гидрофобизаторов-модификаторов древесины архитектурных памятников применять составы на основе этилсиликата калия (АКВАСИЛ) и бутадиен-стирольного латекса СКС-65 ГП [3, 4].

Этилсиликаты калия относятся к поверхностно-активным веществам, молекулы которых благодаря дифильному строению способны, адсорбируясь на гидрофильной поверхности, ориентироваться к ней своей полярной группой. Гидрофобная группа, чаще всего органический радикал, при этом обращена в сторону неполярной среды — воздуха. Благодаря этому гидрофильная ранее поверхность материала становится гидрофобной. Стойкость гидрофобного эффекта зависит от прочности связи гидрофобизирующего вещества с поверхностью материала: наиболее надежная фиксация обеспечивается в случае химической связи молекул гидрофобизатора с поверхностью. Такими свойствами обладают гидрофобизаторы на основе кремнийорганических соединений (КОС), что обусловлено комплексом специфических свойств, связанных с особенностями строения их молекул, отличными от органических соединений [4].

Таким образом, защитные составы на основе кремнийорганических соединений более эффективны, чем их органические аналоги, и их характерными свойствами являются высокая реакционная способность, малая зависимость физико-механических свойств от температуры, высокая стойкость к термической и термоокислительной деструкции, морозостойкость. Кремнийорганические соединения обладают достаточной стойкостью к действию слабых кислот и щелочей, многих растворителей, топлив и минеральных масел[1].

Молекулы кремнийорганических полимеров построены из чередующихся атомов кремния и кислорода, соединенных посредством силоксановой связи Si–O. Валентности атомов кремния, не заполненные атомами кислорода, замещены органическими радикалами (метильными, этильными, фенильными и др.), гидроксильными группами и атомами водорода. Такое строение определяет промежуточное положение между органическими и неорганическими полимерами.

[1] Соболевский М.В., Моцарев Г.В., Розенберг В.Р. Карбофункциональные органосиланы и органосилоксаны. М.: Химия, 1990. 236 с.

Структура кремнийорганических полимеров аналогична структуре кварца — неорганического полимера, отличающегося высокой твердостью и прочностью. Отличие состоит в том, что в полиорганосилоксанах только две или три валентности кремния связаны с кислородом, а остальные валентности заняты органическими радикалами, придающими гибкость молекуле. Такое строение обусловливает наряду с большой термической стабильностью, связанной с силикатным характером строения цепей молекул, высокую эластичность, характерную для большинства органических полимеров.

Высокая прочность связи Si–O объясняется ее полярностью, благодаря которой ковалентная связь приближается к ионной. Дипольное строение силоксановой группы вызывает поляризацию связи кремния с углеродом, индуцируя в ней дипольный момент (рис. 5). Это повышает прочность связи углерод — кремний и придает ей большую устойчивость к тепловым воздействиям и окислительной деструкции по сравнению с органическими полимерами, у которой связи C–C в главной цепи неполярны.

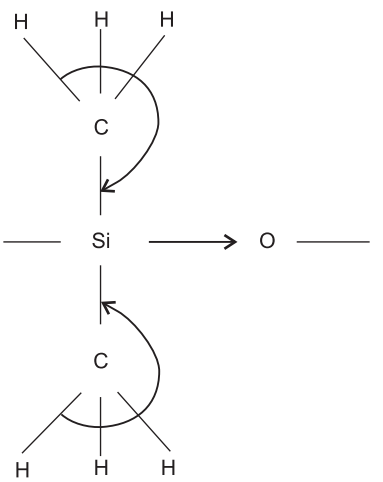


Рис. 5. Поляризация связи Si–C в кремнийорганическом соединении

Наиболее экономичны и технологически удобны для поверхностной обработки материалов деревянных конструкций метилсиликонаты щелочных металлов (МСК) — водорастворимые кремнийорганические соединения, которые не требуют использования органических растворителей или приготовления эмульсий, применяются в виде сильно разбавленных водных растворов и являются самыми дешевыми из всех кремнийорганических продуктов. Побочными продуктами, образующимися в результате реакции карбонизации щелочи углекислым газом воздуха, являются нетоксичные соединения — карбонаты калия. Катализатором химических процессов гидролиза и поликонденсации этих кремнийорганических соединений служит углекислый газ воздуха, поэтому метилсиликонаты щелочных металлов можно назвать достаточно универсальными гидрофобизаторами-модификаторами древесины.

Товарные продукты МСК представляют собой водный 35–45%-ный раствор (серия АКВАСИЛ (ТУ 6-02-1-824–97), АКВАСТОП (ТУ 2229-003-11421207–00), Пента-811, Софэксил-40). В качестве основных гидрофобизаторов-модификаторов древесины были подробно исследованы этилсиликонат калия (АКВАСИЛ) и бутадиен-стирольный латекс СКС-65 ГП, из которых был сформирован комплексный гидрофобизатор-модификатор древесины.

Древесину модифицировали составом, включающим бутадиен-стирольный латекс СКС-65 ГП (сухой остаток более 47 %, вязкость по ВЗ-4–24 с) — 10–12 % и 35–45%-ный водный раствор метилсиликоната калия — АКВАСИЛ (ТУ 6-02-1824) — 88–90 %. Для сравнения использовались также и традиционные фенолоспирты [2]. Пропитку древесины осуществляли по методу «вакуум — атмосферное давление» и методом

пульверизации по ГОСТ 24329 «Древесина модифицированная. Способы модифицирования».

Физико-механические свойства гидрофобизированной (модифицированной) древесины (прочность при сжатии и изгибе, деформации набухания, степень пропитки, плотность) определяли по методике ЦНИИСК им. В.В. Кучеренко на образцах размером 10×10×150 мм. Деформации измеряли индикаторами часового типа ИЧ-1,5 с ценой деления 0,01 мм. Свойства модифицированной древесины (при сквозной пропитке) представлены в таблице.

Свойства модифицированной древесины

Древесина	Степень пропитки, %	Средняя плотность, кг/м^3	Прочность при радиальном сжатии, МПа	Прочность при статическом изгибе, МПа	Ударная вязкость, кДж/м^2
Береза натуральная	—	650	11,0	145,2	55,0
Сосна натуральная	—	510	7,5	94,3	58,0
Береза, модифицированная фенолоспиртами	23,7	732	15,8	148,1	41,5
Сосна, модифицированная фенолоспиртами	27,2	721	15,6	110,8	43,2
Береза, модифицированная латекс-кремнийорганическим модификатором	34,0	750	19,1	164,3	45,4
Сосна, модифицированная латекс-кремнийорганическим модификатором	37,3	739	18,7	180,5	49

Достоверность результатов оценивали методом статистической обработки по ГОСТ 16483.0 «Древесина. Методы испытаний. Общие требования».

В результате проведенных предварительных исследований установлено, что при использовании для модифицирования древесины составов на основе силиконата калия достигается значительный уровень повышения физико-механических свойств древесины, сопоставимый с применением традиционных фенолоспиртов. Учитывая технологичность и простоту применения МСК, следует прогнозировать их эффективное использование для защиты деревянных памятников архитектуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покровская, Е.Н. Химико-физические основы увеличения долговечности древесины. Сохранение памятников деревянного зодчества с помощью элементоорганических соединений [Текст] / Е.Н. Покровская. — М. : АСВ, 2009. — 136 с.
2. Машкин, Н.А. Эксплуатационная стойкость модифицированной древесины в строительных изделиях [Текст] / Н.А. Машкин. — Новосибирск : НГАСУ, 2001. — 260 с.
3. Машкин, Н.А. Разработка и исследование структурных моделей модифицированной древесины [Текст] / Н.А. Машкин, Б.В. Крутасов // Строительные материалы (приложение № 7. Наука). — 2006. — № 3. — С. 35–36.
4. Машкин, Н.А. Защитная обработка строительных материалов кремнийорганическими гидрофобизаторами [Текст] : монография / Н.А. Машкин, С.Г. Ершова, Б.В. Крутасов, А.Г. Маньшин // НГАСУ (Сибстрин). — Новосибирск : НГАСУ, 2013. — 204 с.

МАШКИН Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mashkin@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

КРУТАСОВ Борис Валентинович, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
БЕРНАЦКИЙ Анатолий Филиппович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: bernatsky@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
КРУТАСОВА Ирина Борисовна, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ЛАРИЧКИН Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: larichkin@craft.nstu.ru
Новосибирский государственный технический университет

Получено 05.08.13

Mashkin Nikolay Alekseevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mashkin@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Krutasov Boris Valentinovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Bernatsky Anatoly Filippovich, doctor of technical sciences, professor, E-mail: bernatsky@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Krutasova Irina Borisovna, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Larichkin Vladimir Viktorovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: larichkin@craft.nstu.ru, Novosibirsk State Technical University, Russia

THE USE OF SILICONE FOR PROTECTION OF MONUMENTS OF WOODEN ARCHITECTURE

Are considered the protection of monuments of wooden architecture using wood modification technologies. As effective protection for the wood offered protective structures on the basis of silicone compounds, surfacing of wood by spraying.

K e y w o r d s: monuments of wooden architecture, modification of wood, organosilicon, weather resistance, durability.

REFERENCES

1. P o k r o v s k a y a, E.N. Chemical-physical bases of increase of durability of wood. Preservation of monuments of wooden architecture by means of hetero-organic compounds [Text] / E.N. Pokrovskaya. — M. : ASV, 2009. — 136 p.
2. M a s h k i n, N.A. Operational stability of modified wood in construction products [Text] / N.A. Mashkin. — Novosibirsk : NSUACE, 2001. — 260 p.
3. M a s h k i n, N.A. Development and research of structural models of modified wood [Text] / N.A. Mashkin, B.V. Krutasov // Building materials (application N 7. Science). — 2006. — N 3. — P. 35–36.
4. M a s h k i n, N.A. Protective treatment of building materials with kremnijorganicheskimi [Text] : monograph / N.A. Mashkin, S.G. Ershova, B.V. Krutasov, A.G. Manshin // NSUACE. — Novosibirsk : NSUACE, 2013. — 204 p.

УДК 666.913 : 539.4

Л.В. ЗАВАДСКАЯ, Г.И. БЕРДОВ, Я.С. АГАЛАКОВА, Е.А. ШИШМАКОВА

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ ГИПСОВОГО КАМНЯ

Исследовано влияние дисперсных минеральных добавок (кварцевый песок, диопсид, стеклобой, известняковая мука), введенных в количестве от 1 до 80 % от массы гипса, на механическую прочность гипсового камня. Показано, что введение оптимального количества добавок упрочняет структуру гипсового камня, что проявляется в смещении эндоэффекта на термограммах в область более высоких температур. Микроармирование гипсового камня добавками, имеющими высокую твердость (кварц, стеклобой), обеспечивает повышение прочности его при сжатии на 50–60 %.

Ключевые слова: гипсовый камень, дифференциально-термический анализ, прочность, дисперсные минеральные добавки.

Строительные материалы и изделия на основе гипса имеют ряд несомненных преимуществ. Они отличаются низкой тепло- и звукопроводностью, относительно малой плотностью, высокой огне- и пожаростойкостью, обеспечивают создание в помещениях хорошего микроклимата, так как способны поглощать избыточную влагу и, наоборот, отдавать ее в сухих помещениях [1].

Вместе с тем такие материалы имеют ряд недостатков, к числу которых наряду с низкой водостойкостью можно отнести и малую механическую прочность.

Для регулирования свойств гипсовых материалов используется ряд методов, в том числе введение дисперсных минеральных добавок.

Так, в работе [2] для снижения плотности и повышения прочности гипсовых смесей в их состав предлагается вводить микросферы из стекла, ситалла, керамики или полимеров в количестве 10–60 мас. % и наряду с этим до 30 % минерального заполнителя. В качестве него рекомендуется известняк, мрамор, доломит и другие карбонатные породы, а также гашеная и негашеная известь.

В работе [3] предложен органоминеральный модификатор гипсовых бетонов и изделий. Он содержит в качестве основного компонента гидравлическое вяжущее (портландцемент, белый и цветной цемент, гидравлическую известь). В качестве активного минерального компонента применяют микрокремнезем в сочетании с дисперсными минеральными наполнителями. Такими наполнителями могут являться измельченный кварцевый песок с удельной поверхностью 6500 $см^2/г$, зола-унос, гранулированный доменный шлак с удельной поверхностью 4200–4800 $см^2/г$, стеклобой с удельной поверхностью 9500 $см^2/г$, молотый бой керамических отходов (керамзитовой пыли с электрофильтров) с удельной поверхностью 6500 $см^2/г$.

© Завадская Л.В., Бердов Г.И., Агалакова Я.С., Шишмакова Е.А., 2013

В данной работе исследовано влияние дисперсных минеральных добавок (кварцевого песка, диопсида, стеклобоя, известняковой муки) на структуру и прочность гипсового камня.

В работе использован гипс марки Г-5 по ГОСТ 125–79. Минеральные добавки вводились в количестве 1; 3; 5; 7; 9; 20; 40; 60; 80 % от массы гипса.

Добавка кварца представляет собой измельченный кварцевый песок, полученный от ОАО «Новосибирский речной порт» (Новосибирская область). Диопсид — силикат кальция и магния ($CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$). Диопсидовая добавка представляет собой измельченную отвальную породу от производства флогопитовых руд Алданского месторождения.

Она содержит, мас. %: диопсид 70–75; скаполит 10–20; флогопит 2–3. Химический состав добавки, мас. %: 51,0 SiO_2; 24,8 CaO; 15,8 MgO; 1,6 Al_2O_3; 3,6 Fe_2O_3; п.п.п. — 0,2. Стеклобой представляет собой тонкодисперсный порошок измельченного бытового стекла. Его состав, мас. %: 71–73 SiO_2; 13–15 Na_2O; 8–10,5 CaO; 1–4 MgO; 0,5–1 Al_2O_3; 0,1 Fe_2O_3; 0,1–1 K_2O; 0,3–0,7 SO_3.

Известняковая мука получена от ЗАО «Искитимский известняковый карьер» (Новосибирская область). Ее состав, мас. %: 54,7 CaO; 0,5 SiO_2; 0,5 MgO; 0,2 Al_2O_3; 0,1 Fe_2O_3; потери при прокаливании 40,4.

Дисперсность добавок исследована с помощью лазерного анализатора типа PRO-700 фирмы Seislin Enterprice Co., LTD, Tokyo, обеспечивающего определение размера зерен в пределах 1–192 мкм по 16 интервалам значений (табл. 1).

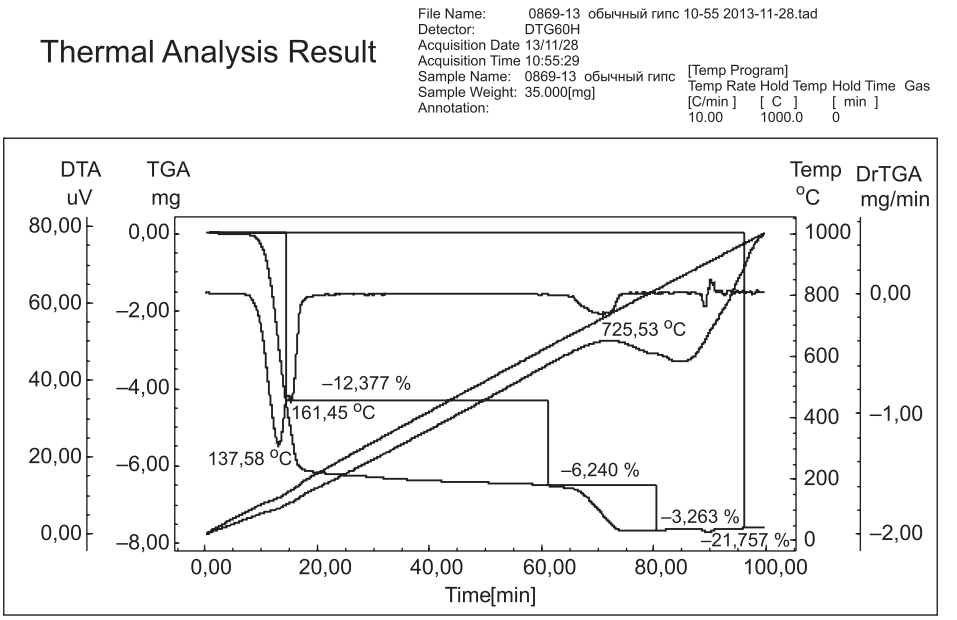
Таблица 1

Показатели дисперсности минеральных добавок по результатам лазерного гранулометрического анализа

Показатели		Кварцевый песок	Стеклобой	Диопсид	Известняковая мука
Среднеобъемный размер частиц, мкм		9,1	8,9	6,1	13,7
Среднеповерхностный размер частиц, мкм		1,4	1,6	1,0	2,1
Удельная поверхность	$см^2/см^3$	18130	17180	24200	10880
	$см^2/г$	6840	6830	7520	4010
Объемная доля частиц с размером, мм	менее 4	32,7	31,6	41,7	14,4
	менее 16	64,3	66,7	65,3	54,6
	менее 32	84,3	89,8	91,6	89,1

Дифференциально-термический анализ проведен на дериватографе DTG 60 H фирмы Shimadzn, Япония в интервале температур 20–1000 °С. Масса навески составляла 35 мг, скорость поднятия температуры 10 °С/мин. Регистрация термических эффектов производилась с точностью до сотых долей градуса. Проведен анализ образцов гипса без добавок (рисунок), а также с добавками, содержание которых соответствует максимальным значениям прочности, полученным при предварительных испытаниях, проведенных на образцах, имевших размеры 40×40×160 мм (табл. 2).

На дериватограмме гипсового камня без добавок прослеживается три эндоэффекта (см. рисунок). Первый при 137,58 °С соответствует удалению 1,5 молей воды из структуры гипса. Он сопровождается потерей мас-



Дифференциально-термический анализ гипсового камня

Таблица 2

Температура первого эндоэффекта и механическая прочность гипсового камня

Добавка, % от массы гипса		Температура эндоэффекта, °С	Прочность при сжатии, МПа
Без добавок		137,58	6,48
Кварцевый песок	5	141,49	8,89
	20	141,49	10,24
	60	140,60	8,52
Стеклобой, 20		144,06	10,05
Диопсид, 9		142,37	9,16
Известняковая мука, 20		143,44	7,73

сы, составляющей около 60 % от общих потерь в интервале 20–1000 °С. Второй эндоэффект (при 161,45 °С) выражен значительно слабее. Он соответствует выделению из структуры гипса оставшихся 0,5 молей гидратной воды. Эндоэффект при 725,53 °С соответствует частичному разложению сульфата.

При введении указанного количества добавок во всех случаях наблюдается смещение температуры первого, наиболее значительного и ярко выраженного эндоэффекта в сторону более высоких температур по сравнению с гипсовым камнем без добавок. Это свидетельствует об упрочнении структуры гипсового камня при введении добавок, что проявляется и в существенном увеличении его прочности. При введении 20 % кварцевого песка или стеклобоя это увеличение составляет около 60 %. Значительно меньше изменяется прочность при изгибе.

При введении 9 мас. % диопсида смещение первого эндоэффекта составляет 4,79 °С, прочность при сжатии возрастает на 41 %.

Наиболее существенно смещение температур первого эндоэффекта при добавлении 20 мас. % известняковой муки. Однако увеличение прочности при сжатии в этом случае составляет лишь 19 %, а прочность при изгибе даже понижается на 13 %.

Дисперсные минеральные добавки могут оказывать следующие воздействия на структуру и свойства гипсового камня:

1. Микроармируют структуру искусственного камня.

2. Обусловливают перераспределение механических напряжений между гипсовым камнем и частицами добавки. При этом существенно, чтобы модуль упругости (и соответственно твердость) материала добавки был выше, чем у гипса.

3. Препятствуют распространению микротрещин в структуре гипсового камня.

4. Могут являться подложками для кристаллизации образующихся новых гидратных фаз.

5. Воздействуют на процесс гидратационного твердения гипса. Очевидно, воздействие по п. 3 могут оказывать все рассмотренные добавки.

Рассмотрим причины изменений свойств гипсового камня при введении минеральных добавок.

При оценке воздействия по п. 4 важное значение имеет химический состав добавки. Стеклобой, диопсид и, особенно, известняковая мука содержат оксид кальция, являющийся основой химического состава гипса. В кварцевом песке оксид кальция практически отсутствует. Снижение эндоэффектов больше в случае добавок, содержащих оксид кальция.

При учете воздействия по п. 1 и 2 следует рассматривать твердость материалов. У кварца и диопсида она составляет 7 по шкале Мооса, у стекла — 6, у кальцита (известняковая мука) — 3, у гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ — 2. Наибольший эффект достигается именно при введении добавок с высокой твердостью. По сравнению с факторами по п. 4 и 5 этот эффект является преобладающим.

Сравнение действия добавок с высоким содержанием SiO_2 — кварцевого песка (100 % SiO_2, кристаллическая структура) и стеклобоя (72 мас. % SiO_2, аморфная структура) показывает, что упорядоченное строение добавки не играет основной роли в ее воздействии на структуру и прочность гипсового камня.

Таким образом, для упрочнения структуры и повышения прочности гипсового камня более эффективны дисперсные минеральные добавки с высокой твердостью (измельченные кварцевый песок, стеклобой, диопсид). При среднем размере частиц добавки 10 мкм оптимальное ее количество, обеспечивающее повышение прочности при сжатии гипсового камня на 50–60 %, составляет 20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): Справочник [Текст] / ред. А.В. Ферронская. — М. : Изд-во АСВ, 2004. — 486 с.
2. Прибытков, Е.А. Гипсовая смесь. Пат. РФ 2476402 от 10.09.2012.
3. Коровяков, В.Ф. Органоминеральный модификатор гипсовых вяжущих, строительных растворов, бетонов и изделий на их основе. Пат. РФ 2381191 от 10.02.2010.

ЗАВАДСКАЯ Любовь Владимировна, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
АГАЛАКОВА Яна Сергеевна, студ.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ШИШМАКОВА Екатерина Александровна, студ.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 09.08.13

Zavadskaya Lubov Vladimirovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Berdov Gennadiy Ilich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Agalakova Jana Sergeevna, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Shishmakova Ekaterina Alexandrovna, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

INFLUENCE OF DISPERSED MINERAL ADDITIVES ON THE STRUCTURE AND STRENGTH OF GYPSUM

The effect of particulate mineral additive (quartz sand, diopside, glass, limestone powder) administered in an amount of from 1 to 80 % by weight of gypsum, the mechanical strength of gypsum. It is shown that the introduction of the optimal amount of additives strengthens the structure of gypsum, which is manifested in the displacement endoeffect thermograms to higher temperatures. The micro-gypsum additives having a high hardness (quartz, glass cullet) enhances its compressive strength by 50–60 %.

K e y w o r d s: gypsum, differential thermal analysis, strength, dispersed mineral supplements.

REFERENCES

1. Gypsum materials and products (production and use): Reference [Text] / Red. A.V. Ferronskaya. — M. : Publishing hause ASV, 2004. — 486 p.
2. P r i b i t k o v, E.A. Gypsum mixture. Pat. RF 2476402 from 10.09.2012.
3. K o r o v y a k o v, V.F. Organo-modifier izdnly gypsum concrete and based on them. Pat. RF 2381191 from 10.02.2010.

УДК 691.58.668.3

В.И. ЛОГАНИНА, С.Н. КИСЛИЦЫНА, К.В. ЖЕГЕРА

ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ В СОСТАВЕ ПЛИТОЧНОГО КЛЕЯ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА

Приведены сведения о влиянии синтезированных алюмосиликатов на структуру и свойства плиточного клея на основе цемента. Изучен характер изменения показателя pH жидкой фазы цементных систем. Приведены сведения о кинетике тепловыделения при твердении цементных композитов.

Ключевые слова: плиточный клей, синтезированные алюмосиликаты, структура, тепловыделение, показатель pH.

Один из приоритетов современного строительного материаловедения — разработка эффективных строительных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. Решение этой задачи основывается на целенаправленном формировании структуры материала как гетерогенной, многофазной системы сложной иерархии. Важным направлением управления свойствами такой системы является модифицирование их структуры наноразмерными частицами [1, 2].

Проведенные ранее исследования подтвердили эффективность введения в рецептуру отделочных известковых сухих строительных смесей (ССС) нанодисперсных добавок — синтезированных гидросиликатов кальция (ГСК), золя кремниевой кислоты, органоминеральных добавок, способствующих повышению стойкости известковых покрытий[1] [3, 4].

В продолжение дальнейших исследований нами установлена возможность регулирования структурообразования и свойств цементных композиций введением синтезированных цеолитов[2].

Синтез алюмосиликатов заключался в их осаждении из раствора сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3$ добавлением силиката натрия с последующим промыванием водой осадка. При разработке технологии синтеза алюмосиликатной добавки исследовалось влияние модуля жидкого стекла, pH раствора сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3$, количество введенного силиката натрия, pH фильтрата.

Химический и фазовый состав синтезируемого продукта определялся на рентгеновской станции ARL 9900 X-ray WorkStation (Thermo Scientific) на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. При оценке химического состава синтезированных алюмосиликатов установлено, что преобладают оксиды кремнезема[3], составляющие 55,45 %.

[1] Логанина В.И., Петухова Н.А., Горбунов В.Н., Дмитриева Т.Н. Перспективы изготовления органоминеральной добавки на основе отечественного сырья // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 9. С. 36–39.

[2] Жданов С.П., Егорова Е.П. Химия цеолитов. М.: Наука, 1968.

[3] Логанина В.И., Кислицына С.Н., Макарова Л.В., Садовникова М.А. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 4. С. 37–42.

© Логанина В.И., Кислицына С.Н., Жегера К.В., 2013

Синтезированные алюмосиликаты применялись нами при разработке рецептуры плиточного клея. Для проведения исследований в работе использовался вольский портландцемент марки 400. Оценивалось влияние добавок на структурообразование цементных систем.

Установлено, что композиционное цементное вяжущее, содержащее синтезированные алюмосиликаты, имеет более высокое значение нормальной густоты цементного теста, составляющее 34–41 % в зависимости от содержания добавки. Наблюдается ускорение сроков схватывания. Так, у цементного теста без добавки начало и конец схватывания составляют соответственно 2 ч 30 мин и 5 ч, а у композиционного вяжущего, содержащего 20 % алюмосиликатов, — 40 мин и 1 ч 30 мин. С увеличением содержания алюмосиликатов в композиционном вяжущем сроки схватывания ускоряются.

Был изучен характер изменения показателя pH жидкой фазы цементных систем различного состава от момента затворения до начала схватывания.

Определение величины показателя pH жидкой фазы цементного теста осуществлялось при помощи иономера Аквилон pH-410, замеры показателя pH производились сразу после приготовления теста, затем через каждые 5 мин. Все образцы приготовлены с равным водоцементным соотношением, составляющим В/Ц = 0,6. По полученным данным построены зависимости, представленные на рис. 1.

Как видно из приведенных данных, для жидкой фазы цементного теста контрольного образца характерно более высокое начальное значение показателя pH, составляющее 12,08 (см. рис. 1, кривая *1*). Для цементного теста (контрольный состав, без добавки) характерно быстрое увеличение показателя pH, от значения 12,08 до 12,9 за 17 мин.

Рост показателя pH цементного теста от момента затворения объясняется повышением концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе

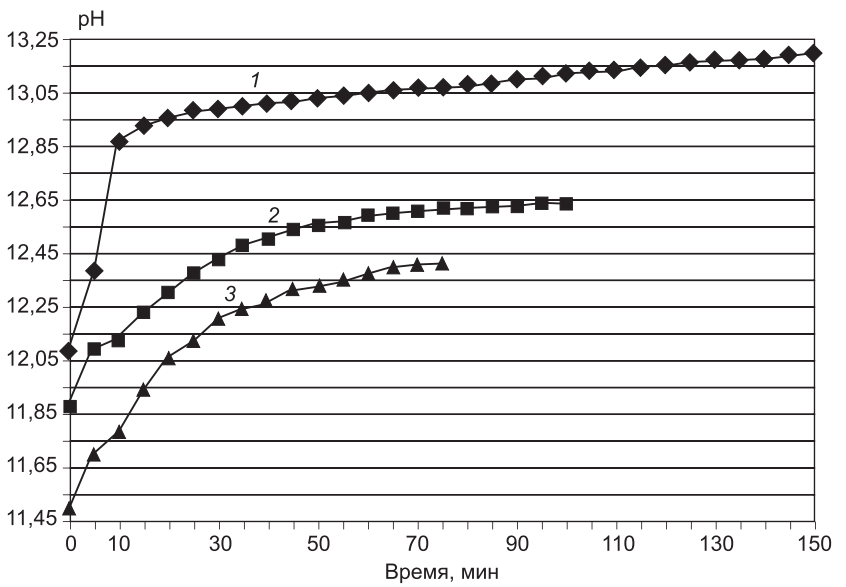


Рис. 1. Изменение показателя pH для цементного теста

1 — контрольный образец; *2* — содержание добавки 10 % от массы цемента; *3* — содержание добавки 20 % от массы цемента

за счет выделения $Ca(OH)_2$ при гидролизе трехкальциевого силиката. При введении в рецептуру цементного теста синтезированной добавки в количестве 10 и 20 % от массы цемента наблюдается снижение начального значения pH соответственно до 11,88 и 11,50. Наблюдается более медленное увеличение показателя pH. Механизм понижающего влияния добавок на основе синтезированных алюмосиликатов на величину показателя pH, на наш взгляд, заключается в том, что, с одной стороны, в цементном тесте происходит взаимодействие между гидроксидом кальция и синтезированными алюмосиликатами, с другой стороны, очевидно, происходит снижение растворимости $Ca(OH)_2$. Установлено, что количество портландита в контрольных образцах в возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения составляет 13 %, а с применением синтезированных алюмосиликатов в количестве 10 и 20 % от массы цемента соответственно 11 и 6,5 %. Кроме того, алюмосиликаты обладают влагоудерживающей способностью, что создает более благоприятные условия для твердения цемента в воздушно-сухих условиях. В возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения влагосодержание контрольных образцов (без добавок) составляло 0,32 %, а с добавкой синтезированных алюмосиликатов в количестве 30 % от массы цемента — 2,17 %. По сравнению с традиционными добавками (Bermocool, метилцеллюлоза) добавка синтезированных алюмосиликатов при одинаковом содержании (1 % от массы цемента) также обладает большей водоудерживающей способностью. Влагосодержание цементных образцов с добавками Bermocool 425, метилцеллюлоза марки FMC 2094 составляет соответственно 0,39 и 0,35 %, а с добавкой синтезированных алюмосиликатов — 1,42 %.

Структурообразование цементного теста дополнительно оценивалось по кинетике тепловыделения. Результаты исследований приведены на рис. 2.

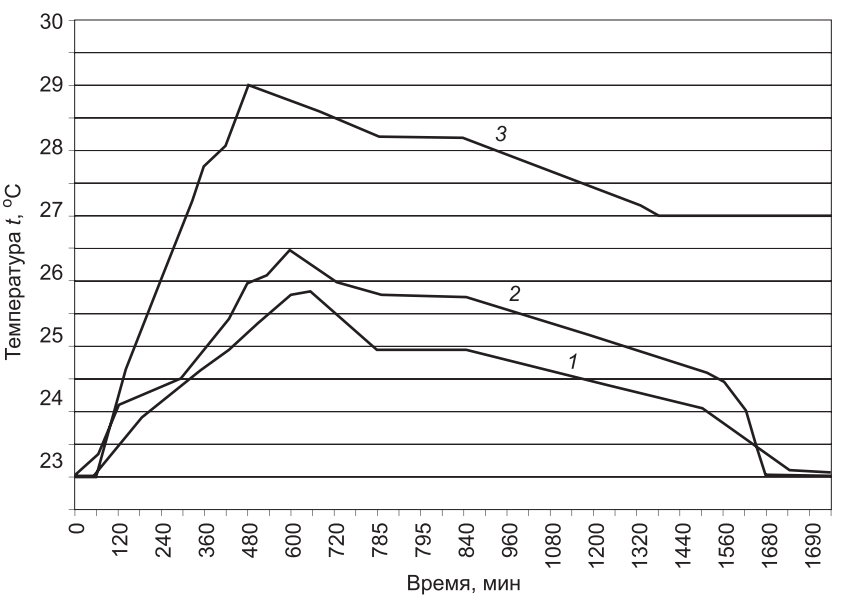


Рис. 2. Кинетика тепловыделения при твердении образцов

Усл. обозначения см. на рис. 1

Из представленных данных видно, что минимальное тепловыделение характерно для контрольного состава (см. рис. 2, кривая *3*). Максимальная температура, составляющая 26 °С, достигается по истечении 565 мин. При введении в цементное тесто синтезированных алюмосиликатов в количестве 10 и 20 % от массы цемента максимальное тепловыделение образцов наблюдается по истечении 530 и 420 мин, соответственно 26,5 и 29 °С (см. рис. 2, кривые *2* и *1*).

Анализируя экспериментальные данные, можно отметить, что введение в рецептуру синтезированной добавки приводит к повышению прочности при сжатии цементных образцов в возрасте 90 сут воздушно-сухого твердения на 19,9–70,1 % в зависимости от содержания добавки по сравнению с образцами на основе контрольных составов (без добавки).

Проведенные исследования свидетельствуют, что синтезированные алюмосиликаты могут с успехом применяться в качестве структурирующих добавок в рецептуре плиточных цементных клеев, а также водоудерживающих взамен импортных добавок (метилцеллюлозы и Bermokol).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов, Ю.М. Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении [Текст] / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев // Строительные материалы. — 2009. — № 6. — С. 66–67.
2. Строкова, В.В. Свойства синтетических нанотубулярных гидросиликатов [Текст] / В.В. Строкова, А.И. Везенцев, Д.А. Колесников, М.С. Шиманская // Вестн. БГТУ им. Шухова. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. — № 4. — С. 30–34.
3. Логанина, В.И. Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита [Текст] / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. — 2011. — № 12. — С. 63.
4. Логанина, В.И. Свойства известковых композитов с силикатсодержащими наполнителями [Текст] / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Строительные материалы. — 2012. — № 3. — С. 30–31.

ЛОГАНИНА Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
КИСЛИЦЫНА Светлана Николаевна, канд. техн. наук
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ЖЕГЕРА Кристина Владимировна, асп.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 12.08.13

Loganina Valentina Ivanovna, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Kislitsyna Svetlana Nikolaevna, candidate of technical sciences, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Zhegera Kristina Vladimirovna, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

USE AS PART OF SYNTHESIZED ALLUMOSILICATE TILE ADHESIVE BASED ON CEMENT

Provides information on the impact of the synthesized aluminosilicates on structure and properties of tile adhesive based on cement. The character of changes in the pH of the liquid

phase of cement systems. Provides information on the kinetics of heat hardening cement composites.

K e y w o r d s: tile adhesive, synthetic aluminosilicates, structure, heat, pH- index.

REFERENCES

1. B a z h e n o v, Yu.M. Evaluation of technical and economic efficiency of nanotechnology in building materials [Text] / Yu.M. Bazhenov, E.V. Korolev // Building materials. — 2009. — N 6. — P. 66–67.
2. S t r o k o v a, V.V. Properties of synthetic hydro nanotubular [Text] / V.V. Strokova, A.I. Vezentsev, D.A. Kolesnikov, M.S. Shimanskaya // Herald BSTU. — Belgorod : Publishing house of BSTU, 2010. — N 4. — P. 30–34.
3. L o g a n i n a, V.I. Study patterns of influence of silica sol on structure and properties of diatomite [Text] / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Building materials. — 2011. — N 12. — P. 63.
4. L o g a n i n a, V.I. Properties lime composites silikatsodezhaschimi fillers [Text] / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Building materials. — 2012. — N 3. — P. 30–31.

УДК 691.33:666.965.2:539.4

Г.И. ОВЧАРЕНКО, Д.И. ГИЛЬМИЯРОВ

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЧНОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА АВТОКЛАВНОГО ИЗВЕСТКОВО-ЗОЛЬНОГО КАМНЯ. Часть I

Прочность камня из известково-зольной композиции после автоклавирования в течение 8, 50 и 100 ч изотермы при 0,8 МПа всегда прямо пропорциональна содержанию гелевидной фазы C–A–S–H. Ее содержание пропорционально количеству Al-тоберморита в бездобавочных композициях или совершенно не соответствует содержанию тоберморита в композициях с добавкой 2 % Na_2SO_4.

Ключевые слова: известково-зольные композиции, прочность камня, автоклавная обработка, связь с фазовым составом.

Главные закономерности формирования прочности силикатных автоклавных материалов обсуждались с начала 50-х гг. XX столетия, когда Г.Л. Калоузек отметил прямую ее зависимость от количества образующегося 1,1 нм тоберморита. Затем Х.Ф.У. Тейлор возразил Калоузеку, отметив, что прочность любого материала есть функция его плотности, а для автоклавных материалов она также зависит и от наличия в них гелевидной фазы. О влиянии гелевидной фазы на прочность отмечалось в работах П.И. Боженова, на которые и сослался Тейлор. Однако количественных закономерностей ни П.И. Боженов, ни Тейлор не приводили. Краткий обзор по этим вопросам Тейлор изложил в последнем прижизненном издании «Химии цемента» [1], отметив также расхождение мнений по данному вопросу, особенно в том, до какой степени выгодно закристаллизовывать гелевидную фазу.

Несколько позже Г.Л. Калоузека, в 1960-е гг. отечественные ученые Ю.М. Бутт и Л.Н. Рашкович[1] в сравнительном аспекте показали зависимость прочности, морозостойкости и карбонизационной стойкости автоклавированного камня от его фазового состава. Максимальную прочность по их данным показывал камень на основе гелевидных гидросиликатов типа C–S–H. А.В. Волженский[2] объяснил это максимальной удельной поверхностью частиц C–S–H фазы по сравнению с явно кристаллическими гидросиликатами $C_2SH(A)$ и $C_2SH(C)$ (альфа- и гамма-гидраты C_2S по классификации Тейлора) или микрокристаллическими тоберморитом и ксонотлитом.

Фазообразование в системе известь — кварц даже с дозировками извести в 10–20 % осложняется кинетикой ее связывания и на первых этапах образуется не желательный с позиции прочности гидросиликат $C_2SH(A)$ или α-гидрат C_2S и фаза C–S–H с уменьшающейся впоследствии основностью, частично кристаллизующаяся в тоберморит.

[1] Бутт Ю.М., Рашкович Л.Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. М.: Стройиздат, 1961. 232 с.

[2] Волженский А.В., Буров Ю.С., Виноградов Б.Н. Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов. М.: Стройиздат, 1969. 392 с.

