

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

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

Редакционная коллегия:

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

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

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 18.12.15. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 322

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Ерофеев В.Т., Старцев О.В., Смирнов И.В., Максимова И.Н., Ерастов В.В., Махоньков А.Ю. Ударная прочность эпоксидных полимербетонов 5

Рахимбаев Ш.М., Половнева А.В., Аниканова Т.В. Влияние новых добавок электролитов на свойства мелкозернистого бетона 12

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Варсегова Е.В., Посохин В.Н. Об условиях предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом 18

Костин В.И. Регулирование насосов и вентиляторов в системах теплоснабжения и климатизации ... 23

Гвоздков А.Н. Тепло- и влагообмен в системе «воздух – вода» с позиции теории потенциала влажности 31

Коваленко К.А., Пушкарева Г.И. Сорбционное удаление ионов тяжелых металлов из водных сред с использованием природного оксида марганца 41

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Абраменков Э.А., Кутумов А.А., Корнеев А.Н., Абраменков Д.Э. Дроссельный пневмударный механизм с функцией управления перепуском в камеру холостого хода и его физико-математическое описание 47

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Хунин Ян, Цзяньхао Чэнь, Хунчжоу Чжао, Тинця Гао, Сяюнь Цай, Цзяньвань Чэнь. Взрыв газа в Гаосюне – подробный анализ трагедии в портовом городе (оригинал на английском языке) 57

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Калинич И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. Теплоотдача от поверхности нагретых материалов при конвейерной транспортировке 74

Матус Е.П., Пичугин А.П. Трещиностойкость сталефибробетона с малым процентом армирования 85

Хархардин А.Н. Топологические свойства крупномасштабных структур 91

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

Рудзей Г.Ф., Адегова Л.А., Дубинин В.В. Влияние коррозионной среды на изменение усталостной долговечности образцов с отверстием после упрочняющих технологий 103

УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в 2015 г. (с № 1 по № 12) 109

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 11–12 (683–684)
November–December 2015

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

Editorial Board:

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

CONTENTS

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Erofeev V.T., Startsev O.V., Smirnov I.V., Maksimova I.N., Erastov V.V., Makhon'kov A.Yu. Epoxy impact resistance of polymer concrete 5

Rakhimbayev S.M., Polovneva A.V., Anikanova T.V. Influence of new additives electrolytes on fine-grained concrete properties 12

SANITARY ENGINEERING

Varsegova E.V., Posokhin V.N. About conditions of limit catching of the flow hazardous substance by the local suction 18

Kostin V.I. Regulation of pumps and ventilators in systems of heat supply and klimatization 23

Gvozdkov A.N. Heat and mass transfer in the system «air–water» from the standpoint of the humidity potential theory 31

Kovalenko K.A., Pushkareva G.I. Removal of heavy metal ions from aqueous media by adsorption on natural manganese oxide 41

BUILDING AND ROAD MACHINES

Abramenkov E.A., Kutunov A.A., Korneev A.N.,

Abramenkov D.E. Throttle mechanism pneumoshock control function bypass in the chamber idle and its physical and mathematical description	47
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Yui-Ning Yang, Jen-How Chen, Home-Jo Chiu, Ting-Jia Kao, Hsiao-Yun Tsai, Jenq-Renn Chen. Kaohsiung vapour explosion – a detailed analysis of the tragedy in the harbour city	57
SCIENTIFIC AND METHODOICAL SECTION	
Kalinich I.V., Smol'nikov G.V., Sakash G.V. Heat transfer from the surface of heated materials during conveyer transportation	74
Matus E.P., Pichugin A.P. Fracture toughness of steel fiber reinforced concrete with a low percentage of reinforcement	85
Kharkhardin A.N. Topological properties of large-scale structures	91
IN HIGHER SCHOOL LABS	
Rudzey G.F., Adegova L.A., Dubinin V.V. Impact on change corrosive environments fatigue life of samples with holes after strengthening technology	103
List of articles in 2015 (No. 1–12)	109

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.342

**В.Т. ЕРОФЕЕВ, О.В. СТАРЦЕВ, И.В. СМИРНОВ, И.Н. МАКСИМОВА,
В.В. ЕРАСТОВ, А.Ю. МАХОНЬКОВ**

УДАРНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРБЕТОНОВ

Статья посвящена исследованию ударной прочности ненаполненных, мало- и высоконаполненных полимерных материалов. В качестве связующего использована эпоксидная смола, а в качестве наполнителя – портландцемент, гранитный щебень, кирпичный бой. Испытания проведены методом ASTM D 7136. Экспериментально установлено, что снижение максимальной контактной силы каркасных композитов после натурального экспонирования сопровождается увеличением пластичности, способствующей поглощению энергии при механических воздействиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ударная прочность, полимербетоны, полимерные связующие.

Полимерные покрытия во время эксплуатации зачастую подвергаются воздействию достаточно сложного комплекса механических нагрузок, которые могут быть не только статическими, но и динамическими. Поведение полимера при механических воздействиях зависит от того, в каком состоянии он находится. Один и тот же полимер может быть в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем состояниях [1–3].

Релаксационная природа механических свойств полимеров проявляется в закономерностях изменения прочности, которая существенно зависит от скорости деформирования. При длительно действующих напряжениях возникает пластическая деформация веществ, обладающих большой вязкостью. При высоких скоростях нагружения (ударных нагрузках) релаксационные процессы не успевают развиваться заметным образом даже в относительно маловязких системах. Тело реагирует на внешнее воздействие как упругое [4–6].

В работе исследована устойчивость к ударному воздействию ненаполненных, мало- и высоконаполненных полимерных материалов, предназначенных для изготовления антикоррозионных защитных покрытий и каркасных полимербетонных полов. Была поставлена задача оценить, как изменяется устойчивость полимерных систем к ударному воздействию в условиях натурной климатической экспозиции.

Исследуемые материалы и методика ударных испытаний. Для испытаний использовались образцы на основе эпоксидного связующего с различными видами наполнителя и каркасных композитов. Образцы имели форму прямоугольной пластины, размером 100 × 150 мм и толщиной 10 мм. Составы связующего отличались процентным содержанием в них растворителя и наполнителя, в качестве которых применялись эпоксидная смола марки ЭД-20,

отвердитель – полиэтиленполиамин, растворитель – ацетон и наполнитель – портландцемент. В качестве заполнителя для каркасных композитов использовали гранитный щебень и кирпичный бой размером 2,5–5 мм. Композиты формировались в два этапа: сначала изготавливали каркас путем склеивания между собой зерен заполнителя, после чего пропитывали полимерной матрицей пустоты между зёрнами заполнителя [7–10]. Составы образцов приведены в табл. 1.

Ударные повреждения на образцы наносились по методу ASTM D 7136¹.

Таблица 1. Содержание массовых частей в исследуемых составах

Компонент	1	2	3	4		5	
				каркас	матрица	каркас	матрица
Эпоксидная смола	100	100	100	100	100	100	100
Полиэтиленполиамин	10	10	10	10	10	10	10
Ацетон	–	10	–	–	10	–	10
Портландцемент	–	–	100	–	–	–	–
Гранитный щебень	–	–	–	2000	–	–	–
Кирпичный бой	–	–	–	–	–	1000	–

Для нанесения удара использовался вертикальный копер фирмы Coesfeld, оснащенный полусферическим бойком массой 2,3 кг с диаметром наконечника 10 мм. Высота падения ударного бойка составляла 50 мм. Датчик скорости его движения был установлен на расстоянии от 3 до 6 мм над поверхностью образца. Для предотвращения повторного соприкосновения ударника с образцом копер оборудован системой антиотскока.

В процессе испытаний фиксировались глубина отпечатка, размеры и площадь зоны повреждения, F_1 , F_{\max} , E_1 , E_{\max} .

Энергию удара E_i , Дж, определяли по формуле

$$E_i = C_E h, \quad (1)$$

где $C_E = 6,7$ – коэффициент нормирования энергии удара на толщину образца, Дж/мм;

h – толщина образца, мм.

В момент удара регистрировалась зависимость контактной силы от времени. Пример такой зависимости приведен на рис. 1.

Из зависимости контактной силы от времени была определена величина импульса ударника J , при котором происходило разрушение образца:

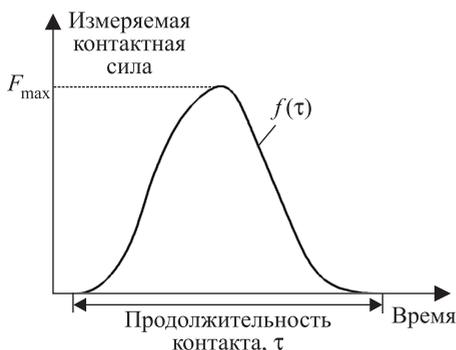


Рис. 1. Модельная кривая зависимости силы ударника от времени

$$J = F_{\max} \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau, \quad (2)$$

¹ ASTM D 7136 / D 7136M-07. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.

где F_{\max} – максимальная сила, зафиксированная в процессе разрушения образца;

τ – продолжительность контакта ударника с образцом.

Экспериментальная часть. Изготовленные образцы были разделены на две части. Первая часть образцов была выставлена на натурную климатическую экспозицию согласно ГОСТ 9.906–83 «Единая система защиты от коррозии и старения. Станции климатические испытательные. Общие требования» Геленджикского центра климатических испытаний им. Г.В. Акимова. Было проверено влияние трех видов натурной климатической экспозиции: под навесом, на открытой площадке, с погружением в морскую воду. Длительность натурной экспозиции составляла год. Вторая часть образцов (контрольные) хранилась в течение года в комнатных условиях г. Саранска при температуре от 20 до 25 °С и относительной влажности от 35 до 60 %. После завершения натурной экспозиции на все образцы наносились ударные повреждения с энергией удара, нормированной на толщину образца согласно ASTM D 7136 (метод А).

Примеры кривых зависимости контактной силы удара от времени для образцов с различными условиями экспозиции приведены на рис. 2, 3 и в табл. 2.