© Овчаренко Г.И., Гильмияров Д.И., 2013

При использовании в качестве кремнеземистого компонента различного алюмосиликатного сырья, например в виде кислых зол ТЭЦ, фазообразование характеризуется формированием алюминий замещенного или Al-тоберморита, который формируется через кристаллизацию C–A–S–H и гидрогранатовую фазу [2]. Присутствующие в сырье Al_2O_3, SO_3 и другие примеси могут размещаться как в гелевидной фазе C–A–S–H, так и в Al-тоберморите [3]. При этом кристаллизация гелевидной фазы может ускоряться.

Несмотря на отмеченные особенности формирования фазового состава и прочности автоклавных материалов из разных сырьевых источников, многие вопросы остаются открытыми, некоторые вызывают дискуссию, а другие интерпретируются в противовес известным фактам.

Цель настоящей работы — установление взаимосвязи между фазовым составом и прочностью известково-зольного прессованного автоклавированного камня, в том числе в присутствии активизатора Na_2SO_4.

В эксперименте использовали электрофильтровую золу от сжигания кузнецких каменных углей марки Г на Новосибирской ТЭЦ-5 (КУЗ), с содержанием несгоревшего угля (п.п.п.) 3,29 %. Кальциевая известь содержала 90 % активных CaO и MgO и по основным показателям соответствовала извести первого сорта по ГОСТ 9179–77. В отдельных составах использовался активизатор твердения Na_2SO_4 с содержанием основного вещества 98 %.

Методика эксперимента и характеристика сырьевых материалов даны нами в [4].

Из рис. 1 видно, что с увеличением изотермической выдержки от 8 до 100 ч прочность бездобавочных известково-зольных составов неуклонно растет от 20 до 45,5 МПа. При введении в известково-зольную смесь 1 и 2 % Na_2SO_4 наблюдается перегиб в прочности при 50 ч автоклавирования, а при 100 ч изотермы прочность снижается пропорционально добавке сульфата натрия. При этом основную прочность образцы с добавкой 2 % Na_2SO_4 набирают уже за первые 8 ч термообработки в автоклаве и далее не наблюдается ее существенный рост при 50 и 100 ч синтеза. Добавка 1 и 2 % сульфата натрия по сравнению с бездобавочным соста-

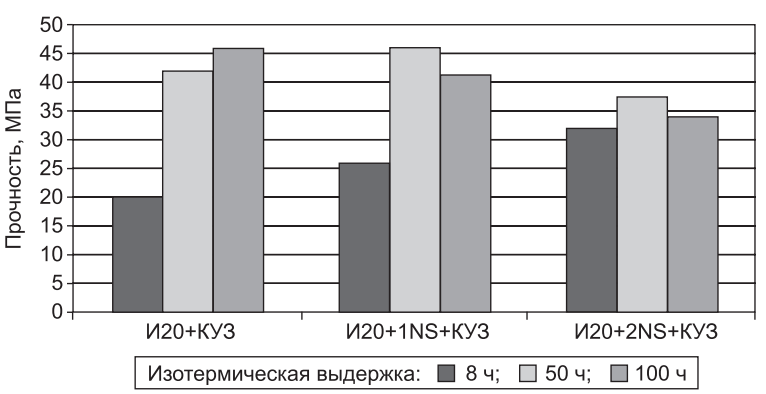


Рис. 1. Показатели прочности автоклавированных при 0,8 МПа составов на золе НТЭЦ-5 в зависимости от времени изотермической выдержки и добавки Na_2SO_4

И — известь; КУЗ — каменноугольная зола; NS — сульфат натрия; И20 — содержание извести 20 %; 1NS, 2NS — содержание сульфата натрия 1 и 2 %

вом повышает прочность камня при 8 ч изотермы автоклавирования в 1,3 и 1,6 раза соответственно.

Взаимосвязь прочности и фазового состава камня исследованных композиций приведена на рис. 2–4, из которых видно, что прочность без-

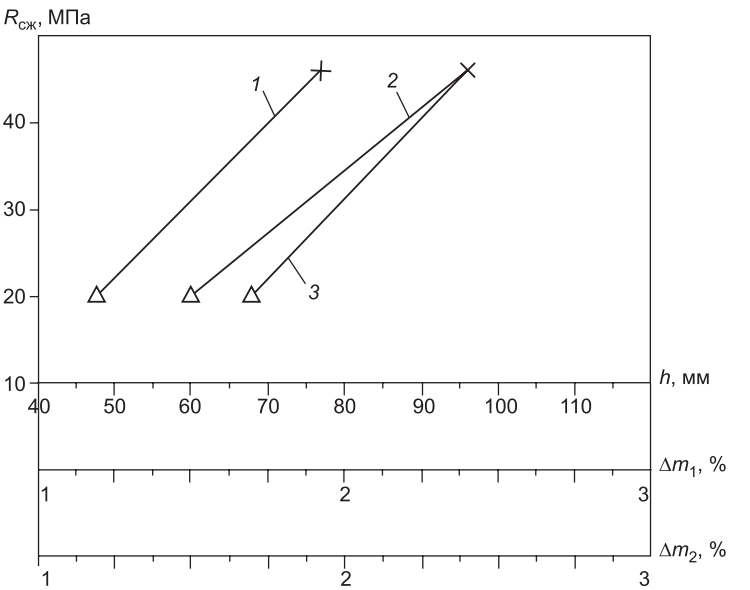


Рис. 2. Взаимосвязь прочности камня и содержания в нем Al-тоберморита по данным РФА (*1*); Al-тоберморита по данным DTG (*2*); C–A–S–H по данным DTG (*3*)

Δ — 8 ч изотермической выдержки; × — 100 ч изотермической выдержки; *h* — высота пика тоберморита по данным РФА; Δm_1, Δm_2 — потери массы в образце при 165–190 и 725–740 °С соответственно

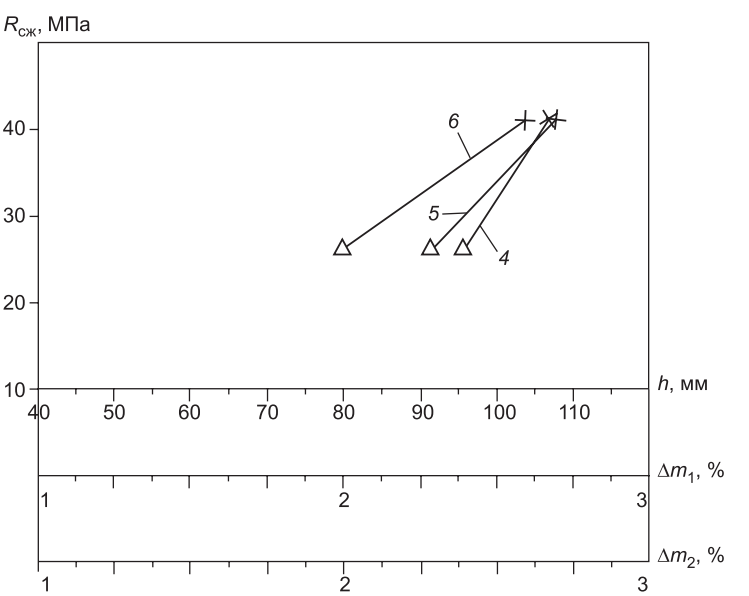


Рис. 3. Взаимосвязь прочности камня с добавкой 1 % Na_2SO_4 и содержания в нем Al-тоберморита по данным РФА (*4*); Al-тоберморита по данным DTG (*5*); C–A–S–H по данным DTG (*6*)

Усл. обозначения см. на рис. 2

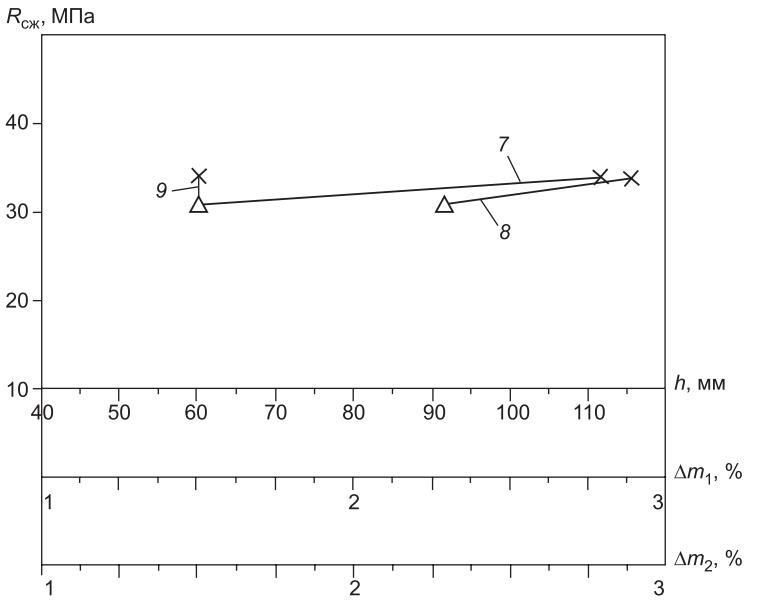


Рис. 4. Взаимосвязь прочности камня с добавкой 2 % Na_2SO_4 и содержания в нем Al-тоберморита по данным РФА (*7*); Al-тоберморита по данным DTG (*8*); C–A–S–H по данным DTG (*9*)

Усл. обозначения см. на рис. 2

добавочных по Na_2SO_4 составов прямо пропорциональна содержанию как Al-тоберморита, так и гелевидной фазы C–A–S–H. Взаимосвязь прочности и фазового состава менее явно, но сохраняется и при 1 % сульфата натрия (рис. 3). Однако при 2 % добавки Na_2SO_4 (рис. 4) она отсутствует. При этом значительное увеличение количества Al-тоберморита в композиции как по данным РФА, так и по данным DTG совершенно не соответствует незначительному приросту прочности камня. Но малое количество C–A–S–H фазы здесь полностью соответствует такому же незначительному приросту прочности камня.

Таким образом, прочность автоклавированного камня из известково-зольных композиций всегда пропорциональна содержанию гелевидной C–A–S–H фазы. При этом ее содержание может быть пропорционально количеству Al-тоберморита, а может абсолютно ему не соответствовать. Характерно, что при инициировании синтеза Al-тоберморита добавкой Na_2SO_4 его кристаллизация осуществляется за счет фазы C–A–S–H.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Т е й л о р, Х. Химия цемента [Текст] / Х. Тейлор; пер. с англ. — М. : Мир, 1996. — 560 с.
2. M a t s u i, K. Influence of addition of a compound and gypsum on tobermorite formation in autoclaved aerated concrete studied by *in situ* x-ray diffraction [Текст] / K. Matsui, A. Ogawa, J. Kikuma // JCPDS-International Centre for Diffraction Data 2011. ISSN 1097-0002.
3. R a y, A. Hydrothermally treated cement-based building materials. Past, present, and future [Текст] / A. Ray // Pure Appl. Chem. — 2002. — Vol. 74, N 11. — P. 2131–2135.
4. О в ч а р е н к о, Г.И. Фазовый состав автоклавных известково-зольных материалов [Текст] / Г.И. Овчаренко, Д.И. Гильмияров // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 9. — С. 28–33.

ОВЧАРЕНКО Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: egogo1980@mail.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
ГИЛЬМИЯРОВ Данил Игоревич, асп.; E-mail: dan7658@yandex.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 06.08.13

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: egogo1980@mail.ru, Altai State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia
Gilmiyarov Daniel Igorevich, post-graduate student; E-mail: dan7658@yandex.ru, Altai State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

RELATIONSHIP OF STRENGTH AND PHASE COMPOSITION OF THE AUTOCLAVE LIME FLY-ASH STONE. Part I

The strength of lime-ash stone after autoclaving for 8, 50, and 100 hours of isotherms at 0,8 MPa always directly proportional to the gel phase C–A–S–H. Its content is proportional to the Al-tobermorite in mixtures without additives or does not correspond to the content of tobermorite in mixtures with additive 2 % Na_2SO_4.

Key words: lime-ash composition, strength of the stone, autoclaving, the relationship with the phase composition.

REFERENCES

1. Taylor, H. Chemistry of cement [Text] / H. Taylor; transl. from English. — M. : Mir, 1996. — 560 p.
2. Matsui, K. Influence of addition of a compound and gypsum on tobermorite formation in autoclaved aerated concrete studied by *in situ* x-ray diffraction [Text] / K. Matsui, A. Ogawa, J. Kikuma // JCPDS-International Centre, 2011. ISSN 1097-0002.
3. Ray, A. Hydrothermally treated cement-based building materials. Past, present, and future [Text] / A. Ray // Pure Appl. Chem. — 2002. — Vol. 74, N 11. — P. 2131–2135.
4. Ovcharenko, G.I. The phase composition of autoclaved lime-ash materials [Text] / G.I. Ovcharenko, D.I. Gilmiyarov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 9. — P. 28–33.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 625.173:658.527

Г.К. ЩЕПОТИН

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрен технологический процесс капитального ремонта пути, а также надежность технологического процесса, осуществлен статистический анализ пооперационных графиков производства основных работ при капитальном ремонте пути. Сделан вывод о необходимости при планировании организации капитальных работ учитывать существующую на дорогах фактическую надежность технологических процессов.

Ключевые слова: технологический процесс, капитальный ремонт, статистический анализ, пооперационные графики, надежность.

Технологический процесс является сложной совокупностью технической и организационной систем, которые, в свою очередь, состоят из большого количества взаимно связанных и взаимодействующих между собой элементов, обеспечивающих выполнение системой некоторой достаточно сложной функции.

Технологический процесс капитального ремонта пути состоит из частных технологических потоков. Способность этих потоков сохранять рабочее состояние и выполнять возложенные на них функции в заданный срок при определенных условиях функционирования и определяет в целом надежность технологического процесса.

При производстве основных работ в «окно» по некоторым причинам в случайные моменты времени возникают различные неполадки и отказы путевых машин и механизмов, которые часто приводят к длительному простою технологических потоков. Это увеличивает продолжительность «окон», влияет на ухудшение основных технико-экономических показателей технологического процесса и сказывается на транспортном потоке.

Большие возможности повышения эффективности выполнения капитальных ремонтов пути заключены в решении задачи организационно-технической надежности технологических процессов, синтезирующей многие теоретические, методологические и практические проблемы планирования ремонтов.

Проблема надежности технологических процессов имеет особую актуальность на участках скоростного движения поездов и интенсивного пригородного сообщения.

© Щепотин Г.К., 2013

С целью оценки влияния отказов техники на задержки выполнения путевых работ в «окно» осуществлен статистический анализ пооперационных графиков производства основных работ при капитальном ремонте пути на главном ходу Красноярской железной дороги.

Рассмотрим случай, когда силами одной ПМС за период летних путевых работ здесь было выполнено 39,75 км капитального ремонта пути на щебеночном балласте за 22 «окна».

Статистическому анализу подвергались временные интервалы T_i при укладке и перетяжке пакетов звеньев путевой решетки (рельсы Р65 длиной 25 м, шпалы деревянные).

Минимальное время укладки одного пакета оказалось равным 7 мин, а максимальное — 53 мин. Время перетяжки пакетов колеблется от наименьшего 3 мин до наибольшего 30 мин.

Таким образом, наблюдается неритмичность выполнения отдельных операций, причинами которой являются отказы тяговых лебедок, порывы тросов, поломки моторной платформы МПД и т.п.

Данные о временных интервалах при работе укладочного крана УК-25 и перетяжки пакетов обрабатывались в следующей последовательности. Первоначально они были разделены на две группы. В первую группу включены значения интервалов выполнения технологических операций, при которых отсутствовали задержки из-за отказов техники, во вторую — с задержками вследствие отказов техники.

Далее весь наблюдаемый временной диапазон разбивался на интервалы Δt. Для каждого интервала определялось число уложенных пакетов звеньев в этом интервале m_i (частота). Частость r_i, отношение числа уложенных пакетов в интервале m_i к общему числу уложенных пакетов n, определялась по формуле

$$r_i = \frac{m_i}{n}. \qquad (1)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистическая обработка экспериментальных данных при укладке пакетов звеньев путевой решетки без задержек

Параметр	Интервал времени, мин				
	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16
Частота m_i	27	68	61	30	12
Частость r_i	0,14	0,34	0,31	0,15	0,06

По значениям r_i строились гистограммы частостей распределения временных интервалов выполнения операций (рис. 1). Из анализа графиков видно, что гистограммы частостей распределения не противоречат гипотезе о нормальном законе распределения временных интервалов при укладке пакетов звеньев без задержек (см. рис. 1, *а*) и экспоненциальному закону при отказах техники (см. рис. 1, *б*).

Вычислим оценки параметров распределения:

$$\overline{T} = \frac{\Sigma T_i}{n}, \qquad (2)$$

где $\overline{T}$ — среднее значение, мин;

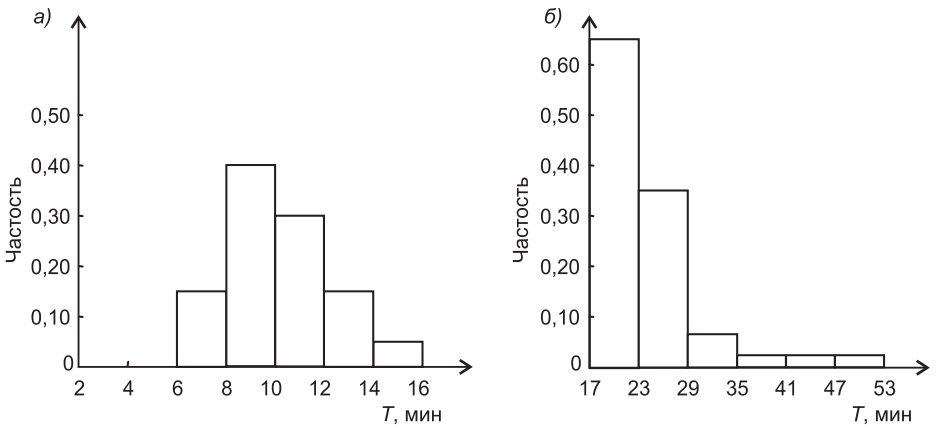


Рис. 1. Гистограммы частостей распределения времени укладки пакетов звеньев *а* — без задержек; *б* — с задержками

среднее квадратическое отклонение, мин:

$$S = \sqrt{\frac{\Sigma(T_i - \overline{T})^2}{n}}; \tag{3}$$

коэффициент вариации

$$v = S / \overline{T}. \tag{4}$$

Результаты расчета параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка параметров распределения времени выполнения технологических операций

Укладка пакетов звеньев	Параметры распределения		
	$\overline{T}$, мин	S, мин	v
Без задержек	10,9	2,07	0,19
С задержками	23,1	7,27	0,31

Выполненные расчеты показывают, что среднее время укладки одного звена (в пакете 6 звеньев) при отсутствии задержек составляет 1,8 мин, а при отказах техники — 3,85 мин. При этом количество звеньев, укладываемых с задержками от общего числа уложенных в «окно» звеньев, составляет 23 %.

По изложенной методике была выполнена оценка параметров распределения времени перетяжки пакетов звеньев.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка параметров распределения времени перетяжки пакетов звеньев

Перетяжка пакетов звеньев	Параметры распределения			Объем выборки n
	$\overline{T}$, мин	S, мин	v	
Без задержек	6,44	1,75	0,27	48
С задержками	20,44	9,82	0,48	18

Найдем оценку вероятности отказа техники при перетяжке пакетов

$$R = \frac{n_{от}}{n_{от} + n_b}, \qquad (5)$$

где $n_{от}$ — число пакетов звеньев, при перетяжке которых наблюдались отказы техники, шт.; n_b — число пакетов звеньев, перетяжка которых выполнялась без задержек, шт. (см. табл. 3).

По формуле (5) получено: R = 0,27.

Таким образом, при отказах укладочных поездов возникают задержки в выполнении технологических операций. Продолжительность задержек оценивается временем восстановления возникающих отказов техники. Для расчета основных параметров распределения длительности восстановления отказов использовались зависимости (1)–(4). Общее количество отказов укладочных поездов за 22 «окна» составило 33, т.е. в среднем 1,5 отказа на одно «окно».

Средняя длительность восстановления отказа техники для данной ПМС составляет 9,82 мин, среднее квадратическое отклонение — 9,14 мин, коэффициент вариации 0,93.

Процент задержанных «окон» из-за отказов укладочных поездов равен 59 %.

Анализ износа техники, которая входит в состав укладочных поездов (УК, МПД, платформы со съемным оборудованием), показал, что износ на момент выполнения ремонтных работ уже достигал от 30 до 100 %. Очевидно, такой износ техники заметно сказался на надежности технологического процесса.

Для оценки влияния отказов техники на выработку в «окно» были выполнены специальные расчеты основных параметров рабочего технологического процесса капитального ремонта пути по методике МГУ ПС (МИИТ) [1].

Для используемой ПМС технологического потока на рис. 2 приведены зависимости выработки в «окно» W (м/ч) от продолжительности «окна» $T_о$ (ч) для двух случаев:

1) укладка звеньев выполняется без задержек (рис. 2, кривая *1*);

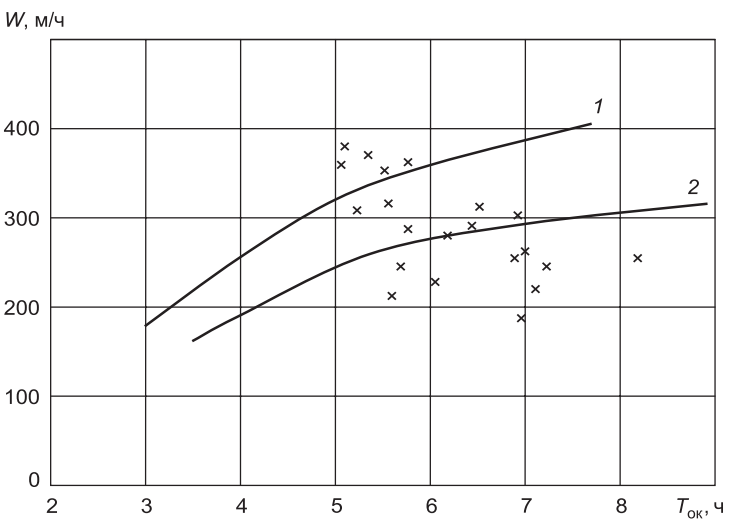


Рис. 2. График зависимости выработки в «окно» от продолжительности «окна»

1 — график нормативной выработки; *2* — график с учетом задержек при укладке звеньев; × — данные о фактической выработке

2) укладка звеньев выполняется с задержками, связанными с устранением отказов техники (рис. 2, кривая *2*).

Для первого случая использовались существующие нормативы на выполнение путевых работ, а для второго учитывались также наблюдаемые задержки при укладке пакетов, значения которых приведены выше.

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что максимально возможная выработка для данной технологии при продолжительности «окна» 5 ч может достигать 320 м/ч. Но по причине указанного ранее износа техники и имеющих место отказов укладочных поездов фактическая выработка составляет всего 250 м/ч (78 %). Чтобы при таком износе техники поддерживать выработку на уровне 320 м/ч, необходимо организовывать «окна» продолжительностью 9 ч, т.е. увеличить их почти в два раза.

Для оценки надежности технологического процесса определим вероятность достижения нормативной выработки в «окно» $P(W \geq [W])$:

$$P(W \geq [W]) = \frac{N(W \geq [W])}{N_{\text{о}}}, \qquad (6)$$

где $[W]$ — нормативная выработка в «окно»; $N(W \geq [W])$ — количество «окон» с нормативной выработкой; $N_{\text{о}}$ — общее количество «окон» за сезон летних путевых работ.

На рис. 2 приведены данные о фактической выработке в «окно» достигнутой ПМС за сезон летних путевых работ. Сравнительный анализ опытных данных с расчетными кривыми $W = f(T_{\text{о}})$ показывает, что только при 8 «окнах» из 22 наблюдалась выработка, равная или больше нормативной, т.е. $P(W \geq [W]) = 36\%$.

Таким образом, с целью снижения ущерба перевозочному процессу из-за задержек «окон» необходимо при планировании организации капитальных работ учитывать существующую на дорогах фактическую надежность технологических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология, механизация и автоматизация путевых работ / Э.В. Воробьев, К.Н. Дьяков, В.Г. Максимов и др.; под ред. Э.В. Воробьева, К.Н. Дьякова. — М. : Транспорт, 1996. — 375 с.

ЩЕПОТИН Георгий Константинович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 02.08.13

Shchepotin Georgy Konstantinovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

EVALUATION OF RELIABILITY OF TECHNOLOGICAL PROCESS

Reviewed process overhaul, as well as the reliability of technological process, carried out a statistical analysis of the variables and events schedules for the production of basic works with major repairs. Considered necessary in the planning of capital works on roads take into account the actual process reliability.

K e y w o r d s: process, overhaul, statistical analysis, pooperacionnye graphics, reliability.

REFERENCES

1. Technology, mechanization and automation works / E.V. Vorobiev, K.N. Dyakov, V.G. Maksimov, etc.; ed. E.V. Vorobiev, K.N. Dyakov. — M. : Transport, 1996. — 375 p.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.5:533.6

И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА

ЭЖЕКЦИЯ ВОЗДУХА ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ С КОВШАМИ*

Сообщение 2. ЭЖЕКТИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ЛЕНТОЧНОГО КОВШОВОГО ЭЛЕВАТОРА**

Рассмотрен процесс эжектирования воздуха в нориях с позиции классических законов изменения массы воздуха и количества движения. Получена система дифференциальных уравнений, описывающих процесс продольных осредненных течений воздуха в кожухе при совместном размещении в нем рабочей и холостой ветвей нории.

Ключевые слова: аспирация, перегрузки сыпучих материалов, эжекция воздуха.

Рассмотрим теперь более сложный случай, когда в общем кожухе размещены рабочая и холостая ветви нории (рис. 3). В этом случае возможно поперечное перемещение воздуха из одной части кожуха (в которой, например, перемещаются ковши с материалом) в другую (в которой перемещаются пустые ковши). Скорость поперечного потока воздуха в зазоре между лентой и стенками кожуха обозначим w. Параметры воздушного потока в правой части кожуха (где перемещаются пустые ковши и падают частицы просыпки) обозначим нижним индексом u (от обозначения скорости воздуха в холостой ветви), а в левой соответственно v (от обозначения скорости воздуха в рабочей ветви конвейера).

Скорость перетекания определяется разностью давлений и аэродинамическим сопротивлением зазоров:

$$\Delta p = p_v - p_u = \zeta_z \frac{w|w|}{2}\rho, \qquad (20)$$

где p_v, p_u — избыточные статистические давления соответственно в левой и правой частях кожуха, Па;

ζ_z — суммарный коэффициент местного сопротивления (к.м.с.) двух зазоров между стенками кожуха и торцевой части холостой и рабочей ветвями конвейера.

Знак абсолютной величины в правой части введен для универсальности соотношения, которое в таком виде описывает и случай обратного потока (когда $p_u > p_v$). Скорость w в таком «векторном» случае отрицательна, т. е. вектор скорости будет направлен в противоположную сторону (справа налево). На рис. 3 этот вектор показан пунктиром.

Из-за наличия поперечного перетока воздуха скорости u и v не будут постоянны, а будут изменяться по высоте кожуха элеватора (нории).

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-31069-мол_а), плана стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

** См.: Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. Сообщ. 1. Закономерности изменения эжекционного напора в желобах // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 9. С. 53–63.

© Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., 2013

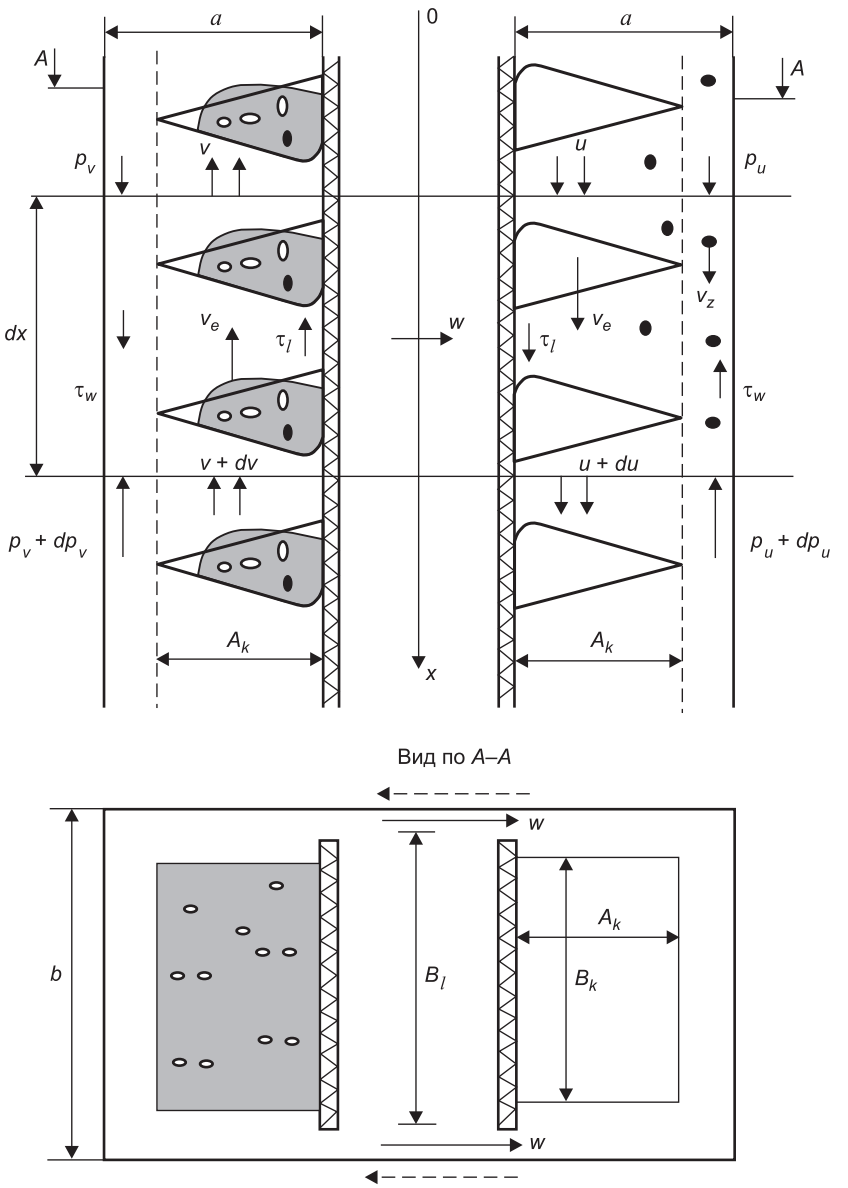


Рис. 3. Схема продольного течения воздуха при размещении холостой и рабочей ветвей в общем кожухе элеватора

Запишем уравнение сохранения расхода воздуха, по-прежнему считая, что в поперечном сечении скорости u и v усреднены, а положительное направление этих скоростей совпадает с направлением движения ковшей:

$$uab = (u + du)ab - w(b - B_l)dx, \; vab = (v + dv)ab - w(b - B_l)dx.$$

Отсюда видно, что изменение абсолютной величины продольных скоростей одинаково:

$$\frac{du}{dx} = w\frac{b - B}{ab}, \quad \frac{dv}{dx} = w\frac{b - B}{ab}.$$

А разность этих скоростей по длине кожуха не изменяется

$$u - v = k = \text{const}.$$

Запишем теперь для выделенного элемента кожуха длиной dx уравнение сохранения количества движения. Для правого (нисходящего) потока воздуха уравнение сохранения количества движения в проекции на ось Ox ничем не отличается от уравнения (12). После несложных преобразований получим следующее дифференциальное уравнение динамики рассматриваемого воздушного течения:

$$2\rho u\frac{du}{dx} = -\frac{dp_u}{dx} - \frac{\lambda_w}{D_w}\frac{u^2}{2}\rho + \zeta_u\frac{|v_e - u|(v_e - u)}{2}\rho +$$

$$+ A_n\frac{|v_e - u|(v_e - u)}{2v}\rho,$$

где для простоты записи принято:

$$\zeta_u = \frac{\lambda_l}{4}\frac{B_l}{ab} + c_k\frac{A_kB_k}{abl_k}, \quad A_n = \frac{1{,}5}{d_e}\frac{G_p}{\rho_z}\frac{\psi_e}{ab}.$$

Для левого (восходящего) потока запишем вначале уравнение сохранения количества движения в дифференциалах:

$$-\rho v v ab - \rho(v + dv)ab[-(v + dv)] =$$
$$= p_v ab - (p_v + dp_v)ab + \tau_w(b + 2a)dx - \tau_l B_l dx - R_k\frac{dx}{l_k}, \tag{21}$$

где

$$\tau_w = \frac{\lambda_w}{4}\frac{v|v|}{2}\rho; \quad \tau_l = \frac{\lambda_l}{4}\frac{(v_e - v)|v_e - v|}{2}\rho;$$
$$R_k = c_{kz}A_kB_k\frac{(v_e - v)|v_e - v|}{2}\rho;$$

c_{kz} — безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления ковша с материалом.

После несложных преобразований из равенства (21) получим:

$$2\rho v\frac{dv}{dx} = -\frac{dp_v}{dx} + \frac{\lambda_w}{D_w}\frac{v^2}{2}\rho - \zeta_v\frac{|v_e - v|(v_e - v)}{2}\rho, \tag{22}$$

$$\zeta_v = \frac{1}{ab}\left(\frac{\lambda_l B_l}{4} + c_{kz}\frac{A_kB_k}{l_k}\right). \tag{23}$$

Таким образом, продольное течение воздуха при совместном размещении в кожухе холостой и рабочей ветвей описывается системой уравнений:

$$2\rho u\frac{du}{dx} = -\frac{dp_u}{dx} + f_u, \tag{24}$$

$$2\rho v\frac{dv}{dx} = -\frac{dp_v}{dx} + f_v, \tag{25}$$

$$\frac{du}{dx} = w\frac{b - B_l}{ab}, \tag{26}$$

$$v = u - k, \tag{27}$$

$$\Delta p = \zeta_z \frac{w|w|}{2}\rho; \quad \Delta p = p_v - p_u, \tag{28}$$

где для сокращения записи положено:

$$f_u = -\frac{\lambda_w}{D_w}\frac{u|u|}{2}\rho + \zeta_u \frac{|v_e - u|(v_e - u)}{2}\rho + A_n \frac{|v_z - u|(v_z - u)}{2v_z}\rho,$$

$$f_v = \frac{\lambda_w}{D_w}\frac{v|v|}{2}\rho - \zeta_v \frac{|v_e - v|(v_e - v)}{2}\rho.$$

Введенные функции f_u и f_v можем записать в более удобном (симметричном) виде. Прежде всего положим, что скорость просыпи равна скорости холостой ветви (учитывая малый зазор между ковшами и стенками кожуха, частицы соударяются с днищем ковша, далее под действием силы тяжести разгоняются и «догоняют» равномерно перемещающиеся ковши): $v_z \approx v_e$.

Тогда

$$f_u = -\xi_u \frac{T}{l}\frac{\rho u^2}{2} + \gamma_u \frac{M_u}{l}\frac{\rho(v_e - u)^2}{2},$$

$$f_v = \xi_v \frac{T}{l}\frac{\rho v^2}{2} - \gamma_v \frac{M_v}{l}\frac{\rho(v_e - v)^2}{2}, \tag{29}$$

где T, M_u и M_v — безразмерные параметры: $T = \lambda_w \frac{l}{D_w}$;

$$M_u = \lambda_l \frac{l}{D_l} + c_k \frac{l}{l_k}\frac{A_k B_k}{S} + 1{,}5\psi \frac{l}{d}\beta_e; \tag{30}$$

$$M_v = \lambda_l \frac{l}{D_l} + c_{kz} \frac{l}{l_k}\frac{A_k B_k}{S}; \quad D_w = \frac{4S}{b + 2a}; \quad D_l = \frac{4S}{B_l}; \quad \beta_e = \frac{G_p}{\rho_z v_e S};$$

$$\xi_u = \operatorname{signum}(u), \quad \xi_v = \operatorname{signum}(v) = \operatorname{signum}(u - k);$$

$$\gamma_u = \operatorname{signum}(v_e - u); \quad \gamma_v = \operatorname{signum}(v_e - v) = \operatorname{signum}(v_e + k - u).$$

Систему уравнений (24)–(28) можно значительно упростить. Из (28) можно определить скорость перетекания поперечного потока:

$$w = \delta\sqrt{\frac{2|\Delta p|}{\zeta_z \rho}}, \quad \Delta p = p_v - p_u, \tag{31}$$

Где $\delta = \operatorname{signum}(\Delta p)$.

Подставляя (31) в (26), получим

$$\frac{du}{dx} = \delta \frac{L}{l}\sqrt{\frac{2|\Delta p|}{\rho}}, \tag{32}$$

где $L = \dfrac{l(b - B)}{S\sqrt{\zeta_z}}$.

Вычитая из уравнения (24) соотношение (25) и имея в виду, что в силу (27) $\frac{dv}{dx} = \frac{du}{dx}$, получим

$$2\rho k\frac{du}{dx} = \frac{d\Delta p}{dx} - \xi_u \frac{T}{l}\frac{u^2}{2}\rho + \gamma_u \frac{M_u}{l}\frac{(v_e - u)^2}{2}\rho - \\ - \xi_v \frac{T}{l}\frac{v^2}{2}\rho + \gamma_v \frac{M_v}{l}\frac{(v_e - v)^2}{2}\rho \tag{33}$$

или с учетом (32)

$$-\frac{d\Delta p}{dx} = -2\delta k\rho \frac{L}{l}\sqrt{\frac{2|\Delta p|}{\rho}} - \xi_x \frac{T}{l}\frac{u^2}{2}\rho + \gamma_u \frac{M_u}{l}\frac{(v_e - u)^2}{2}\rho - \\ - \xi_v \frac{T}{l}\frac{v^2}{2}\rho + \gamma_v \frac{M_v}{l}\frac{(v_e - v)^2}{2}\rho. \tag{34}$$

К уравнению (34) запишем (24) с учетом (29) и (32):

$$\frac{dp_u}{dx} = -2\rho u\delta \frac{L}{l}\sqrt{\frac{2|\Delta p|}{\rho}} - \xi_u \frac{T}{l}\frac{u^2}{2}\rho + \gamma_u \frac{M_u}{l}\frac{(v_e - u)^2}{2}\rho. \tag{35}$$

Тогда с учетом (32) получим систему (учитывая (27)) трех дифференциальных уравнений (35), (34) и (32), описывающих процесс продольных осредненных течений воздуха в кожухе при совместном размещении в нем рабочей и холостой ветвей нории.