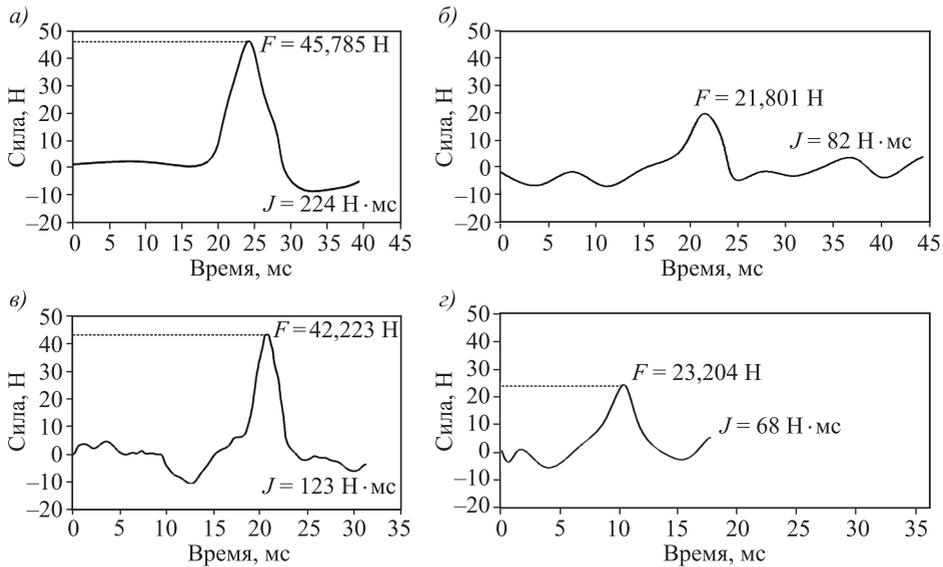


Рис. 2. Зависимость изменения силы ударника от времени при испытании образцов состава № 1

а – контрольный образец; б – после экспозиции на открытой площадке; в – под навесом; г – в морской воде

Обсуждение результатов. Результаты испытаний на ударную прочность показывают существенное изменение физико-механических свойств полимербетонов после года натурной климатической экспозиции. Общей закономерностью является снижение максимальной контактной силы и импульса ударника после натурной экспозиции. Так для состава № 1, после экспозиции на открытой площадке максимальная контактная сила уменьшается на 52 %. Для состава № 2 наибольшее изменение этого показателя наблюдалось для образца, находившегося в морской воде. Уменьшение составило

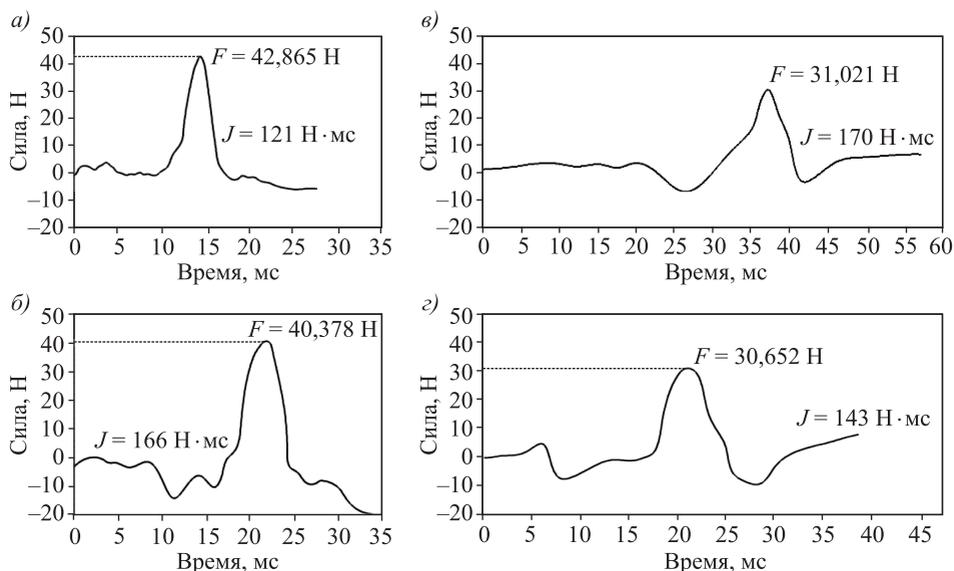


Рис. 3. Зависимости изменения силы ударника от времени при испытании образцов состава № 4

а – контрольный образец; б – после экспозиции на открытой площадке; в – под навесом; г – в морской воде

Таблица 2. Влияние условий экспонирования на характеристики ударных повреждений полимербетонов

№ состава	Максимальная контактная сила, Н				Продолжительность контакта, мс			
	контрольный образец	после экспозиции			контрольный образец	после экспозиции		
		на открытой площадке	под навесом	в морской воде		на открытой площадке	под навесом	в морской воде
1	45,8	21,8	42,2	23,2	13,1	9,8	7,9	7,6
2	23,7	7,4	20,4	6,3	9,5	2,5	5,5	3,1
3	20,9	6,0	18,1	11,7	12,4	3,8	9,8	6,1
4	42,9	31,0	40,4	30,7	7,3	11,1	6,9	8,5
5	43,4	17,4	36,6	41,8	16,6	8,4	11,8	10,9

73 %. Максимальное изменение F_{\max} для состава № 3 отмечается после экспозиции на открытой площадке.

Следует отметить, что каркасные композиты, изготовленные на основе гранитного щебня (состав № 4), показывают наименьшее изменение в прочностных свойствах: при экспозиции под навесом максимальная контактная сила уменьшилась на 6 %, а при экспозиции в морской воде – на 28 %.

В табл. 3 приведены значения импульса ударника, при котором происходило разрушение образца для различных составов, использованных в эксперименте.

Анализ результатов эксперимента показывает, что составы № 1–3 наряду с уменьшением максимальной контактной силы разрушаются при меньших значениях импульса ударника. Например, для состава № 1, экспонированного в морской воде, разрушающая сила снизилась в 2 раза, а величина импульса – в 3,3 раза.

Таблица 3. Влияние условий экспонирования на величину импульса ударника, при котором происходило разрушение полимербетонов, Н · мс

№ состава	Контрольные образцы	После экспозиции		
		на открытой площадке	под навесом	в морской воде
1	224	82	123	68
2	70	13	35	11
3	145	10	114	62
4	121	170	166	143
5	122	77	212	216

Для состава № 4 на основе каркасного полимербетона экспозиция в морской воде в течение года привела к снижению разрушающей силы в 1,4 раза и увеличению импульса, приведшего к разрушению образца, – в 1,2 раза. Для образцов, экспонированных на открытой площадке, величина импульса возросла в 1,4 раза.

Выводы. 1. После экспонирования полимербетонов в природных климатических условиях умеренно теплого климата Геленджика происходит ухудшение их стойкости к механическим ударным нагрузкам.

2. Изменения максимальной контактной силы и ударного импульса разрушения зависят от состава полимербетонов и условий природного экспонирования.

3. Снижение максимальной контактной силы каркасных композитов после природного экспонирования сопровождается увеличением пластичности, способствующей поглощению энергии при механических воздействиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. СПб., 2012. 476 с.
2. Волгина Е.В., Казначеев С.В., Ерофеев В.Т., Кретьева В.М. Деформативность винилэфирных композитов // Изв. Юго-Зап. гос. ун-та. 2012. № 6 (45). С. 82–90.
3. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н. Полимерные композиционные материалы. Саранск, 2013. 480 с.
4. Ерофеев В.Т., Волгина Е.В., Казначеев С.В., Богатов А.Д., Ерыкалина И.В. Оптимизация содержания компонентов винилэфирных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 22–31.
5. Ерофеев В.Т., Волгина Е.В., Ерыкалина И.В., Казначеев С.В. Оптимизация содержания отверждающих компонентов в винилэфирных композитах // Изв. Юго-Зап. гос. ун-та. 2011. № 5–2 (38). С. 427–433.
6. Ерофеев В.Т., Соколова Ю.А., Богатов А.Д., Морозов Е.А., Митина Е.А., Калгин Ю.И., Черушова Н.В., Кондакова И.Е., Ерофеева А.А., Яшова Л.С., Миронов А.А., Губанов Д.А. Эпоксидные полимербетоны, модифицированные нефтяными битумами, каменноугольной и карбамидной смолами и аминокпроизводными соединениями. М.: Изд-во АСВ, 2008. 244 с.
7. Твердохлебов Д.А., Тармосин К.В., Богатов А.Д., Леснов В.В., Конышин А.А., Казначеев С.В. Фурфуrolацетонoвые композиты каркасной структуры. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 220 с.

8. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности (основы теории, методы расчета и технологическое проектирование). М.: Изд-во АСВ, 2008. 320 с.
9. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Калгин Ю.И. Дорожные битумо-минеральные материалы на основе модифицированных битумов (технология, свойства, долговечность). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 276 с.
10. Ерофеев В.Т., Завалишин Е.В., Богатов А.Д., Асташов А.М., Коротчаев С.А., Никитин Л.В. Силикатные и полимерсиликатные композиты каркасной структуры роликового формования. М.: Изд-во АСВ, 2009. 158 с.

Ерофеев Владимир Трофимович, д-р техн. наук, проф.

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

Старцев Олег Владимирович, д-р техн. наук

Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова ВИАМ

Смирнов Игорь Витальевич, асп.

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

Максимова Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Ерастов Валентин Викторович, канд. техн. наук, доц.

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

Махоньков Алексей Юрьевич, инж.

Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова ВИАМ

Получено 29.10.15

Erofeev Vladamir Trofimovich, DSc, professor, Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

Startsev Oleg Vladimirovich, DSc, Gelendzhik Center environmental tests named after G.V. Akimov VIAM, Russia

Smirnov Igor' Vital'evich, post-graduate student, Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

Maksimova Irina Nikolaevna, PhD, ass. professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Erastov Valentin Viktorovich, PhD, ass. professor, Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

Makhon'kov Aleksey Jur'evich, engineer, Gelendzhik Center environmental tests named after G.V. Akimov VIAM, Russia

EPOXY IMPACT RESISTANCE OF POLYMER CONCRETE

The article investigates the impact strength of unfilled, small and highly filled polymeric materials. The binder used in the epoxy resin, and as a filler – Portland cement, crushed granite, brick fight. Tests conducted by ASTM D 7136. It is experimentally established that the reduction in the maximum contact force frame full-scale composites after exposure is accompanied by an increase in plasticity conducive to the absorption of energy in the mechanical effects.

Key words: impact resistance, polymer, polymeric binders.

REFERENCES

1. Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Kozomazov V.N. Fizika i sinergetika dispersno-neuporyadochennykh kondensirovannykh kompozitnykh system [Physics and Synergetics dispersive-disordered condensed composite systems]. St. Petersburg, 2012. 476 p. (rus.)

2. Volgina E.V., Kaznacheev S.V., Erofeev V.T., Kretova V.M. Deformativnost' vinilefirnykh kompozitov [Deformation vinyl ester composites]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the South-West State University]. 2012. No. 6 (45). Pp. 82–90 (rus.)
 3. Bobrychev A.N., Erofeev V.T., Kozomazov V.N. Polimernye kompozitsionnye materialy [Polymer composite materials]. Saransk, 2013. 480 p. (rus.)
 4. Erofeev V.T., Volgina E.V., Kaznacheev S.V., Bogatov A.D., Erykalina I.V. Optimizatsiya sodержaniya komponentov vinilefirnykh kompozitov [Optimization of components vinyl ester composites]. Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. 2012. No. 1. Pp. 22–31 (rus.)
 5. Erofeev V.T., Volgina E.V., Erykalina I.V., Kaznacheev S.V. Optimizatsiya sodержaniya otverzhdayushchikh komponentov v vinilefirnykh kompozitakh [Content optimization curing components in the vinyl ester composites]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the South-West State University]. 2011. No. 5–2 (38). Pp. 427–433 (rus.)
 6. Erofeev V.T., Sokolova Yu.A., Bogatov A.D., Morozov E.A., Mitina E.A., Kalgin Yu.I., Cherushova N.V., Kondakova I.E., Erofeeva A.A., Yausheva L.S., Mironov A.A., Gubanov D.A. Epoksidnye polimerbetony, modifitsirovannye neftyanymi bitumami, kamennougol'noy i karbamidnoy smolami i aminoproizvodnymi soedineniyami [Epoxy Polymer-modified bitumen oil, coal and urea resin and amino compounds]. Moscow, 2008. 244 p. (rus.)
 7. Tverdokhlebov D.A., Tarmosin K.V., Bogatov A.D., Lesnov V.V., Konyashin A.A., Kaznacheev S.V. Furfurolatsetonovye kompozity karkasnoy struktury [Furfurolatsetonovye composite frame structure]. Saransk, 2008. 220 p. (rus.)
 8. Bazhenov Yu.M., Korol' E.A., Erofeev V.T., Mitina E.A. Ograzhdayushchie konstruksii s ispol'zovaniem betonov nizkoy teploprovodnosti (osnovy teorii, metody rascheta i tekhnologicheskoe proektirovanie) [Protecting designs using low thermal conductivity of concrete (foundations of the theory, methods of calculation and process design)]. Moscow, 2008. 319 p. (rus.)
 9. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Kalgin Yu.I. Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modifitsirovannykh bitumov (tekhnologiya, svoystva, dolgovechnost') [Bituminous materials based on modified bitumen (technology, properties, durability)]. Saransk, 2009. 276 p. (rus.)
 10. Erofeev V.T., Zavalishin E.V., Bogatov A.D., Astashov A.M., Korotaev S.A., Nikitin L.V. Silikatnye i polimersilikatnye kompozity karkasnoy struktury rolikovogo formovaniya [Silicate and polimersilikatnye composite frame structure of the roller forming]. Moscow, 2009. 158 p. (rus.)
-

УДК 691.31 : 678.06

Ш.М. РАХИМБАЕВ, А.В. ПОЛОВНЕВА, Т.В. АНИКАНОВА

**ВЛИЯНИЕ НОВЫХ ДОБАВОК ЭЛЕКТРОЛИТОВ
НА СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА**

Изучено влияние ряда новых модифицированных добавок электролитов на свойства цементного теста. Рассмотрено комплексное действие добавок электролитов с супер- и гиперпластификаторами (С-3, Sika Visco Crete) на свойства цементного теста и камня. Исследовано влияние добавок на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона, твердевшего в пропарочной камере при пониженной температуре тепловой обработки 40 °С.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электролиты, добавки – ускорители схватывания и твердения, сроки схватывания, мелкозернистый бетон.

Сроки схватывания цементного теста оказывают значительное влияние на формирование строительно-технических свойств бетонных изделий и конструкций и технико-экономические показатели строительной отрасли. Тем не менее этому вопросу как в отечественной, так и в зарубежной литературе не уделяется должного внимания [1]. Время живучести, как правило, в 1,5–2 раза короче, чем время начала схватывания. Из этого следует, что время начала схватывания желательно в пределах не более 1,5 ч, что и отражено в современных нормативно-технических документах России и Европы (предусмотрено 45–60 мин). В связи с этим в ряде случаев, когда время начала схватывания цемента, который используется для изготовления изделий, составляет 2–4 ч и более, его надо ускорять.

Окончание схватывания показывает время, в течение которого бетонная смесь превращается в камневидное тело, и вскоре после этого изделие несложной формы и небольшого размера можно расформовывать для продолжения технологического процесса. Поэтому нежелательно время конца схватывания, превышающее 5–6 ч. Между тем в ГОСТ 10178–85 время начала схватывания допускается до 10–12 ч, что совершенно неприемлемо с технологической точки зрения и приводит как к недобору прочности, так и к сильному падению производительности труда, особенно при конвейерной технологии производства изделий и на площадке монолитного строительства.

В Евростандарте и ГОСТ РФ 31108–2003 время конца схватывания вообще не нормируется, допускается и 15–20 ч, что иногда наблюдается на практике, особенно при вводе некоторых добавок. В связи с этим необходимо регулировать время конца схватывания, точнее, нужно сокращать интервал между началом и концом схватывания, так как начало схватывания должно быть достаточно продолжительным, чтобы можно было спокойно изготавливать изделия даже сложной формы. Но после того как изделие заформовано, желательно немедленное наступление конца схватывания, в идеале интервал схватывания должен равняться нулю, но таких цементов нет. Тем не менее практика показывает, что с помощью ряда добавок и другими способами

интервал схватывания можно сокращать [2, 3]. В частности, он зависит от водоцементного отношения: чем оно больше, тем продолжительнее интервал схватывания. Использование супер- и гиперпластификаторов, которые позволяют снизить водопотребность бетонной смеси нормальной густоты до 0,3 и менее, обеспечивает сокращение интервала схватывания. Большое влияние на сроки схватывания оказывает температура. С ее повышением сроки и интервал схватывания сокращаются.

Скорость гидратации портландцемента и других неорганических вяжущих лимитируется интенсивностью диффузии ионов кальция из зоны гидратации в поровую структуру бетонной смеси [4]. Все приемы, которые позволяют увеличить и ускорить выход ионов кальция в поровое пространство бетонной смеси, позволяют сокращать схватывание. Одним из практических приемов реализации такого подхода является использование добавок, которые образуют с ионами кальция соединения с максимальной растворимостью. Тогда в жидкой фазе бетонной смеси будет поддерживаться высокая концентрация ионов кальция, достигаться максимальное пересыщение жидкой фазы по отношению к гидратным соединениям. Анализ литературных данных по растворимости кальциевых солей различных анионов показывает, что последние располагаются в порядке роста растворимости кальциевых солей следующим образом: NO_3^- , CNS^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, Cl^- . Этот ряд полностью совпадает с закономерностью, эмпирически установленной японскими исследователями.

Было изучено влияние добавок на нормальную густоту, сроки схватывания цементного теста, водопотребность и прочностные характеристики мелкозернистого бетона.

Определение сроков схватывания и нормальной густоты цементного теста без добавок и с упомянутыми солями проводились по ГОСТ 310.3–76. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Из приведенных данных видно, что добавки не влияют на водопотребность цементного теста. При вводе добавки ХВН сроки схватывания умень-

Таблица 1. Сроки схватывания цементного теста с солями электролитов

Добавка	В/Ц	Начало схватывания, мин	Интервал, мин	Конец схватывания, мин
<i>Белгородский цемент</i>				
–	0,26	120	95	215
ХВН 0,5 %	0,26	125	56	180
ХВН 1 %	0,26	115	45	160
Калий серноокислый (М) 0,5 %	0,26	160	55	215
Натрий серноокислый (М) 0,5 %	0,26	145	75	220
<i>Себряковский цемент</i>				
–	0,26	115	80	185
ХВН 0,5 %	0,26	125	45	170
ХВН 1 %	0,26	120	60	180
Калий серноокислый (М) 0,5 %	0,26	135	45	180
Натрий серноокислый (М) 0,5 %	0,26	130	40	170

шаются до 25 % по сравнению с чистым цементом. Очевидно, что срок «живучести» цементного теста остается неизменным, так как сокращается время конца схватывания.

Добавка калия сернокислого (М) позволяет увеличить время начала схватывания на 30 и 20 % белгородского и себряковского цементов соответственно по сравнению с чистыми цементами. Интервал между началом и концом схватывания сокращается на 40 %. Натрий сернокислый (М) обладает примерно таким же действием: начало схватывания увеличивается на 20 %, а интервал уменьшается на 20 и 40 % для белгородского и себряковского цементов соответственно.

Представляет практический интерес совместное действие электролитов с добавками пластификаторов. В рамках данной работы было рассмотрено взаимодействие суперпластификатора С-3 с изучаемыми электролитами.

Эксперимент показал, что смесь суперпластификатора С-3 и данных электролитов значительно сокращает время начала схватывания и увеличивает его интервал. При этом сроки схватывания удовлетворяют требованиям ГОСТ 31108–2003, за исключением С-3 (0,4 %) + ХВН (1 %). В табл. 2 приведены результаты исследования комплексного действия гиперпластификаторов и сульфаниловой кислоты.

Таблица 2. Сроки схватывания цементного теста с комплексной добавкой гиперпластификатора и добавки сульфаниловой кислоты на себряковском цементе

Добавка	В/Ц	Начало схватывания, мин	Интервал, мин	Конец схватывания, мин
–	0,26	115	80	185
Sika Visco Crete	0,22	85	355	440
Сульфаниловая кислота 1 %	0,24	150	120	270
Сульфаниловая кислота 0,5 %	0,24	135	105	240
Sika Visco Crete + сульфаниловая кислота 0,5 %	0,21	120	100	220
Sika Visco Crete + сульфаниловая кислота 0,2 %	0,21	115	115	230
Sika Visco Crete (0,4 % жидк.) + сульфаниловая кислота 0,1 %	0,215	125	150	275

Добавка сульфаниловой кислоты в дозировке от 0,5 до 1 % не оказывает существенного положительного влияния на сроки схватывания цементного теста, при этом обладает слабым разжижающим действием. В комплексе с гиперпластификатором Sika Visco Crete она снимает удлинившиеся сроки схватывания. Дозировка добавки может быть очень низкой, это обуславливается слабой растворимостью сульфаниловой кислоты в воде.

Добавки неорганических электролитов двояко влияют на разность концентраций ионов кальция у поверхности и в порах жидких гидратных новообразований. При вводе ускорителей, например, кальцинированной соды, поташа увеличивается диффузия ионов Са от зоны гидратации в межпоровое пространство. Сода «высаживает» ионы Са в жидкой фазе в виде слаборастворимого карбоната и резко снижает их концентрацию в жидкой фазе. Это ускоряет выход ионов Са через пленку гидратных новообразований в жидкую фазу. ХВН действуют по-другому – увеличивается растворимость извести в жидкой фазе и повышается емкость поровой жидкости по иону Са,

Таблица 3. Предел прочности на сжатие мелкозернистого бетона с добавками электролитов

Добавка	Дозировка, %	Предел прочности на сжатие, МПа	
		белгородский цемент (ЦЕМ I)	себряковский цемент (ЦЕМ II)
–	–	14,1	1
ХВН	0,5	12,65	11,2
ХВН	1	14,7	12,2
Калий сернокислый (М)	0,5	13,1	9,8
Натрий сернокислый (М)	0,5	18,5	10,5

что ускоряет гидратацию клинкерных минералов и сокращает сроки схватывания.

Было изучено влияние данных электролитов на твердение цементного камня. Образцы твердели в камере тепловлажностной обработки по режиму 2 + 6 + 2 при пониженной температуре тепловой обработки 40 °С. Результаты представлены в табл. 3.