Изменение скорости u можно найти из (33), используя (32), которое можно записать в виде:

$$\Delta p = A\left(\frac{du}{dx}\right)^2 \frac{\rho}{2}\left(\frac{l}{L}\right)^2, \quad A = \text{signum}\left(\frac{du}{dx}\right). \tag{36}$$

Подставляя (36) в (33) и используя соотношение (27), получим нелинейное уравнение 2-го порядка относительно искомой функции u:

$$-A\rho\left(\frac{l}{L}\right)^2 \frac{d^2u}{dx^2}\frac{du}{dx} + 2\rho k\frac{du}{dx} = -\xi_u \frac{T}{l}\frac{u^2}{2}\rho + \gamma_u \frac{M_u}{l}\frac{(v_e - u)^2}{2}\rho - \\ - \xi_v \frac{T}{l}\frac{(u - k)^2}{2}\rho + \gamma_v \frac{M_v}{l}\frac{(v_e + k - u)^2}{2}\rho. \tag{37}$$

Для упрощения численного интегрирования полученных размерных уравнений используем безразмерную формулу дифференциальных уравнений. Это позволит сократить число постоянных. В качестве базовых величин примем: скорость ленты нории v_e; высоту (длину) кожуха нории l; динамическое давление $\rho v_e^2 / 2$.

Таким образом, пусть:

$$p_u = p\frac{v_e^2\rho}{2}; \quad \Delta p = R\frac{v_e^2\rho}{2}; \quad u = u^* v_e; \quad k = m^* v_e; \quad x = zl,$$

тогда, подставляя принятые обозначения в уравнения (24), (34), (32), после несложных преобразований получим следующую систему безразмерных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp}{dz} = -\delta u^* 4L\sqrt{|R|} - \xi_u T(u^*)^2 + \gamma_u M_u (1-u^*)^2; \tag{38}$$

$$\frac{dR}{dz} = 4\delta m^* L\sqrt{|R|} + \xi_u T(u^*)^2 - \gamma_u M_u (1-u^*)^2 + \\ + \xi_v T(u^* - m^*)^2 - \gamma_v M_v (1+m^* - u^*)^2; \tag{39}$$

$$\frac{du^*}{dz} = \delta L\sqrt{|R|}, \tag{40}$$

где $\delta = \text{signum}(R)$, $\xi_u = \text{signum}(u^*)$, $\xi_v = \text{signum}(u^* - m^*)$, $\gamma_u = \text{signum}(1-u^*)$, $\gamma_v = \text{signum}(1+m^*-u^*)$.

Аналогично (37) станет

$$\left(-A_3 \frac{2}{L^2}\frac{d^2u^*}{dz^2} + 4m^*\right)\frac{du^*}{dz} = -\xi_u T(u^*)^2 + \gamma_u M_u (1-u^*)^2 - \\ -\xi_v T(u^* - m^*)^2 + \gamma_v M_v (1+m^*-u^*)^2,$$

где $A_3 = \text{signum}\left(\frac{du^*}{dz}\right)$.

3. Перетекание воздуха по герметичным кожухам элеватора. Рассмотрим наиболее распространенный случай элеватора с двумя кожухами. Пусть рабочая и холостая ветви конвейера с ковшами находятся в отдельных герметичных кожухах, из которых перетекание воздуха по их длине не происходит. Аэродинамически эти кожухи связаны между собой лишь в нижней (загрузочной) и в верхней (разгрузочной) частях. Пусть в этих частях поддерживается статистическое давление p соответственно p_k и p_n, причем положим, что $p_k < p_n$.

В этом случае воздух будет поступать из верхней в нижнюю зону по кожуху холостой ветви, а по кожуху рабочей ветви конвейера лишь в случае, когда эжекционный напор, создаваемый груженными ковшами, будет меньше разности статистических давлений $\Delta p_e \le p_n - p_k$, тогда предельный случай (при $v = 0$) в силу (22) и (23) запишем в виде

$$p_n - p_k > \zeta_1 \frac{v_e^2}{2}\rho$$

или условие опрокидывания эжекционных свойств рабочей ветви в безразмерном виде определяется следующим неравенством:

$$h_a = \frac{p_n - p_k}{\frac{v_e^2}{2}\rho} > \zeta_1 \quad \text{или} \quad t_1 = \frac{h_a}{M_1} \ge 1.$$

Здесь и далее нижним индексом «1» будем по-прежнему обозначать параметры, характеризующие воздушное течение в кожухе рабочей ветви конвейера (т.е. вместо индекса «v» будем использовать индекс «1», например, продольную скорость воздуха u_1 вместо v, параметр ζ_1 вместо

ζ_v, M_1 вместо M_v и т.д.) и индексом «2» для продольного течения воздуха в кожухе холостой ветви (скорость воздуха u_2 вместо u, параметр ζ_2 вместо ζ_u, M_2 вместо M_u и т.д.).

В общем случае (когда величина p_n может быть и меньше величины p_k) перетекание воздуха по кожухам нории возможно по двум схемам: по прямоточной, когда скорости u_1 и u_2 положительны и движение воздуха в кожухах осуществляется по направлению движения ковшей, и по комбинированной схеме, когда воздух по одному из кожухов протекает по направлению движения ковшей, а в другом кожухе — навстречу движения ковшей (рис. 4).

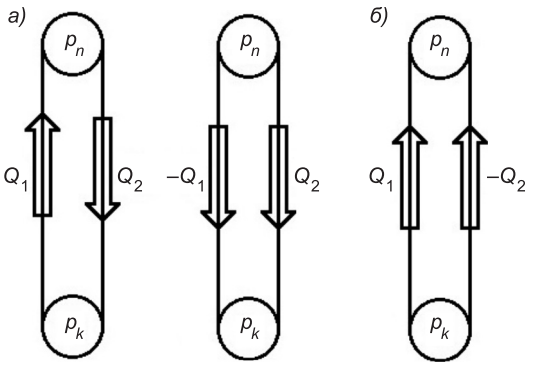


Рис. 4. Аэродинамические схемы перетекания воздуха по двум герметичным кожухам нории
а — при $p_n > p_k$; *б* — при $p_n < p_k$

Найдем расходы воздуха Q_1 и Q_2 и их разность: $\Delta Q = Q_2 - Q_1$.

Величины расходов воздуха могут принимать знак «минус» в зависимости от знака и величины векторов скорости u_1 и u_2.

Вначале найдем расход Q_2. Для нахождения расхода в кожухе холостой ветви воспользуемся уравнением динамики (13). При этом статистическое давление в начале и конце кожуха выразим через давления p_n и p_k с помощью коэффициентов местных сопротивлений при входе воздуха в кожух (ζ_{2n}) и при выходе из кожуха (ζ_{2k}):

$$p_2(0) = p_n - \zeta_{2n}\frac{u_2^2}{2}\rho, \quad p_2(l) = p_k + \zeta_{2k}\frac{u_2^2}{2}\rho.$$

С учетом принятых условий перепишем уравнение (13), раскрывая значения E_k и E_p на основании (15), (16) и (19),

$$p_k - p_n + \sum\zeta_2\frac{u_2^2}{2}\rho = M_2\frac{|v_e - u_2|(v_e - u_2)}{2}\rho,$$

где $\sum\zeta_2$ — сумма к.м.с. кожуха,

$$\sum\zeta_2 = \zeta_{2n} + \lambda_w\frac{l}{D_w} + \zeta_{2k},$$

M_2 — параметр, характеризующий эжектирующую способность холостой ветви конвейера и потока просыпи (в соответствии с формулой (30)).

Если разделим обе части уравнения на $\rho\frac{v_e}{2}$, получим безразмерное уравнение

$$-h_a + \sum\zeta_2\varphi_2^2 = M_2|1-\varphi_2|(1-\varphi_2), \qquad (41)$$

здесь

$$\varphi_2 = \frac{u_2}{v_e};\quad h_a = \frac{p_n - p_k}{\rho\dfrac{v_e^2}{2}} = \frac{h_k - h_n}{\rho\dfrac{v_e^2}{2}},$$

где h_k — величина разрежения в аспирируемом кожухе башмака элеватора, поддерживаемого вентилятором аспирационной системы, Па;
h_n — величина разрежения в неаспирируемом кожухе головки нории, устанавливающаяся в результате перетекания воздуха по разгрузочному желобу и кожухам элеватора, Па.

Искомый расход Q_2 определяется очевидным отношением $Q_2 = \varphi_2 v_e S$, где $S = a \cdot b$.

Значение величины φ_2 определяется уравнением (41), которое в силу произвольности величины h_a можем записать в виде следующего безразмерного уравнения:

$$h_a + M_2|1-\varphi_2|(1-\varphi_2) = \sum\zeta_2\varphi_2|\varphi_2|$$

или

$$t_2 = g_2\varphi_2|\varphi_2| - |1-\varphi_2|(1-\varphi_2), \qquad (42)$$

где для сокращения числа определяющих параметров введены безразмерные числа:

$$t_2 = \frac{h_a}{M_2},\quad g_2 = \frac{\sum\zeta_2}{M_2},$$

представляющие собой отношение располагаемого давления и потерь давления на общие сопротивления кожуха к эжекционному напору нории[2].

Уравнение (42), раскрывая знаки абсолютных величин, сводится к следующей системе трех уравнений:

$$t_2 = g_2\varphi_2^2 - (1-\varphi_2)^2 \quad \text{при} \quad 1 \ge \varphi_2 \ge 0;$$

$$t_2 = -g_2\varphi_2^2 - (1-\varphi_2)^2 \quad \text{при} \quad -\infty < \varphi_2 \le 0;$$

$$t_2 = g_2\varphi_2^2 + (1-\varphi_2)^2 \quad \text{при} \quad +\infty > \varphi_2 \ge 1.$$

График изменения однозначной функции $\varphi_2 = f(t_2)$ представляет собой совокупность трех дуг парабол (рис. 5):

$$y_1 \equiv t_2 = -\varphi_2(g_2+1) + 2\varphi_2 - 1 \quad \text{при} \quad -\infty < \frac{\varphi}{2} \le 0;$$

$$y_2 \equiv t_2 = -\varphi_2^2(1-g_2) + 2\varphi_2 - 1 \quad \text{при} \quad 1 \ge \varphi_2 \ge 0;$$

$$y_3 \equiv t_2 = -\varphi_2^2(1+g_2) - 2\varphi_2 + 1 \quad \text{при} \quad \infty > \varphi_2 \ge 1.$$

Для получения однозначной величины безразмерного расхода φ_2 во всем диапазоне изменения параметра t_2 необходимо найти корни уравнений:

$$-\varphi_2^2(1+g_2) + 2\varphi_2 - (1+t_2) = 0 \quad \text{при} \quad -\infty < t_2 < -1;$$

[2] Следует иметь в виду, что параметр g_2 может меняться в силу возможного изменения $\sum\zeta$ при перемене знака величины φ_2.

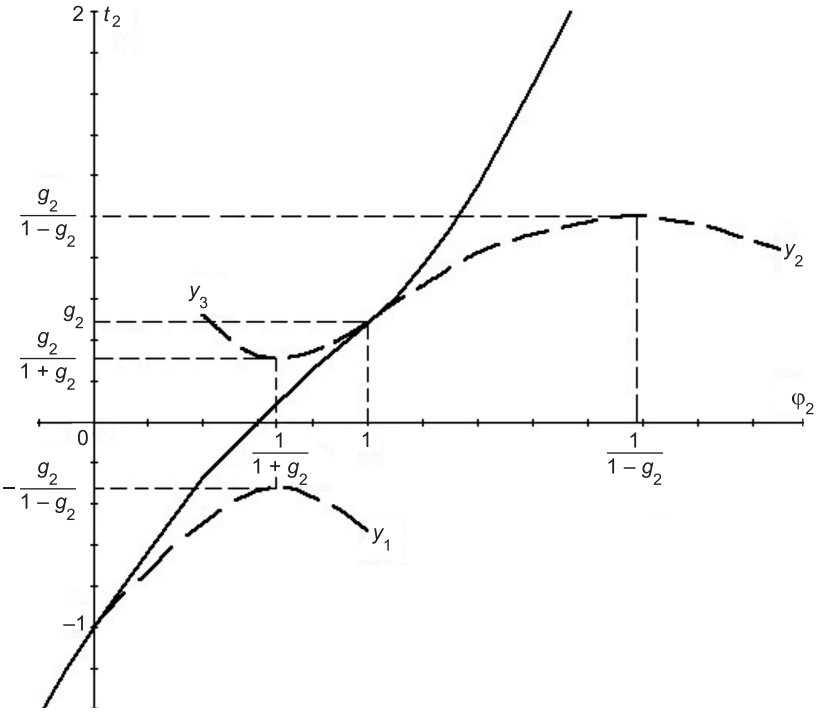


Рис. 5. Изменение относительного расхода воздуха, перегружаемого по кожуху холостой ветви конвейера элеватора в зависимости от перехода давлений (сплошная линия — график однозначной функции $\varphi_2 = f(t_2)$)

$$-\varphi_2^2(1-g_2)+2\varphi_2-(1+t_2)=0 \quad \text{при} \quad g_2 > t_2 > -1;$$

$$\varphi_2^2(1+g_2)-2\varphi_2+(1-t_2)=0 \quad \text{при} \quad \infty > t_2 > g_2.$$

Имеем (при $g_2 < 1$)

$$\varphi_2 = \frac{1}{1+g_2}\left[1-\sqrt{1-(1+t_2)(1+g_2)}\right] \quad \text{при} \quad -\infty < t_2 \le -1; \tag{43}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{1-g_2}\left[1-\sqrt{1-(1+t_2)(1-g_2)}\right] \quad \text{при} \quad g_2 > t_2 \ge -1; \tag{44}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{1+g_2}\left[1+\sqrt{1-(1-t_2)(1+g_2)}\right] \quad \text{при} \quad \infty > t_2 > g_2. \tag{45}$$

Таким образом, прямоточное движение воздуха в кожухе холостой ветви формируется при $t_2 > -1$, т.е. при $M_2 > -h_a$.

В противном случае при $M_2 < -h_a$ возникает противоточное движение воздуха под действием значительного разрежения в верхнем укрытии при

$$h_n > h_k + M_2 \frac{v_e^2}{2}\rho.$$

При отсутствии разности давлений ($h_n = h_k$) φ_2 достигает предельного значения

$$\lim_{t_2 \to 0} \varphi_2 = \varphi_{2pr} = \frac{1}{1+\sqrt{g_2}}, \tag{46}$$

которое стремится к единице при больших значениях эжекционных сил

$$\varphi_{2pr} \approx 1, \quad \text{при} \quad M_2 >> \sum \zeta_2,$$

т.е. скорость воздуха в кожухе холостой ветви ленты конвейера элеватора достигает скорости ленты лишь при значительных эжекционных силах.

ЛОГАЧЕВ Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 12.08.13

Logachev Ivan Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia
Logachev Konstantin Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia
Averkova Olga Alexandrovna, candidate of technical sciences, assistant professor; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

THE EJECTION OF AIR DURING OVERLOADS OF GRANULAR MATERIALS IN A VERTICAL CHANNELS WITH LADLES

Message 2. EJECTED CHARACTERISTICS OF BELT-AND-BUCKET ELEVATOR

We have considered the process of injecting air in norias from the position of classical laws of changing air mass and momentum. We obtained a system of differential equations describing the process of longitudinal averaged flows of air in the cover with sharing work and idle branches of noria in it. We identified patterns of change of an ejection pressure generated by the conveyor belt and alluvial particles.We have determined mechanism of flows, speed and consumption of air currents in the covers of norias.

Key words: aspiration, bulk material transfer, air suction.

УДК 697.95:518.5

Г.М. ПОЗИН, В.М. УЛЯШЕВА, И.Д. КИБОРТ

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Представлены результаты численного моделирования процессов тепло- и воздухообмена в помещениях с источниками тепловыделений при использовании моделей турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA) и стандартной $k-\varepsilon$, а также метода LES. Выполнено обоснование применения однопараметрической модели турбулентности SA. Приведен анализ результатов расчета и экспериментальных данных.

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

Исследованиям процессов тепло- и воздухообмена в горячих цехах со сложными объемно-планировочными решениями посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов, в частности [1, 2].

Особенностью машинных залов компрессорных цехов с газотурбинными установками (ГТУ) является размещение тепловыделяющего технологического оборудования и коммуникаций выше уровня пола, что определяет характер циркуляционных течений в этих помещениях [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.

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 (1). Уравнения Навье-Стокса, как и любая математическая модель, описывают реальную физическую систему в рамках принятых приближений или допущений.

$$\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) + g\beta(T - T_0) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{u_i' u_j'}),$$

$$\frac{\partial \overline{T}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\lambda}{\rho c_p}\frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{T' u_j'}), \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j C}}{\partial x_j} = \frac{\partial(\overline{-u_j' C'})}{\partial x_j} + J_C,$$

© Позин Г.М., Уляшева В.М., Киборт И.Д., 2013

где $\rho c_p \overline{u'_j T'}$, $\overline{u'_j C'}$ — дополнительные тепловой поток и поток массы;

t — время;

ρ — плотность;

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

ν — коэффициент кинематической вязкости;

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

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

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

$\overline{u'_i u'_j} = \frac{\tau_{ij}}{\rho}$; τ_{ij} — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса);

$\rho c_p \overline{u'_j T'}$, $\overline{u'_j C'}$ — дополнительные тепловой поток и поток массы;

u'_i, u'_j, T', C' — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока;

J_C — интенсивность источника примеси.

В настоящее время различают два основных подхода моделирования вязких течений (табл. 1):

— 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).

Анализ данных табл. 1 и результатов исследований многих авторов показывает, что основными рабочими инструментами для решения прикладных задач аэродинамики остаются полуэмпирические методы, бази-

Таблица 1

Методы моделирования турбулентных течений

Полное наименование метода	Наименование в англоязычной литературе	Необходимое число узлов сетки	Область применения в настоящее время	Характерные особенности методов
Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса	Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)	10^7	Решение широкого спектра инженерных задач	Реализован в современных программах расчета гидродинамических течений
Метод моделирования отсоединенных вихрей	Detached-Eddy Simulation (DES)	10^8		Комбинация методов LES (в зоне отрывных течений) и RANS (в зоне «гладкого» потока)
Метод моделирования крупных вихрей	Large Eddy Simulation (LES)	$10^{11,5}$	Расчет метеорологических задач, аэроакустики, аэроупругости, турбулентных химически реагирующих течений	LES с пристеночным RANS моделированием
Метод прямого численного моделирования	Direct Numerical Simulation (DNS)	10^{16}	Расчет течений с относительно низкими числами Рейнольдса для фундаментальных исследований структуры и основных закономерностей турбулентности	Решение нестационарных уравнений Навье-Стокса без замыкающих соотношений

рующиеся на использовании RANS в рамках стационарных и нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (SRANS и URANS) в сочетании с различными полуэмпирическими моделями турбулентности, и метод DES, который также в значительной степени опирается на эти модели.

Основной проблемой при решении уравнений Навье-Стокса является моделирование турбулентности. В настоящий момент создано большое количество разнообразных моделей для расчета турбулентных течений [3, 4]. 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. Основные положения наиболее известных моделей турбулентности представлены в табл. 2. Модель Спаларта-Аллмареса (SA) содержит одно дифференциальное уравнение для модифицированной кинематической турбулентной вязкости $\tilde{\nu}$:

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

где P^{ν}, D^{ν} — генерационный и деструктивный (диссипативный) 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;

σ, c_{b2} — эмпирические константы модели;

ΔU — модуль разности векторов скорости в рассматриваемой точке и в точке перехода.

Уравнения модели k–ε включают формулу Колмогорова — Прандтля для турбулентной вязкости и уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций и скорости ее диссипации. Кинематическая турбулентная вязкость определяется из соотношения:

$$\nu_t = C_{\mu} f_{\mu} k^2 \varepsilon. \qquad (3)$$

Кинетическая энергия турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{\nu}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij}\frac{\partial \overline{\nu}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]. \qquad (4)$$

Степень диссипации турбулентности:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{\nu}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} f_1 \tau_{ij}\frac{\varepsilon}{k}\frac{\partial \overline{\nu}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]. \qquad (5)$$

Коэффициенты замыкания:

$$C_{\varepsilon 1} = 1{,}44;\ C_{\varepsilon 2} = 1{,}92;\ C_{\mu} = 0{,}09;\ \sigma_k = 1{,}0;\ \sigma_{\varepsilon} = 1{,}3. \qquad (6)$$

В методе моделирования крупных вихрей (LES) осуществляется решение отфильтрованных по пространству уравнений Навье-Стокса и разрешается движение только крупных вихрей. Метод основан на двух предположениях. Первое состоит в возможности разделения поля скорости на движе-

Таблица 2

Характеристика некоторых моделей турбулентности

Наименование модели	Отличительная особенность	Область применения	Примечание
Алгебраические модели			
Прандтля	Аналогия пути смешения и длины свободного пробега молекул	Тонкие вязкие слои	
Болдуина — Ломакса	Отдельные соотношения вязкости во внутреннем и внешнем слоях	Отрывные течения, скачки уплотнения	
Однопараметрические модели			
А.Н. Секундова, А.Н. Гуляева, В.Е. Козлова (v_t-92)	Четыре константы и априорное задание масштаба турбулентности	Канонические сдвиговые течения	
Спаларта и Аллмареса (SA модель и SARC, SACC)	Одно дифференциальное уравнение переноса для модифицированной турбулентной вязкости	Задачи внешней аэродинамики, безотрывные течения и течения с ограниченными отрывными зонами	Ф.2
Двухпараметрические модели			
k–ε модели: Лаундера-Шармы	k — кинетическая энергия турбулентности, ε — скорость диссипации энергии турбулентности	Свободные и струйные сдвиговые течения, многочисленные инженерные задачи	Ф.3, 4
k–ω модели: Уилкокса (Вилкокса) и Ментера (k–ω)	k — кинетическая энергия турбулентности, ω — удельная (по объему) скорость диссипации кинетической энергии турбулентности		
	Более точное описание пристеночных пограничных слоев; чувствительность к граничным условиям во внешнем потоке	Потоки с твердыми стенками и течения без касательных напряжений	
Ментера — комбинация k–ω и k–ε моделей (Shear Stress Transport или SST)		Отрывные течения, течения при больших градиентах давления, процессы эжекции	
Многопараметрические модели			
4-параметрическая модель V2F	Четыре уравнения зависимых переменных k, ε масштаба скорости, эллиптическая релаксационная функция f	Турбулентное обтекание траншей и лунок, моделирование турбулентных течений в технологических установках	Низкорейнольдсовая модель

ние крупных и мелких вихрей, причем движение крупных вихрей может быть рассчитано отдельно, что связано с достаточной изотропностью и универсальностью мелких масштабов турбулентного движения. Второе предположение — в возможности аппроксимации нелинейных взаимодействий между крупными и мелкими вихрями только по крупным вихрям с использованием моделей подсеточного масштаба SGS (SubGrid Scale models).

Важным направлением исследований турбулентных течений в настоящее время является тестирование и определение границ применимости полуэмпирических моделей турбулентности. Эти исследования проводятся в рамках многих международных программ [3].

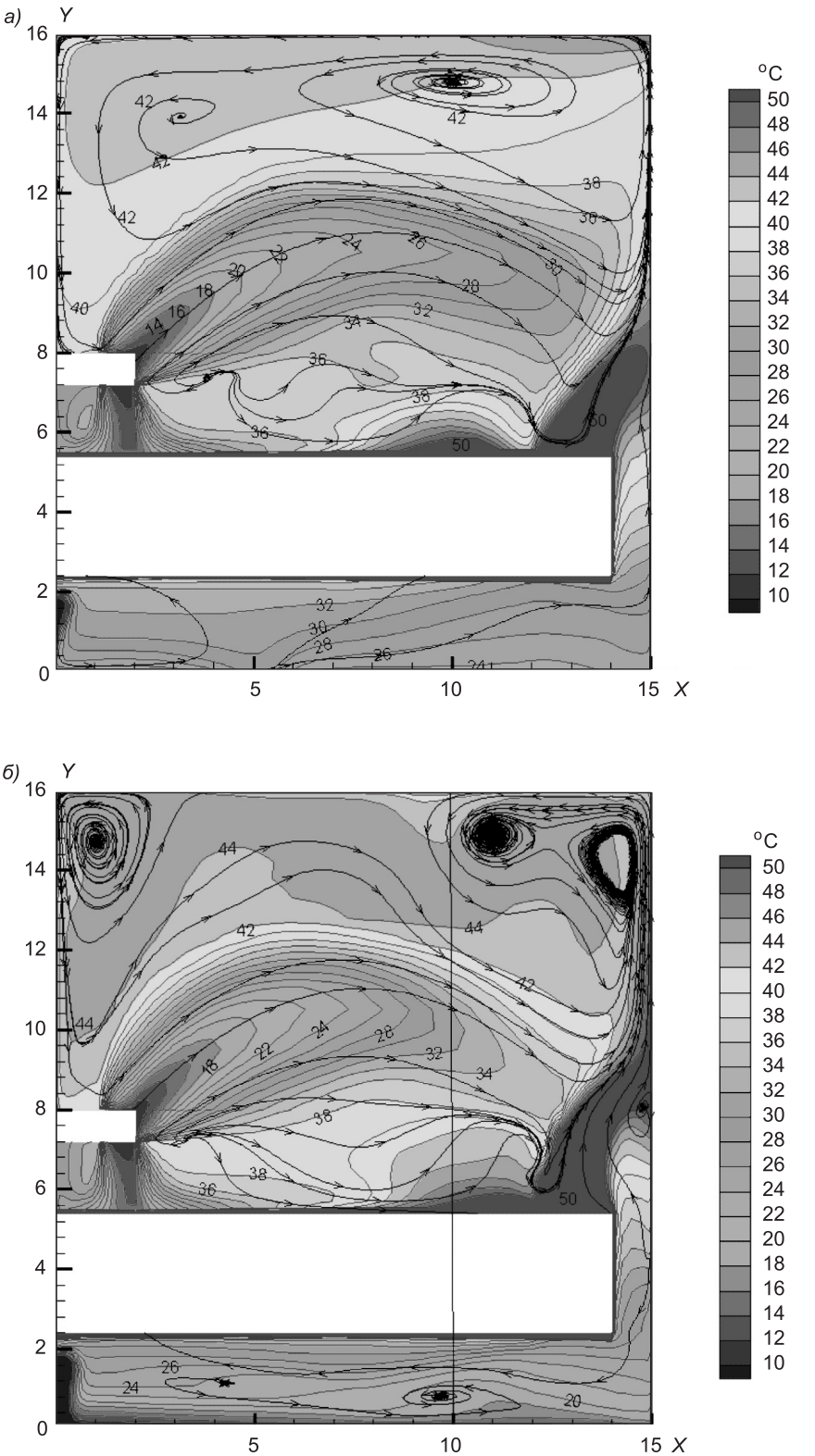
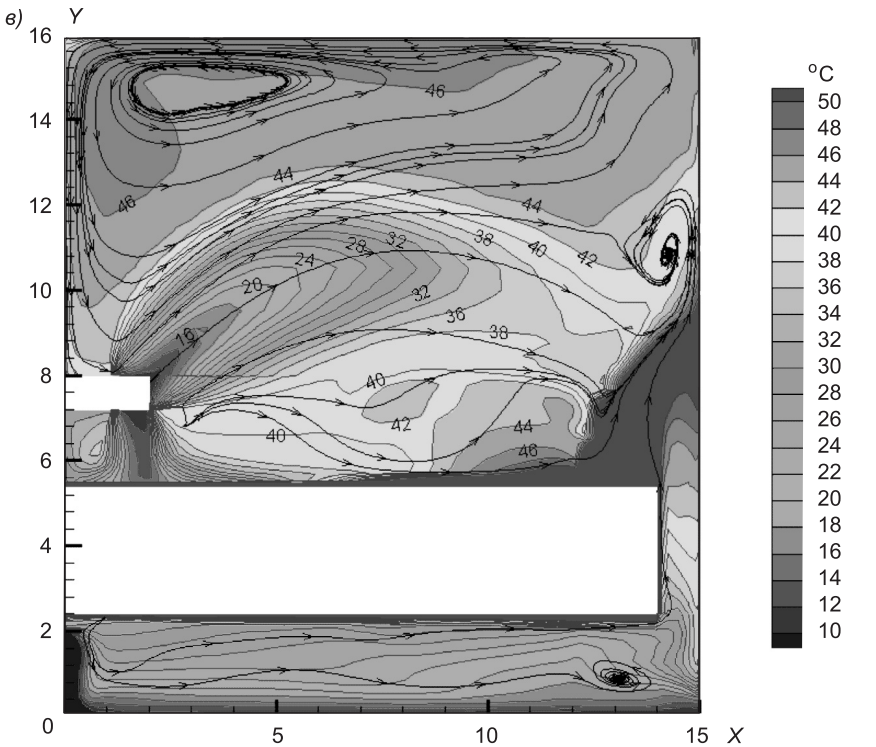


Рис. 1. Результаты численного расчета с применением моделей турбулентности k–ε (*а*), SA (*б*) и метода LES (*в*)



Для исследования распределения параметров микроклимата использован программный комплекс Star–CD, при этом в качестве примеси принято влагосодержание воздуха [2]. Численные расчеты процессов тепло- и воздухообмена в помещениях с источниками тепловыделений выполнены с использованием моделей турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA) и стандартной k–ε, а также метода LES. Результаты расчета для одного из наиболее характерных сечений рассматриваемого помещения приведены на рис. 1.

Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным применен метод конечных объемов на структурированной неортогональной несмещенной сетке. Сетка сгущается вблизи твердых границ. Полное количество ячеек для расчетного модуля вдоль осей координат X, Y, Z равно 72, 81, 96 соответственно. 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 стенках заданы, как обычно, условия «прилипания». На поверхностях, через которые имеет место поток теплоты (поверхности газотурбинной установки и газохода, наружных конструкций), приняты плотности потока тепловой энергии. В приточных отверстиях задавались скорость, температура и влагосодержание воздуха.

Поскольку применение модели турбулентности SA обеспечивает удовлетворительную сходимость с другими, наиболее распространенными методами моделирования и при этом существенно снижается время расчетов, то для дальнейшего численного моделирования принята модель турбулентности Спаларта-Аллмареса. Представленные на рис. 2 и 3 результаты численного расчета удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными.

В итоге была получена удовлетворительная сходимость результатов расчета температуры и скорости движения воздуха в сходственных точ-

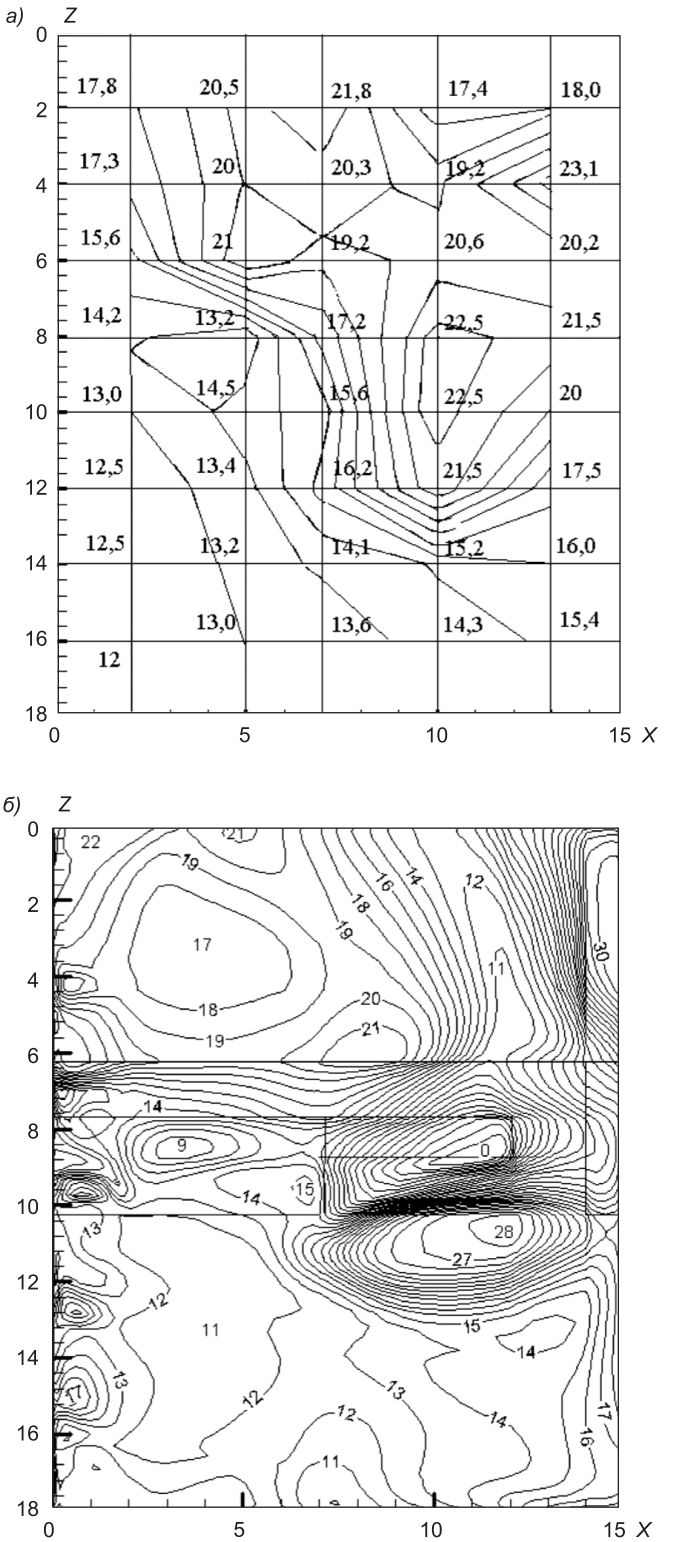


Рис. 2. Температура воздуха в рабочей зоне нижней части машинного зала в холодный период года

а — по данным экспериментальных исследований;
б — по результатам численного моделирования

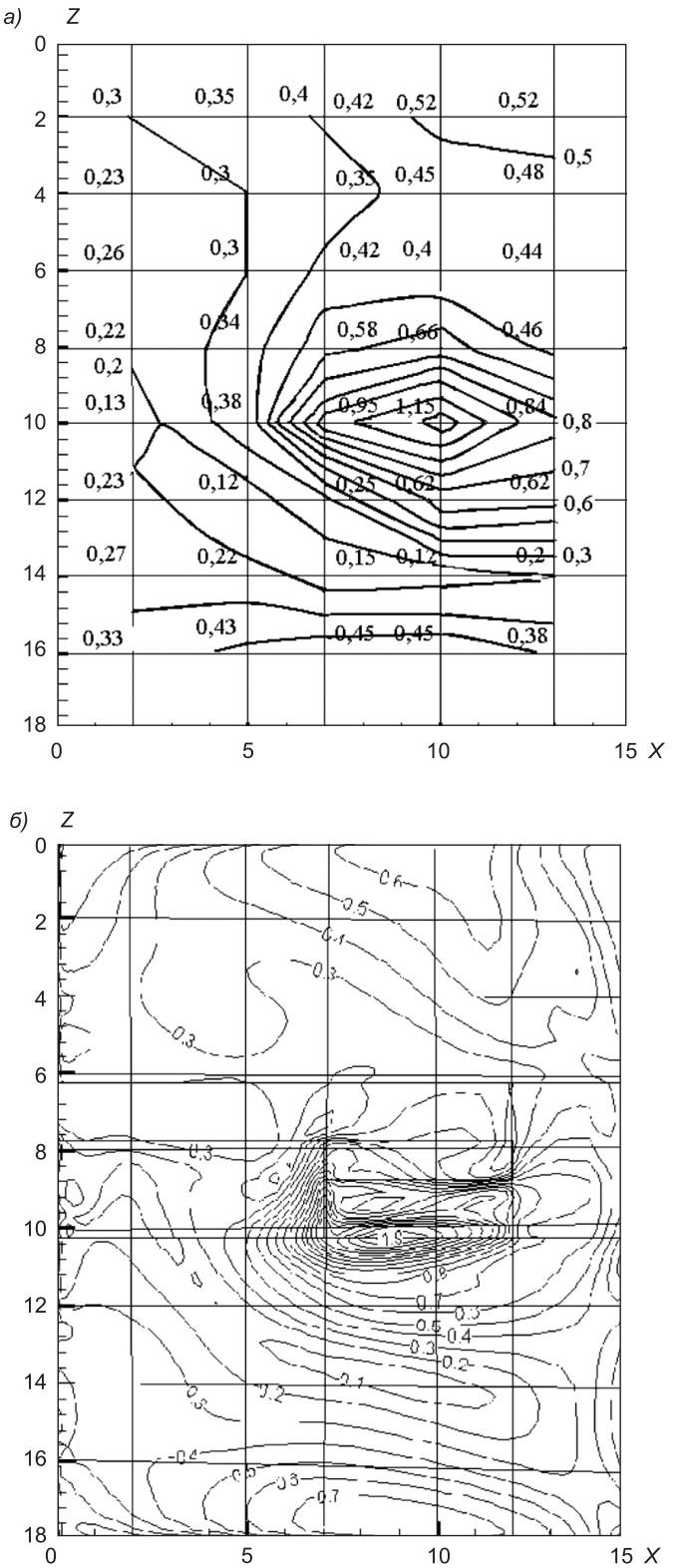


Рис. 3. Скорость движения воздуха в рабочей зоне нижней части машинного зала в холодный период года

Усл. обозначения см. на рис. 2

ках при использовании метода LES, моделей турбулентности SA и k–ε. Сопоставление результатов численного моделирования с применением модели турбулентности SA и экспериментальных исследований тепло- и воздухообмена в машинных залах компрессорных станций подтвердило корректность выбранного метода численного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гебхарт, Б. Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен [Текст] / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия. — Т. 1, 2. — М. : Мир, 1991. — 400 с.
2. Позин, Г.М. Распределение параметров воздуха в помещениях с источниками тепловыделений [Текст] / Г.М. Позин, В.М. Уляшева // Инженерно-строительный журнал. — 2012. — № 6 (32). — С. 42–47.
3. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст] / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. — СПб. : Изд-во С.-Петербург. политехн. ун-та, 2012. — 88 с.
4. Гримитлин, 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.

ПОЗИН Гари Моисеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gpozin@mail.ru
Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна
УЛЯШЕВА Вера Михайловна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ulyashevavm@mail.ru
Ухтинский государственный технический университет
КИБОРТ Иван Дмитриевич, асп.; E-mail: ivxg@mail.ru
Ухтинский государственный технический университет

Получено 09.08.13

Pozin Gari Moiseevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: gpozin@mail.ru, St.-Petersburg State University of Technology and Design, Russia
Ulyasheva Vera Mihailovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ulyashevavm@mail.ru, Ukhta State Technical University, Russia
Kibort Ivan Dmitrievich, post-graduate student; E-mail: ivxg@mail.ru, Ukhta State Technical University, Russia

TO A QUESTION OF TURBULENCE MODELS APPLYING AT A NUMERICAL MODELING VENTILATION PROCESSES

The results of a processes heat and air exchange numerical modeling in puttings with heat sources are introduced at use of Spalart-Allmares (SA) and standard k–ε turbulence models, and also method LES. The justification of one-parameter turbulence model SA applying is executed. The analysis of account results and experimental data is reduced.