Исследуемые добавки не оказали значительного влияния на прочностные характеристики белгородского цемента. Исключением является натрий сернокислый, который привел к увеличению прочности на 30 % по сравнению с чистым цементом. Ввод этих добавок к себряковскому цементу дает прирост прочности до 20 %.

Было изучено влияние смеси солей электролитов с пластификаторами на твердение мелкозернистого бетона (табл. 4).

Таблица 4. Предел прочности на сжатие мелкозернистого бетона на белгородском цементе с добавками электролитов и пластификаторов

Добавка	Предел прочности на сжатие, МПа	Добавка	Предел прочности на сжатие, МПа
–	14,1	Сульфаниловая кислота 0,5 % + С-3	15,1
С-3 (0,4 %)	16,4	Sika Visco Crete	17,1
ХВН 0,5 % + С-3 (0,4 %)	16,5	ХВН 0,5 % + Sika Visco Crete	16,8
ХВН 1 % + С-3 (0,4 %)	16,9	ХВН 1 % + Sika Visco Crete	18,2
Калий сернокислый (М) 0,5 % + С-3 (0,4 %)	15,5	Калий сернокислый (М) 0,5 % + Sika Visco Crete	15,8
Натрий сернокислый (М) 0,5 % + С-3 (0,4 %)	19,0	Натрий сернокислый (М) 0,5 % + Sika Visco Crete	19,5
Сульфаниловая кислота 0,5 % + С-3 (0,4 %)	17,3	Сульфаниловая кислота 0,5 % + Sika Visco Crete	18,2

Наибольший прирост прочности дает добавка натрия сернокислого (М) в сочетании с пластификаторами С-3 и Sika Visco Crete (31 и 38 % соответственно). Она показала оптимальные результаты по срокам схватывания цементного теста. Сроки сокращаются за счет уменьшения интервалов схватывания.

Выводы. Добавка ХВН может быть применена как ускоритель схватывания цементных систем. Ее положительной особенностью является то, что период «живучести» смеси остается неизменным. Добавки натрия сернокислого

го и калия сернокислого имеют приблизительно одинаковое действие. Они увеличивают время начала схватывания, а его конец остается неизменным. Положительный эффект новой добавки ХВН выше, чем других, особенно на себряковском цементе. Исследуемые добавки в ряде случаев увеличивают прочность мелкозернистого бетона, что обусловлено ускорением гидратации клинкерных минералов. Следовательно, данные добавки можно использовать в качестве регуляторов сроков схватывания. Совместно с суперпластификатором С-3 они оказывают обратное действие на сроки схватывания. При этом изучаемые электролиты не снижают пластифицирующего действия С-3.

Добавка сульфаниловой кислоты в дозировке 0,1–0,3 % обладает слабым разжижающим действием и не влияет на сроки схватывания. При совместном действии сульфаниловой кислоты с С-3 и Sika Visco Crete она снимает удлинившиеся сроки схватывания до состояния чистого цемента без добавок. Исследованные добавки представляют практический интерес, так как сокращают интервал схватывания. Сульфаниловая кислота в комплексе с гиперпластификатором снимает удлинившиеся сроки схватывания. Это позволяет ускорить твердение изделий и увеличить оборачиваемость форм на заводах стройиндустрии и стройплощадках, что приведет к экономии трудовых, материальных ресурсов, повысит производительность труда в строительной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б а ж е н о в Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
2. Р а х и м б а е в Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов. Ташкент: Наука, 1976. 224 с.
3. Р а х и м б а е в Ш.М., Б а ш С.М. К вопросу о влиянии органических веществ на срок схватывания портландцемента // Журн. приклад. химии. 1968. № 12. С. 43–51.
4. Р а х и м б а е в Ш.М., С е р д ю к о в а А.А. О механизме действия ускорителей схватывания и твердения цементной матрицы бетона // Вестн. Белгород. гос. техн. ун-та им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 26–28.

Рахимбаев Шарк Матрасулович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Половнева Анастасия Валерьевна, асп.; E-mail: polovnev4ik@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Аниканова Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 15.10.15

Rakhimbayev Shark Matrasulovich, DSc, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Polovneva Anastasiya Valeryevna, post-graduate student; E-mail: polovnev4ik@yandex.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Anikanova Tat'yana Viktorovna, PhD, ass. professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

INFLUENCE OF NEW ADDITIVES ELECTROLYTES ON FINE- GRAINED CONCRETE PROPERTIES

Influence of a number of new modified electrolytes additives on properties of cement dough is studied. Complex action of electrolytes additives and mixed it with softener (S-3, Sika Visco Crete) on properties of cement dough is considered. Influence of additives on

physical and mechanical characteristics of fine-grained concrete hardening in the steaming camera at a lowered temperature of thermal treatment 40 °C is studied.

Key words: electrolytes, additives – setting and hardening accelerators, setting time, fine-grained concrete.

REFERENCES

1. B a z h e n o v Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete Technology]. Moscow, Izd. ASV, 2003. 500 p. (rus.)
 2. R a k h i m b a y e v Sh.M. Regulirovanie tekhnicheskikh svoystv tamponazhnykh rastvorov [Regulatio of the technical properties of cement slurries]. Tashkent, Science, 1976. 224 p. (rus.)
 3. R a k h i m b a y e v Sh.M., B a s h S.M. K voprosu o vliyaniy organicheskikh veshchestv na srok skhvatyvaniya portlandtsementa [To the question about the influence of organic matter on the setting time of Portland cement]. Zhurnal prikladnoy khimii [Journal of applied chemistry]. 1968. No. 12. Pp. 43–51 (rus.)
 4. R a k h i m b a y e v Sh.M., S e r d y u k o v a A.A. O mekhanizme deystviya uskoriteley skhvatyvaniya i tverdeniya tsementnoy matritsy betona [Mechanism of action of accelerators and curing the cement matrix concrete]. Vestnik BSTU name after V.G. Shukhov. 2013. No. 2. Pp. 26–28 (rus.)
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.921.42

Е.В. ВАРСЕГОВА, В.Н. ПОСОХИН

ОБ УСЛОВИЯХ ПРЕДЕЛЬНОГО УЛАВЛИВАНИЯ ПОТОКА ВРЕДНЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ МЕСТНЫМ ОТСОСОМ

Анализируется влияние потока вредных выделений, подтекающего к отсосу, на форму вихревых зон, образующихся на острых краях. Показано, что размеры вихревых зон быстро уменьшаются с увеличением скорости потока. Этот факт предлагается учитывать при формулировании условий предельного улавливания потока отсосом.

К л ю ч е в ы е с л о в а: поток вредных выделений, отсос, условия предельного улавливания.

Предельным улавливанием принято называть такой режим действия местного отсоса, при котором захват потока вредных выделений от источника происходит при минимальной интенсивности отсоса. Увеличивая интенсивность последнего получают режим избыточного улавливания, уменьшая – режим неполного улавливания.

В работе [1] сформулированы условия предельного улавливания для отсосов открытого типа, различным образом расположенных относительно теплоисточников – соосных, боковых, нижних. Рис. 1, *а* иллюстрирует геометрию тепловой струи для разных режимов улавливания при соосном расположении источника и отсоса. Предельному режиму соответствует замыкание границ струи на краях отсоса, наличие вихревых зон на острых краях отсоса не учитывалось. Позднее в работе [2] условие предельного улавливания

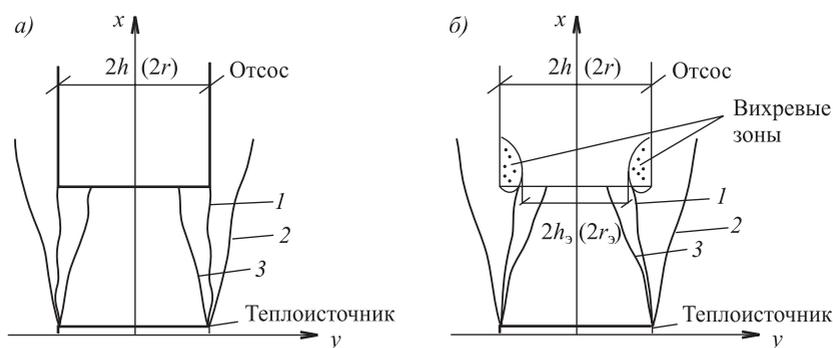


Рис. 1. Режимы действия отсоса

а – вихревые зоны не принимаются во внимание; *б* – учитывается наличие вихревых зон

Режимы улавливания: 1 – предельного; 2 – неполного; 3 – избыточного

ния было сформулировано с учетом этого факта – предельному режиму соответствует замыкание границ струи на краях вихревых зон, определяющих размеры эффективно всасывающей площади приемного отверстия отсоса (рис. 1, б).

Очертания свободных линий тока, ограничивающих вихревые зоны для щелевидных и круглых всасывающих патрубков, определены в работах [3, 4]. Оказалось, что размеры $\bar{h}_3 = h_3/h$, $\bar{r}_3 = r_3/r$ практически одинаковы. В указанных выше работах не учитывалось «заталкивающее» действие потока вредных выделений.

В работе [5] рассмотрена плоская задача о форме свободной линии тока при наличии набегающего равномерного потока, моделирующего струю, восходящую над источником. Задача решалась в рамках теории потенциальных течений идеальной жидкости. Получены уравнения линий тока, в том числе свободной линии тока, для которой:

$$x(\eta) = \frac{h}{\pi(1+b)} \left[\ln(1+\eta^2) - \frac{b^2\eta^2 + \eta^2}{\eta^2 + 1} \right];$$

$$y(\eta) = h + \frac{h}{\pi(1+b)} \left[\frac{2b\eta}{\eta^2 + 1} - 2b \operatorname{arctg} \eta \right],$$

где $0 \leq \eta \leq \infty$ – параметрическая переменная;

$$b = (1 - \bar{v}_\infty) / (1 + \bar{v}_\infty); \quad \bar{v}_\infty = v_\infty 2h / Q;$$

v_∞ – скорость набегающего потока;

Q – удельная интенсивность отсоса.

Эта задача решается численным методом с использованием комплекса программ *Ansys Fluent*. Рассматривается плоское течение вязкой жидкости вблизи щелевого всасывающего патрубка при наличии потока набегающего со скоростью v_∞ . Симметричная половина области течения показана на рис. 2. В точке *B* набегающий поток разделяется, часть его поступает в отсос, а часть со скоростью v_∞ уходит далее. На границе *AD* скорость равна $v_0 = Q/2h$. Границы *EF*, *AG* – проницаемы; *ABC*, *CA* – непроницаемы; *ED* – ось симметрии; *FG* – удаленная линия тока, параллельная оси *x*. Размеры расчетной области: $\bar{H} = H/h = 10$; $\bar{L} = L/l = 20$. Решается система дифференциальных уравнений движения, дополненная уравнением газового состояния. Используется модель замыкания $k-\varepsilon$ «стандартная», в области, прилегающей к непроницаемым границам, применяются расширенные пристеночные функции.

В ходе решения задачи на проницаемых участках *AD* и *EF* ставятся граничные условия *VelocityInlet*, т.е. задаются компоненты скорости. На *AG* граничное условие *PressureOutlet*, т.е. на границе избыточное давление $\Delta p = 0$, скорость направлена по нор-

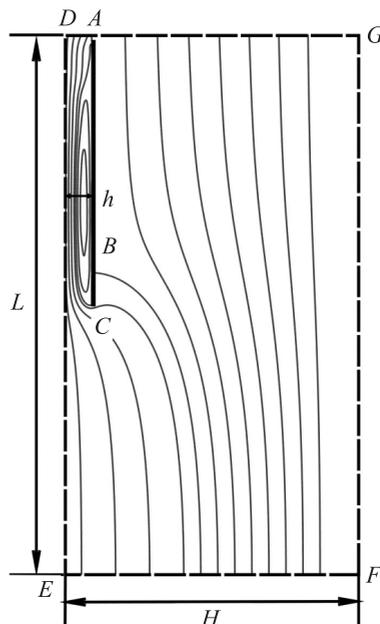


Рис. 2. Расчетная область

мали к ней $\bar{v} = v_n$. На непроницаемых участках ABC, CA и на линии тока FG – граничные условия $Wall$ – условие непроницаемости $v_n = 0$.

При выполнении расчетов скорость на границе EF принималась $\bar{v}_x = v_\infty 2h/Q = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; \bar{v}_y = 0$. На рис. 3 представлено сопоставление аналитического и численного решений.

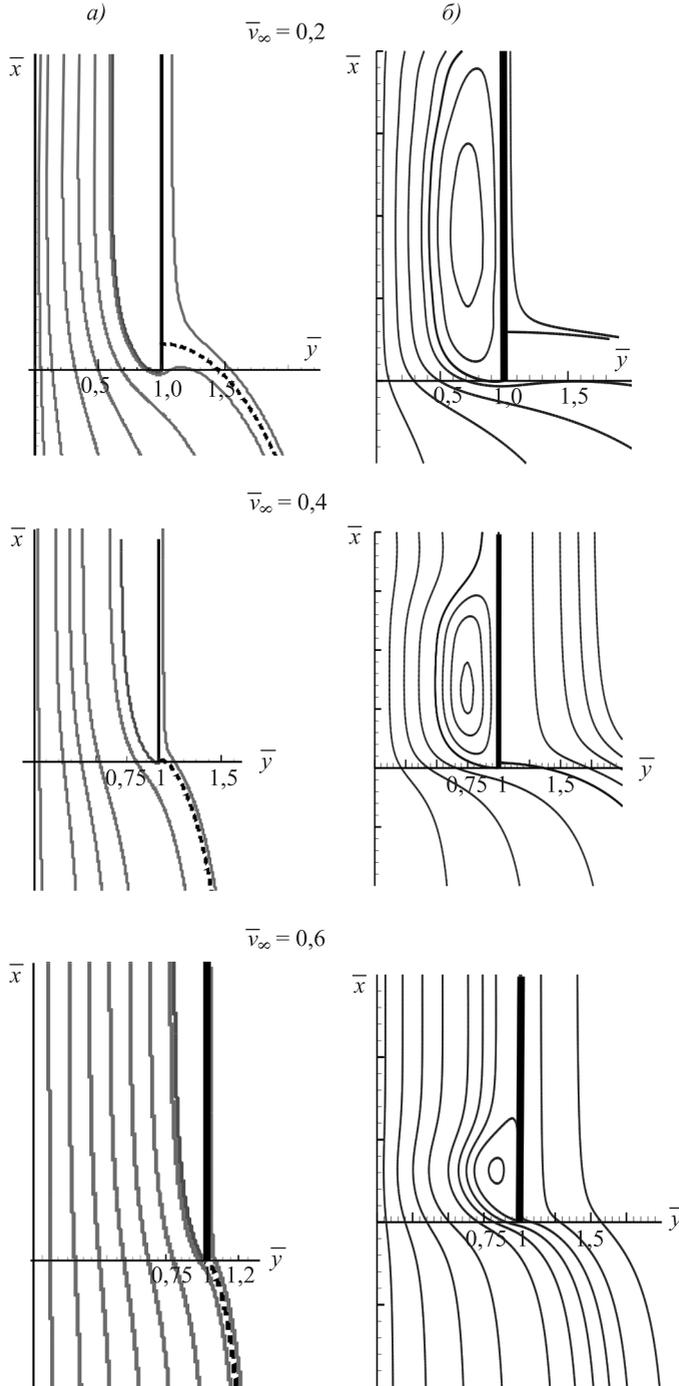


Рис. 3. Линии тока течений
 а – аналитическое решение [5]; б – численное решение

Качественные картины течений примерно одинаковы. Важным отличием является наличие, во втором варианте решения, замкнутых вихревых зон, что более соответствует реальной физике явления. На рис. 4 показаны результаты вычислений эффективного размера щели в зависимости от параметра \bar{v}_∞ . Оба метода дают здесь примерно одинаковые значения.

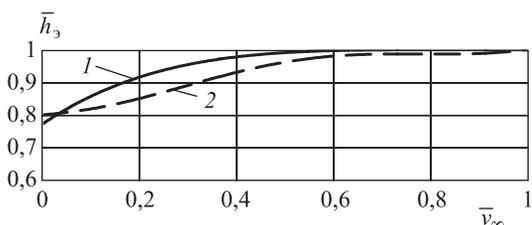


Рис. 4. Зависимость эффективного размера щели от соотношения скоростей $\bar{v}_\infty = v_\infty/v_0$
1 – аналитическое решение; 2 – численное решение

Следует отметить, что эффективный размер щели очень быстро возрастает с увеличением \bar{v}_∞ : уже при $\bar{v}_\infty = 0,5$ $\bar{h}_3 = 0,95$, т.е. всасывание происходит практически по всей площади приемного отверстия. Учитывая это обстоятельство, а также тот факт, что для реально действующих отсосов значение $\bar{v}_\infty \geq 1$, условие предельного улавливания должно формулироваться согласно схеме рис. 1, а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Посохин В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
2. Posokhin V.N., Zivov A.M. Principles of local exhaust design // Ventilation 97. Global developments in industrial ventilation. Proceedings of Symposium on ventilation for contaminant control held in Ottawa, Canada, September, 14–17, 1997. P. 33–44.
3. Талиев В.Н. Всасывающий канал у щели между двумя параллельными стенками // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1970. № 5. С. 101–104.
4. Логачев К.И., Посохин В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. № 1. С. 29–32.
5. Варсегова Е.В., Посохин В.Н. О форме отрывных зон на входе в щелевой всасывающий патрубок // Изв. КГАСУ. 2015. № 3 (33). С. 98–102.

Варсегова Евгения Владиславовна, канд. физ.-мат. наук, доц.; E-mail: evarsegova@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Посохин Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: posohin@kgasu.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 16.10.15

Varsegova Evgeniya Vladislavovna, PhD, ass. professor; E-mail: evarsegova@yandex.ru,
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Posokhin Vladimir Nikolaevich, DSc, professor; E-mail: posohin@kgasu.ru, Kazan State
University of Architecture and Engineering, Russia

ABOUT CONDITIONS OF LIMIT CATCHING OF THE FLOW HAZARDOUS SUBSTANCE BY THE LOCAL SUCTION

Influence of the flow of hazardous substance leaking to suction on a form of the vortex zones which are formed on sharp edges is analyzed. It is shown that the sizes of vortex zones

quickly decrease with increase in speed of a flow. This fact is offered to be considered at a formulation of conditions of limit catching of the flow suction.

Key words: flow of hazardous substance, suction, conditions of limit catching.

REFERENCES

1. P o s o k h i n V.N. Raschët mestnykh otsosov ot teplo- i gazovydelyayushchego oborudovaniya [Calculation of local suction from the heat and gas-yielding equipment]. M., Mashinostroenie, 1984. 160 p. (rus.)
2. P o s o k h i n V.N., Z i v o v A.M. Principles of local exhaust design. Ventilation 97. Global Developments in industrial ventilation. Proceedings of symposium on ventilation for contaminant control held in Ottawa, Canada, September, 14–17, 1997. Pp. 33–44.
3. T a l i e v V.N. Vsasyvayushchiy kanal u shcheli mezhdv dvumya parallelnymi stenkami [The suction slot at a slot-hole between two parallel walls]. Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti [News of Higher Education Institutions. Technology of the textile industry]. 1970. No. 5. Pp. 101–104 (rus.)
4. L o g a c h e v K.I., P o s o k h i n B.N. Raschët techeniya vblizi kruglogo vsasyvayushchego patrubka [Calculation of a flow near the round the suction slot-hole branch pipe]. Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika [News of Higher Education Institutions. Russian Aeronautics]. 2004. No. 1. Pp. 29–32 (rus.)
5. V a r s e g o v a E.V., P o s o k h i n V.N. O forme otryvnykh zon na vkhode v shchelevoy vsasyvayushchiy patrubok [A form of separated flow on an entrance to suction slot-hole branch pipe]. Izvestia KGASU [News of the KSUAE]. 2015. No. 3 (33). Pp. 98–102 (rus.)

УДК 697.953.2 : 621.65

В.И. КОСТИН

**РЕГУЛИРОВАНИЕ НАСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ
В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И КЛИМАТИЗАЦИИ**

Выбор метода регулирования насосов и вентиляторов входит в комплекс задач оптимизации систем климатизации и теплоснабжения и должен производиться на основе анализа их работы в течение годового цикла эксплуатации.

Анализ совместной работы нагнетателей следует производить при всех характерных режимах эксплуатации, а не только при максимальных расходах воды (воздуха). Игнорирование этого принципа приводит к перерасходу энергии, а в некоторых случаях – и к созданию аварийной ситуации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: насосы, вентиляторы, регулирование.

Постановка задачи. Выбор метода регулирования насосов и вентиляторов входит в комплекс решения задачи оптимизации систем климатизации, конечная цель которой – поддержание в помещениях требуемого климата при минимальных затратах. При этом встречаются два рода задач регулирования.

1. Регулируется объем подаваемого воздуха (воды). Здесь тип регулирования (плавный, ступенчатый, с постоянной или прерывистой подачей) определяется технологическим процессом, назначением зданий (жилые, общественные, административные, промышленные и т.д.).

2. Регулируется количество подаваемой теплоты (холода). В этом случае характер регулирования определяется не только технологическими процессами, но и климатическими условиями (температурой, влажностью наружного воздуха, интенсивностью солнечной радиации, направлением и скоростью ветра), а также тепловой аккумуляцией ограждающих конструкций и оборудования. И если изменение потребности в теплоте (холоде) носит всегда плавный характер, то тип регулирования нагнетателей может быть различным. Изменение подачи производится и в течение суток, и по сезонам (зима, лето, весна, осень), и на протяжении самих сезонов.

Наиболее распространенными способами регулирования производительности насосов и вентиляторов в системах теплоснабжения и климатизации являются следующие [1, 2]:

- 1) дросселирование;
- 2) частотный;
- 3) комбинированный (одновременное изменение гидравлического сопротивления сети и частоты вращения нагнетателя).