Key words: a heat source, microclimate, numerical method, turbulence model.

REFERENCES

1. Gebhart, B. Free-convective currents, the heat and mass-transfer [Text] / B. Gebhart, Y. Jaluriya, P. Mahadzhan, B. Sammakiya. — Vol. 1, 2. — M. : Mir, 1991. — 400 p.
2. Pozin, G.M. Air parameters distribution in puttings with heat development sources [Text] / G.M. Pozin, V.M. Ulyasheva // Magazine of Civil Engineering. — 2012. — N 6 (32). — P. 42–47.
3. Garbaruk, A.V. Simulation of turbulence in the calculation of complex flows [Text] / A.V. Garbaruk, M.H. Strelets, M.L. Schur. — St.-Petersburg : Publishing house of St.-Petersburg State Polytechnical University, 2012. — 88 p.
4. Grimitlin, A.M. Mathematical simulation in designing systems of ventilating and conditiong [Text] / A.M. Grimitlin, T.A. Datsyuk, D.M. Denisihina. — St.-Petersburg : AVOK Northwest, 2013. — 192 p.

УДК 621.928.9.001.24

М.И. ШИЛЯЕВ, В.В. ПЕНЯВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ПОРЯДКА КОМПОНОВКИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ В КАСКАДНЫЕ СИСТЕМЫ НА УДЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ГАЗООЧИСТКИ

Проведено сопоставление расчетных данных по удельным энергозатратам каскадов и одиночных однотипных циклонов, полученных с помощью стандартного универсального метода расчета (УМР) инерционных пылеуловителей, и этого же метода, учитывающего эмпирические понижающие фракционную эффективность коэффициенты в последующих ступенях каскадов. На основании этих данных показано, что каскадными системами очищать газы от пыли экономичнее, чем одиночными пылеуловителями, и при этом устанавливать число аппаратов в каскад более 3-4 нецелесообразно.

Ключевые слова: универсальный метод расчета, энергетический принцип сравнения, удельные энергозатраты, потери давления на аппаратах, инерционные пылеуловители.

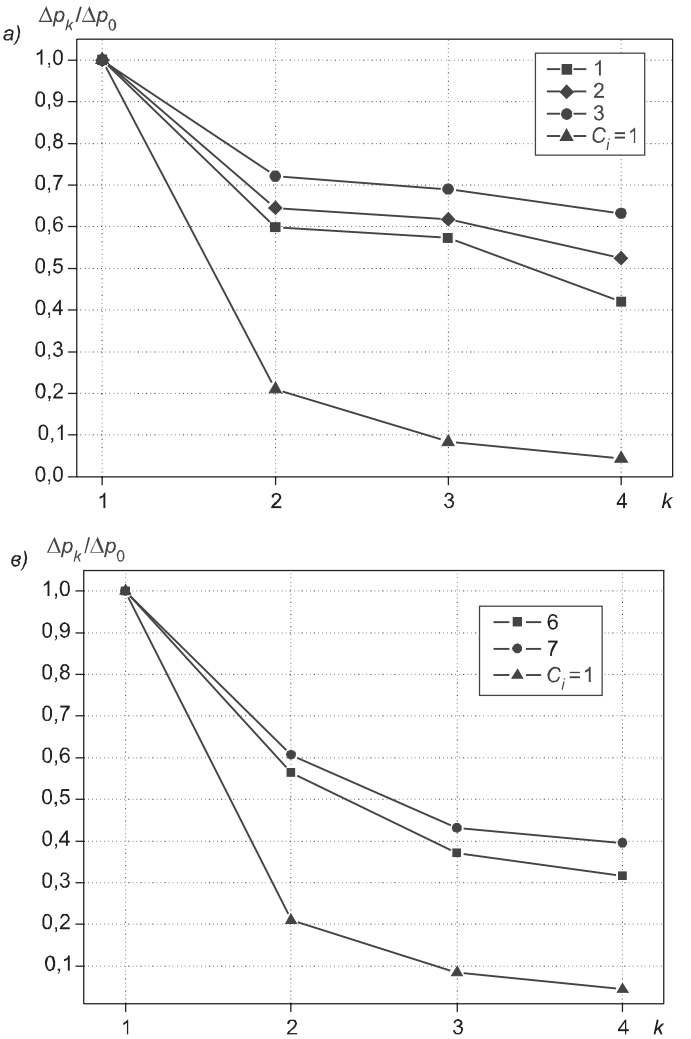
В связи с большими объемами очищаемых газов в промышленности, а также удорожанием энергоносителей и повышением в перспективе доли использования угля в мировом топливно-энергетическом балансе вопросы экономики очистки газов от пыли становятся чрезвычайно актуальными. Эти обстоятельства требуют разработки оборудования, обеспечивающего не только высокую эффективность очистки газов, но и минимально возможные капитальные затраты на его сооружение и удельные энергозатраты на его эксплуатацию. В настоящее время интенсивно создаются так называемые экологически чистые угольные технологии. Это могут быть эффективные способы сжигания углей, превращения их потенциальной энергии в тепловую без выделения вредных выбросов в окружающую среду. Однако, учитывая кроме теплоэнергетики и другие загрязняющие атмосферу отрасли промышленности, основой охраны воздушного бассейна еще долго будет оставаться совершенствование газоочистных систем и аппаратов в направлении повышения их эффективности и экономичности работы.

В [1] предложен универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей (УМР), в основу разработки которого положено представление фракционного коэффициента проскока K_δ в виде обобщенной экспоненциальной зависимости от числа Стокса Stk вида:

$$K_\delta = \exp(-a\mathrm{Stk}^n),$$

где a и n — постоянные, определяющие пылеулавливающие качества аппарата; $\mathrm{Stk} = \rho_m \delta^2 V_0/(18\mu d_0)$; ρ_m и δ — плотность и диаметр частиц пыли; μ — динамическая вязкость очищаемого газа; V_0, d_0 — характерные скорость и линейный размер инерционного улавливания пыли аппаратом.

© Шиляев М.И., Пенявский В.В., 2013



Параметры a, n, V_0, d_0, а также коэффициент гидравлического сопротивления ξ для конкретных пылеуловителей занесены в банк данных (БД) универсального метода [1]. При этом принято, что подлежащие улавливанию пыли подчиняются логарифмически нормальному закону распределения частиц по размерам (ЛНР):

$$g(\delta)d\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma} e^{-\frac{\lg^2\left(\frac{\delta}{\delta_{50}}\right)}{2\lg^2\sigma}} d\lg\delta, \qquad (1)$$

где δ_{50} и σ — масс-медианный размер и среднелогарифмическое квадратичное отклонение ЛНР исходной, подлежащей улавливанию пыли.

Полный коэффициент проскока каскада k последовательно установленных аппаратов, рассчитываемых с помощью УМР, с учетом введения в расчет понижающих эффективность коэффициентов $C_i(\delta)$ [2, 3] определяется как

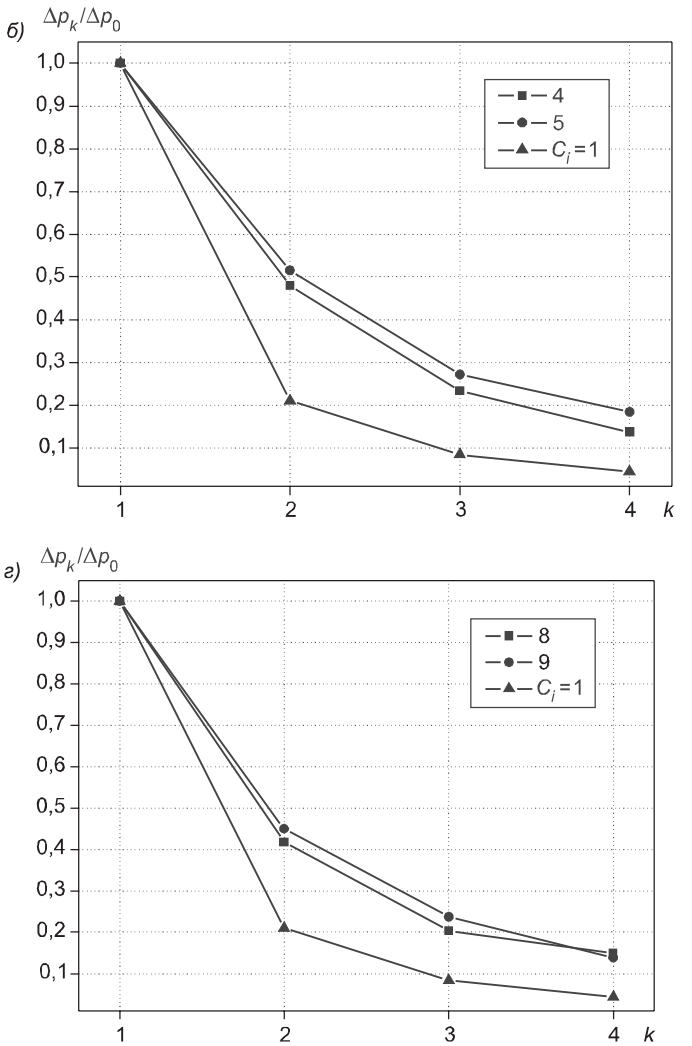


Рис. 1. Сравнение удельных энергозатрат для каскада и одиночного циклона ЦН-15У с исходными данными: d = 0,6 м, ρ_m = 2650 кг/м^3, $\mu_\Gamma = 18{,}1 \cdot 10^{-6}$ Па · с, ρ = 1,2 кг/м^3

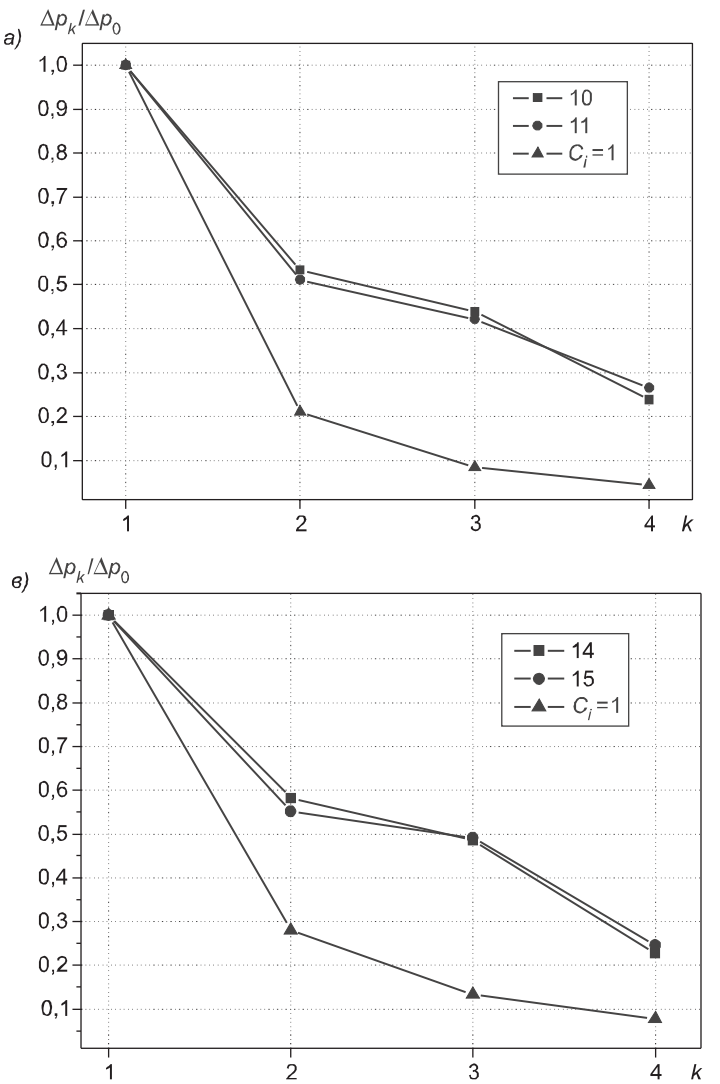
а — δ_{50} = 18 мкм, σ = 3,2; 1 — V_0 = 2,5 м/с; 2 — V_0 = 3,5 м/с; 3 — V_0 = 4,5 м/с; *б* — δ_{50} = 18 мкм, σ = 1,5; 4 — V_0 = 2,5 м/с; 5 — V_0 = 3,5 м/с; *в* — δ_{50} = 30 мкм, σ = 3,2; 6 — V_0 = 2,5 м/с; 7 — V_0 = 3,5 м/с; *г* — δ_{50} = 30 мкм, σ = 1,5; 8 — V_0 = = 2,5 м/с; 9 — V_0 = 3,5 м/с

$$K_{\Sigma k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \prod_{i=1}^{k} \left[1 - C_i(\delta) + C_i(\delta) \cdot \exp\left(-a_i \mathrm{Stk}_{50,i}^{n_i} \cdot \sigma^{2n_i t} - \frac{t^2}{2} \right) \right] dt,$$

$$i = 1, 2, \ldots, k, \qquad (2)$$

где $t = \dfrac{\ln\delta / \delta_{50,1}}{\ln\sigma_1}$, $\delta_{50,1}$ и σ_1 — масс-медианный размер и среднелогарифмическое квадратичное отклонение ЛНР пыли на входе в первую ступень каскада;

$\mathrm{Stk}_{50,i} = \dfrac{\rho_m \delta_{50}^2}{18\mu} \dfrac{V_i}{d_i}$, V_i и d_i — характерные скорость и линейный размер



инерционного улавливания пыли *i*-ми аппаратами;

$C_i(\delta)$ — аппроксимации для понижающих эффективность коэффициентов от одной ступени к другой каскада имеют вид [2, 4]:

$$C_1(\delta) = 1; \quad C_2(\delta) = 0{,}2535\ln\delta + 0{,}06767;$$
$$C_3(\delta) = C_4(\delta) = 0{,}3633\ln\delta - 0{,}307. \qquad (3)$$

В известных работах В. Страуса, Д.Т. Карпуховича, H. Ebbenhorst-Tengbergen представляется мнение о том, что каскадные системы пылеулавливания менее экономичны по сравнению с одиночными аппаратами[1–3]. В данной работе представлены результаты сравнения расчетных данных по удельным энергозатратам для циклонов НИИОГАЗ.

[1] Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль, 1970. 94 с.

[2] Страус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1961. 616 с.

[3] Карпухович Д.Т., Смирнов Б.К., Белевицкий А.М. Последовательная установка циклонов // Водоснабжение и санитарная техника. 1975. № 6. С. 23–24.

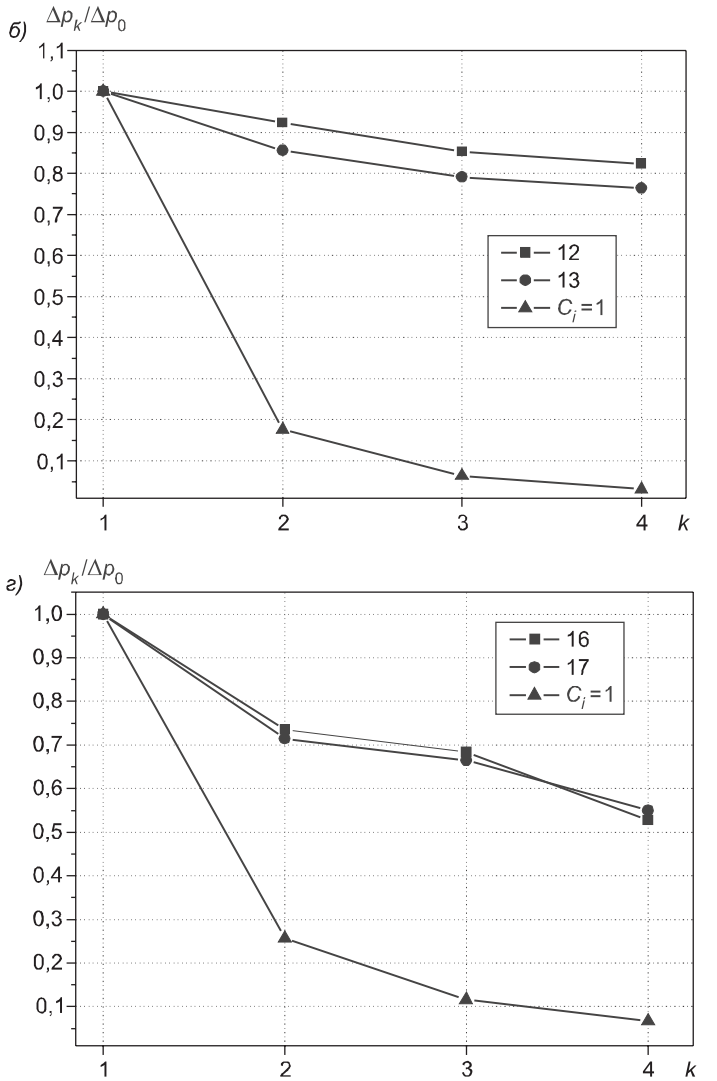


Рис. 2. Сравнение удельных энергозатрат для каскада и одиночного циклона с исходными данными: d = 0,6 м, ρ_m = 2400 кг/м^3, $\mu_Г = 23 \cdot 10^{-6}$ Па · с, ρ = 1,2 кг/м^3

а — ЦН-15У при V_0 = 2,5 м/с: 10 — δ_{50} = 22,2 мкм, σ = 2,6; 11 — δ_{50} = = 55,2 мкм, σ = 3,5; *б* — СК-ЦН-34 при V_0 = 2,5 м/с: 12 — δ_{50} = 22,2 мкм, σ = 2,6; 13 — δ_{50} = 55,2 мкм, σ = 3,5; *в* — ЦН-24 при V_0 = 4,5 м/с: 14 — δ_{50} = 22,2 мкм, σ = 2,6; 15 — 55,2 мкм, σ = 3,5; *г* — ЦН-11 при V_0 = 3,5 м/с: 16 — δ_{50} = 22,2 мкм, σ = 2,6; 17 — 55,2 мкм, σ = 3,5

Сравнение пылеуловителей и каскадных систем из них по удельным энергозатратам на очистку газов правомерно проводить при соблюдении условий: 1) одинаковых эффективностях пылеулавливания в сравниваемых системах и 2) при одинаковых физических свойствах газов и пыли. Эти условия положены в основу энергетического принципа сравнения пылеуловителей (ЭП) и систем из них, математическое выражение которого для однотипных аппаратов ($a = a_i$, $n_i = q$, $i = 1, 2, ..., k$) получено при $C_i = 1$ в [1] и имеет вид

$$\frac{\Delta p_k}{\Delta p_0} = k^{1-\frac{4}{3q}}. \qquad (4)$$

Исходя из этих условий, сравнение удельных энергозатрат в каскадных и одиночных циклонах НИИОГАЗ проводится по следующей схеме. Будем рассматривать каскад из одинаковых одного типа k установленных последовательно циклонов и сравнивать удельные энергозатраты в них на очистку газа с соответствующими удельными энергозатратами в одиночном циклоне того же типа при одинаковой полной эффективности (или полном проскоке).

Расчет проводим следующим образом. Вычисляем по формуле (2) значение $K_{\Sigma k}$ при заданных параметрах пыли и газа (ρ_m, δ_{50}, σ, μ, ρ) и режимно-геометрических параметрах конкретного типа циклона (V_k, d_k). По полученному значению $K_{\Sigma k}$ определяем скорость V_1 и диаметр d_1 одиночного циклона с помощью УМР [1] при условии равенства расходов очищаемого газа каскадом и одиночным аппаратом.

Вычислим перепады давления, определяющие удельные энергозатраты на очистку газов на каскадах и на одиночных аппаратах:

$$\Delta p_k = k\xi_k \rho \frac{V_k^2}{2}, \qquad (5)$$

$$\Delta p_1 = \xi_1 \rho \frac{V_1^2}{2}, \qquad (6)$$

где ξ_k и ξ_1 — коэффициенты сопротивления отдельных циклонов в каскаде и одиночного аппарата того же типа.

Приведем формулы (5) и (6) к удобному для расчетов виду

$$\frac{\Delta p_k}{\Delta p_1} = k\frac{\xi_k}{\xi_1}\left(\frac{V_k}{V_1}\right)^2. \qquad (7)$$

Здесь ξ_k — в общем случае отличается от ξ_1, поскольку диаметры циклонов в каскаде и одиночного циклона разные и, следовательно, требуется поправка к коэффициенту сопротивления циклонов на диаметр [1, 4].

На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов на основе ЭП с учетом понижающих коэффициентов C_i на эффективность пылеулавливания во второй, третьей и четвертой ступенях каскада [3] для циклонов НИИОГАЗ удельных энергозатрат в каскаде k аппаратов ΔP_k и в одиночном аппарате ΔP_0 при равной эффективности пылеулавливания, корректирующие сформулированные выше выводы.

На рис. 1, 2 нижняя кривая представляет расчет по формуле (7), соответствующей $C_i = 1$, полученной из общего математического выражения энергетического принципа. Как видно из этих рисунков, даже с учетом понижающего коэффициента $C_i < 1$ в каскадных системах очищать газ экономичнее, чем в одиночных аппаратах. Правда, эта разница в реальности менее выражена, чем в идеальном случае ($C_i = 1$), но тем не

менее весьма существенная. Так, в приведенных на рис. 2 вариантах расчета уменьшение энергозатрат в каскаде из четырех циклонов по сравнению с одиночным достигается в 2–3 раза. При этом чем выше обеспечивается эффективность пылеулавливания в сравниваемых системах (в данном случае, чем выше скорости газа в циклонах), тем эта разница меньше, откуда следует, что очищать газы в каскадах выгоднее при меньших скоростях при обеспечении практически той же эффективности (см. рис. 1, *а*). При этом устанавливать в каскады более трех, четырех аппаратов нецелесообразно как с энергетической точки зрения, так и с точки зрения обеспечения максимально возможной эффективности пылеулавливания (см. рис. 1, 2), что подтверждает ранее сделанный вывод для идеального случая (C_i = 1).

В некоторых случаях это снижение может быть и большим. Например, для параметров более грубой пыли (см. рис. 1, *б*, *г*) и тех же параметрах газа снижение на четырех аппаратах достигается в 5 раз.

Энергозатраты для каскадов, состоящих из высокоэффективных циклонов СК-ЦН-34 (см. рис. 2, *б*), снижаются незначительно, а металлоемкость будет с очевидностью существенно возрастать.

Таким образом, как показали проведенные исследования, каскадные системы пылеулавливания менее энергоемки по сравнению с одиночными аппаратами для реальных условий их эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиляев, М.И. Методы расчета пылеуловителей [Текст] / М.И. Шиляев, А.М. Шиляев, Е.П. Грищенко. — Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. — 385 с.
2. Шиляев, М.И. К расчету каскадных систем пылеуловителей [Текст] / М.И. Шиляев, В.В. Пенявский // Сб. докл. XVII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». — Томск : Изд-во ТПУ, 2011. — С. 247–248.
3. Русанов, А.А. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике [Текст] / А.А. Русанов, И.И. Урбах, А.П. Анастасиади. — М. : Энергия, 1969. — 456 с.
4. Пенявский, В.В. Подбор пылеулавливающих циклонов в каскадные системы с помощью универсального метода расчета [Текст] / В.В. Пенявский // Вестн. ТГАСУ. — Томск : Изд-во ТГАСУ, 2013. — № 3. — С. 290–297.

ШИЛЯЕВ Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.
Томский государственный архитектурно-строительный университет
ПЕНЯВСКИЙ Виталий Владимирович, ст. препод.; E-mail: Maloy.pvv@yandex.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 27.08.13

Shilyaev Michail Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Penyavsky Vitaly Vladimirovich, senior lecturer; E-mail: Maloy.pvv@yandex.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

INFLUENCE OF THE ORDER OF CONFIGURATION OF DUST COLLECTORS IN CASCADE SYSTEMS ON SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION OF GAS PURIFICATION

In work comparison of settlement data on specific energy consumption of cascades and the single same cyclones received by means of the standard universal calculation method (UCM)

of inertial dust collectors, and the same method considering empirical coefficients lowering fractional efficiency in the subsequent steps of cascades is carried out. On the basis of these data it is shown that cascade systems to clear gases of a dust more economically, than single dust collectors, and thus to determine number of devices in the cascade more than 3-4 it is inexpedient.

Key words: universal method of calculation, the power principle of comparison, specific energy consumption, pressure losses on devices, inertial dust collectors.

REFERENCES

1. Shilyaev, M.I. Methods of calculation of dust collectors [Text] / M.I. Shilyaev, A.M. Shilyaev, E.P. Grishchenko. — Tomsk : Publishing house TSUACE, 2006. — 385 p.
2. Shilyaev, M.I. To calculation of cascade systems of dust collectors [Text] / M.I. Shilyaev, V.V. Penyavsky // XVII International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists «Modern equipment and technologies». — Tomsk : Publishing house TPU, 2011. — P. 247–248.
3. Rusanov, A.A. Ochistka of combustion gases in industrial energy drink [Text] / A.A. Rusanov, I.I. Urbakh, A.P. Anastasiadi. — M. : Energy, 1969. — 456 p.
4. Penyavsky, V.V. Podbor of dust removal cyclones in cascade systems by means of a universal method of calculation [Text] /V.V. Penyavsky // Vestnik TSUACE. — Tomsk : Publishing house TSUACE, 2013. — N 3. — P. 290–297.

УДК 628.3:631.2

Г.Т. АМБРОСОВА, А.А. ФУНК, О.В. КСЕНОФОНТОВА

РЕНТАБЕЛЬНОЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЕ ФЕРМЕРСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

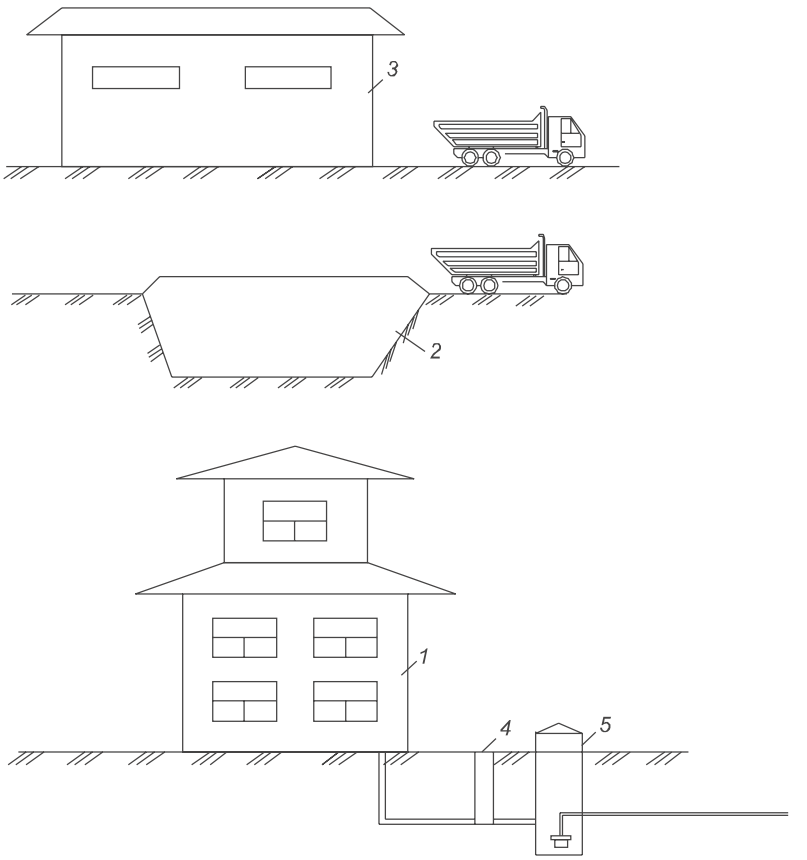
Рассмотрена проблема обработки и утилизации отходов на животноводческих и птицеводческих фермах. Предлагается технология биогазовой установки, в основе которой лежат процессы анаэробного сбраживания, позволяющая обеспечить работу фермерского хозяйства в автономном режиме.

Ключевые слова: анаэробный биореактор, когенератор, сброженный осадок, фермерское хозяйство.

На животноводческих, свиноводческих или птицеводческих фермах образуется большое количество навоза, помета и других органических отходов, которые хранятся в навозохранилищах или пометохранилищах больших размеров. С течением времени быстро загнивающая органическая масса становится основным источником загрязнения воздушного пространства дурнопахнущими и канцерогенными газами (аммиаком, сероводородом, индолом и меркаптанами). Если земляные навозохранилища устраиваются без экранов, а это наблюдается почти повсеместно, то жидкая фракция проникает в грунт, вызывая загрязнение грунтовых вод. Очень часто из переполненных навозохранилищ жижа разливается по территории хозяйства, попадая в открытые водоемы и вызывая их эвтрофирование. Использование свежего навоза под запашку приводит к интенсивному росту сорняков, для борьбы с которыми применяют пестициды. Следует признать, что в нашей стране бытовые условия большей части фермеров нельзя назвать комфортными. Жилище не оборудовано санузлами, нет горячего водоснабжения и канализации. Многие фермерские хозяйства удалены от магистральных газопроводов и линий электропередач, поэтому требуются огромные (по меркам фермера) расходы на подключение к источникам газа и электроэнергии.

Радикальный вариант решения данной проблемы — использование на фермерских хозяйствах нетрадиционных технологий, суть которых заключается в превращении энергии Солнца в тепло или электрическую энергию. Одна из известных и широко применяемых за рубежом нетрадиционных технологий — это использование первичных или вторичных отходов фермерского хозяйства в качестве источников возобновляемой энергии [1]. Отходы загружаются в биогазовую установку, в которой органическое вещество в результате анаэробного сбраживания превращается в осадок с выделением биогаза, содержащего метан. Биогаз сжигается в когенераторе, образовавшаяся тепловая и электрическая энергия частично затрачивается на осуществление технологического процесса биогазовой установки, а остальная, большая часть расходуется на отопление и обеспечение электроэнергией жилых и производственных помещений фермы. В зависимости от количества производимой на ферме сельскохозяйственной продукции биогазовая установка может обеспечить пол-

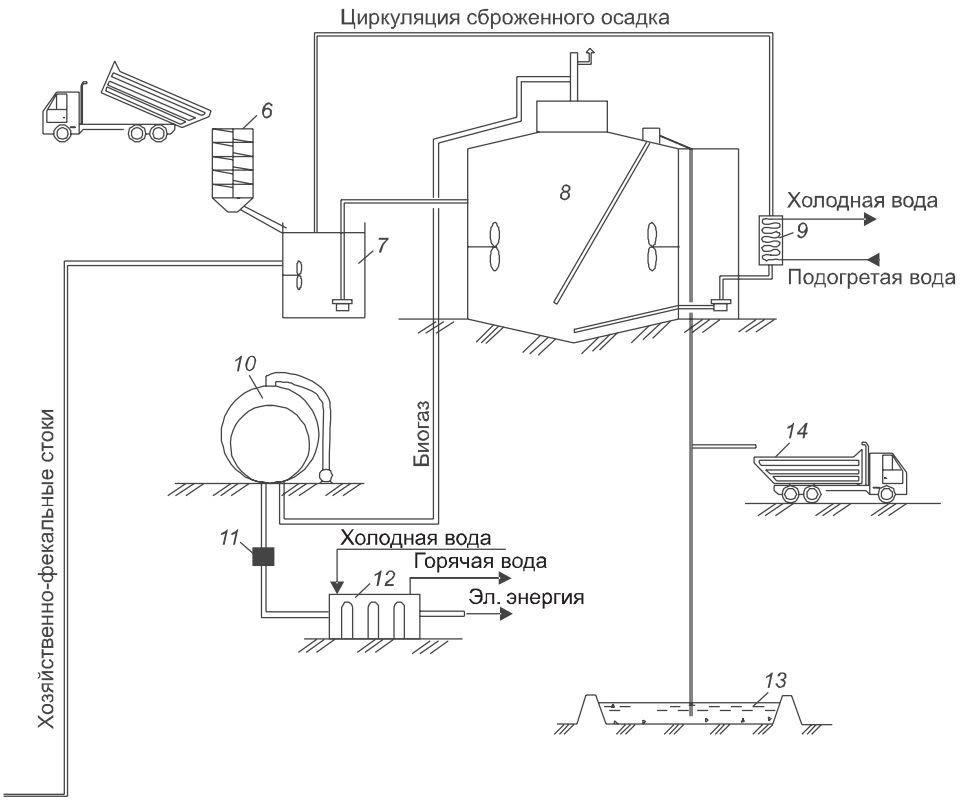
© Амбросова Г.Т., Функ А.А., Ксенофонтова О.В., 2013



ное снабжение всего фермерского хозяйства теплом и электроэнергией. В странах Европы, в частности в Германии, излишки газа фермер закачивает в магистральные газопроводы, по которым транспортируется газ из России, благодаря этому получает налоговые льготы.

В качестве первичных сельскохозяйственных отходов, которые являются возобновляемыми источниками энергии, используются некондиционные овощи, фрукты, зеленая масса травы, картофельной ботвы, листьев свеклы, соломы, рапса и др. Наибольший выход газа дает выращенное для этих целей или некондиционное зерно пшеницы, ржи, овса, кукурузы, вики и чечевицы. Пригодны все составляющие подсолнечника: зеленая масса, семя и некондиционное масло. Вторичными сельскохозяйственными отходами могут служить навоз животных, помет птиц, стоки от жилых помещений фермера, отходы небольших фермерских заводов или фабрик по переработке сельскохозяйственной продукции. При этом чем разнообразнее состав биомассы, загружаемой на биогазовую установку, тем эффективнее ее работа.

К основным элементам биогазовой установки относятся анаэробные биореакторы (метантенки), газгольдеры и котел или когенератор [2, 3]. Если в биореактор будет загружаться сточная жидкость от санузлов, душевых и кухонь жилых помещений фермерского хозяйства, то потребуется строительство насосной станции хозяйственно-фекальных стоков. Первичное и вторичное сырье перед загрузкой в метантенки требуется измельчать, поэтому необходимо помещение, где будут установлены два



Принципиальная схема автономного функционирующего фермерского хозяйства

1 — жилой дом фермера; *2* — емкость зеленой массы (силосная яма); *3* — животноводческий комплекс (коровник, свинарник); *4* — контрольный канализационный колодец; *5* — канализационная насосная станция; *6* — измельчитель твердых отходов; *7* — резервуар-усреднитель хозяйственно-фекальных стоков; *8* — метантенк; *9* — теплообменный аппарат; *10* — газгольдер; *11* — узел осушения и очистки газа; *12* — когенератор горячей воды и электрической энергии; *13* — иловая площадка для обезвоживания сброженного осадка; *14* — возможный вывоз жидкого осадка

измельчителя (один рабочий и один резервный). Измельчение необходимо как для предупреждения засорения коммуникаций, по которым транспортируются отходы, так и для более глубокого распада сухого беззольного вещества загружаемого сырья. Смесь, подаваемая в метантенки, должна быть однородной, поэтому требуется устройство двух резервуаров-усреднителей (оба рабочие). Резервуары-усреднители оборудуются мешалками, обеспечивающими равномерное распределение по всему объему твердых частиц, поддержанию их во взвешенном состоянии, а также способствуют гомогенизации сырья. Из резервуаров суспензия загружается пульпонасосами минимум в два метантенка (оба рабочие). В каждом метантенке также устанавливаются по две мешалки (обе рабочие), продолжительность работы которых в течение суток составляет не менее 16 ч. Перемешивание сбраживаемой массы необходимо для равномерного распределения свежих порций загружаемого сырья в зрелом осадке, для беспрепятственного выхода биогаза и предотвращения образования на поверхности сбраживаемой массы корки, а также для исключения скапливания минеральных частиц в нижней части метантенка.

В процессе анаэробного сбраживания иловая вода осадка насыщается азотом (NH_4^+), концентрация которого достигает 800–1200 мг/л, и фосфатами (150–350 мг/л). В результате этого сброженный осадок характеризуется как органоминеральное удобрение наивысшего качества (рисунок).

Содержимое метантенков подогревается до расчетной температуры 33 или 53 °С. Термофильный режим (53 °С) сбраживания менее выгодный с точки зрения энергетических затрат, однако он гарантирует уничтожение в сбраживаемой суспензии патогенной микрофлоры и яиц гельминтов. Мезофильный режим (33 °С) дает практически такой же, как и термофильный, выход биогаза, однако в сброженном осадке остаются жизнеспособные яйца гельминтов. Такой осадок не рекомендуется использовать в качестве органоминерального удобрения, особенно для овощных культур.

В результате анаэробного сбраживания первичных и вторичных отходов образуется биогаз с содержанием метана (CH_4) в количестве 63–67 % и углекислого газа (CO_2) 32–36 %. Примерно 1 % от общего объема биогаза приходится на сероводород (H_2S) и аммиак (NH_3). Процесс анаэробного сбраживания протекает в четыре стадии. Первая стадия ферментативного гидролиза осуществляется факультативными анаэробами, которые превращают сложные органические вещества в более простые растворимые соединения. Вторая стадия кислотообразования сопровождается выделением летучих жирных кислот, аминокислот и спиртов. Процесс осуществляется быстрорастущими, устойчивыми к неблагоприятным условиям гетеротрофными анаэробами. Третья стадия ацетогенная осуществляется двумя группами бактерий. Первая группа — ацетатогены — образует ацетаты (CH_3COOH) с выделением водорода

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O = CH_3COOH + CO_2 + 3H_2.$$

Вторая группа ацетатогенов также образует ацетаты, однако путем восстановления диоксида углерода (CO_2) водородом, продуцированными первой группой ацетатогенов

$$2CO_2 + 4H_2 = CH_3COOH + 2H_2O.$$

И, наконец, четвертая стадия осуществляется медленно растущими облигатными метанообразующими анаэробами, которые расщепляют ацетат до метана (CH_4) или восстанавливают до метана диоксид углерода

$$CH_3COOH = CH_4 + CO_2,$$

$$CO_2 + H_2 = CH_4 + H_2O.$$

Биогаз выделяется в течение суток из метантенков неравномерно, при условии, что органический субстрат загружается циклически, например, через каждые 4–6 ч. Максимальный выход биогаза будет наблюдаться сразу же после загрузки, а минимальный к началу загрузки новых порций субстрата. В связи с этим давление в газовой сети постоянно изменяется, что затрудняет работу котла или когенератора, поэтому необходимо устройство газгольдеров, позволяющих поддерживать в газовой сети постоянное давление. Объем газгольдеров рассчитывают на нахождение в них биогаза в течение 2–4 ч. При этом рабочее давление в газовой сети составляет в среднем 100–200 мм вод. ст. Перед подачей биогаза в котел или когенератор его осушают и очищают от аммиака и сероводорода на фильтрах. Теплотворная способность неочищенного и неосушенного газа

составляет 5000 ккал/м^3, а осушенного и очищенного 5500 ккал/м^3. В среднем с 1 т сырья по сухому веществу образуется примерно 200–900 м^3 газа в зависимости от вида загружаемого сырья. Максимальный вход газа наблюдается при переработке животного или растительного жира, минимальный при переработке соломы и мякины. При сжигании 1 м^3 газа образуется примерно 5,8–6,4 кВт электрической энергии. В аварийных ситуациях газ не подается в котел или когенератор, а направляется на газовую свечу для сжигания в виде факела.