При совместной работе на сеть двух и более нагнетателей задача осложняется тем, что регулирование лишь некоторых из них ведет к изменению параметров остальных [3–5]. Поэтому необходима корректировка работы всех включенных в систему нагнетателей [2]. Нарушение этого принципа приводит к разрегулировке системы, снижению экономичности ее работы,

вследствие увеличения расходов на нерегулируемых нагнетателях. В некоторых случаях возможно создание аварийных ситуаций из-за перегрузки электродвигателей и нарушения баланса давлений в точке слияния потоков [2]. Цель данной работы – анализ регулирования нагнетателей ряда типичных случаев в системах теплоснабжения и климатизации.

1. Регулирование воздухообмена в помещении. Регулирование воздухообмена в помещении большого объема путем отключения части вентиляторов может привести к созданию зон с нарушением санитарных (технологических, противопожарных) норм из-за неравномерного воздухораспределения. Применение этого метода должно обосновываться специальным расчетом полей скоростей, температур воздуха, концентраций вредных веществ. Учитывая приближенный характер расчетных методик, изменение воздухообмена надежнее производить регулированием вентиляторов.

А. Помещения с избытками теплоты. Требуемый тепловой режим поддерживается средствами вентиляции без охлаждения воздуха.

Необходимая степень регулирования может быть найдена расчетным путем. На рис. 1 показаны результаты расчета воздухообмена промышленного здания, расположенного в Москве, в теплый период при трехсменной работе [6].

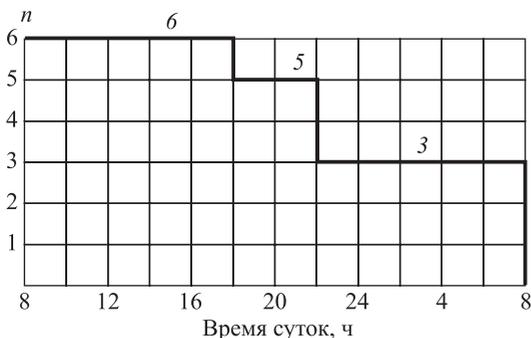


Рис. 1

Минимальная кратность воздухообмена n , рассчитанная из условия ассимиляции токсичных веществ, – 3.

Из рис. 1 напрашивается вывод о целесообразности использования ступенчатого регулирования. Однако в течение теплого периода изменяются интенсивность солнечной радиации, температура наружного воздуха и его суточная амплитуда, а следовательно, и избытки теплоты, и необходимый воздухообмен. Поэтому в данном случае следует применять плавное регулирование.

Б. Совмещение приточной вентиляции с отоплением (охлаждением) помещения. В этом случае при регулировании объема подаваемого воздуха изменяется соотношение инерционных и архимедовых сил в приточной струе, и возможно создание дискомфортных зон. Поэтому необходимо производить расчет воздухораспределения не только при максимальных, но и при минимальных объемах подаваемого воздуха.

В. Помещения с токсичными выделениями. При известном характере динамики выделения вредностей необходимая степень регулирования может быть установлена на стадии проектирования. Однако в процессе эксплуатации регулирование должно осуществляться только по сигналам датчиков концентраций удаляемых из помещения веществ. Изменение концентраций чаще всего бывает плавным, но возможны случаи и ступенчатого изменения.

2. Поддержание постоянного расхода воздуха в системе вентиляции или в определенной части воздухораспределителей. Как известно, по мере загрязнения фильтра возрастает аэродинамическое сопротивление сети

и уменьшается производительность системы. Постоянство расхода воздуха можно обеспечить только за счет специальных мероприятий. Наиболее надежным способом является установка плавного частотного регулятора. Максимальная частота вращения должна соответствовать предельной степени загрязнения фильтра, превышение которой должно сопровождаться соответствующим предупредительным сигналом. Принципиальная схема регулирования приведена в статье [7].

При обслуживании одной приточной (вытяжной) системой нескольких помещений может потребоваться уменьшение расхода воздуха для некоторых из них. Увеличения расходов для остальных помещений можно избежать, поддерживая статическое давление в воздуховоде $P_{ст}$ на постоянном уровне. Выполнение условия $P_{ст} = const$ достигается только комбинированным регулированием вентилятора [8].

3. Регулирование подачи воды в системы теплоснабжения и отопления. Рассмотрим следующий пример (рис. 2).

Насос 3 подает воду от теплового генератора, насос 1 – в систему отопления, насос 2 – в систему теплоснабжения калориферов. Так как законы изменения потребности в тепловой энергии системами отопления и калориферными установками не совпадают, то и степени регулирования подачи воды насосами 1 и 2 будут разными. Как показано в монографии [2], в этом случае следует применять комбинированное регулирование, которое тем выгоднее, чем доля регулиро-

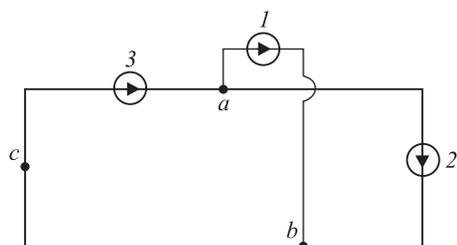


Рис. 2

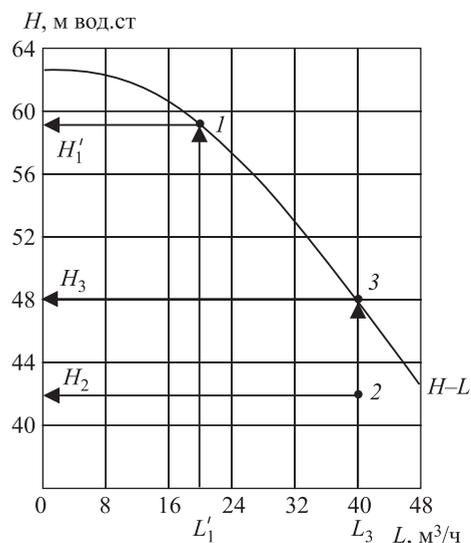


Рис. 3

вания дросселированием будет меньше. Значит, наиболее экономичным будет вариант с насосами, снабженными плавными регуляторами.

Только частотное регулирование при неравномерной степени снижения расходов не может обеспечить равенство давлений, создаваемых насосами 1 и 2 в точке b. В результате работа насоса, создающего меньшее давление, будет заблокирована. Поэтому необходим анализ совместной работы насосов 1 и 2 не только в расчетном режиме, но и при минимальных и других характерных расходах [2].

Рассмотрим теперь регулирование насоса 3. Пусть в расчетном режиме его подача $L = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H = 48 \text{ м вод. ст.}$ (рис. 3, точка 3). Потери давления на участке bca $\Delta H = 42 \text{ м вод. ст.}$ (точка 2).

$\Delta H_{3-2} = H_3 - H_2 = 48 - 42 = 6 \text{ м вод. ст.}$ Разница ΔH_{3-2} расходуется на компенсацию потерь давления на участках $a1b$, $a2b$. В результате регулиро-

вания подача насоса 3 должна уменьшиться в 2 раза. $L'_3 = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$, соответствующий напор без регулирования $H_1 = 59 \text{ м вод. ст.}$ (точка 1). Потери напора на участке bca

$$\Delta H'_{bca} = \Delta H_{bca} \left(\frac{L'_3}{L_3} \right)^2 = 42 \cdot 0,5^2 = 10,5 \text{ м вод. ст.}$$

Потери напора на участках $a1b$ и $a2b$ также уменьшатся в квадрате. Тогда $\Delta H'_{3-2} = \Delta H_{3-2} \cdot 0,5^2 = 6 \cdot 0,25 = 1,5 \text{ м вод. ст.}$

Следовательно, потери напора в системе, которые должен компенсировать насос 3, $H'_3 = 10,5 + 1,5 = 12 \text{ м вод. ст.}$

При регулировании дросселем потери напора в нем $\Delta H_{др} = 59 - 12 = 47 \text{ м вод. ст.}$, т. е. около 80 % энергии будет расходоваться в регулирующем устройстве. Значит, энергетически наиболее выгодный вариант работы насоса 3

после регулирования будет при параметрах: $L = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 12 \text{ м вод. ст.}$, что может быть обеспечено только плавным частотным регулированием.

При ступенчатом регуляторе насоса следует применить комбинированное регулирование.

Одним из возможных способов регулирования в тепловых сетях является применение параллельной работы насосов. Целесообразность такого метода рассмотрим на

примере схемы, изображенной на рис. 4.

Наличие трех параллельно работающих насосов позволяет осуществлять трехступенчатое регулирование. Примем, что потери напора на участках раздельной работы и изменение характеристики сети при отключении некоторых насосов пренебрежимо малы. Анализ работы приведен на рис. 5.

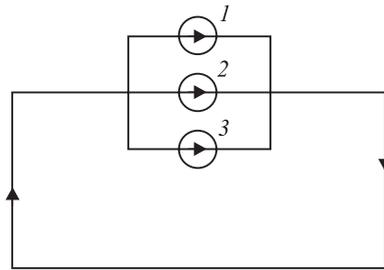


Рис. 4

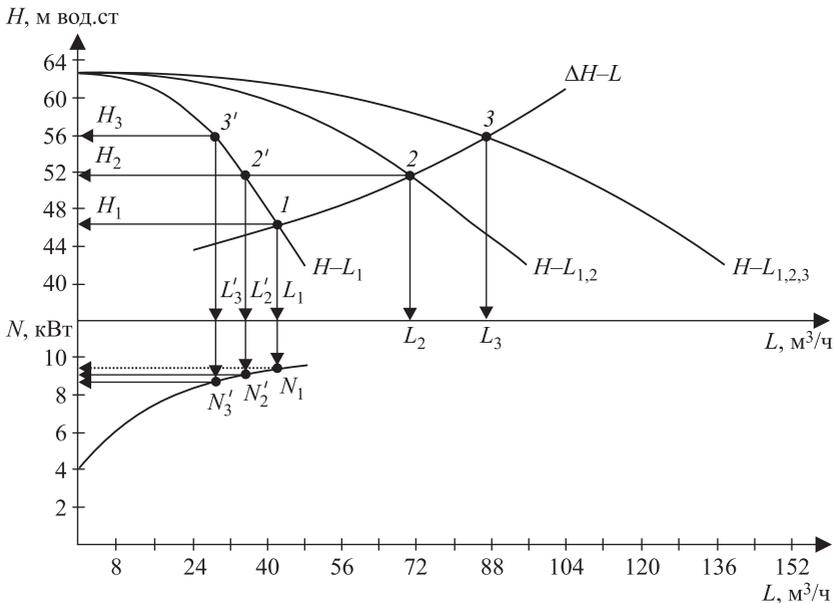


Рис. 5

При работе трех насосов подача системы (точка 3) $L_3 = 84 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H_3 = 53,5 \text{ м вод. ст.}$ При этом каждый насос создает подачу $L'_3 = 28 \text{ м}^3/\text{ч}$, потребляет мощность $N'_3 = 8,3 \text{ кВт}$ (точка 3'). Суммарная мощность системы $N_3 = 24,9 \text{ кВт}$.

При работе двух насосов (точка 2) $L_2 = 68 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H_2 = 52 \text{ м вод. ст.}$ Один насос создает подачу $L'_2 = 34 \text{ м}^3/\text{ч}$, потребляет мощность $N'_2 = 9 \text{ кВт}$ (точка 2'). Суммарная мощность системы $N_2 = 18 \text{ кВт}$.

При работе одного насоса (точка 1) $L_1 = 42 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H_1 = 46 \text{ м вод. ст.}$, $N_1 = 9,5 \text{ кВт}$.

Соотношение подачи при регулировании

$$L_3 : L_2 : L_1 = 84 : 68 : 42 = 1 : 0,81 : 0,5.$$

Соотношение потребляемой мощности

$$N_3 : N_2 : N_1 = 24,9 : 18 : 9,5 = 1 : 0,72 : 0,38.$$

В случае применения частотного регулирования мощность уменьшилась бы по кубическому закону. Тогда соотношение мощностей было бы $N_3 : N_2 : N_1 = 1^3 : 0,81^3 : 0,5^3 = 1 : 0,53 : 0,125$. Таким образом, регулирование с помощью параллельной работы энергетически невыгодно. При наличии такой системы в эксплуатации следует оборудовать электродвигатели частотными регуляторами, отказавшись от периодического отключения части насосов.

Установка ступенчатых регуляторов с применением схемы «регулятор + отключение одного (двух) параллельных насосов» приблизит регулирование к плавному. Однако система с плавными регуляторами (без отключения некоторых насосов) экономичнее и проще в управлении.

4. Оценка энергетической эффективности регулирования насосов и вентиляторов. Способ регулирования существенно влияет на экономичность систем теплоснабжения и климатизации. Поэтому при технико-экономическом сравнении вариантов энергозатраты следует определять с учетом производимого регулирования. Оценка вариантов по установочной мощности N_p может привести к ошибочным выводам.

Р а с с м о т р и м п р и м е р. Сравняются два варианта установки вентиляторов для работы в теплый период года в дополнение к круглогодичной системе вентиляции.

Вариант 1: один вентилятор, $N_p = 10 \text{ кВт}$.

Вариант 2: два вентилятора, $N_p = 6,5 \text{ кВт}$.

Во втором варианте суммарная установочная мощность будет 13 кВт .

Годовое число часов работы $\tau = 792 \text{ ч}$.

Сравнение по установочной мощности.

Вариант 1. Энергозатраты $E = N_p \tau = 10 \cdot 792 = 7920 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Вариант 2. $E = 2 \cdot 6,5 \cdot 792 = 10\,296 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

При таком расчете первый вариант оказывается выгоднее, что справедливо лишь при отсутствии регулирования.

Пусть в обоих случаях вентиляторы имеют трехступенчатые регуляторы. При работе по второму варианту допускается выключение одного из вентиляторов при уменьшении избытков теплоты. Таким образом, в первом

варианте будет трехступенчатое регулирование, а во втором – шестиступенчатое. Энергозатраты определяются по зависимости

$$E = \sum N_i \tau_i. \quad (1)$$

Здесь τ_i – число часов работы при расходе мощности N_i .

Для первого варианта $E = 4831$ кВт · ч, для второго $E = 4333$ кВт · ч. Таким образом, второй вариант энергетически выгоднее, однако и он не является идеальным. Идеальным будет такое регулирование, при котором подача воды (воздуха) будет минимальной из условия соблюдения санитарных, технологических, противопожарных стандартов в течение всего года. Оптимальные энергозатраты

$$E_{\text{опт}} = \sum N_j \tau_j. \quad (2)$$

Здесь τ_j – число часов работы при расходе мощности N_j .

В качестве показателя степени рациональности метода регулирования можно использовать критерий эффективности регулирования как отношение энергозатрат по данному варианту регулирования к оптимальным затратам:

$$K_E = \frac{E}{E_{\text{опт}}} = \frac{\sum N_i \tau_i}{\sum N_j \tau_j}. \quad (3)$$

Фактически этот критерий является коэффициентом полезного действия регулирования, $K_E \leq 1$.

Пусть в данном случае $E_{\text{опт}} = 3356$ кВт · ч.

Тогда для первого варианта

$$K_E = \frac{3356}{4831} = 0,695.$$

Для второго варианта

$$K_E = \frac{3356}{4333} = 0,775.$$

Следовательно, и второй вариант далек от идеального. Поэтому целесообразно рассмотреть и другие варианты. Например, установку одного вентилятора с плавным регулятором.

Выводы. 1. Выбор метода регулирования насосов и вентиляторов следует производить на основе анализа динамики изменения подачи перемещаемой среды и ее параметров в течение годового цикла эксплуатации.

2. Анализ совместной работы нагнетателей должен производиться не только в расчетном режиме, но и при других характерных расходах системы (минимальных и т.д.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гр им и т л и н А.М., И в а н о в О.Л., П у х к а л В.А. Насосы, вентиляторы, компрессоры в инженерном оборудовании зданий. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006. 210 с.
2. К о с т и н В.И. Энергоэффективная работа насосов и вентиляторов в системах теплоснабжения и вентиляции. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2015. 184 с.
3. В а х в а х о в Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.

4. Поляков В.В., Скворцов Л.С. Насосы и вентиляторы: учеб. пособие для вузов по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция». М.: Стройиздат, 1990. 336 с.
5. Костин В.И. Регулирование работы насосов и вентиляторов при совместной работе // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 7–8. С. 45–49.
6. Костин В.И., Федоров Б.А. Проблемы расчета воздухообмена в помещениях с избытками теплоты в теплый период // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 6. С. 54–58.
7. Караджи В.Г., Московко Ю.Б. Поддержание заданной производительности вентилятора в сети // АВОК. 2010. № 7. С. 123–132.
8. Шумилин А.В. IPSUM – новые возможности для оптимизации энергопотребления системы кондиционирования воздуха // АВОК. 2015. № 8. С. 10–13.

Костин Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 14.10.15

Kostin Vladimir Ivanovich, DSc, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

REGULATION OF PUMPS AND VENTILATORS IN SYSTEMS OF HEAT SUPPLY AND KLIMATIZATION

The choice of a method of regulation of pumps and ventilators enters a complex of problems of optimization of systems of a klimatization and heat supply and has to be performed on the basis of the analysis of their work during a year cycle of operation.

The analysis of collaboration of superchargers should be made at all characteristic modes of operation, and not just at the maximum expenses of water (air). Ignoring of this principle leads to excessive consumption of energy, and in certain cases – and to creation of an emergency.

Key words: pumps, ventilators, regulation.

REFERENCES

1. G r i m i t l i n A.M., I v a n o v O.L., P u k h k a l V.A. Nasosy, ventilyatory, kompresso-ry v inzhenernom oborudovanii zdaniy [Pumps, ventilators, compressors in the engineering equipment of buildings]. St. Petersburg, AVOK North-west, 2006. 210 p. (rus.)
2. K o s t i n V.I. Energoeffektivnaya rabota nasosov i ventilyatorov v sistemakh teplosnabzheniya i ventilyatsii [Power effective operation of pumps and fans in systems of heat supply and ventilation]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2015. 184 p. (rus.)
3. V a k h v a k h o v G.G. Energoberezhenie i nadezhnost' ventilyatornykh ustanovok [Energy saving and reliability of ventilators installations]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 176 p. (rus.)
4. P o l y a k o v V.V., S k v o r t s o v L.S. Nasosy i ventilyatory: uchebnoe posobie dlya vusov po spetsial'nosti «Teplogazosnabzhenie i ventilyatsiya» [Pumps and ventilators: the manual for higher education institutions in the specialty «Heat gas supply and ventilation»]. Moscow, Stroyizdat, 1990. 336 p. (Rus.)
5. K o s t i n V.I. Regulirovanie raboty nasosov i ventilyatorov pri sovmestnoy rabote [Regulation of operation of pumps and ventilators at collaboration]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 7–8. Pp. 45–49 (rus.)

6. Kostin V.I., Fedorov B.A. Problemy rascheta vozdukhoobmena v pomeshcheniyakh s izbytkami teploty v teplyy period [Problems of calculation of air exchange in premises with surpluses of warmth during the warm period]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 6. Pp. 54–58 (rus.)
 7. Karadzhii V.G., Moskovko Yu.B. Podderzhanie zadannoy proizvoditel'nosti ventilyatora v seti [Maintenance of the set ventilators productivity in network]. AVOK. 2010. No. 7. Pp. 123–132 (rus.)
 8. Shumilin A.V. IPSUM – novye vozmozhnosti dlya optimizatsii energopotrebleniya sistemy konditsionirovaniya vozdukha [IPSUM-new opportunities for optimization of energy consumption of the air conditioning system]. AVOK. 2015. No. 8. Pp. 10–13 (rus.)
-

УДК 628.853.001

А.Н. ГВОЗДКОВ

**ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕН В СИСТЕМЕ «ВОЗДУХ–ВОДА»
С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ**

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований по применению теории потенциала влажности для расчета процессов тепловлагообмена между воздухом и водой. На основе установленной зависимости между потенциалом влажности и парциальным давлением водяных паров в воздухе при различных температурах, на поле $I-d$ -диаграммы были нанесены линии постоянных потенциалов влажности $\theta = \text{const}$, что позволило существенно расширить область ее использования для анализа процессов изменения тепловлажностного состояния воздуха. Представлены результаты экспериментальных исследований процессов тепло- и влагообмена в виде критериальных уравнений для Nu , Nu_{θ} , учитывающих влияние на обменные процессы состояния поверхностной фазы.

Ключевые слова: потенциал влажности, тепло- и влагообмен, $I-d$ -диаграмма, состояние $\theta = \text{const}$, поверхностная фаза, температура поверхности воды.

Стремление к единому физико-математическому описанию и расчету процессов тепло- и влагообмена в элементах систем кондиционирования микроклимата реализовано в виде трех моделей [1]: ТП-модель предусматривает передачу явной теплоты через стенку, разделяющую потоки обменивающихся сред; ТМО-модель – передачу явной теплоты и влаги при непосредственном контакте рабочих сред (например, воздуха и воды); ТМП-модель – передачу теплоты через разделяющую потоки стенку, при наличии массообмена на одной из поверхностей стенки.

Однако, по-прежнему, рассмотрение процессов тепло- и влагообмена встречает значительные трудности, связанные с тем, что:

– отсутствует единая методика анализа физической картины протекания обменных процессов, учитывающая особенности состояния контактирующих сред на границе раздела [2–4];

– не учитываются термодинамические закономерности протекания процессов переноса, ввиду чего предлагаемые методики расчета носят полумпирический или эмпирический характер и имеют ограниченное применение [5–7].