К достоинствам биогазовой установки относится следующее.

1. Фермер получает доход, благодаря использованию получаемого биогаза для отопления жилых и производственных помещений фермерского хозяйства. Возможен полный отказ от использования природного газа и электрической энергии от ЛЭП. Ферма может работать в автономном режиме.

2. Сброженный после метантенков осадок в жидком виде обогащен азотом, фосфором и калием, не содержит сорняков, яиц гельминтов и патогенной микрофлоры (при термофильном режиме сбраживания), повышает урожайность в сравнении с навозом на 10–30 % в первый год после его внесения в почву. Навоз коровий или конский повышает урожайность только на третий год после его запахивания. Поля не зарастают сорняком, не требуется использование пестицидов. Сброженный осадок является органоминеральным удобрением высокого качества, в сравнении с минеральными удобрениями, так как он обогащен микро- и макроэлементами, не содержит нитритов и нитратов, которые, накапливаясь в овощах, снижают их качественные характеристики и сроки хранения. Исключаются или сокращаются эксплуатационные затраты на минеральные удобрения [4].

3. Сброженный осадок имеет слабощелочную реакцию (pH = 7,2–7,6), такое удобрение особенно ценно для кислых почв.

4. Выделение из биогаза углекислого газа и его сжижение для получения «сухого» льда позволяет в течение длительного времени хранить скоропортящуюся сельскохозяйственную продукцию. Углекислый газ, пропущенный через воду, может использоваться как «воздушное удобрение» в теплицах.

5. Исключается загрязнение воздушного бассейна продуктами гниения органических веществ. Создаются более комфортные условия проживания фермера, так как жилой дом оборудуется системами холодного, горячего водоснабжения, отоплением и канализацией. Исключается загрязнение подземных вод, которые используются фермером в качестве основного источника чистой воды. Исключается загрязнение и зарастание водорослями открытых водоемов.

Ниже приводятся технико-экономические показатели биогазовой установки, рассчитанной на переработку отходов фермы в количестве 2 т/сут по сухому веществу или 20 м^3/сут в пересчете на влажность 90 %. Общая строительная стоимость биогазовой установки с оборудованием по укрупненным показателям составляет 5,7 млн руб., включая когенератор. Когенератор принимается модели АС 200 с электродвигателем Cumins 6CTA. 8.3-G2 мощностью 180 кВт/ч и устанавливается в помещении. Себестоимость вырабатываемой им электроэнергии составляет 0,7 руб./кВт. Общая прибыль фермера от работы биогазовой установки будет равна 2,157 млн руб./год, затраты на ее строительство окупятся примерно за 2,6 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фасхутдинов, В.З. Метановое сбраживание вторичного сырья в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В.З. Фасхутдинов, Т.В. Фасхутдинов. — Уфа : БГАУ, 2007. — 138 с.
2. Маринин, В.Д. Проблема использования биоэнергетических установок для очистки животноводческих стоков [Текст] : автореф. ... д-ра техн. наук / В.Д. Маринин. — М., 1992. — 40 с.
3. Официальный сайт Huo Long Biogas Ltd / Биогазовые установки [Электронный ресурс]–Режим доступа свободный www. huo-long-biogas.ru.
4. Амбросова, Г.Т. Новая установка для стабилизации, обеззараживания и обезвоживания осадков сточных вод [Текст] / Г.Т. Амбросова, П.В. Степанова, О.В. Ксенофонтова // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 10. — С. 56–62.

АМБРОСОВА Галина Тарасовна, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ФУНК Анна Александровна, канд. техн. наук
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
КСЕНОФОНТОВА Ольга Владимировна, канд. техн. наук
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 30.08.13

Ambrosova Galina Tarasovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Funk Anna Alexandrovna, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Ksenofontova Olga Vladimirovna, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PROFITABLE AND ECO-FRIENDLY FARMING

Considered is the problem of waste treatment and utilization of livestock, pig or poultry farms. We offer a technology of biogas plant, which is based on the processes of anaerobic digestion, which allows to provide the operation of the farm offline.

Key words: anaerobic bioreactor, co-generator, digested sludge, farm.

REFERENCES

1. Faskhutdinov, V.Z. Methane fermentation of recycled materials in agricultural production [Text] / V.Z. Faskhutdinov, T.V. Faskhutdinov. — Ufa : BSAU, 2007. — 138 p.
2. Marinin, V.D. The problem of the use of bioenergy installations to clean livestock waste [Text] : summary ... of doctor of technical sciences / V.D. Marinin. — M., 1992. — 40 p.
3. Official site Huo Long Biogas Ltd / Biogas plants [electronic resource]–Access mode free www. huo-long-biogas.ru.
4. Ambrosova, G.T. Fresh installation for stabilization, decontamination and dehydration sludge [Text] / G.T. Ambrosova, P.V. Stepanova, O.V. Ksenofontova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 10. — P. 56–62.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ БЕСКЛАПАННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ВОЗДУХОПОДВОДЯЩЕЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ТРУБКОЙ И ИХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассмотрены физико-математические описания пневматических ударных механизмов с неподвижными ступенчатыми управляющими трубками в системе воздухораспределения.

Ключевые слова: пневматический ударный механизм, камера рабочего хода, камера холостого хода, пустотелый ударник, ступенчатая трубка.

В данной статье рассматриваются оригинальные принципиальные конструктивные решения пневматических ударных механизмов с трубчатым подводом воздуха и управлением впуском и выпуском, выполненных в одной трубке [1].

Аналитически изучено действие отдельной характерной группы механизмов, обладающих близкими динамическими и конструктивными признаками согласно классификации [1]. В целом данная работа — это продолжение цикла исследований, опубликованных ранее [2–4].

Краткие описания принципиальных схем пневматических ударных механизмов. Ударный механизм [1], представленный на рис. 1, устроен и работает следующим образом[1].

Сжатый воздух из сети по каналу *А* с проходным сечением $\omega_р$ в ступенчатой трубке *1* постоянно поступает в кольцевую камеру *Б* рабочего

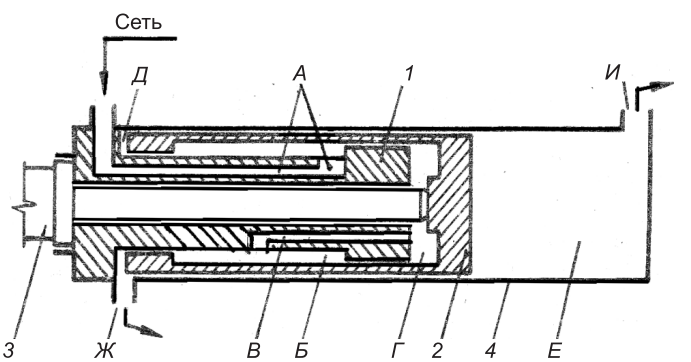


Рис. 1

[1] Pat. 214243 Deuts. Drukluftwerzeuge,bei welchen der Cilinder die Slauge ausfuhrt / the Konomax, Rock Drill, Sindicate Lim. Publ. 1909.

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., 2013

хода с объемом $V_р$, образованную проточкой на трубке и выточкой в ударнике *2*, откуда в зависимости от его положения по каналу *В* с проходным сечением $\omega_х$ в трубке в управляемую камеру *Г* холостого хода объемом $V_х$, расположенную со стороны хвостовика инструмента *3*.

Кольцевая камера *Д* атмосферного давления объемом $V_{АА}$ со стороны инструмента и камера атмосферного давления объемом $V_А$ с противоположной стороны постоянно сообщены с окружающим пространством через выпускные каналы *Ж* и *И* с проходными сечениями $\omega_{АА}$ и $\omega_А$, значительно превышающими проходное сечение впускного канала из сети, выполненного в корпусе *4*. Поэтому давление воздуха в камерах *Д* и *Е* близко к атмосферному давлению на всем протяжении рабочего цикла. Управляется камера *Г* периодически в зависимости от положения ударника, сообщается с окружающим пространством посредством канала *В* выпуска с проходным сечением $\omega_{Ах}$ через камеру *Д* атмосферного давления.

Выпуск отработавшего воздуха из камеры *Г* осуществляется через канал *В*, камеру *Д* и канал *Ж*.

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

К недостаткам механизма следует отнести: жесткое закрепление ступенчатой трубки воздухоподвода, управления впуском и выпуском; наличие стержня, жестко закрепленного на инструменте и проходящего через отверстие в трубке *1*, по которому периодически наносятся удары; пустотелый ударник.

К положительным сторонам конструкции следует отнести: камеры атмосферного давления с обоих торцов ударника не создают сил противодавления, тормозящих ударник; рабочий инструмент постоянно поджат к обрабатываемой среде.

Физико-математическое описание рабочего процесса механизма. Согласно обозначениям на рис. 1 рабочий процесс описывается следующими уравнениями, входящими в бародинамическую, термодинамическую и баромеханическую системы.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{dp_р}{dt} = \dfrac{k}{V_р - x_у S_р}\left[W(\omega_р \varphi_{\ р} - \omega_х(x_у)\varphi_{\ х} - \omega_{Ар}(x_у)\varphi_{\ Ар}) + p_р \dfrac{dx_у}{dt} S_р \right]; \\ \dfrac{dp_х}{dt} = \dfrac{k}{V_х + x_у S_х}\left[W(\omega_х(x_у)\varphi_{\ х} - \omega_{Ах}(x_у)\varphi_{\ Ах}) - p_х \dfrac{dx_у}{dt} S_х \right]; \\ \dfrac{dp_А}{dt} = \dfrac{k}{V_А - x_у S_А}\left[W(\omega_А(x_у)\varphi_{\ А} - \omega_А(x_у)\varphi_{\ А}) + p_А \dfrac{dx_у}{dt} S_А \right]; \\ \dfrac{dp_{АА}}{dt} = \dfrac{k}{V_{АА} + x_у S_{АА}}\left[W(\omega_{АА}(x_у)\varphi_{\ АА} - \omega_{АА}(x_у)\varphi_{\ АА}) - p_{АА} \dfrac{dx_у}{dt} S_{АА} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{\text{р}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{р}}}{p_{\text{р}}(V_{\text{р}} - x_{\text{у}}S_{\text{р}})}\Big[W(\omega_{\text{р}}\varphi_{\text{р}}\Omega_{\text{р}} - \omega_{\text{х}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{х}}\Omega_{\text{х}} - \\ -\omega_{\text{Ар}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ар}}\Omega_{\text{Ар}}) + (k-1)p_{\text{р}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{р}}\Big]; \\ \dfrac{d\theta_{\text{х}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{х}}}{p_{\text{х}}(V_{\text{х}} + x_{\text{у}}S_{\text{х}})}\Big[W(\omega_{\text{х}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{х}}\Omega_{\text{х}} - \omega_{\text{Ах}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ах}}\Omega_{\text{Ах}}) - \\ -(k-1)p_{\text{х}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{х}}\Big]; \\ \dfrac{d\theta_{\text{А}}}{dt} = \dfrac{\theta_{A}}{p_{\text{А}}(V_{\text{А}} - x_{\text{у}}S_{\text{А}})}\Big[W(\omega_{\text{А}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}} - \omega_{\text{А}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}} - \\ -\omega_{\text{А}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}}) + (k-1)p_{\text{А}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{А}}\Big]; \\ \dfrac{d\theta_{\text{АА}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{АА}}}{p_{\text{АА}}(V_{\text{АА}} + x_{\text{у}}S_{\text{АА}})}\Big[W(\omega_{\text{АА}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{АА}}\Omega_{\text{АА}} - \\ -\omega_{\text{А}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}}) - (k-1)p_{\text{АА}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{АА}}\Big]. \end{cases} \tag{2}$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x_{\text{у}}}{dt^2} = \dfrac{p_{\text{х}}S_{\text{х}} - p_{\text{р}}S_{\text{р}} + \operatorname{sign}F_{\text{уш}} + \operatorname{sign}F_{\text{уп}} + \operatorname{sign}F_{\text{ук}}}{m_{\text{у}}} & \text{при } x_{\text{у}} > 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_0 = -k_{\text{у}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{п}} \le 0, \\ \dfrac{d^2x_{\text{к}}}{dt^2} = \dfrac{p_{\text{х}}S_{\text{х}} - p_{\text{р}}S_{\text{р}} + \operatorname{sign}F_{\text{уш}} + \operatorname{sign}F_{\text{уп}} + \operatorname{sign}F_{\text{ук}} - F_{\text{н}}}{m_{\text{к}}} & \text{при } x_{\text{к}} > 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{к}}}{dt}\right)_0 = -k_{\text{к}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{к}} \le 0. \end{cases} \tag{3}$$

Величины значений сил трения $\operatorname{sign}F_{\text{уш}}$, $\operatorname{sign}F_{\text{уп}}$, $\operatorname{sign}F_{\text{ук}}$ зависят от скорости движения ударника при контактах со штоковой и поршневой частями ступенчатой трубки и корпусом при рабочем и холостом ходах.

При возможном перемещении трубки относительно стержня следует учитывать при уточненных расчетах также возможное действие $\operatorname{sign}F_{\text{тс}}$ и коэффициент отскока трубки $k_{\text{т}}$ от буртика инструмента.

Усилие прижатия корпуса $F_{\text{н}}$ задается с учетом допустимых величин перемещения корпуса.

В (1)–(3) обозначены и соответствуют

$$S_{\text{р}} = S_{\text{у}} - S_{\text{ш}}, \quad S_{\text{х}} = S_{\text{у}} + S_{\text{с}}, \quad S_{\text{п}} = S_{\text{у}} - S_{\text{с}},$$

где $S_{\text{ш}}$ и $S_{\text{с}}$ — кольцевая площадь штоковой части трубки, площадь диаметрального сечения стержня;

$S_п$ — кольцевая площадь поршневой части трубки со стороны камеры *Г*; $S_у$, $S_р$, $S_х$ — площадь диаметрального сечения внутренней выточки ударника, кольцевая площадь выточки ударника со стороны кольцевой камеры *Б*, площадь диаметрального сечения внутренней выточки ударника со стороны камеры *Г*.

Обозначения, приведенные в (1)–(3):

$V_р$, $V_х$, $V_{АА}$, $V_А$ — объемы камер рабочего и холостого ходов, атмосферного давления со стороны камер *Д* и *Е*;

$p_р$, $p_х$, $p_{АА}$, $p_А$, p_0 — давление воздуха в камерах рабочего и холостого ходов, атмосферного давления со стороны камер *Д* и *Е* и давление воздуха, подводимого из сети через канал *А*;

$\omega_р$, $\omega_х$, $\omega_{АА}$, $\omega_А$ — площади проходных сечений каналов (дросселей) впуска в камеры рабочего и холостого ходов, атмосферного давления со стороны камер *Д* и *Е*;

$\varphi_р$, $\varphi_х$, $\varphi_{АА}$, $\varphi_А$ — бародинамические функции для проходных сечений $\omega_р$, $\omega_х$, $\omega_{АА}$, $\omega_А$;

$\theta_р$, $\theta_х$, $\theta_{АА}$, $\theta_А$ — температура воздуха в камерах с объемами $V_р$, $V_х$, $V_{АА}$, $V_А$;

$\Omega_р$, $\Omega_х$, $\Omega_{АА}$, $\Omega_А$ — термодинамические функции для температур с учетом показателя процесса k;

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

$x_к$, $x_у$ — перемещение корпуса и ударника;

$m_к$, $m_у$ — массы корпуса и ударника;

$S_т$, $S_у$, $S_с$ — площади диаметральных сечений трубки, ударника, стержня;

$F_н$ — усилие нажатия на корпус-цилиндр;

$k_у$, $k_к$ — коэффициенты отскока ударника и корпуса от хвостовика инструмента;

t — текущее время.

В системе уравнений, описывающих рабочий процесс пневмоударного механизма, рассматриваемого типа процессы перетечек и утечек опущены. Возможные обратные течения воздуха учтены зависимостями (4) и (5). Согласно зависимостям Сен-Венана–Вантцеля функции имеют одинаковую форму записи и могут иметь вид:

$$\varphi_{ij} \equiv \varphi_{ji} = \begin{vmatrix} 0{,}5283 > p_i/p_j & p_i\sqrt{\theta_i}\cdot 0{,}2588 \\ 0{,}5283 \le p_i/p_j & p_i\sqrt{\theta_i}\cdot\sqrt{(p_i/p_j)^{2/k}-(p_i/p_j)^{(k+1)k}} \\ 0{,}5283 > p_j/p_i & p_{ji}\sqrt{\theta_j}\cdot 0{,}2588 \\ 0{,}5283 \le p_j/p_i & p_j\sqrt{\theta_j}\cdot\sqrt{(p_j/p_i)^{2/k}-(p_j/p_i)^{(k+1)k}} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где индексы *ji* и *ij* обозначают направления течения воздуха: при *i* — куда и *j* — откуда.

Аналогична запись для функций Ω_{ij}, Ω_{ji}:

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{vmatrix} \varphi_{ij} > 0 & (k-1), \\ \varphi_{ij} \le 0 & k-\theta_j/\theta_i, \\ \varphi_{ij} \le 0 & k-\theta_i/\theta_j, \\ \varphi_{ij} > 0 & (k-1). \end{vmatrix} \quad (5)$$

При рассмотрении рабочего процесса пневмоударного механизма (рис. 1) приняты допущения о возможности прямых и обратных течений воздуха по дросселям (каналам) при наличии соответствующих посадок между контактирующими подвижными деталями: ударник-корпус; ударник-стержень, ударник-трубка, корпус (букса) — хвостовик инструмента.

Теоретический и практический интерес представляют рациональные значения соотношений между объемами камер, проходными сечениями дросселей (каналов) впуска-выпуска и координаты их расположения. В данной работе ограничения для функции $\omega_i(x_y)$ для конкретных случаев опускаются и могут по форме записи отличаться от представлений [2–4].

Допущения и ограничения для бародинамических, термодинамических и баромеханических уравнений, описывающих рабочий процесс пневматического ударного механизма, широко известны из более ранних публикаций, например [2, 3]. Принимая во внимание рекомендации по публикуемому объему, при описании других механизмов данной группы в статье допущения и ограничения будут опущены. Наличие индексов в обозначениях параметров дает полное представление о направлениях впуска и перепуска потоков воздуха между рабочими камерами и их выпуска в атмосферу.

Пневматический ударный механизм [2], представленный на рис. 2, устроен и работает следующим образом[2].

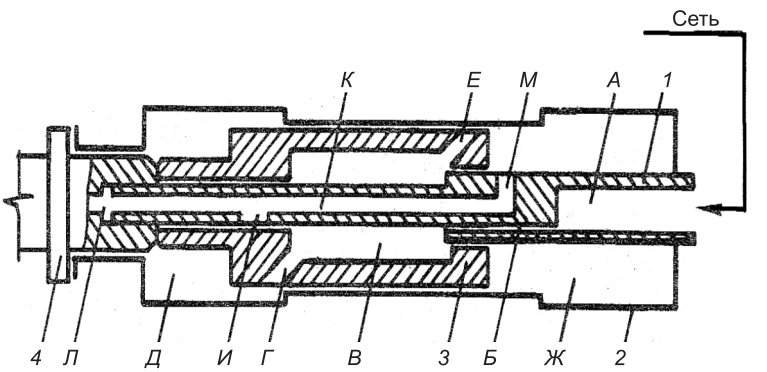


Рис. 2

Сжатый воздух из сети по каналам *А* и *Б* с проходными сечениями ω_c в ступенчатой трубке *1*, закрепленной в цилиндре *2*, постоянно поступает в кольцевую проточную камеру *В* с объемом $V_к$ (она же камера рабочего хода), откуда, в зависимости от положения ударника *3* со сквозным ступенчатым каналом, по выпускному каналу *Г* с проходным сечением ω_x, в управляемую камеру *Д* холостого хода с объемом V_x или по каналу *Е* с проходным сечением ω_p, в зависимости от положения ударника, в управляемую камеру *Ж* рабочего хода с объемом V_p.

Выпуск отработавшего воздуха из камеры *Д* осуществляется периодически через выпускные каналы *И* и *К* в трубке с проходными сечениями ω_x и ω_p и канал *Л* с проходным сечением ω_A в хвостовике инструмента *4*.

---

[2] А.с. 1474258 СССР. Пневмоударник / А.Р. Черненко, И.А. Понамарчук, Э.А. Корнет и др. Опубл. 1989; БИ № 15.

Выпуск отработавшего воздуха из камеры *Ж* осуществляется периодически через выпускные каналы *М*, *К* и *Л* в призабойное пространство или в атмосферу.

Под действием разницы импульсов давления воздуха со стороны камер *Д*, *В* и *Ж* ударник совершает возвратно-поступательное движение и наносит удары по хвостовику инструмента.

К недостаткам варианта исполнения механизма следует отнести: конструктивную и техническую сложность перепуска воздуха между камерами *Д*, *В* и *В*, *Ж*; жесткое закрепление трубки *1* относительно корпуса *2* и наличие ее посадки на ударнике *3*, что может вызывать перекосы трубки и ее тормозящее воздействие на ударник, а также ее поломку; большее противодавление воздуха со стороны камеры *В*, которая подпитывается воздухом из камеры *А* посредством канала *Б*.

Положительными свойствами конструктивного исполнения механизма являются: постоянное поджатие к обрабатываемой среде рабочего инструмента *4* трубкой *1* посредством давления воздуха со стороны камеры *А*, что снижает влияние импульса отскока инструмента от обрабатываемой среды и на столько же сохраняет импульс удара, передаваемого среде; конструктивная простота средств выпуска отработавшего воздуха из камер *Ж* и *Д*, обеспечиваемая меньшими местными сопротивлениями воздуха на выпуске.

Физико-математическое описание рабочего процесса механизма. Уравнения, описывающие рабочий процесс, составлены в последовательности описания (1)–(3) в соответствии с рис. 2 и представлены системами (6)–(8).

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{dp_{\text{с}}}{dt} = \dfrac{k}{V_{\text{с}}}[W(\omega_{\text{с}}\varphi_{\text{с}} - \omega_{\text{к}}\varphi_{\text{к}})], \\ \dfrac{dp_{\text{к}}}{dt} = \dfrac{k}{V_{\text{к}} - x_{\text{у}}S_{\text{б}}}\Big[W\Big(\omega_{\text{к}}\varphi_{\text{к}} - \omega_{\text{х}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{х}} - \omega_{\text{р}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{р}} - \\ -\omega_{\text{Ар}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ар}} - \omega_{\text{Ах}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ах}} + p_{\text{к}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{б}}\Big)\Big], \\ \dfrac{dp_{\text{р}}}{dt} = \dfrac{k}{V_{\text{р}} - x_{\text{у}}S_{\text{р}}}\Big[W(\omega_{\text{р}}\varphi_{\text{р}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{р}} - \omega_{\text{Ар}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ар}}) + p_{\text{р}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{р}}\Big], \\ \dfrac{dp_{\text{х}}}{dt} = \dfrac{k}{V_{\text{х}} + x_{\text{у}}S_{\text{х}}}\Big[W(\omega_{\text{х}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{х}} - \omega_{\text{Ах}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ах}}) - p_{\text{х}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{х}}\Big]. \end{cases} \quad (6)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{\text{с}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{с}}}{p_{\text{с}}V_{\text{с}}}[W(\omega_{\text{с}}\varphi_{\text{с}}\Omega_{\text{с}} - \omega_{\text{к}}\varphi_{\text{к}}\Omega_{\text{к}})], \\ \dfrac{d\theta_{\text{к}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{с}}}{p_{\text{к}}(V_{\text{к}} - x_{\text{у}}S_{\text{б}})}\Big[W(\omega_{\text{к}}\varphi_{\text{к}}\Omega_{\text{к}} - \omega_{\text{х}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{х}}\Omega_{\text{х}} - \omega_{\text{р}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{р}}\Omega_{\text{р}} - \\ -\omega_{\text{Ар}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ар}}\Omega_{\text{Ар}} - \omega_{\text{Ах}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ах}}\Omega_{\text{Ах}}) + (k-1)p_{\text{к}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{б}}\Big], \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{\text{р}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{р}}}{p_{\text{р}}(V_{\text{р}} - x_{\text{у}}S_{\text{р}})}\Big[W(\omega_{\text{р}}\varphi_{\text{р}}(x_{\text{у}})\Omega_{\text{р}} - \\ -\omega_{\text{Ар}}(x_{\text{к}})\varphi_{\text{Ар}}\Omega_{\text{Ар}}) + (k-1)p_{\text{р}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{р}}\Big], \\ \dfrac{d\theta_{\text{х}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{х}}}{p_{\text{х}}(V_{\text{х}} + x_{\text{у}}S_{\text{х}})}\Big[W(\omega_{\text{х}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{х}}\Omega_{\text{х}} - \\ -\omega_{\text{Ах}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ах}}\Omega_{\text{Ах}}) - (k-1)p_{\text{х}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{х}}\Big]. \end{cases} \tag{7}$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x_{\text{у}}}{dt^2} = \dfrac{p_{\text{х}}S_{\text{х}} - p_{\text{к}}S_{\text{б}} + \operatorname{sign}F_{\text{ку}} + \operatorname{sign}F_{\text{ут}}}{m_{\text{у}}} & \text{при } x_{\text{у}} > 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_0 = -k_{\text{у}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{п}} \le 0, \\ \dfrac{d^2x_{\text{к}}}{dt^2} = \dfrac{p_{\text{х}}S_{\text{х}} - p_{\text{к}}S_{\text{б}} + \operatorname{sign}F_{\text{ку}} + \operatorname{sign}F_{\text{ут}} - F_{\text{н}}}{m_{\text{к}}} & \text{при } x_{\text{к}} > 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{к}}}{dt}\right)_0 = -k_{\text{к}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{к}} \le 0. \end{cases} \tag{8}$$

Основные ограничения к (6)–(8) аналогичны ограничениям (4) и (5).

Дополнительные обозначения для рабочих площадей ступенчатой трубки и ударника в (6)–(8) обозначены и соответствуют

$$S_{\text{р}} = S_{\text{у}} - S_{\text{ш}} + (S_{\text{у}} - S_{\text{п}}), \quad S_{\text{х}} = S_{\text{у}} - S_{\text{ш}} + (S_{\text{в}} - S_{\text{п}}),$$

где $S_{\text{р}}$, $S_{\text{х}}$ — рабочие диаметральные площади ударника со стороны камер *В*, *Ж* и *Д*, *В*;

$S_{\text{у}}$ — наружная кольцевая площадь ударника;

$S_{\text{в}}$ — кольцевая площадь выточки в ударнике;

$S_{\text{ш}}$, $S_{\text{п}}$ — диаметральная площадь штоковой части ступенчатой трубки и кольцевая площадь поршневой части трубки со стороны камеры *В*.

Для (8) сделаем замечания. Если корпус ПУМ при работе занимает вертикальное положение, то $F_{\text{ку}}$ и $F_{\text{ут}}$ незначительны и ими можно пренебречь.

Если корпус ПУМ при работе занимает горизонтальное положение, то при предварительных испытаниях или моделировании рабочего процесса $F_{\text{ку}}$, $F_{\text{ут}}$ можно для упрощения решения систем уравнений (6)–(8) опустить.

Для более точного учета влияния сил трения на рабочий процесс ПУМ необходимо учитывать в (8) $F_{\text{ку}}$, $F_{\text{ут}}$.

Пневматический ударный механизм [3], представленный на рис. 3, устроен и работает следующим образом[3].

[3] Pat. 394270 Franc. Ontil pneumatigue / Fabrik für Bergwerks bedarfsartkel G.M.B.H. Publ. 1909.

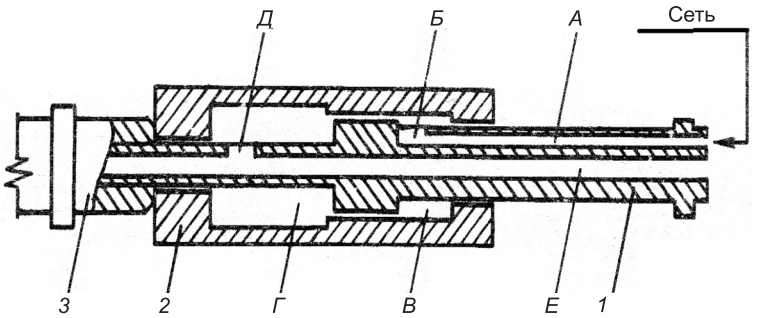


Рис. 3

Сжатый воздух из сети по каналам *А* и *Б* с проходным сечением ω_x в ступенчатой трубке *1* поступает постоянно в кольцевую управляемую камеру *В* с объемом V_x (она же камера холостого хода), откуда в зависимости от положения ступенчатого ударника *2* со сквозным отверстием в виде кольцевого зазора с проходным сечением ω_p между поршневой частью трубки и большей выточкой в ударнике, образующей камеру *Г* рабочего хода с объемом V_p.

Выпуск отработавшего воздуха из камеры *Г* осуществляется периодически через выпускной канал *Д* с проходным сечением ω_{Ap} и сквозной канал *Е* в трубке с проходным сечением $\omega_{Ap} >> \omega_p$.

Под действием разницы силовых импульсов давления воздуха со стороны камер *Г* и *В* ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту *3*.

Канал *Е* в трубке предназначен для пропуска стержня или подобных элементов [1] без нарушения условий $\omega_{Ap} > \omega_p$.

К недостаткам механизма [3] следует отнести: жесткое закрепление трубки *1* воздуховода относительно корпуса и наличие ее посадки на ударнике, что может вызвать перекосы трубки и ее поломку; камера холостого хода является камерой пневматического буфера и создает противодавление и торможение ударника перед соударением с инструментом.

К положительным сторонам конструкции следует отнести: рабочий инструмент постоянно поджат к обрабатываемой среде силовым импульсом давления со стороны камеры холостого хода и ступенчатой трубки, которая может быть значительной, например, у механизмов с энергией удара более 1000 Дж; хвостовик инструмента и ступенчатая трубка при отскоке от обрабатываемой среды затормаживаются и инструмент не будет выталкиваться обрабатываемой средой, а следовательно, не потребуются затраты энергии удара на его возвращение в положение, соответствующее после соударения с ударником в предыдущем цикле.

Физико-математическое описание рабочего процесса пневмоударного механизма. Согласно обозначений на рис. 3, рабочий процесс механизма описывается следующими уравнениями, увязанными между собой для камер *В* и *Г* баро- и термодинамическими, баромеханическими зависимостями.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{dp_x}{dt} = \dfrac{k}{V_x + x_y S_x}\left[W(\omega_x \varphi_x - \omega_p(x_y)\varphi_p) - p_x \dfrac{dx_y}{dt} S_x\right], \\ \dfrac{dp_p}{dt} = \dfrac{k}{V_p - x_y S_p}\left[W(\omega_p(x_y)\varphi_p - \omega_{Ap}(x_y)\varphi_{Ap}) + p_p \dfrac{dx_y}{dt} S_p\right]. \end{cases} \quad (9)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{\text{х}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{х}}}{p_{\text{х}}(V_{\text{х}} + x_{\text{у}}S_{\text{х}})}\Big[W(\omega_{\text{х}}\varphi_{\text{х}}\Omega_{\text{х}} - \omega_{\text{р}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{р}}\Omega_{\text{р}}) - \\ -(k-1)p_{\text{х}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{х}}\Big], \\ \dfrac{d\theta_{\text{р}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{р}}}{p_{\text{р}}(V_{\text{р}} + x_{\text{у}}S_{\text{р}})}\Big[W(\omega_{\text{р}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{р}}\Omega_{\text{р}} - \omega_{\text{Ар}}(x_{\text{у}})\varphi_{\text{Ар}}\Omega_{\text{Ар}}) + \\ +(k-1)p_{\text{р}}\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}S_{\text{р}}\Big]. \end{cases} \tag{10}$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x_{\text{у}}}{dt^2} = \dfrac{p_{\text{х}}S_{\text{х}} - p_{\text{р}}S_{\text{р}} + \text{sign}F_{\text{ут}}}{m_{\text{у}}} & \text{при } x_{\text{у}} > 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_0 = -k_{\text{у}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{п}} \le 0, \\ \dfrac{d^2x_{\text{к}}}{dt^2} = \dfrac{p_{\text{х}}S_{\text{х}} - p_{\text{р}}S_{\text{р}} + \text{sign}F_{\text{ут}} - F_{\text{н}}}{m_{\text{к}}} & \text{при } x_{\text{к}} > 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{т}}}{dt}\right)_0 = -k_{\text{т}}\left(\dfrac{dx_{\text{т}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{т}} \le 0. \end{cases} \tag{11}$$

В (9)–(11) обозначены и соответствуют:

$$S_{\text{х}} = S_{\text{пт}} - S_{\text{шт}}; \quad S_{\text{р}} = S_{\text{в}} - S_{\text{ш}},$$

где $S_{\text{ш}}$ — площадь диаметрального сечения штока со стороны камеры *Г*;
$S_{\text{пт}}$, $S_{\text{шт}}$ — площади диаметральных сечений поршневой части и штоковой части со стороны камеры *В*;
$S_{\text{в}}$, $S_{\text{р}}$, $S_{\text{х}}$ — площадь диаметрального сечения большей выточки в ударнике со стороны камеры *Г*, рабочие площади ударника при рабочем и холостом ходах.

В качестве основных ограничений к (9)–(11) применяются (4) и (5).

Так же как и в системах уравнений (1)–(3), (6)–(8), в системах уравнений (9)–(11) утечки из рабочих камер при их сообщении с атмосферой и перетечки между рабочими камерами при закрытых с их стороны выпускных каналов не учитывались.

Для уравнений систем (9)–(11) обозначения параметров и их индексация сохраняют принятый ранее (1)–(8) физический смысл. В качестве общего результата приведенных описаний отметим, что наибольший интерес при моделировании рабочего процесса данной группы пневматических ударных механизмов представляет установление геометрических соотношений, зависящих от назначения машины с тем или иным механизмом и от соответствующих энергетических характеристик выбранных базовых машин-носителей и компрессорного оборудования.

Выводы. 1. Уравнения, описывающие рабочий процесс бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухопроводящей ступенчатой управляющей трубкой, удобны по форме записи и позволяют ориентироваться и прогнозировать тот или иной результат моделирования рассмотренной группы и им подобным по конструкциям механизмов.

2. Численное моделирование позволяет получить адекватность физико-математической и натурной моделей с использованием одинакового масштаба при заданных параметрах с выходом на искомый результат.

3. Пневматические ударные механизмы рассмотренной группы и им подобным по конструкциям с учетом их положительных качеств целесообразно применять практически для всех машин ударного действия, используемых в различных технологических процессах строительного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков // Справ. пособие. — Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1993. — 430 с.
2. Абраменков, Д.Э. Принципиальные схемы бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухоподводящей трубкой и их физико-математическое описание [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.В. Грузин, Е.И. Крутиков, Ю.Э. Малышева, А.С. Мельникова // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 5. — С. 87–96.
3. Абраменков, Д.Э. Принципиальные схемы бесклапанных пневматических ударных механизмов с коаксиальной камерой воздуховода и их физико-математическое описание [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.В. Грузин, Е.И. Крутиков, А.С. Попова, Д.А. Попов //Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 6. — С. 60–68.
4. Абраменков, Д.Э. Классификация признаков и принципиальных механизмов строительных навесных молотов [Текст] /Д.Э. Абраменков, А.С. Мельникова, А.С. Дедов, Н.А. Попов, А.В. Грузин, Э.А. Абраменков // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 1. — С. 92–101.

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

Получено 21.08.13

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

SCHEMATIC DIAGRAMS BESKLAPANNYKH OF PNEUMATIC SHOCK MECHANISMS WITH THE AIRBRINGING OPERATING TUBE AND THEIR PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION

Physical and mathematical descriptions of pneumatic shock mechanisms with motionless step managing directors of tubes in airdistribution system are considered.

K e y w o r d s: pneumatic shock mechanism, chamber of a working course, idling chamber, hollow drummer, step tube.

REFERENCES

1. A b r a m e n k o v, E.A. Pneumatic mechanisms of cars of shock action: throttle, jet, bezzolotnikovy, besklapanny [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov // Handbook. — Novosibirsk : Publishing house Novosibirsk State University, 1993. — 430 p.
2. A b r a m e n k o v, D.E. Schematic diagrams of besklapanny pneumatic shock mechanisms with an airbringing tube and their physical and mathematical description [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, A.V. Gruzin, E.I. Krutikov, Yu.E. Malysheva, A.S. Melnikova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 5. — P. 87–96.
3. A b r a m e n k o v, D.E. Schematic diagrams of besklapanny pneumatic shock mechanisms with the coaxial chamber of an air line and their physical and mathematical description [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, A.V. Gruzin, E.I. Krutikov, A.S. Popova, D.A. Popov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 6. — P. 60–68.
4. A b r a m e n k o v, D.E. Classification of signs and basic mechanisms of construction hinged hammers [Text] / D.E. Abramenkov, A.S. Melnikova, A.S. Dedov, N.A. Popov, A.V. Gruzin, E.A. Abramenkov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 1. — P. 92–101.

УДК 621.542.001

Д.Г. СУВОРОВ

СТРУКТУРНОЕ СТРОЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН С ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПОРШНЯ

Излагается особенность структурного строения пневматических машин с возвратно-поступательным движением поршня. Структурно-пневматическая схема включает звенья силовых двигателей рабочего и обратного ходов машины, составляющих кинематический остов, и структурные элементы автоматической системы распределения сжатого воздуха. Тепломеханические системы в структуре машины позволяют анализировать теплодинамические процессы приводных двигателей.

Ключевые слова: структура, анализ и синтез, пневматическая машина.

Пневматическая поршневая машина с возвратно-поступательным движением поршня является сложным объектом исследования. Особенности машины при ее изучении заключаются в следующем.

1. Структурная схема машины при анализе и синтезе (проектирование) формируется не только как сочетание звеньев кинематических пар, цепей силовых двигателей, корпусных деталей и рабочего инструмента, но и кинематических элементов, обслуживающих систему управления (распределители, их сервоприводы, детали силовых и информационных каналов и пр.) [1]. Последние элементы входят в состав автоматизированной системы управления механизмами машин. Очевидность и целесообразность включения звеньев воздуха распределения в общую кинематическую схему машины подтверждаются принципом программированного управления.

М.З. Коловский и др., изучая приводные механизмы манипуляторов [2], установили важную особенность некоторых из них, назвав ее «Принципом программированного управления» (ППУ). Для пояснения ППУ воспользуемся простым авторским примером, приведенным в этой монографии. На рис. 1 представлен кривошипно-ползунный механизм с приводом от электродвигателя Д, ротор которого вращается в одном и том же направлении, а возвратно-поступательное циклическое движение точки М шатуна (в примере шатун выполняет роль основания, на котором закреплен рабочий орган) по траектории $\alpha-\alpha$ реализуется за счет преобразования вращения начального звена кривошипного механизма с нелинейными функциями положения звеньев в движении с необходимыми траекториями точек отдельных звеньев. Параметры траектории в этом случае определяются методом кинематического синтеза. Для выполнения траектории точки М рабочего звена необходимо иметь один нереверсивный двигатель с системой управления и механизм с нелинейной функцией положения звеньев. Рассматриваемый механизм относится к первому виду устройств.

Другой способ создания циклического возвратно-поступательного движения показан на рис. 2. Циклическое движение рабочего органа машины (точка М) здесь осуществляется механизмами с линейными функциями положения звеньев (зубчатая и зубчато-реечная передача). Двига-

© Суворов Д.Г., 2013

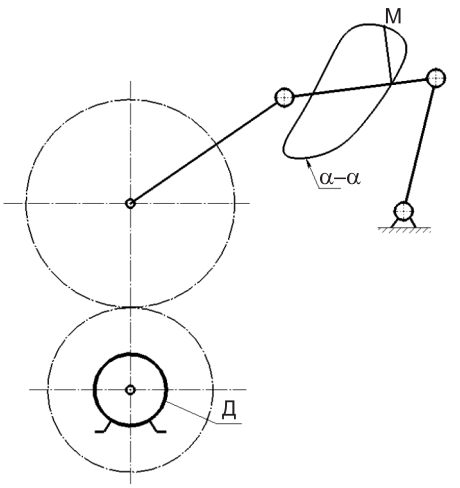


Рис. 1. Механизм с нелинейной функцией положения звеньев

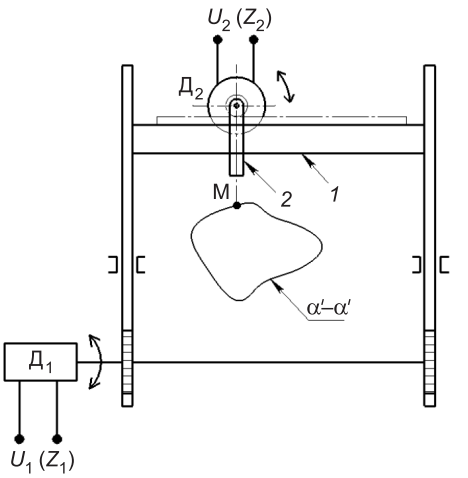


Рис. 2. Механизм с линейной функцией положения звеньев

тель $Д_1$ перемещает каретку *1* с помощью зубчато-реечного механизма. Подобный механизм связывает двигатель $Д_2$, установленный на каретке *1*, с рабочим органом *2*. Требуемая траектория $(\alpha'-\alpha')$ точки M получается подбором входных сигналов $U(Z_1)$ и $U(Z_2)$ для двигателей $Д_1$ и $Д_2$. Траектория $\alpha'-\alpha'$ выполняется совместным движением двух механизмов с линейными функциями положения звеньев (прямолинейное движение), привод которых осуществляется от двигателей $Д_1$ и $Д_2$ с помощью автоматизированного программированного управления (АПСУ). Таким образом, положив в основу характеристики цикловых механизмов принцип программированного управления, были выделены две группы механизмов: с автоматическим управлением и с программированным автоматическим управлением.

В аспекте принципа программированного управления рассмотрим работу поршневой, штоковой пневматической машины. Ее принципиальная развернутая схема представлена на рис. 3 и по принципу ППУ относится ко второй группе механизмов. Цикловое возвратно-поступательное движение точки M обеспечивается двумя линейными штоковыми поршневы-

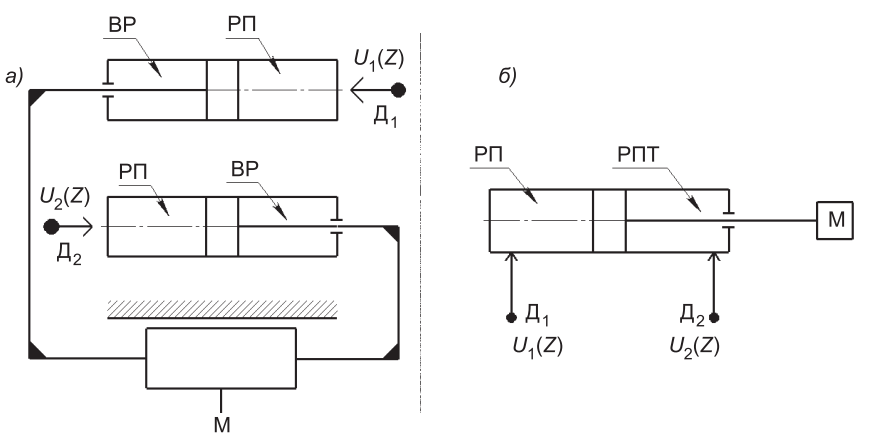


Рис. 3. Аналог механизма с линейными функциями положения звеньев

ми двигателями $Д_1$ и $Д_2$. Двигатель технологического прямого хода имеет две полости: поршневую рабочую РП и запоршневую ВР. Механизм транспортный, обратного хода аналогичен рабочему. Механизм (см. рис. 2; 3, *а*) имеет один и тот же принцип работы. Многопозиционное перемещение позиционировано, в том числе для линейного перемещения точки М механизма двигатели снабжены программирующим устройством, которое, имея автоматизированный блок управления с помощью сигналов $U_1(Z)$ и $U_2(Z)$ для двигателей $Д_1$ и $Д_2$, выполняет заданные траектории. Схема (см. рис. 3, *б*) наглядно показывает многофункциональность звеньев и рабочих полостей. Рассмотренные механизмы могут быть работоспособными только при наличии автоматизированной программирующей системы управления (АПСУ) двигателями.

2. Второй особенностью пневматической поршневой машины с возвратно-поступательным движением рабочего механизма является наличие в ее структуре тепломеханических систем (ТМС) [3].

Тепломеханическая система представляет собой совокупность твердых и термодинамических тел (звеньев), где имеет место комплекс тепловых и механических процессов. Установив структуру и расположение ТМС в конструкции машины более определенно, можно получить математические модели термодинамических процессов, происходящих в ней, и записать математические уравнения движения ее элементов. В определение ТМС машины входят как «совокупность твердых тел», так и рабочие термодинамические (газовые) тела — звенья, что расширяет понятие «кинематическая цепь» и может быть использовано для исследования пневматических машин на более высоком уровне. Типичные для эксплуа-

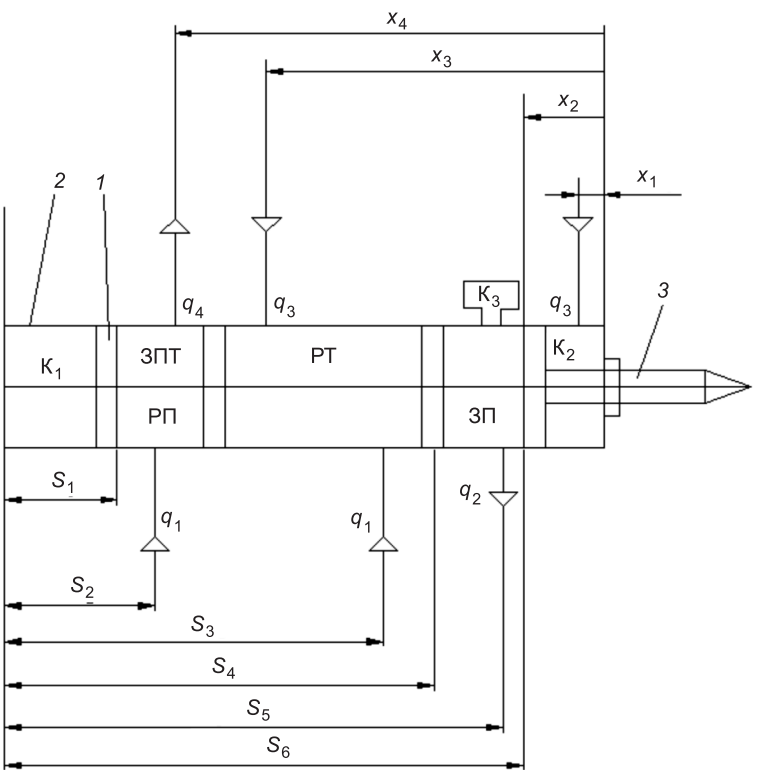


Рис. 4. Расположение ТМС

тируемых машин ТМС представлены на рис. 4. ТМС машины позволяют получить энергетические параметры происходящих в них процессов и общий КПД установки.

Принципиальная конструктивная схема ударного узла пневматической машины (см. рис. 4) включает следующие звенья: поршень *1*, цилиндр *2* и условно неподвижный рабочий инструмент *3*. Пространство цилиндра делится поршнем на рабочие полости и камеры $К_1$ и $К_2$. На схеме координата перемещения центра масс поршня относительно начала цилиндра обозначена для рабочего механизма — S_i, координата перемещения поршня при обратном ходе относительно конца цилиндра — X_i. Указано также расположение впускных и выпускных каналов. Принято обозначение $q_i = 1$ при наличии потока и $\overline{q}_i = 0$ при его отсутствии в том или ином канале.

Уточним понятия полости и камеры для поршневого расширительного двигателя. Определим полость как часть пространства цилиндра переменного объема с одной или с двумя подвижными торцевыми цилиндрическими стенками поршня, цилиндра, в которой происходит термодинамический процесс преобразования энергии сжатого воздуха в механическую энергию подвижного элемента или наоборот.

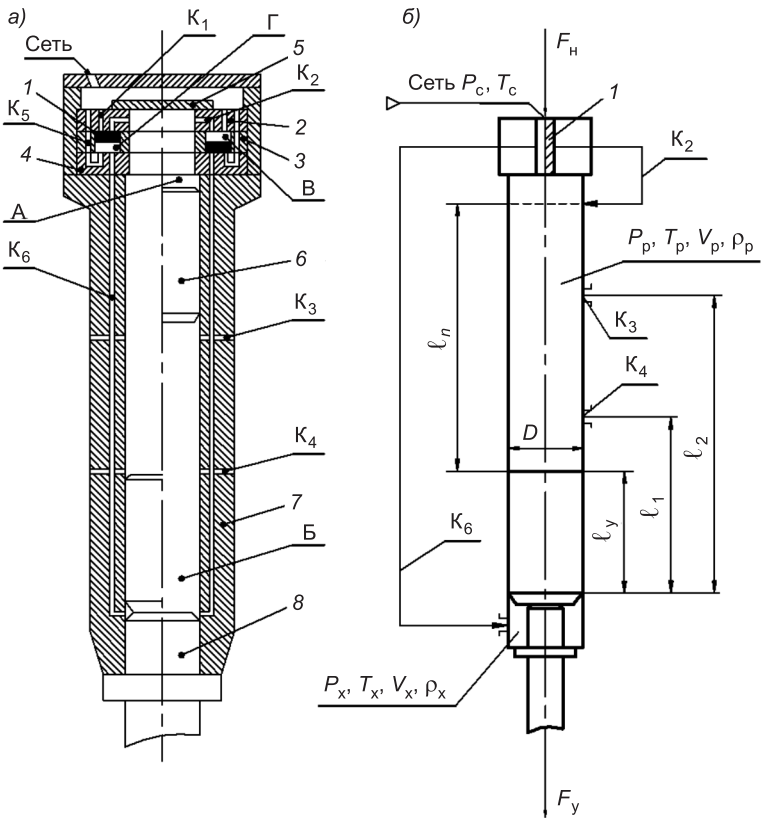
Камерой будем именовать пространство части цилиндра постоянного объема или объем вне цилиндра $К_3$ (см. рис. 4), связанные с полостью или другими камерами каналами и предназначенные для аккумулирования энергии некоторого количества сжатого воздуха. Камеры взаимодействуют с теми полостями, с которыми они связаны каналами.

Полости в цилиндре относительно подвижного поршня подразделяются на поршневые (РП и РТ) (см. рис. 4), выполняющие роль энергетических «котлов», в которых реализуются движущие силы от сжатого воздуха, и запоршневые (ЗП и ЗПТ), в которых происходит вытеснение находящегося в них воздуха в атмосферу или процесс сжатия его для аккумуляционных камер типа $К_1$, ..., $К_3$ при отключении полостей от атмосферы.

По определению [1] выделим в структуре пневматической машины частные ТМС. Для ударного технологического механизма ТМС РП — тепломеханическую систему рабочей полости; ТМС ЗП — тепломеханическую систему запоршневой полости. Аккумуляционная камера $К_1$ обслуживает ТМС РП.

Для транспортного механизма обратного хода определению [1] соответствуют: ТМС РТ — тепломеханическая система с полостью РТ; ТМС ЗПТ — тепломеханическая система запоршневой полости транспортного механизма. Аккумуляционная камера $К_2$ обслуживает ТМС РТ.

Выполняя структурный анализ, необходимо учитывать те особенности структурного строения машины, которые были установлены выше. Это принцип программированного управления и наличия ТМ систем. Структурный анализ пневматической машины необходим при ее модернизации. Результаты анализа позволяют оценить совершенство ее воздухо-распределительных устройств, рациональность кинематической схемы, степень воздействия на организм рабочего и пр. При анализе одновременно разрабатывается структурно-пневматическая схема машины, ее графическая модель. Структурно-пневматическая схема представляет собою чертеж в произвольном масштабе, включающий основные функциональные элементы пневматической машины и выполненный с приме-



нением условных изображений по ГОСТ 2.721–68; 2.782–68 и 2.784–70 с учетом специфики пневматических машин. Методы разработки и построения структурно-пневматических схем изложены в работе [4]. В качестве примера выполним структурный анализ клапанного пневматического механизма. Из конструкции машины (рис. 5, *а*) выделим элементы группы «К». Это многофункциональные звенья: цилиндр и ударник — основные детали, которые образуют жесткий кинематический остов машины. Каждое звено имеет две функции и входит в состав механизмов рабочего и транспортного холостого хода машины. Кроме того, цилиндр-ударник является пятипозиционным четырехлинейным распределителем, управляющим каналами $К_А$–$К_3$, $К_Б$–$К_4$. Элементы группы «К» представлены на схеме с рабочими полостями двигателей А и Б.

Элементы группы «А» схематично показаны клапаном *1*, выполняющим одновременно роль поршня сервопривода. Сервопривод имеет две полости В и Г, последняя из которых постоянно соединена каналом $К_4$ с сетью и выполняет роль аккумуляторного, упругостного двигателя (пневматическая пружина). С помощью сервопривода клапан имеет возможность переключаться на две позиции: рабочий ход и холостой ход. Все это в условных графических изображениях представлено на схеме.

Позиции распределителя (ударник-цилиндр) I–II–III–IV–V при рабочем ходе и V–IV–III–II–I при обратном ходе позволяют последовательно выполнять такты рабочего цикла, т.е. ударник-цилиндр совместно с клапаном *1* является управляющим устройством. На графической модели первая группа элементов, как правило, образует механический остов ма-

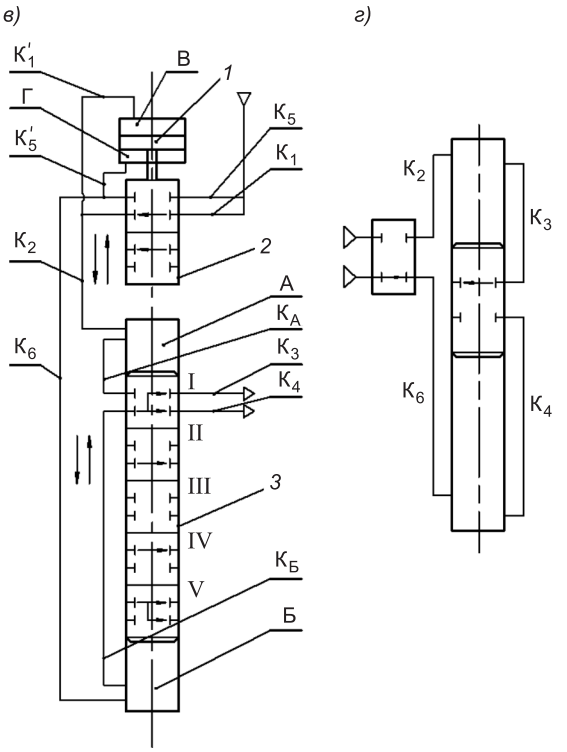


Рис. 5. Графические схемы клапанного пневматического механизма

шины, условно обозначим ее «К». Вторая группа элементов входит в систему автоматического управления, обозначим ее «А». При выполнении структурного анализа необходимо получить структурно-пневматическую схему, включающую как элементы «К», так и «А».

Конструктивная схема пригодна для выполнения сборочных и рабочих чертежей пневматической ударной машины. При анализе ее можно дополнить расчетной.

Расчетная схема машины (см. рис. 5, *б*) снабжена геометрическими размерами, связанными с движением звеньев. Схема выполняется в масштабе с учетом длины и диаметра поршня-ударника, его хода, длины подводящих и воздухоотводящих каналов, отдельно указываются диаметры каналов. Схема должна содержать расчетные данные, внутренние силы и моменты, действующие на звенья машины, параметры рабочего тела (сжатого воздуха).

На схеме (рис. 5, *б*) обозначены: $F_Н$ — усилие нажатия, $F_У$ — сила удара, $P_с$, $T_с$, $P_р$, $T_р$, $V_р$, $m_р$ и $P_х$, $T_х$, $V_х$, $m_х$. Соответственно с индексом «с» — давление и температура сетевого, с индексом «р» — давление, температура, объем рабочей камеры и масса сжатого воздуха для рабочей камеры ударного механизма и с индексом «х» то же для возвратного механизма. Подобные графические схемы являются составной частью математической модели машины.

Структурный анализ заканчивается построением обобщенной структурно-пневматической схемы. Структурно-пневматическая схема (см. рис. 5, *в*) (объект анализа) строится в условных изображениях. Вначале определяются структурные элементы группы «К» с рабочими полостями А и Б. Затем показываются элементы группы «А»: изображения клапана *2* и поршня сервопривода *1*. Клапан является четырехканальным двухпозиционным распределителем, обслуживающим каналы $К_2$ при рабочем ходе ударника-поршня *6* и $К_6$ при его холостом, транспортном ходе. Клапан с помощью сервопривода меняет рабочие позиции с первой — рабочий ход на вторую — обратный холостой ход. Сервопривод является поршневым двигателем с управляемым каналом $К'_1$ полостью В и полостью Г, постоянно соединенной каналами $К_3$, $К'_3$ с сетью (пневматическая пружина).

Автоматизированное программное устройство управления машины включает два распределительных устройства: клапанный и силовой удар-

ник-цилиндр, управляющие воздухоподводящим и отводящим каналами. Поршень-ударник (пятипозиционный четырехлинейный распределитель) является носителем программы и имеет последовательно включаемые пять позиций (I, ..., V) при выполнении поршнем рабочего хода и пять позиций (V, ..., I) при обратном ходе.

Из структурно-пневматической схемы выделим элементарную графическую модель, которая будет нести информацию только о структурных элементах группы «К» и «А». Подобная графическая модель представлена на рис. 5, *г*. В условных изображениях показаны элементы группы «К» (цилиндр, поршень и каналы $К_6$–$К_4$, $К_2$–$К_3$, управляемые поршнем-ударником) и элементы группы «А» (четырехлинейный распределитель, связывающий каналы $К_2$, $К_6$ с сетью). Такие элементарные графические модели с изображением каналов доставки и отвода энергоносителя будут именоваться модулями. Пневматические машины имеют разнообразные графические модули в зависимости от сочетания признаков «К» и «А». Разработана классификация модулей [4], позволяющая классифицировать по этому признаку и сами пневматические машины возвратно-поступательного движения. Очевидно, что структурный анализ сводится к построению структурно-пневматической схемы пневматического механизма и модуля, которые являются инструментом дальнейшего углубленного исследования. Схема дает возможность определить место механизма в структурной классификации, оптимальность его характеристик, добротность работы распределителей силовой системы, системы управления, наметить пути совершенствования машины.

Относительно структурного синтеза поясним следующее. Структурный синтез — проектирование структурно-пневматической схемы машины — основан на применении математической логики и по существу сводится к синтезу системы управления, включающей логические элементы памяти с минимизацией булевых функций и тем самым упрощающей управляющее устройство автоматической или автоматически программирующей системы. При синтезе учитываются дополнительные особенности структурно-пневматической схемы. В ее состав будут входить элементы группы как «К», так и «А». Элементы группы «К», образующие кинематическую основу машины, при проектировании структуры машины особых затруднений не вызывают. Многолетняя практика разработки конструкций создала основательный запас механизмов и машин, звенья которых входят в группу «К».

Синтез систем управления группы «А» вызывает определенную трудность. При небольшом числе частично однородных объектов управления для проектирования систем АСУ результативно использовать методы[1] проектирования дискретных систем автоматики. Математической моделью управляющего устройства в логическом проектировании служит модель конечного автомата, предложенная Клини. Дискретное устройство, описываемое моделью конечного автомата, имеет конечное число входов и выходов, на каждом из которых может быть два или несколько уровней физического воздействия и конечное число функциональных элементов. Различают комбинационные и последовательные автоматы. В первых от-

[1] Юдицкий С.А., Тагаевская А.А., Ефремова Т.К. Проектирование дискретных систем автоматики. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.

сутствуют элементы памяти и каждой комбинации значений входных переменных соответствует одна определенная комбинация значений выходных переменных. Последовательные автоматы реагируют по-разному на появление какой-либо комбинации входных переменных в зависимости от того, какая комбинация входных переменных была перед этим на входе автомата.

Последовательные автоматы позволяют избежать противоречий, при которых одному и тому же входному состоянию соответствуют два или более различных выходных состояний. Противоречия устраняются включением в систему управления устройств, именуемых памятью. Методы проектирования АСУ пневматических машин по своему содержанию выходят далеко за рамки данного исследования и в этой работе подробно не излагаются.

Выводы. 1. В структуре пневматической машины возвратно-поступательного движения, имеющей звенья двигателей с линейными функциями положения для получения цикловой, замкнутой траектории рабочего инструмента, необходимо иметь программирующую систему автоматического управления (принцип программированного управления (М.З. Коловский и др.)).

2. Особенностью структуры пневматической машины возвратно-поступательного движения является наличие в ней «тепломеханических систем, которые представляют собою совокупность твердых и термодинамических тел (звеньев), где имеет место комплекс тепловых и механических процессов»[2]. Понятие тепломеханической системы машины позволяет получать обоснованные математические модели термодинамических процессов в рабочих полостях двигателей.

3. Структурный анализ пневматических машин возвратно-поступательного движения показывает, что структурное строение машины представлено двумя видами структурных элементов. Первый вид «К» включает звенья двигателей и образует жесткий кинематический остов машины (основная ее механическая часть). Второй вид структурных элементов «А» — устройства управления энергоносителем: силовые распределители, их сервоприводы, система подающих и отводящих сжатый воздух каналов, детали автоматических программирующих устройств. В течение длительной эксплуатации и совершенствования создана достаточно полная база элементов вида «К», которую можно результативно использовать для создания более эффективных машин. Элементы вида «А» являются объектами проектирования АСУ всех уровней.

4. При небольшом числе объектов управления в АСУ пневматической машины наряду с классическими и современными методами проектирования можно успешно применять способы дискретных систем автоматики, используя в качестве математических моделей комбинационные и последовательные автоматы с блоками управления, включающими логические элементы и элементы памяти (С.А. Юдицкий и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герц, Е.В. Синтез пневматических приводов [Текст] / Е.В. Герц, В.П. Зенченко, Г.В. Крейнин. — М. : Машиностроение, 1966.

[2] Подчуфаров Б.М. Современное состояние и некоторые перспективы развития теории пневматических (газовых) сервомеханизмов // Пневматические приводы и системы управления. М.: Наука, 1971. С. 18–26.

2. Коловский, М.З. Основы динамики промышленных роботов [Текст] / М.З. Коловский, А.В. Слоущ. — М. : Наука, 1988. — 240 с.
3. Суворов, Д.Г. Обобщенная термомеханическая система машинного агрегата компрессор — вторичный двигатель [Текст] / Д.Г. Суворов // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 3. — С. 71–76.
4. Суворов, Д.Г. Классификация ручных пневматических машин ударного действия и их структурно-пневматические схемы [Текст] // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1983. — № 10. — С. 130–135.

СУВОРОВ Дмитрий Григорьевич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 29.08.13

Suvorov Dmitry Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

STRUCTURAL COMPOSITION OF PNEUMATIC MACHINES RECIPROCATING MOTION OF THE PISTON

Feature sets out the structural framework of pneumatic machines with reciprocating piston. Structurally pneumatic circuit includes not only links the power of engines working and return strokes machines that make up its kinematic skeleton, but also, according to the principle of programmed control, structural elements of the automatic air distribution system. Thermo-mechanical system in the structure of the machine allow you to analyze dynamic processes drive heat engines. Structural analysis and synthesis machines are maintained in view of its structural features.

Key words: a structure, analysis and synthesis, pneumatic machine.

REFERENCES

1. Hertz, E.V. Synthesis of pneumatic actuators [Text] / E.V. Hertz, V.P. Zenchenko, G.V. Kreynin. — M. : Mechanical Engineering, 1966.
2. Kolovsky, M.Z. Basics dynamics of industrial robots [Text] / M.Z. Kolovsky, A.V. Sloushch. — M. : Science, 1988. — 240 p.
3. Suvorov, D.G. Thermomechanical generalized system of the engine compressor unit — a secondary engine [Text] / D.G. Suvorov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 3. — P. 71–76.
4. Suvorov, D.G. Classification of pneumatic tools shock actions and their structural and pneumatic diagrams [Text] / D.G. Suvorov // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1983. — N 10. — P. 130–135.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 728.27

П.П. СЕМИКИН

КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Проведен анализ 50 основных проектов и построек высотных зданий. Разработана классификация типов высотных зданий в зависимости от применяемого инженерного оборудования, работающего на возобновляемых источниках энергии.

Ключевые слова: архитектура, высотные здания, объемно-пространственное решение, возобновляемые источники энергии.

1. Анализ развития высотных зданий. Высотные здания как тип застройки появился в древние времена. Первоначально это были сооружения, которые строились в случае необходимости уплотнения застройки. В дальнейшем возводились культовые и религиозные сооружения (пирамиды, храмы, дворцы), которые превосходили существующую застройку по своим масштабам, в том числе и по высоте. Первые высотные здания, в том виде, в каком мы их привыкли воспринимать, были построены в Чикаго в конце XIX в., их высота составляла 10–12 этажей. Они имели громоздкие размеры в связи с большой толщиной стен (по разным данным на первых этажах она доходила до 4 м). В 1970-х гг., после мирового энергетического кризиса, началось активное проектирование зданий, использующих возобновляемые источники энергии. Параллельно с этой тенденцией, в 1980-х гг. отношение к высоткам стало изменяться. Стереотипные модернистские формы сменились разнообразными вариациями постмодернизма. Большое внимание теперь уделялось интеграции высотных зданий в уже существующий городской комплекс [1].

С 2000-х гг. началось массовое проектирование масштабных высотных объектов. Довольно быстро была преодолена высота 300, потом 500 м. В 2012 г. был возведен небоскреб «Бурж-Халифа», шпиль которого возвысился над землей на рекордные 818 м. Однако с увеличением габаритов росло и энергопотребление данного типа объектов. Сегодня «средний» небоскреб по затратам энергии сопоставим с небольшим населенным пунктом. Поэтому включение возобновляемых источников энергии в структуру высотных зданий стало закономерным этапом их развития. Существуют понятия альтернативная и возобновляемая энергетика. Первая объединяет источники энергии, которые составляют альтернативу традиционным (газ, уголь, нефть). Их спектр весьма широк: от «классических» — солнца и ветра до «необычных» — энергии молнии, торнадо и гигантских воздушных змеев. Вторая имеет более четкие рамки и состав. Под возобновляемыми источниками понимают энергию солнца, ветра, биомассы, приливную, гео- и гидротермальную. В данной статье мы будем рассматривать именно эти пять источников.

© Семикин П.П., 2013

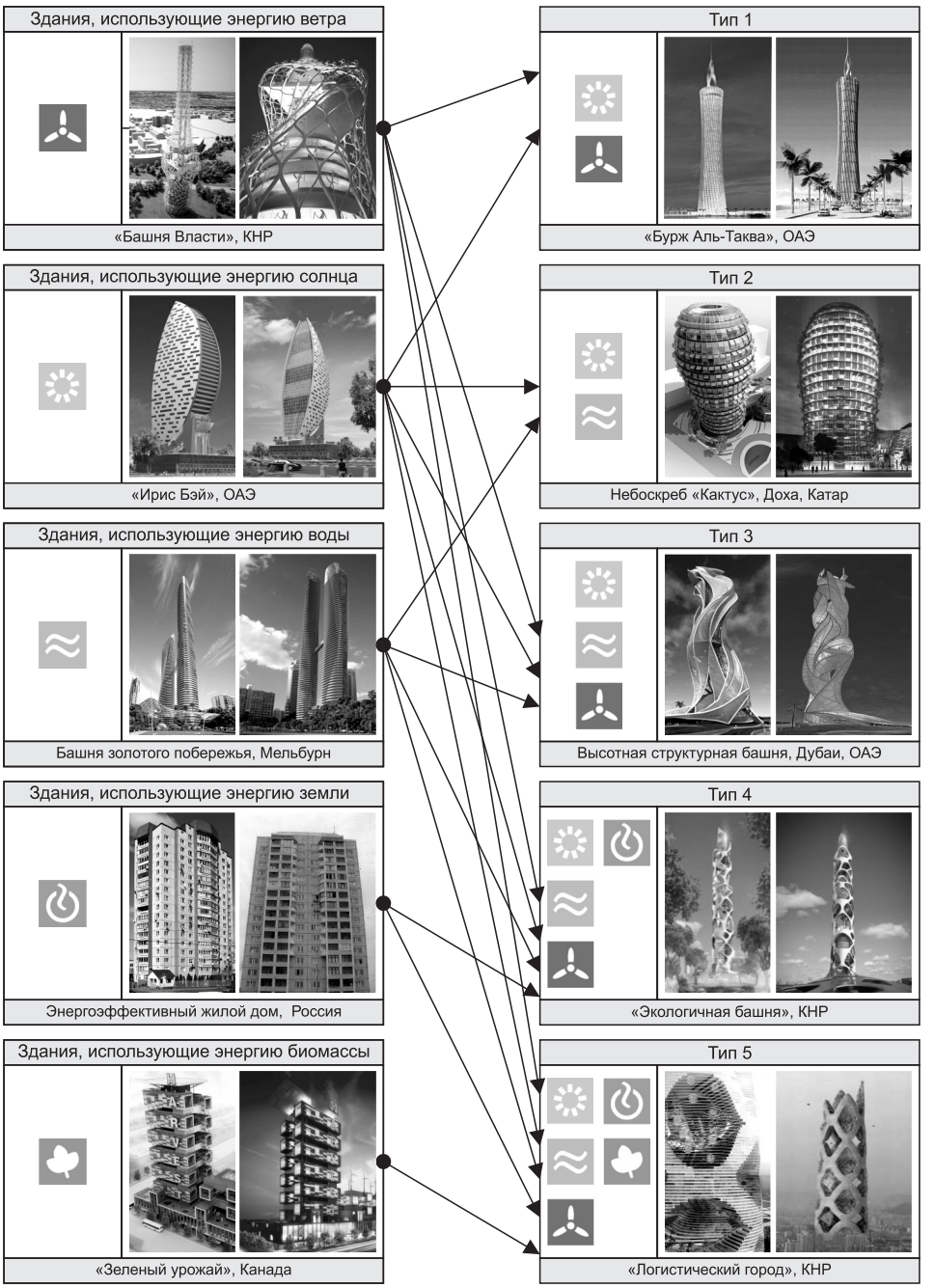
2. Моноэнергетические типы высотных зданий. Был проведен анализ 50 построек и проектов высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии, что составляет порядка 8 % от общего количества. Опираясь на эти данные, составлена классификация типов. В ее основу положено разделение зданий по количеству и набору возобновляемых источников энергии. Осуществлено крупное деление на моноэнергетические и полиэнергетические объекты. В первых применен один из пяти источников, во второй группе — несколько, в разных сочетаниях. Каждая из групп разбивается на отдельные типы (рис. 1). Рассмотрим их подробнее.

Здания, использующие энергию ветра. Тип объектов характеризуется применением инженерного оборудования, основанного на преобразовании ветровой энергии. Он делится на два вида: объекты со сквозными отверстиями и объекты с ветроустановками. Первый характеризуется особым объемно-пространственным решением, которое концентрирует и направляет потоки ветра. Разогнанные и усиленные, они проходят сквозь установленный на их пути ветрогенератор, что позволяет увеличить его КПД. Характерные примеры: башня Страта (Великобритания), Всемирный торговый центр (Бахрейн). Второй — объекты, в структуру которых внедрены ветроустановки с различным местоположением. Такими зданиями являются башня Власти (КНР), небоскреб «Гигантское яйцо» (США).

Здания, использующие энергию солнца. Значительная часть внешней облицовки небоскребов этого типа — солнечные батареи. Они определяют членение и фактуру фасадов объекта. Возможен монтаж на здании специальной конструкции (например, экрана), на котором будут размещаться фотоэлементы гелиосистемы как в комплексе инвестиционного совета в Абу-Даби (ОАЭ). Другим распространенным вариантом является создание наклонной поверхности, угол которой равен углу падения солнца, для наибольшей эффективности системы («Ирис Бэй», ОАЭ).

Здания, использующие энергию воды. Объекты возводятся рядом с водным источником, как правило, рекой или океаном. Планировочное решение нижних этажей (в том числе стилобатной части) определяется конструкцией энергоустановки. В большинстве случаев это небольшие гидроэлектростанции, которые работают на приливной энергии. В связи с этим водные акватории со стоячей водой или слабым течением не подходят для данного типа. Примеров подобных зданий не так много, в связи с частым отсутствием прямого выхода на водную поверхность из нижней части небоскреба. Одним из удачных объектов является башня Золотого побережья (Мельбурн).

Здания, использующие энергию земли. Ресурсы геотермальной энергии разделяются на гидротермальные и петротермальные. Первые из них представлены такими теплоносителями, как подземные воды, пар и пароводяные смеси. Вторые представляют собой геотермальную энергию, содержащуюся в раскаленных горных породах. Гидротермальные источники энергии могут быть задействованы лишь в районах молодого и современного вулканизма, крупных разломов земной коры с высокими геотермальными параметрами. Петротермальные ресурсы — это геотермальная энергия, заключенная в твердых «сухих» горячих породах, которая составляет около 99 % от общих ресурсов подземной тепловой энергии. На глубине до 4–6 км горячие породы с температурой 100–150 °С распространены почти повсеместно, а с температурой 180–200 °С на доволь-



Классификация типов высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии

но значительной части России. Этого вполне достаточно для целей теплоснабжения [2]. Примером использования данного вида энергии является «17-этажный энергоэффективный жилой дом в микрорайоне Никулино-2» в г. Москве, разработанный и реализованный в период с 1998 по 2002 г. В здании внедрена теплонасосная установка для горячего водоснабжения, использующая тепло грунта и удаляемого вентиляционного воздуха [3]. Примененное решение вкупе с другими технологиями позволило добиться снижения потребления энергии из городских электросе-

тей. Данный возобновляемый источник энергии влияет на планировку первых и подземных этажей объекта.

Здания, использующие энергию биомассы. Биомасса — растительные и животные материалы, которые могут быть преобразованы в электрическую, тепловую энергию, а также биогаз (метан, водород). Это шестой по запасам из доступных на настоящий момент источников энергии после горючих сланцев, урана, угля, нефти и природного газа. Планировочное решение здания, использующего энергоустановки на данной энергии, должно предусматривать площади для размещения инженерного оборудования, которые изолированы от остальных частей объекта. Для стабильной работы энергосистемы необходим постоянный подвоз сырья. Поэтому чаще всего подобные решения внедряют в зданиях, расположенных рядом с лесопилками, фермерскими хозяйствами и подобными объектами. В последние годы стали появляться проекты вертикальных сельскохозяйственных ферм, высотных сооружений, на этажах которых выращиваются овощи и фрукты, а также возможно ведение животноводства. Внедрение установок, работающих на энергии биомассы, в такие объекты является логичным и целесообразным, так как помимо дешевой энергии, сырье для которой всегда «поставляет» сам небоскреб, удается обеспечить наиболее полный цикл переработки отходов производства. Пример — канадский проект «Зеленый урожай».

Моноэнергетический тип высотных зданий является распространенным объектом. Это связано с простотой внедрения системы, работающей на возобновляемых источниках энергии, и ее увязке с другим инженерным оборудованием здания. Данный подход позволяет наиболее эффективно использовать «чистую» энергию. Это достигается благодаря объемно-пространственному решению, которое целенаправленно увеличивает коэффициент полезного действия установки, работающей на возобновляемой энергии. Яркие примеры — ветроулавливающее здание, а также небоскреб с динамическим фасадом, поворачивающимся, следуя траектории солнца. Однако, имея спектр из пяти основных возобновляемых источников, проектировщики пришли к идее их симбиоза в одном объекте. Так возникли полиэнергетические типы высотных зданий.

3. Полиэнергетические типы высотных зданий — небоскребы, в которых применены два и более возобновляемых источников энергии. Исходя из наличия пяти основных видов «чистой» энергии, их возможное число сочетаний более 20 комбинаций. Это может быть как сочетание четырех-пяти, так и двух-трех источников энергии. Проведенный анализ показал, что наиболее распространенными являются пять основных типов, которые и будут рассмотрены в дальнейшем (см. рисунок).

Тип 1. Энергия солнца и ветра. На сегодняшний день один из самых распространенных типов высотных зданий. Использование «связки» ветро- и гелиоустановок позволяет получить большое количество энергии, практически в любой климатической зоне. Объемно-пространственное решение в каждом случае строго индивидуально и ограничивается лишь фантазией архитектора и техническими возможностями оборудования для преобразования энергии. Примерами подобных объектов являются «Бурж Халифа» и «Бурж Аль-Таква» (ОАЭ). Первый небоскреб вырабатывает электроэнергию, используя 61-метровую турбину, расположенную в верхней части, а также массив солнечных панелей (частично располагающихся на стенах башни) общей площадью около 15 тыс. м^2.

Второй объект практически полностью облицован стеклом, со слоем, позволяющим преобразовывать солнечную энергию в электрическую, наверху расположен большой универсальный ветрогенератор.

Тип 2. Энергия солнца и воды. Применение двух данных возобновляемых источников энергии рационально в связи с отсутствием у них отрицательных эксплуатационных недостатков (как, например, вибрации у ветрогенераторов). Использование воды в данном типе зданий подразумевает как приливные электростанции, так и системы сбора дождевой воды. Как правило, в таких зданиях присутствует или озеленение, или атриум. Воды хватает на полив садов, на увлажнение воздуха атриумов и на обеспечение потребностей людей внутри здания. Пример — небоскреб «Кактус» в Катаре. Это здание выполнено в бионическом стиле. Форма здания, напоминающая кактус, покрыта небольшими «пластинками», которые в нижней части являются открывающимися окнами для естественной вентиляции, а в верхней — солнечными панелями.

Тип 3. Энергия солнца, ветра и воды. Данный тип — комплексный объект, в энергосистему которого включено сразу три возобновляемых источника энергии. Основной архитектурной особенностью является, как правило, плавная бионическая форма, возможно наличие динамических деталей. В ряде объектов прослеживается спиралевидная, закрученная форма. Это связано с тем, что данный прием позволяет перенаправить ветровые потоки и одновременно дать необходимый изгиб и наклон части фасада для восприятия солнечного света. Пример подобного решения — «Высотная структурная башня» в Дубаи, ОАЭ.

Тип 4. Энергия солнца, ветра, воды и земли. В данном типе объемно-планировочное решение здания практически полностью подчинено идее использования возобновляемых источников энергии. Помимо активных элементов энергосистем, и сам образ здания часто продиктован идеей энергоэффективности и биопозитивности. В связи с большим количеством инженерного оборудования для преобразования возобновляемых источников энергии, а также технических особенностей высотных зданий (крупный лестнично-лифтовой узел, массивные несущие конструкции и т.п.), объекты данного типа — это массивные сооружения, масштабные постройки. Выразительный пример — «Экологичная башня», КНР.

Тип 5. Энергия солнца, ветра, воды, земли и биомассы. Данный тип представляет из себя самое крупное сооружение. Как правило, это вертикальный город. Небоскреб, который вмещает несколько тысяч человек, площадь этажа от 5000 м^2 и больше. Построенных подобных высотных зданий на сегодняшний момент нет, однако существует несколько десятков проектов. Как правило, это мегаструктуры как с точки зрения архитектуры, так и с точки зрения конструкций и инженерных коммуникаций. Поскольку энергозатраты на такую систему будут колоссальны, в проект закладывается возможность применения всех возобновляемых источников энергии, вертикального озеленения и ряда других решений. Одним из примеров может служить «Логистический город», КНР. Подобные проекты существуют и для Объединенных Арабских Эмиратов, и Соединенных Штатов Америки.

Более 50 % построенных и проектируемых высотных зданий аккумулируют несколько возобновляемых источников энергии. Данная особенность позволяет разнообразить архитектурное решение и повысить эффективность энергосистемы объекта. В настоящее время прослеживает-

ся тенденция возведения небоскребов все большей высоты. Помимо вертикальной развитости данные объекты имеют значительные размеры в плане. Эти обстоятельства вкупе с повышенным энергопотреблением позволяют предположить появление новых типов высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии.

Объемно-пространственное решение небоскребов часто является визуальным «манифестом» применяемых технологий. Эта тенденция положительно сказывается на имидже высотных зданий. Применение возобновляемых источников энергии также положительно сказывается на ментальности людей и на экологической ситуации. Данные типы зданий являются перспективными формами застройки городских территорий. Речь идет не о массовой застройке, а об уникальных единичных объектах, которые могут являться центрами притяжения городской активности, символами компаний и городов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по высотным зданиям. Типология и дизайн, строительство и технология [Текст] / пер. с англ. — М. : ООО «Атлант-Строй», 2006. — 228 с.
2. Энергосбережение в Новосибирской области [Электронный ресурс] // Петроэнергетика. Глубинное тепло земли и возможности его использования: [сайт]. [2013]. URL: http://nskee.energohelp.com/articles/other/10501/.
3. Инженерное оборудование высотных зданий [Текст] / под общ. ред. М.М. Бродач. — М. : АВОК-ПРЕСС, 2007. — 320 с.

СЕМИКИН Павел Павлович, асп.
ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища)», г. Москва

Получено 23.08.13

Semikin Pavel Pavlovich, post-graduate student, Joint Stock Company Central Research and Design Institute for Residential and Public Buildings, Moscow, Russia

CLASSIFICATION OF TYPES OF HIGH-RISE BUILDINGS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Produced analysis of 50 major high-rise projects and buildings. Developed the classification of types of high-rise buildings, depending on the engineering equipment, working on renewable energy sources.

K e y w o r d s: architecture, high-rise buildings, volumetric-spatial solution, renewable energy sources.

REFERENCES

1. High-rise Manual. Typology and Design, Construction and Technology [Text] /trans of Engl. — M. : Atlant-Stroy Ltd., 2006. — 228 p.
2. Energy conservation in the Novosibirsk region // Petroenergetika. Geothermal heat and the possibility of it use. [2013]. URL: http://nskee.energohelp.com/articles/other/10501/.
3. Engineering equipment of high-rise buildings / under the general editorship M.M. Brodach. — M. : AVOK-PRESS, 2007. — 320 p.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 532.59.001.5

В.И. БУКРЕЕВ, В.В. ДЕГТЯРЕВ-мл.

ЭВОЛЮЦИЯ СВОБОДНЫХ ВОЛН В ЗАМКНУТОМ БАССЕЙНЕ С НАКЛОННЫМ ДНОМ

Приведены результаты экспериментального исследования волн в прямоугольном закрытом по торцам бассейне с наклонным дном. Волны генерировались кратковременным переводом бассейна из горизонтального в наклонное положение и в дальнейшем были свободными. Показано, что даже при достаточно интенсивном возмущении, когда волны сильно нелинейные и нестационарные, в спектрах колебаний свободной поверхности выделяются собственные частоты сейшевых колебаний. Показано также, что эти частоты и координаты узлов различных мод сейши хорошо описываются линейной теорией длинных волн.

К л ю ч е в ы е с л о в а: замкнутый бассейн, наклонное дно, сейши, собственные частоты.

В работе [1] экспериментально показано, что при распространении свободных волн в горизонтальном прямоугольном бассейне ограниченной длины в спектре колебаний свободной поверхности сильно выделяются собственные частоты сейшевых колебаний. Эта закономерность имела место даже в том случае, когда волны были нестационарными, сильно нелинейными, обрушивающимися и быстро вырождающимися. Она подтвердилась также в случае эволюции свободных волн в горизонтальном прямоугольном бассейне с резким расширением [2]. Эта закономерность позволяет существенно упростить расчет волновых движений, в частности сейш, в озерах, водохранилищах, портах, заливах и фиордах.

Природные водоемы имеют большую протяженность и сложную геометрию, что вынуждает использовать при расчетах упрощенные математические модели. Математическая модель, основанная на линейной теории длинных волн (далее ЛТДВ), наиболее популярна при расчетах природных сейш [3, 4].

В настоящей работе приведены некоторые результаты экспериментальной проверки указанной закономерности еще в одном случае, а именно: при эволюции свободных волн в прямоугольном бассейне с наклонным дном. Выполнена также проверка метода расчета собственных частот сейшевых колебаний на основе ЛТДВ.

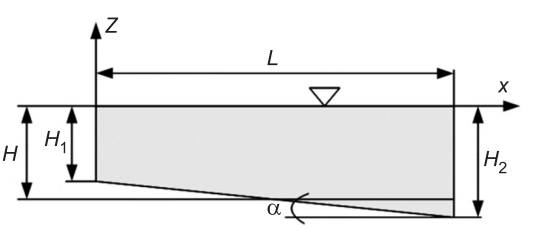


Рис. 1. Схема бассейна

Опыты выполнялись в прямоугольном стеклянном бассейне, схема которого приведена на рис. 1, где указаны используемые обозначения и неподвижная прямоугольная система координат. Бассейн имел длину $L = 2{,}984$ м, ширину $B = 0{,}13$ м и высоту 0,5 м. В основных опытах он наклонялся на угол α к горизонту.

© Букреев В.И., Дегтярев-мл. В.В., 2013

Выполнена также контрольная серия опытов в случае горизонтального дна бассейна. Их результаты хорошо совпали с результатами опытов [1].

Бассейн в его горизонтальном положении заполнялся водой на глубину H, а затем переводился в наклонное положение за некоторое время τ. Энергия поступала в образующиеся волны только в течение времени τ. После этого волны становились свободными и теряли энергию. Интенсивность вносимого возмущения изменялась от опыта к опыту за счет изменения параметра τ. При достаточно больших значениях τ волны все время оставались гладкими. При малых значениях τ волны обрушивались еще до первого отражения от торцевой стенки. В некотором диапазоне значений τ обрушение волн происходило только после их первого отражения. Затем волны становились гладкими.

С помощью шести волномеров измерялись колебания свободной поверхности $\zeta(t, x/L, H, \alpha)$ как функции времени t в ряде точек в продольной плоскости симметрии бассейна с заданными значениями продольных координат x (вертикальная черта в перечне аргументов функции ζ означает, что следующие за ней аргументы считаются параметрами). Время отсчитывалось от момента начала перевода бассейна в наклонное положение. Два волномера располагались на расстоянии 0,01 м от левой и правой торцевых стенок. Другие волномеры располагались в теоретических узлах и пучностях различных мод сейшевых колебаний.

Положения теоретических узлов сейши определяются координатами точек пересечения собственных функций $Z(x, n)$ с осью x ($n = 1, 2, 3,...$ — номер собственной моды). В случае бассейна с горизонтальным дном $Z(x, n) = \cos(\pi n x/L)$ $(0 \le x \le L)$, т. е. собственные функции представляют собой отрезки косинусоиды. Для бассейна с наклонным дном собственные функции отличаются от отрезков косинусоиды. Они определялись расчетом на основе линейного приближения теории мелкой воды. Соответствующая компьютерная программа была предоставлена д-м физ.-мат. наук И.В. Стуровой.

На рис. 2 приведен пример теоретических безразмерных профилей свободной поверхности $Z^0(x^0, n, t, \alpha)$ для первых четырех мод сейши в бассей-

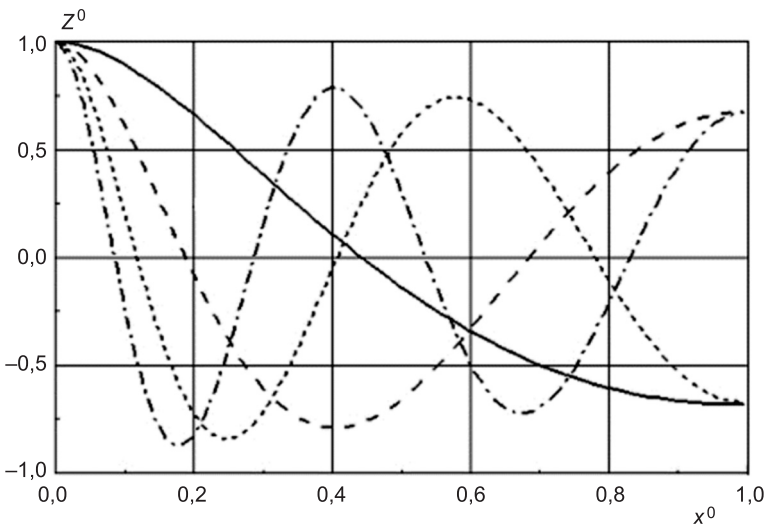


Рис. 2. Профили свободной поверхности в канале с наклонным дном $\alpha = 5°$, *1* — первая мода, *2* — вторая мода, *3* — третья мода, *4* — четвертая мода

не с наклонным дном. Координата x нормирована на L, так что $x^0 = x/L$. Профили свободной поверхности нормированы на их значения при $x = 0$, разные для разных собственных мод, так что $Z^0(x^0) = Z(x^0)/Z(0)$. Функции Z^0 не зависят от способа внесения возмущения.

Пример колебаний свободной поверхности вблизи левой торцевой стенки бассейна и значения параметров показаны на рис. 3. В данном опыте передний фронт бора обрушивался после первого отражения от правой стенки. В момент прихода к левой стенке волна была уже гладкой. Колебания свободной поверхности носят сложный характер и достаточно быстро вырождаются, следовательно, они нестационарные.

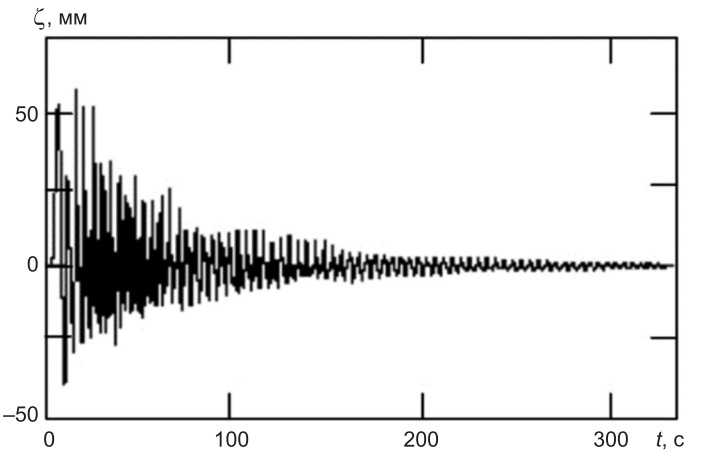


Рис. 3. Колебания свободной поверхности при $x = 0$, $L = 2{,}975$ м, $H = 0{,}195$ м, $\alpha = 4°$

Результаты спектрального анализа функции $\zeta(t)$ в обсуждаемом примере приведены на рис. 4, где дан спектр $F(f)$ функции $\zeta(t)$, являющийся комплексной функцией частоты f, симметричный относительно оси $f = 0$. Также даны только модули спектров и только при $f \geq 0$. При спектральном анализе использовалась стандартная программа быстрого преобразования Фурье «FFT-amplitude», содержащаяся в программном продукте «Origin».

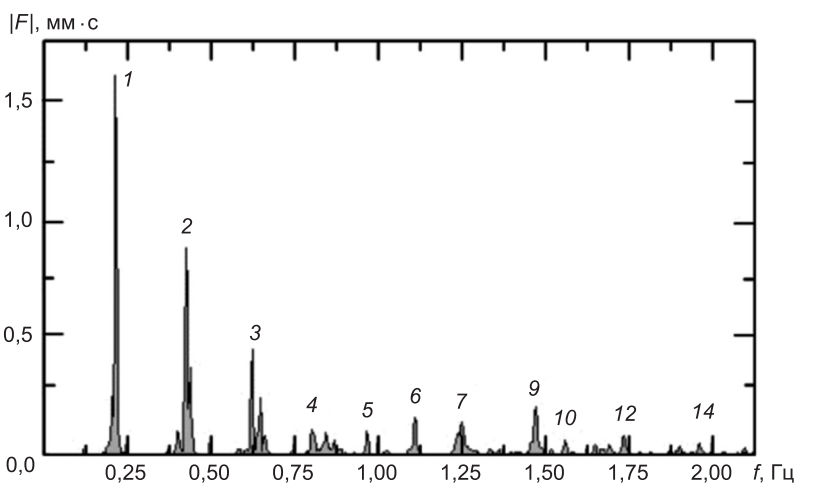


Рис. 4. Модуль спектра функции $\zeta(t)$, показанной на рис. 3

В спектрах четко выделяется ряд пиков (см. рис. 4). Соответствующие им частоты f_j (j = 1, 2, ..., 19) сравнивались с теоретическими частотами сейшевых колебаний f_n, которые определялись следующим образом.

В случае прямоугольного бассейна с горизонтальным дном, заполненного покоящейся жидкостью на глубину H, круговая частота ω и волновое число k линейных гармонических волн связаны друг с другом следующим дисперсионным соотношением

$$\omega^2 = gk \tanh(kH), \qquad (1)$$

где g — ускорение свободного падения.

Далее рассматриваются положительные значения ω.

При достаточно малом параметре kH $\tanh(kH) \approx kH$ и формула (1) приобретает вид

$$\omega^2 = gk^2H. \qquad (2)$$

Дисперсионное соотношение (2) фигурирует в теории мелкой воды, а также в ЛТДВ. В этих теориях волны разной длины распространяются с одной и той же скоростью $c = \omega/k = (gH)^{0,5}$, т.е. дисперсия волн не учитывается.

Формулы (1) и (2) справедливы при произвольных значениях k. Сейшевые колебания соответствуют дискретным значениям $k = k_n = \pi n/L$, где n = 1, 2, 3, ... — номер собственной моды. При этом условии из (1) и (2) получаются следующие формулы для частот продольных сейшевых колебаний в прямоугольном бассейне с горизонтальным дном:

$$\omega_{1n} = [gk_n \tanh(k_nH)]^{0,5}, \qquad (3)$$

$$\omega_{2n} = k_n(gH)^{0,5}. \qquad (4)$$

Расчеты по формулам (3) и (4) показали, что при заданных значениях параметра $\varepsilon = H/L$ приближенная частота ω_{2n} превышает точную частоту ω_{1n} тем меньше, чем меньше номер моды. Определим пороговое значение номера моды n_* условием

$$\delta(n) = (\omega_{2n} - \omega_{1n})/\omega_{1n} \le 50\ \%, \quad \text{если} \quad n \le n_*.$$

Результаты расчета зависимости n_* от ε приведены в таблице. Из таблицы следует, что в натурных условиях, где значения ε, как правило, имеют порядок 0,001 и меньше, ЛТДВ должна хорошо описывать очень много мод сейшевых колебаний, начиная с первой моды.

Пороговые значения n_*, при превышении которых ЛТДВ завышает собственную частоту больше чем на 5 %

ε	0,1	0,05	0,01	0,005	0,002	0,001
n_*	2	4	18	35	90	180

В случае бассейна с наклонным дном собственные частоты сейшевых колебаний определялись численными расчетами. Результаты сравнения теоретических $f_n = \omega_n/2\pi$ и экспериментальных частот f_j представлены на рис. 5. Экспериментальные частоты f_j даны для двух значений α, рав-

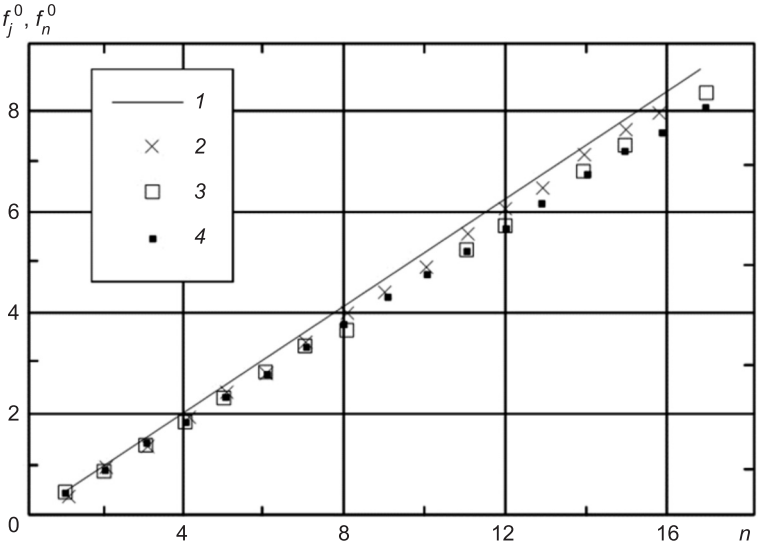


Рис. 5. Зависимость безразмерных дисперсионных соотношений (1) и (2) и собственных частот от номера моды

1 — дисперсионные соотношения, *2* — f_j^0 при $\alpha = 0$, *3* — f_j^0 при $\alpha = 5{,}3°$, *4* — f_n^0 при $\alpha = 36°$

ных 0 и 5,3°. Дискретные теоретические частоты f_n даны для угла $\alpha = 36°$. Сплошной линией показано универсальное по параметру ε безразмерное дисперсионное соотношение для бассейна с горизонтальным дном. Универсальность достигнута за счет использования при нормировке двух разных масштабов времени T_1 для (1) и T_2 для (2). Масштабы T_1 и T_2 выбирались из следующих соображений.

Без учета вязкости жидкости кинематические характеристики рассматриваемого течения определяются параметрами g, L, H, B, α. Поставим условие, чтобы частоты не зависели от отношения $\varepsilon = H/L$. Для дисперсионных соотношений (3) и (4) масштабы времени, соответствующие этому условию, оказываются разными, а именно:

$$T_1(n) = L[\tanh(k_n H)/k_n]^{-0,5} \text{ для (3)}, \tag{5}$$

$$T_2(n) = L(gH)^{-0,5} = \text{const для (4)}. \tag{6}$$

Отметим, что T_1 зависит от номера моды.

На рис. 5 безразмерные дисперсионные соотношения (1) и (2) нормированы каждое на свой масштаб, так что они совпадают друг с другом и не зависят от ε. Раздельный способ нормировки использовался также для дискретных частот, так что $f_j^0 = f_j T_1$, $f_n^0 = f_n T_2$.

Данные, приведенные на рис. 4, показывают, что теоретические собственные частоты слабо зависят от угла α (см. *1*, *4*). Эксперимент подтвердил этот результат (см. *2–4*).

Эксперимент подтвердил также положение теоретических узлов различных мод сейшевых колебаний. Этот вывод получен на основе того, что в экспериментальных спектрах $|F|_{\text{exp}}$ отсутствовали пики на соответствующих частотах, если волномеры располагались в теоретических узлах многомодовой сейши.

Относительно влияния ширины бассейна (параметра B/L) можно отметить, что в бассейне наряду с продольной всегда существует поперечная сейша. Однако при малых значениях B/L = 0,043, которые имели место в опытах, вкладом поперечной сейши в суммарные колебания можно пренебречь. В ЛТДВ влияние вязкости не учитывается. В эксперименте вязкость жидкости приводила к относительно быстрому затуханию колебаний (см. рис. 3). Тем не менее это не привело к расхождению теоретических f_n^0 и экспериментальных частот f_j^0 (см. рис. 5).

Выводы. 1. Экспериментально показано, что в спектрах даже очень сложных свободных волн в прямоугольном бассейне с наклонным дном выделяются собственные частоты сейшевых колебаний, предсказываемые линейной теорией мелкой воды.

2. Установлено, что собственные частоты, представленные в соответствующем безразмерном виде, не зависят от заданного параметра $\varepsilon = H/L$ и слабо зависят от угла наклона дна α. Безразмерные координаты узлов многомодовой сейши слабо зависят от ε, но сильно зависят от α.

3. Показано, что затухание колебаний пренебрежимо мало влияет на собственные частоты сейшевых колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букреев, В.И. Распад начального разрыва глубины воды в канале ограниченной длины [Текст] / В.И. Букреев // Прикладная механика и техническая физика. — 2011. — Т. 52, № 5. — С. 17–26.
2. Букреев, В.И. Сейшевые колебания в прямоугольном канале с резким расширением поперечного сечения [Текст] / В.И. Букреев, И.В. Стурова, А.В. Чеботников // Прикладная механика и техническая физика. — 2013. — Т. 54, № 4. — С. 22–32.
3. Rao, D.B. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: Application to lakes Ontario and Superior [Текст] / D.B. Rao, D. Schwab // Philos. Trans. Roy. Soc. — London, 1976. — Vol. 281. — P. 63–96.
4. Prigo, R.B. Linear, one-dimensional models of the surface and internal standing waves for a long and narrow lake [Текст] / R.B. Prigo, T.O. Manley, B.S.H. Connell // Am. J. Phys. — 1996. — Vol. 64, N 3. — P. 288–300.

БУКРЕЕВ Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: ngasu_gts@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ДЕГТЯРЕВ-мл. Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 12.08.13

Bukreev Victor Ivanovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail:ngasu_gts@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Degtyarev-youn. Vladimir Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: gts@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

EVOLUTION OF FREE WAVES IN A CLOSED BASIN WITH INCLINED BOTTOM

Some results of an experimental study of the waves in a closed rectangular basin with an inclined bottom are presented. The waves were generated by a short time translation of the basin from the horizontal position in the inclined position and later the waves were free. It is shown that even in the case of an intensive disturbance, when the waves where strongly nonlinear and unsteady, the allocated frequencies of the seiche oscillations where selected out in the spectra of oscillations of the free surface. It is shown also that these frequencies and the coordinates of knots of the seiche modes are well described by the linear theory of long waves.

K e y w o r d s: closed basin, inclined bottom, seiche, eigen frequencies.

REFERENCES

1. B u k r e e v, V.I. Decay of an initial discontinuity of water depth in the channel with limited length [Text] / V.I. Bukreev // Applied Mechanics and Technical Physics. — 2011. — Vol. 52, N 5. — P. 17–26.
2. B u k r e e v, V.I. Seiche oscillations in a rectangular channel with the rapid expansion of the cross-sectional [Text] / V.I. Bukreev, I.V. Sturova, A.V. Chebotnikov // Applied Mechanics and Technical Physics. — 2013. — Vol. 54, N 4. — P. 22–32.
3. R a o, D.B. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: Application to lakes Ontario and Superior [Text] / D.B. Rao, D. Schwab // Philos. Trans. Roy. Soc. — London, 1976. — Vol. 281. — P. 63–96.
4. P r i g o, R.B. Linear, one-dimensional models of the surface and internal standing waves for a long and narrow lake [Text] / R.B. Prigo, T.O. Manley, B.S.H. Connell // Am. J. Phys. — 1996. — Vol. 64, N 3. — P. 288–300.

УДК 624.078.04

А.Н. ИВАНОВ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БОЛТОФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ФИБРОАРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Изложены особенности соединения элементов инженерных конструкций из полимерных композиционных материалов и основные проблемы разных типов соединений. Представлены результаты расчета несущей способности соединений. Обоснована возможность и целесообразность применения болтофрикционных соединений.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, соединения, высокопрочные болты, коэффициент трения.

Полимерные фиброармированные композиционные материалы состоят, как правило, из тонких синтетических волокон, помещенных в полимерную матрицу. Армирующие волокна здесь предназначены для восприятия внешней нагрузки, а наполнитель (матрица) для их объединения и защиты от внешних воздействий. При этом для выполнения заданных функций каждая составная часть композита обладает принципиально разными свойствами. Волокна имеют большую прочность (до 2,5 ГПа), высокий модуль упругости (до 370 ГПа) и линейную зависимость между напряжением и деформацией вплоть до разрушения [1]. Матрица же для передачи и равномерного распределения нагрузки на волокна гораздо более податливая, менее прочная и имеет площадку текучести, но хорошо сопротивляется воздействию агрессивных сред [1]. Совокупность свойств составных частей композитов и их взаимодействия друг с другом позволяет создавать принципиально новые материалы с характеристиками, превосходящими традиционные. Однако для создания эффективных конструкций из такого рода материалов необходимо обеспечить прочное и надежное соединение отдельных элементов. При этом необходимо учитывать особенности композитов, требующие особого внимания при разработке конструкций узлов. К таким особенностям можно отнести их сложную внутреннюю структуру и анизотропность. Ситуация усугубляется при работе с полимерными материалами, армированными непрерывными волокнами преимущественно в одном направлении, в которых анизотропия свойств более выражена. Именно такие композиты наиболее распространены в строительной отрасли ввиду относительно невысокой цены (благодаря полной автоматизации производства) и высокой прочности, но только вдоль волокон армирования.

Цель настоящей работы — анализ достоинств и недостатков наиболее распространенных способов соединения элементов из полимерных фиброармированных композитов и оценка перспектив использования болтофрикционных соединений.

В настоящее время в мировой строительной практике для соединения элементов из полимерных композитов применяют обычные болты и

© Иванов А.Н., 2013

клей [1]. С технологической точки зрения наиболее удобным способом соединения являются болты, так как позволяют легко и быстро монтировать конструкцию, а также достаточно просто заменять отдельные элементы в ходе ее ремонта. Однако возникает сложность обеспечения плотного прилегания болта по всей поверхности отверстия в течение полного жизненного цикла сооружения. Это связано с технологическими особенностями образования отверстий, наиболее ярко проявляющимися во многолистовых пакетах, и локальными перенапряжениями материала элементов в местах контакта с металлическим стержнем болта, в результате чего снижается жесткость всей конструкции, что было подтверждено экспериментально в лаборатории «Мосты» СГУПСа при испытаниях опытного пролетного строения из стеклопластика. Еще один недостаток соединений на обычных болтах — разная несущая способность по отношению к направлению армирующих волокон: вдоль волокон — высокая, поперек — низкая, в произвольном направлении — фактически не известная. Это создает большие трудности при проектировании конструкций, где необходимо учитывать изгибающие моменты и поперечные силы, возникающие в узлах прикрепления элементов.

Клеевые соединения лишены вышеописанных недостатков, но при этом с технологической точки зрения они более трудоемки как при монтаже, так и при замене отдельных элементов. Сложности на монтаже обусловлены обеспечением необходимого времени выдержки для набора прочности клеевого состава. После затвердевания соединение становится неразъемным, что весьма осложняет ремонт и замену отдельных частей конструкции. Несущая способность клеевых соединений одинакова во всех направлениях. Однако гипотеза равномерного распределения усилий по длине клеевого шва, на основании которой выполняются расчеты таких соединений при проектировании инженерных конструкций, не совсем точно отражает фактическую работу клеевого соединения. Выполненные автором теоретические исследования [2] показали, что запроектированное и рассчитанное традиционным методом клеевое соединение имеет ярко выраженные участки перенапряжений, возникающие по краям клеевой прослойки, и практически неработающие участки в середине. Применение податливых клеевых смесей позволяет более равномерно распределять напряжения по длине шва в отличие от жестких смесей. Это происходит благодаря перераспределению напряжений за счет вязкоупругого деформирования материала клея и как следствие более интенсивного включения в работу среднего участка. Однако податливость элементов в узловых соединениях негативно сказывается на жесткости конструкции, а применение жестких клеев приводит к их перенапряжению на концевых участках и более раннему разрушению.

Наиболее распространенными в практике современного отечественного мостостроения являются болтофрикционные соединения. В таких соединениях элементы стягиваются высокопрочными болтами и удерживаются силами трения, действующими по поверхности их контакта. Данный способ зарекомендовал себя как наиболее надежный. С момента его широкого внедрения высокопрочные болты использовались исключительно для соединения металлических элементов, так как для обеспечения высокой силы трения необходимо создать большое усилие натяжения

болтов. Для наиболее распространенного болта диаметром 22 мм нормативное усилие натяжения составляет 220 кН. Данное усилие полностью воспринимается материалом соединяемых элементов. Однонаправленно армированные полимерные композиционные материалы не могут обеспечить восприятие таких усилий из-за низкой прочности поперек волокон армирования. Поэтому на сегодняшний день в открытой печати не было найдено ни одного упоминания об исследованиях вопросов болтофрикционного соединения элементов полимерных композиционных материалов. В связи с этим в лаборатории «Мосты» СГУПСа были выполнены экспериментально-теоретические работы по изучению возможности и целесообразности применения высокопрочных болтов в соединениях полимерных композитов.

Исследовательские работы выполнялись на однонаправленно армированном стеклопластике марки СППС-240 с расчетным сопротивлением на сжатие вдоль волокон — 82,2 МПа, поперек — 26,0 МПа. При таком низком расчетном сопротивлении материала поперек армирующих волокон не возможно применить болт ∅ 22 мм. Поэтому было принято решение уменьшить диаметр крепежного элемента до 10 мм. Расчетное усилие натяжения болта М10 составило 38,24 кН. Размеров стандартной шайбы под такой болт не достаточно для распределения усилий натяжения по поверхности соединяемых элементов, так как среднее давление под шайбой превышает расчетное сопротивление материала на смятие. Распределение давления по контакту стеклопластикового элемента и металлической шайбы имеет сложный характер, на который влияют физико-механические свойства контактирующих материалов и их соотношение, а также форма и размеры шайбы. Фактический характер распределения с целью определения оптимальной формы и размеров шайбы был получен на расчетной модели болтофрикционного соединения в программном комплексе SolidWorks. В качестве материала шайбы использовалась легкодоступная сталь Ст3. Подробное описание данной задачи, принятых в ходе ее решения гипотез и полученных результатов изложено в [3].

В результате выполненных расчетов была определена форма шайбы под высокопрочные болты М10, позволяющая обеспечить требуемое усилие их натяжения и значительно снизить главные напряжения в ближайшей к ослаблению зоне при многоосном нагружении элемента за счет конической выточки со стороны взаимодействия с композитом. Разрез шайбы приведен на рис. 1.

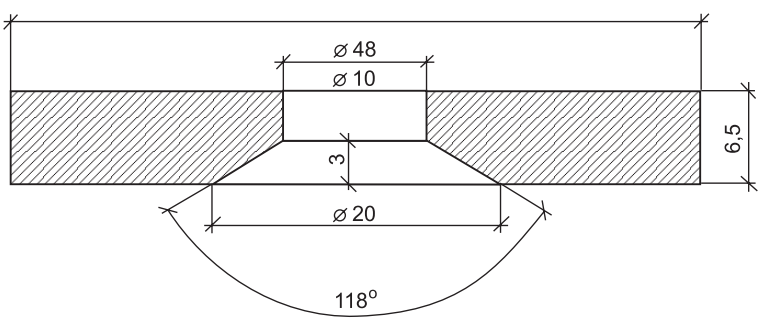


Рис. 1. Разрез шайбы с выточкой

Так как ранее никто не занимался вопросами болтофрикционного соединения композитов, коэффициенты трения при взаимодействии друг с другом большого интереса не представляли. Однако выполненная зарубежными учеными (B. Kechaou, M. Salvia, K. Benzarti и др.) экспериментальная работа по изучению влияния границы раздела фаз на диэлектрические, фрикционные и механические свойства армированных стекловолокном эпоксидных композитов, опубликованная в Journal of Composite Materials, показала, что при различной степени сцепления волокон с матрицей коэффициент трения по контакту двух элементов находится в диапазоне от 0,41 до 0,61 [4]. Данные значения свидетельствуют о высоком потенциале стеклопластиков во фрикционных соединениях, так как коэффициенты трения по соприкасающимся поверхностям металлических элементов имеют значения в диапазоне 0,35 — 0,58. Фактические значения коэффициентов трения по контактным поверхностям взаимодействия стеклопластиков марки СППС-240 друг с другом и со сталью марки Ст3 были определены экспериментально двумя независимыми способами с помощью:

1) наклонной плоскости скольжения;

2) датчика силы диагностического комплекса «Тензор МС».

Сущность эксперимента в первом способе заключалась в определении предельного угла наклона плоскости, при котором начиналось движение скользящей пластинки, во втором — непосредственное определение предельного сдвигающего усилия скользящей пластинки по горизонтальной плоскости. В качестве скользящего элемента использовался стеклопластиковый лист размерами 170×120×10 мм. В рамках эксперимента на величину коэффициента трения оценивалось влияние двух основных факторов — шероховатость контактирующих поверхностей и величина их обжатия. Шероховатость создавалась путем обработки поверхностей наждачной бумагой с различной крупностью зерен, величина обжатия — с помощью приложения к скользящему элементу грузов различной фиксированной величины. Угол наклона поверхности фиксировался при помощи электронного угломера с точностью измерения до 0,05°, сдвигающая сила — электронным датчиком с точностью измерения до 0,02 кг.

Выполненные работы показали, что шероховатость контактирующих поверхностей оказывает значительное влияние на величину коэффициента трения. Однако данная шероховатость образуется на поверхностных слоях матрицы, которая обладает довольно низкой прочностью и стойкостью к истиранию, поэтому при сильном обжатии или многократном скольжении шероховатость быстро отшлифовывается. В связи с этим к дальнейшим расчетам были приняты наименьшие значения коэффициентов трения, полученные по естественным (необработанным) поверхностям. Зависимости между величиной обжатия и коэффициентом трения в ходе эксперимента выявлено не было.

По результатам выполненного эксперимента были определены фактические значения коэффициентов трения и доверительных интервалов вероятностью 0,99:

— по контакту «стеклопластик — стеклопластик»: $\mu_{стп} = 0{,}552 \pm 0{,}010$;

— по контакту «стеклопластик — сталь»: $\mu_{ст} = 0{,}376 \pm 0{,}023$.

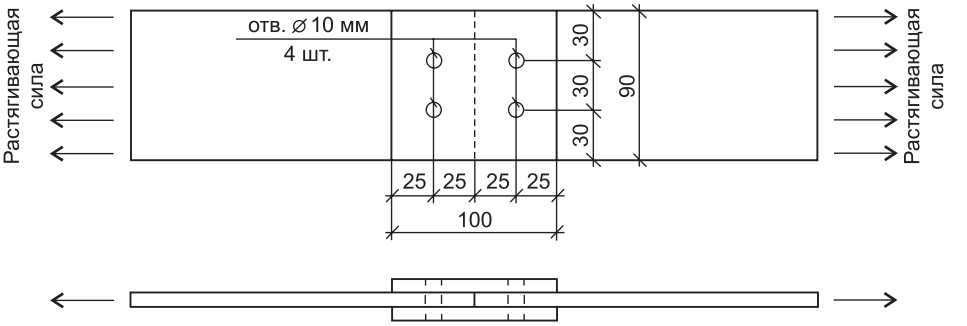


Рис. 2. Схема соединения

На основании полученных экспериментальных данных были выполнены расчеты по определению несущей способности разных типов соединений. Соединение состоит из двух стеклопластиковых элементов, перекрытых с двух сторон стеклопластиковыми фасонками. Схема соединения приведена на рис. 2.

Размеры фасонок определены по минимально допустимым размерам соединений на обычных болтах. Предельная растягивающая сила в соединении на обычных болтах ∅ 10 мм из условия обеспечения прочности стеклопластика на срез составила 9,27 кН. Для соединения на высокопрочных болтах аналогичного диаметра сила составила 33,64 кН. В клеевом соединении (полиэфирный клей ПН-1) при условии равномерного распределения касательных напряжений по длине шва максимальное значение растягивающего усилия составило 30,9 кН. При этом краевые касательные напряжения в клеевой прослойке оказались в 36 раз больше средних. Следует отметить, что можно использовать клеи с иными прочностными и жесткостными характеристиками, однако превышение краевых напряжений над средними всегда будет довольно значительным.

Выполненные исследования показали, что болтофрикционные соединения полимерных композитов вполне оправданы и при большом количестве поверхностей контакта соединяемых элементов являются наиболее целесообразными. Основным достоинством таких соединений перед клеевыми является простота замены дефектных элементов конструкции, а перед болтовыми — независимость несущей способности соединения от направления действия усилия. Поэтому в композиционных конструкциях в виде жестких плоских или пространственных ферм с плоскими элементами целесообразно использовать высокопрочные болты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. P o t y r a l a, P.B. Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http: // / upcommons.upc.edu / pfc / handle / 2099.1 / 12353, свободный.
2. И в а н о в, А.Н. К вопросу применения современных композиционных материалов в мостостроении [Текст] / А.Н. Иванов, А.Н. Яшнов / / Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. — Пенза : Приволжский Дом знаний, 2011. — С. 43–45.
3. П ы р и н о в, Б.В. Совершенствование конструктивных решений узловых соединений для конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / Б.В. Пыринов, А.Н. Яшнов, А.Н. Иванов / / Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения. — Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2012. — Вып. 28. — С. 69–75.

4. K e c h a o u, B. Role of fiber/matrix interphases on dielectric, friction, and mechanical properties of glass fiber-reinforced epoxy composites [Текст] / B. Kechaou, M. Salvia, K. Benzarti, C. Turki, Z. Fakhfakh, D. Treheux // Journal of Composite Materials. — 2012. — Vol. 46, N 2. — P. 131–144.

ИВАНОВ Артем Николаевич, асп.; E-mail: a.n.ivanov1@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 13.08.13

Ivanov Artem Nikolaevich, post-graduate student; E-mail: a.n.ivanov1@mail.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

ABOUT THE PROBLEMS OF CONNECTION ELEMENTS OF POLYMER FIBRE REINFORCED COMPOSITES

The article describes peculiarities of connections of elements of constructions made of polymer composite materials and main problems of the different types of connections. Presents the results of calculation of the bearing capacity of the connections. Justified the opportunity and expediency of application of bolted-friction joints.

K e y w o r d s: polymer composite materials, connections, high-strength bolts, coefficient of friction.

REFERENCES

1. P o t y r a l a, P.B. Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. [Electronic resource]. — Access mode: http: // upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12353, free.
2. I v a n o v, A.N. To the question of the application of modern composite materials in bridge construction [Text] / A.N. Ivanov, A.N. Yashnov // Composite building materials. Theory and practice: collection of articles in International scientific and technical conference. — Penza : Volga House of knowledge, 2011. — P. 43–45.
3. P y r i n o v, B.V. Improvement of constructive decisions of joints for structures made of composite materials [Text] / B.V. Pyrinov, A.N. Yashnov, A.N. Ivanov // Vestnik of Siberian Transport University. — Novosibirsk : Publishing house STU, 2012. — Fasc. 28. — P. 69–75.
4. K e c h a o u, B. Role of fiber/matrix interphases on dielectric, friction, and mechanical properties of glass fiber-reinforced epoxy composites [Text] / B. Kechaou, M. Salvia, K. Benzarti, C. Turki, Z. Fakhfakh, D. Treheux // Journal of Composite Materials. — 2012. — Vol. 46, N 2. — P. 131–144.

УДК 620.172.21

С.И. ГЕРАСИМОВ, В.А. ЖИЛКИН, Г.М. ВЛАСОВ,
П.И. ОСТРОМЕНСКИЙ

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАКЛАДНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Рассмотрен экспериментальный метод изучения механических свойств материалов, основанный на объединении преимуществ голографической интерферометрии и контактного способа крепления регистрирующей среды. Показана высокая эффективность предложенного подхода при определении поверхностных перемещений и деформаций.

Ключевые слова: перемещения, деформации, напряжения, интерференционно-оптический метод.

Накладные голографические интерферометры позволяют экспериментально определить скалярные функции поверхностных перемещений $U(x, y)$, $V(x, y)$, $W(x, y)$. Дальнейший переход к компонентам тензора деформаций $\varepsilon_x(x, y)$, $\varepsilon_y(x, y)$, $\gamma_{xy}(x, y)$ осуществляется либо путем численного дифференцирования экспериментально найденной информации о компонентах вектора перемещения $\Delta\vec{r}$, либо с помощью одного из известных численных методов (например, конечных элементов, граничных уравнений). В пределах упругости напряжения $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$, $\tau_{xy}(x, y)$ можно найти, используя обобщенный закон Гука.

Для оценки точности определения напряженно-деформированного состояния изделий с помощью накладных голографических интерферометров рассмотрим задачу о растяжении изотропной пластинки, ослабленной центральным круговым отверстием (задача Кирша). Сопоставим данные теоретического (аналитического и численного) и экспериментального решений. К настоящему времени для различных экспериментальных методов данная задача (имеющая замкнутое аналитическое решение) является классической тестовой задачей.

1. Теоретическое решение задачи Кирша. *Аналитическое решение*. Впервые задачу о распределении напряжений в пластинке бесконечной ширины с круговым отверстием при известных растягивающих усилиях, приложенных в срединной плоскости, решил путем подбора Г. Кирш (G. Kirsch) [1] (рис. 1). В работе [2] были получены зависимости для перемещений U и V точек поверхности такой пластины:

$$U = \frac{\sigma_0}{\mu}\left[-\frac{\xi}{2(3\xi+2\mu)}x - \frac{(\xi+2\mu)}{2(3\xi+2\mu)}\frac{R^2x}{r^2} + \frac{(r^2-R^2)(3y^2-x^2)R^2x}{4r^6}\right], \quad (1)$$

$$V = \frac{\sigma_0}{\mu}\left[\frac{\xi+\mu}{(3\xi+2\mu)}y + \frac{2(\xi+\mu)}{(3\xi+2\mu)}\frac{R^2y}{r^2} + \frac{(r^2-R^2)(y^2-3x^2)R^2y}{4r^6}\right], \quad (2)$$

где $\mu = E/2(1+\nu)$, $\xi = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$ — коэффициенты Ламе;

© Герасимов С.И., Жилкин В.А., Власов Г.М., Остроменский П.И., 2013

R — радиус отверстия;
r — радиус-вектор рассматриваемой точки;
σ_0 — растягивающее напряжение.

Компоненту $W(x, y)$ найдем, полагая равномерным распределение деформации ε_z по толщине пластинки h, которую принимаем малой по сравнению с R, но отличной от нуля величиной:

$$W = \frac{\varepsilon_z h}{2} = -\nu h(\sigma_x + \sigma_y)/2E. \quad (3)$$

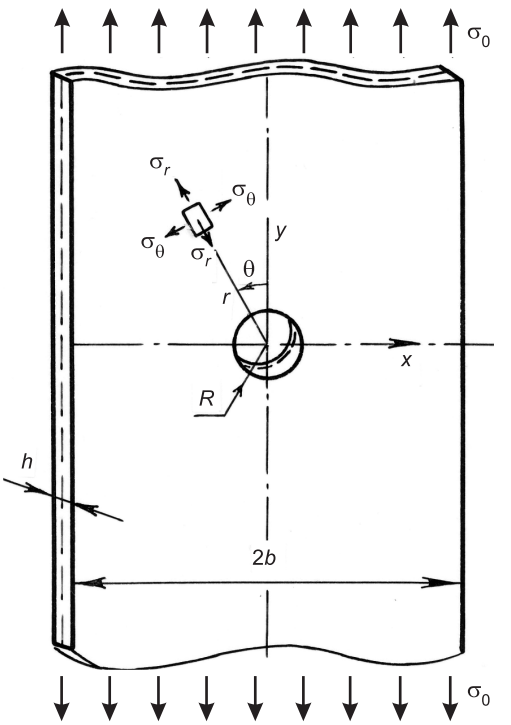


Рис. 1. Одноосное растяжение пластинки с центральным круговым отверстием

Численное решение. С помощью конечно-элементного комплекса COSMOS/M определяли перемещения точек поверхности пластины конечной ширины с центральным отверстием. При расчетах принимали σ_0 = = 65,71 МПа, $E = 7{,}1 \cdot 10^4$ МПа, ν = 0,33, $2R = D$ = 6 мм, h = = 1,06 мм. Вид конечно-элементной сетки после двух этапов ее адаптации показан на рис. 2, *б*, *г*. В рамках настоящей работы использовались различные способы (границы) адаптации. При количестве элементов ~ 4000 все они давали в дальнейшем примерно одинаковые результаты. Количественные характеристики расчетной модели: количество уравнений — 4255, количество элементов — 4023, количество узловых точек — 2129. На рис. 2 представлены для сравнения картины полей $V(x, y)$, $U(x, y)$, вычисленные по уравнениям (1), (2) и по методу конечных элементов.

Правомочность разрешающего уравнения метода голографической интерферометрии была оценена на модельной интерферограмме, имитирующей картину интерференционных полос, получаемую с помощью накладного голографического интерферометра [3]. Использовалось уравнение вида:

$$V\sin\gamma + W(n + \sqrt{n^2 - \sin^2\gamma}) = (N + 1/2)\lambda. \quad (4)$$

Полагая $\gamma = 20°$ и подставляя исходные данные в уравнения (2)–(4), получили расчетную картину, приведенную на рис. 3, *а*. Для сравнения на рис. 3, *б* представлена фотография реальной интерференционной картины, полученной при испытании пластин из сплава Д16Т (экспериментальное решение задачи подробно изложено в [4]). Условия проведения эксперимента были идентичны исходным данным при получении модельной интерферограммы. Сходство картин хорошее. Отметим, что светлым полосам на модельной интерферограмме соответствуют темные полосы реальной интерферограммы.

2. Экспериментальное решение задачи Кирша. Образцы для испытаний (см. рис. 1) были изготовлены из листового материала Д16Т в

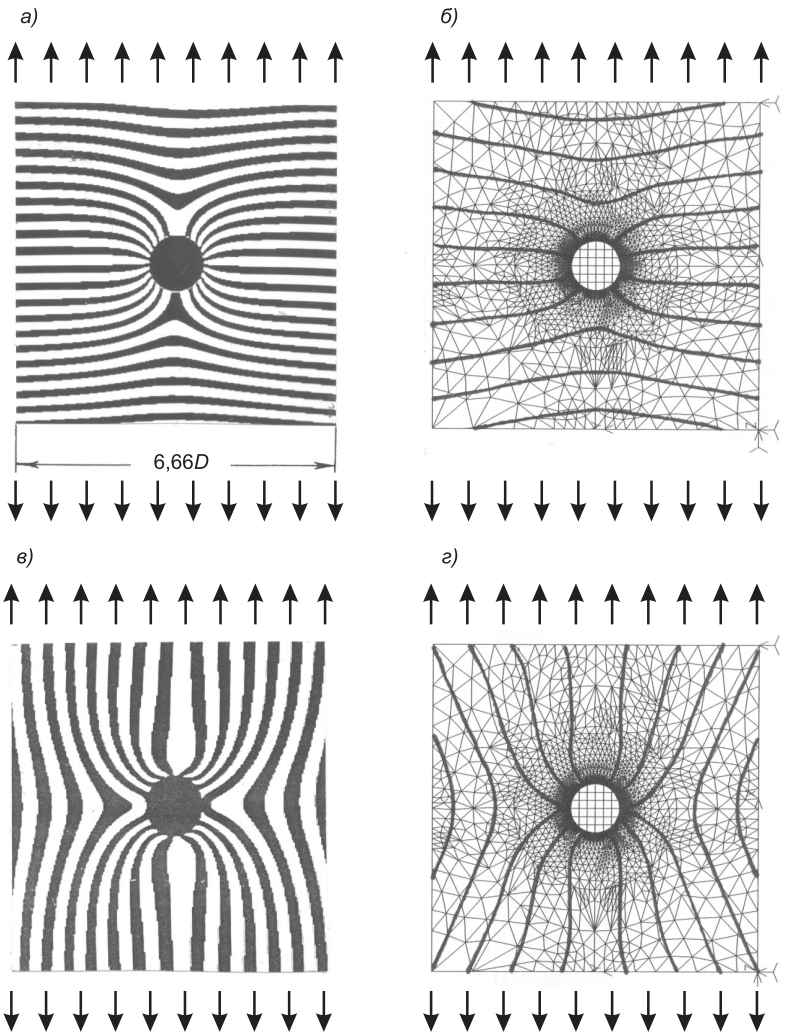


Рис. 2. Поля перемещений V (*а*, *б*) и U (*в*, *г*)

а — бинарная картина, цена полосы $\eta_V = 1{,}6$ мкм; *б* — результаты расчета МКЭ, цена полосы $\eta_V = 4{,}1$ мкм; *в* — бинарная картина, цена полосы $\eta_U = 0{,}8$ мкм; *г* — результаты расчета МКЭ, $\eta_U = 1{,}5$ мкм

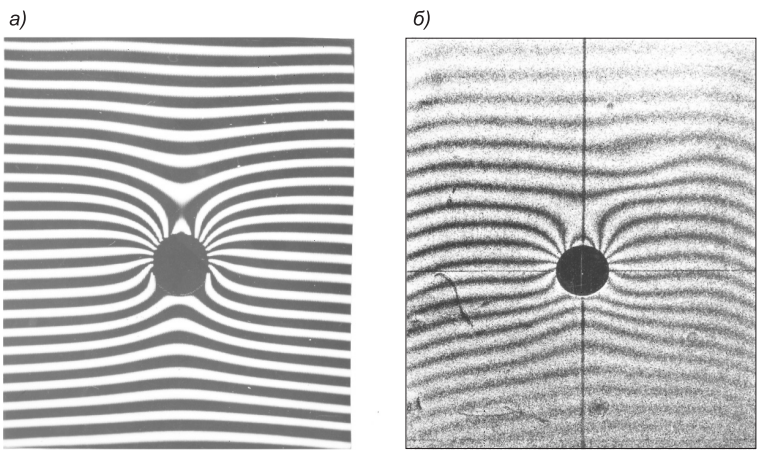


Рис. 3. Фотографии интерференционных полос при решении задачи Кирша

состоянии поставки. Каждый образец вырезался из листа таким образом, чтобы его продольная ось была перпендикулярна направлению проката. Геометрические размеры составляли: R = 3 мм, $2b$ = 40,2 мм, h = 1,06 мм. Обработка производилась на металлорежущих станках, центральное отверстие сверлилось с помощью кондуктора, что обеспечивало отклонение центра отверстия от продольной оси образца не более чем на ±0,05 мм. Окончательная обработка отверстия выполнялась разверткой. Исследуемая часть поверхности образца еще до сверления отверстия обрабатывалась мелкозернистой наждачной бумагой.

Для крепления фотопластинки ПЭ-2 использовали синтетический каучук СКТН, отверждаемый катализатором К-18 (смесь 12 г СКТН и 0,9 г К-18). Характеристики каучука : $E \sim 1$ МПа, n = 1,40. Показатель преломления каучука n определяли на рефрактометре ИРФ-23 в двух состояниях: недополимеризованном и полностью полимеризованном. Различия в показаниях рефрактометра незначительные (n = 1,40125 и 1,40513 соответственно)[1].

Нагружение образца осуществляли на прессе ДМ-30М. Растягивающее напряжение $\sigma_{y\infty}$ = 65,71 МПа. Запись двухэкспозиционной голографической интерферограммы производилась по оптической схеме, обеспечивающей освещение поверхности образца по нормали. Регистрация восстановленного голограммой изображения осуществлялась оптической системой с длиннофокусным объективом, что обеспечивало необходимую глубину резкости. Располагая регистрирующую камеру дважды в плоскости *xoz* (α_1 = 63°, α_2 = 117°) и дважды в плоскости *yoz* (β_3 = 76,8°, β_4 = 103,2°), наблюдали картины полос, фотографии которых приведены на рис. 4. Полученные изображения обрабатывали с целью определения центров интерференционных полос[2]. Съем информации со стилизованной (скелетон) картины полос заключался в определении полярного угла θ_i точек пересечения интерференционных полос с концентрическими окружностями, нанесенными с шагом R, 1,25R, 1,5R, 1,75R, ..., 4R. Расчет полей перемещений, деформаций и напряжений производился по оригинальным программам[3]. Разрешающими уравнениями при расчете являлись зависимости (5)–(8) и обобщенный закон Гука:

$$V = \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2\cos\beta_1}, \tag{5}$$

$$U = \frac{(N_3 - N_4)\lambda}{2\cos\alpha_3}, \tag{6}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\lambda}{2\sin\gamma_3}\left(\frac{\partial N_3}{\partial x} - \frac{\partial N_4}{\partial x}\right), \tag{7}$$

[1] Герасимов С.И. Исследование циклической стабильности прозрачного эластомера методом голографической интерферометрии // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 6. С. 101–104.

[2] Жилкин В.А., Герасимов С.И., Сарнадский В.Н. Оценка точности определения перемещений с помощью накладного голографического интерферометра // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62, вып. 6. С. 1385–1389.

[3] Zhilkin V.A., Gerasimov S.I., Kosen'uk V.K.Residual stress determination through the combined use of holographic interferometry and the boundary integral equations method // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2342. P. 326–331.

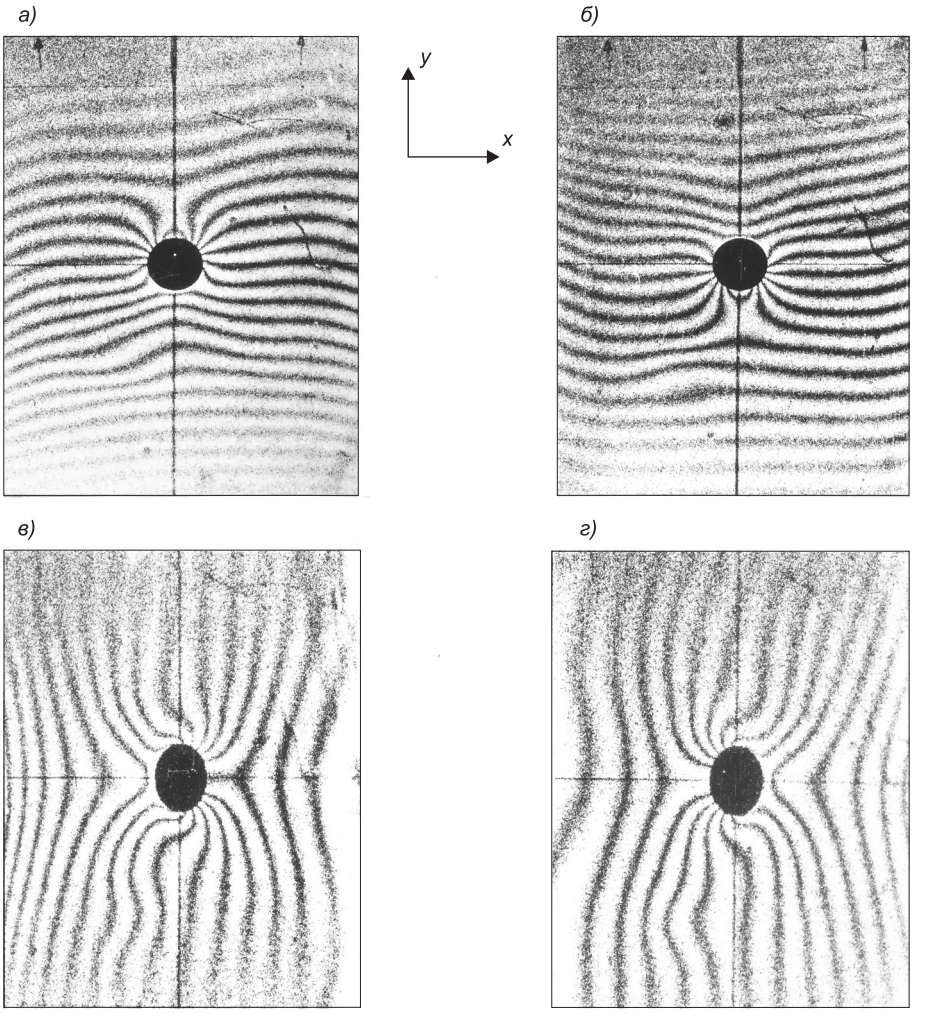


Рис. 4. Фотографии картин полос при упругом деформировании материала изделия
а — $\beta_3 = 76{,}8°$; *б* — $\beta_4 = 103{,}2°$; *в* — $\alpha_1 = 63°$; *г* — $\alpha_2 = 117°$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\lambda}{2\sin\gamma_1}\left(\frac{\partial N_1}{\partial y} - \frac{\partial N_2}{\partial y}\right). \qquad (8)$$

Для проверки точности результатов, получаемых при помощи голографического накладного интерферометра, экспериментальные данные были сопоставлены с расчетными.

Перемещения U и V рассчитывали по уравнениям (1) и (2), которые для контура отверстия принимают вид:

$$U = -3{,}6\cos\theta, \qquad (9)$$

$$V = 10{,}8\sin\theta. \qquad (10)$$

Расхождение экспериментальных результатов с аналитическим решением (рис. 5) может быть вызвано неточным заданием σ_0. Качественно функции $U_{\text{эксп}}$, $U_{\text{анал}}$, $U_{\text{МКЭ}}$ и $V_{\text{эксп}}$, $V_{\text{анал}}$, $V_{\text{МКЭ}}$ совпадают достаточно хорошо. По сравнению с аналитическим решением данные эксперимента оказались заниженными примерно в 1,06 раза.

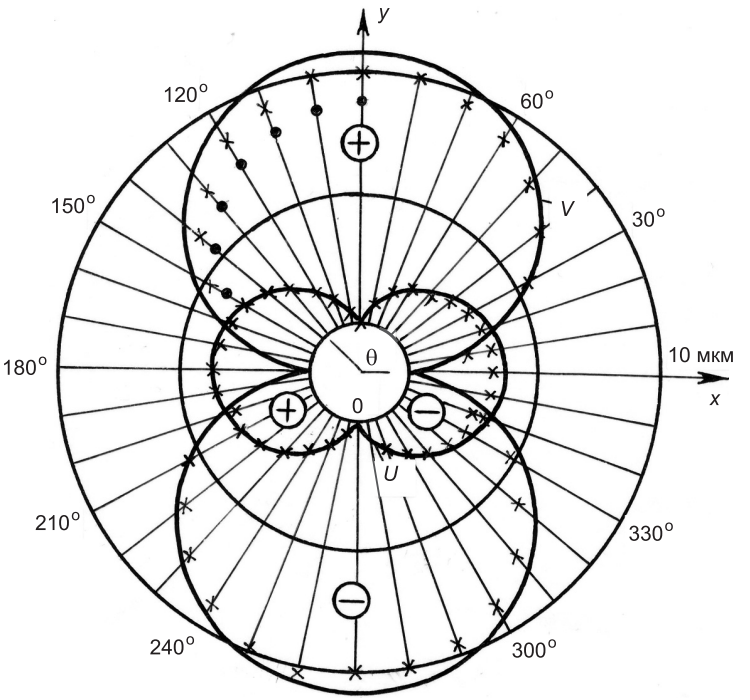


Рис. 5. Распределение перемещений U и V по контуру отверстия

При решении данной тестовой задачи поля деформаций ε_x, ε_y, γ_{xy} получали, используя два способа обработки экспериментальной информации. Первый способ заключался в аппроксимации полей перемещения U и V с помощью кольцевых статически неопределимых балок и последующем дифференцировании функций $U(x, y)$, $V(x, y)$ по направлениям x и y. При этом контролировались условия равновесия по каждому кольцу (всего было 13 колец). Во втором способе информация о картине интерференционных полос задавалась по одному кольцу, отстоящему от контура отверстия на расстоянии трех радиусов[3]. Затем при помощи граничных интегральных уравнений решались уравнения неразрывности и равновесия и определялось напряженно-деформированное состояние образца внутри области $R < r < 4R$ (r — радиус-вектор точек пластины с отверстием радиуса R). Оба способа дали примерно одинаковые результаты (рис. 6, *а*, *б*). На этих рисунках представлены деформации ε_x и ε_y в двух сечениях пластины с отверстием, нормированные на деформацию растяжения $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$. Неудовлетворительная точность получена в определении деформации ε_y вдоль оси y при использовании кольцевой балочной аппроксимации (см. рис. 6, *б*). Такой результат можно объяснить неточностью граничных условий (особенно по первым производным) вдоль контура отверстия (см. рис. 4, *а*, *б*). Кроме того, в этой области находится особая точка — «сток» или «исток» интерференционных полос, где функция порядковых номеров $N(x, y)$ достигает экстремума и где трудно определить конкретное значение $N(x, y)$ (оно будет дробным)[4].

[4] Герасимов С.И., Жилкин В.А. Способ определения дробного порядка интерференционной полосы в накладном голографическом интерферометре // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64, вып. 4. С. 897–902.

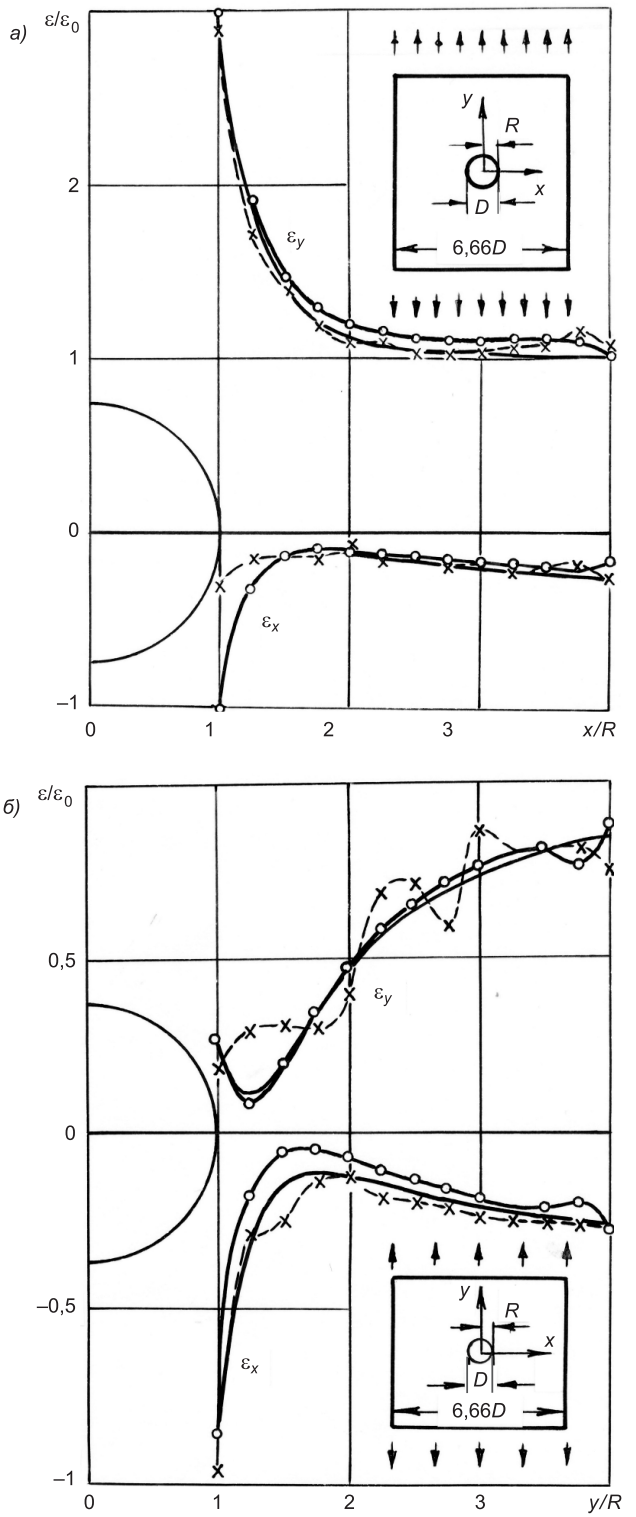


Рис. 6. Нормированные деформации ε_x и ε_y в опасном сечении (*а*) и вдоль вертикальной оси *y* образца (*б*)

— аналитическое решение, × кольцевая балочная аппроксимация, ○ граничные интегральные уравнения

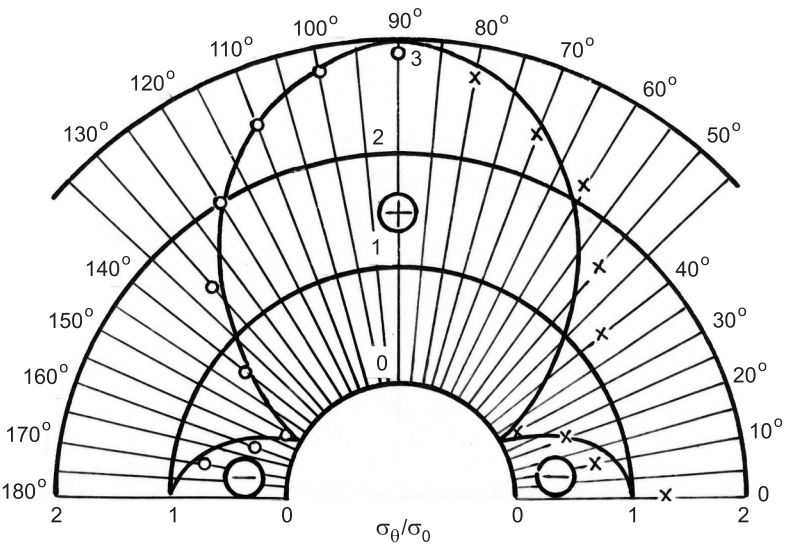


Рис. 7. Распределение нормированного напряжения σ_θ по контуру отверстия

Усл. обозначения см. на рис. 6

Коэффициент концентрации деформаций[5] в наиболее нагруженной точке образца k_ε = 3,08. Нами получены результаты $k_{\varepsilon\circ} = 3{,}0$, $k_{\varepsilon\times}$ = 2,9 (см. рис. 6, *а*). Такие заниженные значения k_ε объясняются неполным соответствием условий эксперимента расчетным данным[5, 6]. В нашем случае h/R = 0,35 и вблизи контура отверстия реализуется не плоское, а объемное напряженное состояние, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента концентрации деформаций, в работе[6] предполагалось $h/R \to 0$.

По найденным деформациям ε_x, ε_y, γ_{xy} в соответствии с обобщенным законом Гука вычислялись напряжения σ_x, σ_y, τ_{xy}, σ_θ. Вследствие того, что деформации были определены с погрешностью, максимальная ошибка в вычислении напряжений получается еще большей (примерно в два раза). На рис. 7, 8 представлены эпюры напряжений, найденные по контуру отверстия и вдоль координатных осей x, y. Так же как и в случае деформаций, неудовлетворительный результат получен для компоненты σ_y вдоль оси y (рис. 8, *б*).

С целью качественной оценки полученных полей перемещений на рис. 9 представлены результаты расшифровки интерференционных картин. Сопоставление соответствующих полей, вычисленных по формулам (1), (2) и найденных экспериментально, позволяет говорить о возможности определения напряженно-деформированного состояния образцов с допустимой для инженерных расчетов точностью.

Анализ результатов, приведенных на рис. 6 и 8, показывает, что максимальная погрешность в определении ε_y и σ_y возникает вблизи контура

[5] Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность. М.: Мир, 1977. 302 с.

[6] Howland R.C.J. On the stresses in the neighbourhood of a circular hole in a strip under tension // Philos. Transac. Roy. Soc. (London). 1929. Vol. 229, ser. A. P. 49–86.

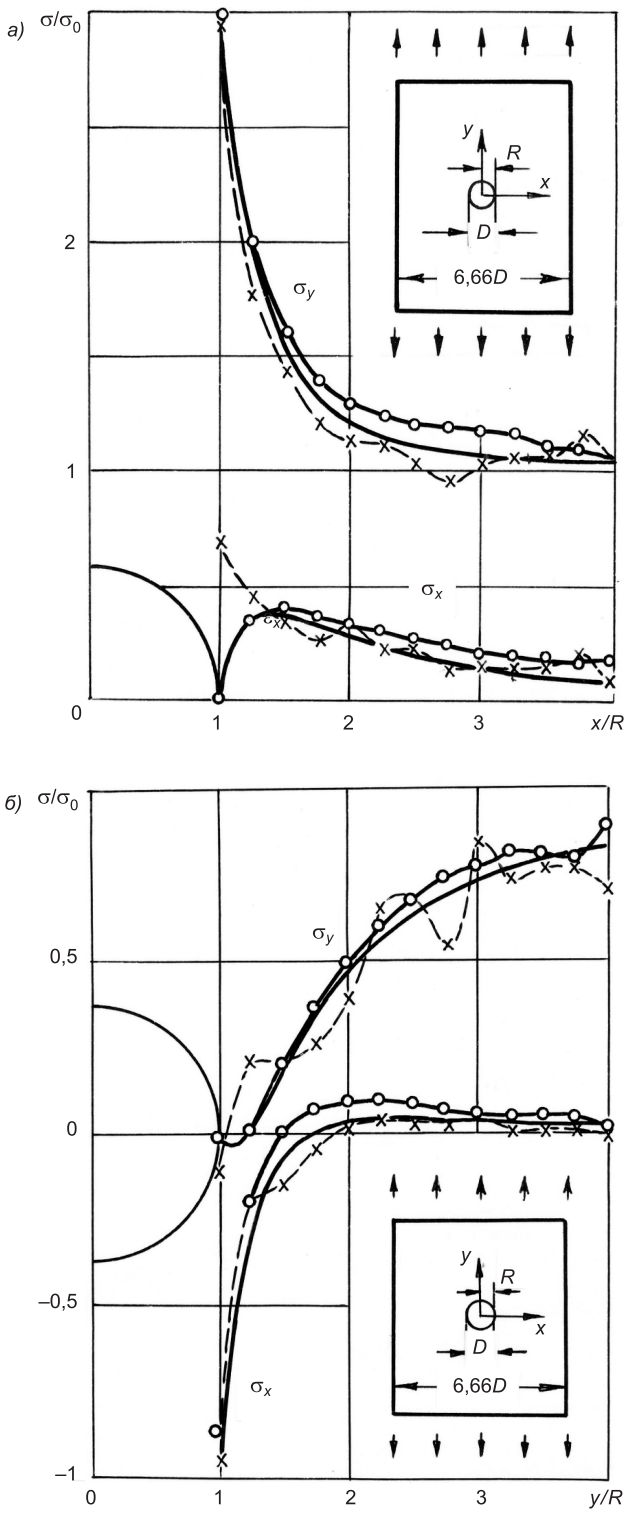


Рис. 8. Распределение нормированных напряжений σ_x и σ_y в опасном сечении (*а*) и вдоль продольной оси *y* пластины с отверстием (*б*)

Усл. обозначения см. на рис. 6

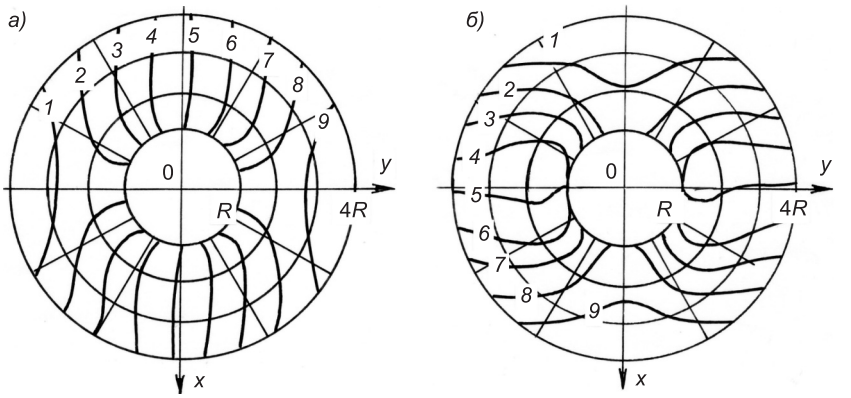


Рис. 9. Поля перемещений, найденные экспериментально
а — поле V, шаг полос η_V = 3,33 мкм; *б* — поле U, шаг полос η_U = 0,98 мкм

отверстия вдоль продольной оси образца. Для увеличения точности определения порядков интерференционных полос в этой зоне необходимо воспользоваться способом компенсации[4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kirsch, G. Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Vereines deutscher [Текст] / G. Kirsch // Ingenieure. — 1898. — Bd. 42, N 29. — S. 797–807.
2. Тимошенко, С.П. Прочность и колебания элементов конструкций [Текст] / С.П. Тимошенко. — М. : Наука, 1975. — 704 с.
3. Жилкин, В.А. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного голографического интерферометра [Текст] / В.А. Жилкин, С.И. Герасимов // Журнал технической физики. — 1982. — Т. 52, № 10. — С. 2079–2085.
4. Герасимов, С.И. Исследование плоских упруго-пластических задач методом голографической интерферометрии [Текст] / С.И. Герасимов, В.А. Жилкин // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1988. — № 2. — С. 107–115.

ГЕРАСИМОВ Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 912267@gmail.com
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
ЖИЛКИН Виталий Афанасьевич, д-р техн. наук, проф.
Челябинская государственная агро-инженерная академия
ВЛАСОВ Георгий Михайлович, д-р техн. наук, проф.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
ОСТРОМЕНСКИЙ Петр Иванович, д-р техн. наук, проф.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 12.08.13

Gerasimov Sergey Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 912267@gmail.com, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Zhilkin Vitaliy Afanasievich, doctor of technical sciences, professor, Chelyabinsk State Agro-engineering Academy, Russia
Vlasov Georgiy Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Ostromensky Petr Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

EVALUATION OF STRAIN-STRESS DETERMINATION ACCURACY OF STRUCTURAL ELEMENTS BY A SUPERPOSED HOLOGRAPHIC INTERFEROMETER

Experimental method for analysis of the mechanical properties of materials is proposed. The method combines the advantages of holographic interferometry and the contact method of fixing a recording medium. The proposed approach is shown to be effective in determining the surface displacements and strains.

K e y w o r d s: displacements, strains, stresses, interference-optical method.

REFERENCES

1. K i r s c h, G. Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Vereines deutscher [Text] / G. Kirsch // Ingenieure. — 1898. — Bd. 42, N 29. — S. 797–807.
2. T i m o s h e n k o, S.P. Strength and vibration of structural elements [Text] / S.P. Timoshenko. — M. : Nauka, 1975. — 704 p.
3. Z h i l k i n, V.A. Study of deformed samples using an interferometer attached to the sample [Text] / V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov // Sov. Phys. Tech. Phys. — 1982. — Vol. 52, N 10. — P. 2079–2085.
4. G e r a s i m o v, S.I. Investigation of plane elastic-plastic problems by the holographic interferometry method [Text] / S.I. Gerasimov, V.A. Zhilkin // J. Appl. Mech. Tech. Phys. (USA) — 1988. — N 2. — P. 107–115.