Это привело к необходимости разработки термодинамического подхода к изучению тепло- и влагообмена между воздухом и жидкостью.

При рассмотрении механизма процесса тепло- и влагообмена следует исходить из основных положений термодинамики необратимых процессов с учетом наложения и взаимосвязи процессов переноса теплоты и влаги [8]. Систему «воздух–жидкость» можно охарактеризовать единым термодина-

мическим уравнением состояния относительно изменения свободной энергии F в виде:

$$dF = -SdT + \theta dm, \quad (1)$$

где S – удельная энтропия гетерогенной системы;

θ – полный термодинамический потенциал состояния влаги в системе, потенциал влажности.

Выражение для потенциала влажности имеет вид:

$$\theta = -\frac{P}{\rho} + \mu + \Sigma\mu_i + \theta_r + \Sigma\theta_i, \quad (2)$$

где μ – химический потенциал влаги;

$\Sigma\mu_i$ – составляющие химического потенциала влаги за счет наличия в ней растворенных веществ;

θ_r – потенциал влаги в результате действия гравитационного поля;

$\Sigma\theta_i$ – потенциал влаги за счет действия других силовых полей.

По термодинамическому смыслу потенциал влажности представляет собой полный термодинамический потенциал влаги, определяющий ее состояние в материальной среде при различных значениях влажности и температуры. Практическое определение значения потенциала влажности среды осуществляется на основе шкалы потенциала влажности [8], установленной экспериментальным путем.

С целью применения теории потенциала влажности к расчету процессов тепловлагообмена между воздухом и водой были проведены специальные экспериментальные исследования, на основании которых выявлена зависимость между потенциалом влажности и парциальным давлением водяного пара влажного воздуха при различных температурах воздуха, представленная на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что кривые связи между парциальным давлением водяного пара и потенциалом влажности при различных температурах в значительной своей части не совпадают. Отсюда следует, что в этой части перепады и градиенты парциальных давлений водяного пара будут отличаться от перепадов и градиентов потенциала влажности, причем это отличие может быть не только по величине (количественное), но и по знаку (качественное).

На рис. 1 отмечены пять характерных сочетаний параметров:

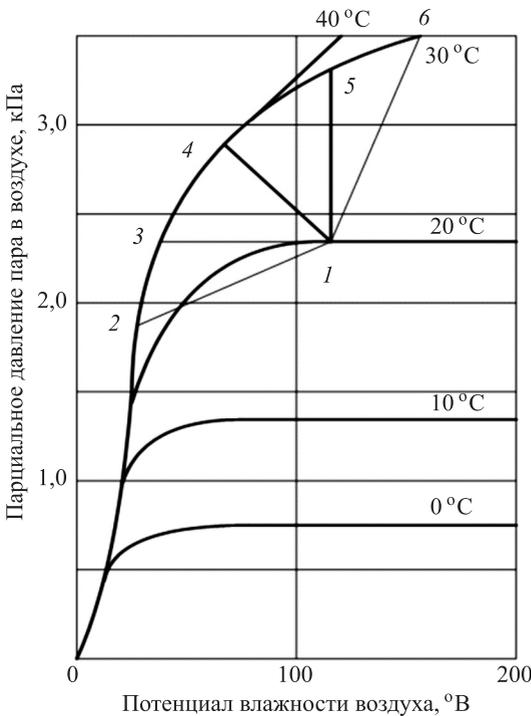


Рис. 1. Зависимость между потенциалом влажности воздуха и парциальным давлением водяных паров в воздухе

ров жидкости и воздуха. Поверхность воды, например, имеет температуру 20 °С и ее состояние определяется точкой 1. Воздух, омывающий поверхность жидкости, имеет температуру 30 °С, при этом точками 2, 3, 4, 5, 6 обозначены характерные его состояния. Лучи, соединяющие точку 1 с остальными, показывают характерные случаи соотношения между параметрами жидкости и воздуха. Среди них особо выделим сочетания 1–4 и 1–5.

В случае 1–4 разность парциальных давлений отрицательна ($P_{\text{ж}} - P_{\text{в}} < 0$), а разность потенциалов влажности положительна ($\theta_{\text{ж}} - \theta_{\text{в}} > 0$). Следовательно, исходя из разности парциальных давлений, поток влаги должен быть от воздуха к жидкости, а исходя из разности потенциалов влажности – наоборот, от жидкости к воздуху.

Для случая 1–5 $P_{\text{ж}} - P_{\text{в}} < 0$, $\theta_{\text{ж}} = \theta_{\text{в}}$, т.е. по разности парциальных давлений поток влаги должен быть от воздуха к жидкости, а по разности потенциалов влажности его не должно быть вообще.

Наиболее распространенной и удобной формой графического изображения процессов изменения тепловлажностного состояния воздуха является, как известно, *I-d*-диаграмма. Данные рис. 1 связи p и θ позволили дополнить *I-d*-диаграмму построением линий постоянного потенциала влажности.

На рис. 2 представлена *I-d*-диаграмма с нанесенными на нее линиями $\theta = \text{const}$. Такое дополнение позволило расширить область применения диаграммы для анализа процессов изменения тепловлажностного состояния воздуха на основе теории потенциала влажности.

Из рассмотрения линий $\theta = \text{const}$ видно, что в зоне влажного воздуха, близкого к состоянию насыщения ($\varphi = 80\text{--}100\%$), имеет место отклонение линий постоянных потенциалов влажности от линий $d = \text{const}$ влево по касательной к линии насыщения.

С целью проверки теоретических предположений, а также подтверждения правомерности использования зависимости $P = f(\theta, t)$ для анализа и расчета процессов тепловлагообмена, были проведены специальные экспериментальные исследования, в задачи которых входило решение следующих вопросов:

- изучение полей температуры и потенциала влажности в пограничных фазах воздуха и жидкости;
- определение параметров поверхностных фаз и выявление особенностей протекания процессов тепловлагообмена с учетом физической модели контактирующих сред, предполагающей существование поверхностных фаз;
- экспериментальная проверка правомерности использования концепции потенциала влажности для наиболее рельефных случаев сочетания параметров состояния, отмеченных на рис. 1 и 2, в частности при $\theta = \text{const}$.

Исследования проводились на специальном экспериментальном стенде, основным элементом которого была рабочая камера сечением 150×150 мм, длиной 1000 мм, имеющая поддон для жидкости. Температура в слое воздуха над поверхностью жидкости и жидкости с прилегающими к поверхности слоями по глубине измерялась с помощью медь-константановых термопар диаметром 0,08 мм, на расстоянии от передней кромки поддона 65, 100, 150, 200 и 300 мм соответственно.

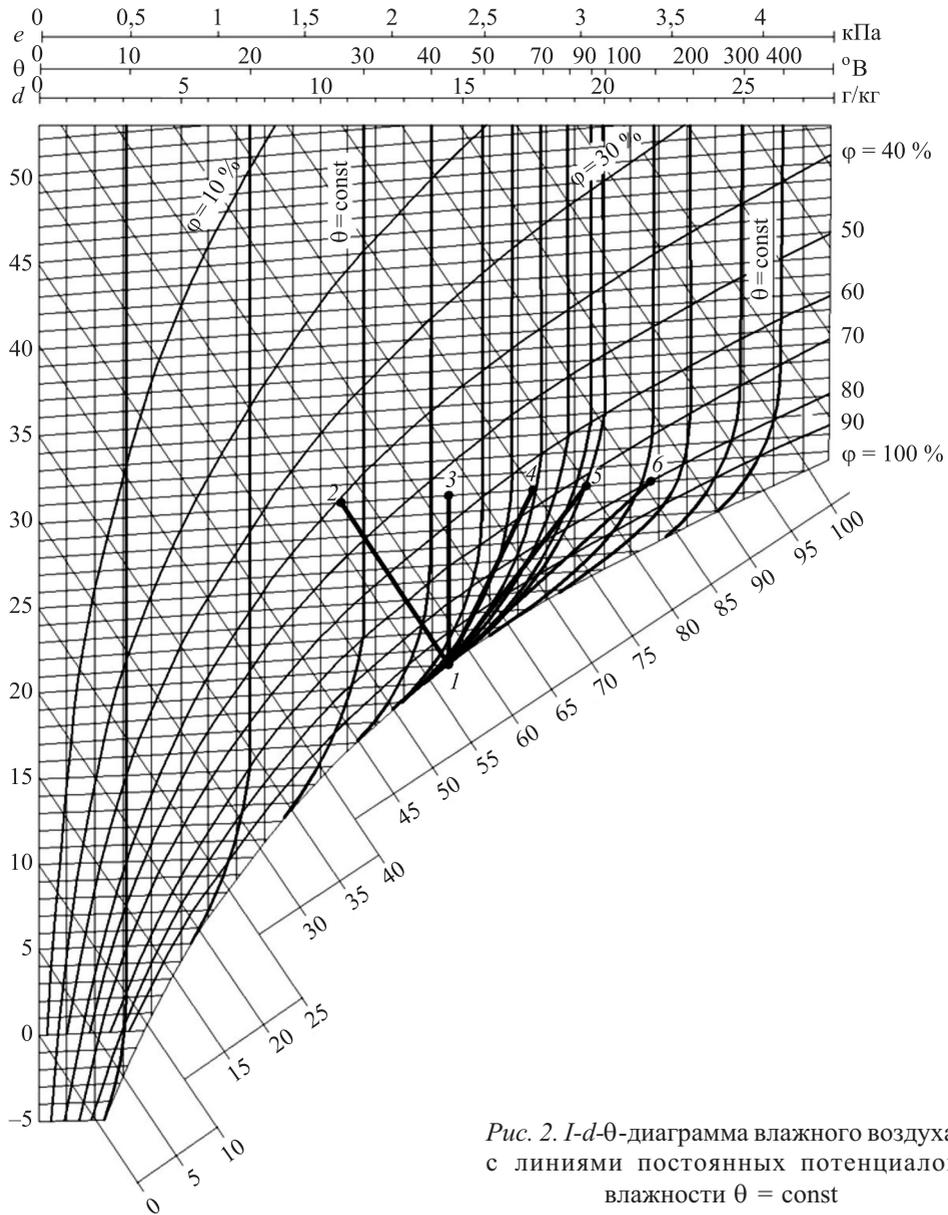


Рис. 2. $I-d-\theta$ -диаграмма влажного воздуха с линиями постоянных потенциалов влажности $\theta = \text{const}$

Проведение экспериментальных исследований предусматривало направленное изучение политропных и изоэнтальпийных состояний в системе «воздух–вода» с учетом существования поверхностных фаз на контакте сред. Поля температуры и потенциала влажности в пограничных фазах воздуха и воды изучались при различном сочетании начальных параметров сред в объемных фазах. Условия экспериментов определялись на основе зависимости $P = f(\theta, t)$ и $I-d-\theta$ -диаграммы. Температура жидкости изменялась в пределах 10–24 °С, относительная влажность 30–80 %, скорость потока воздуха 0,79–2,4 м/с.

Необходимо отметить, что вопрос определения истинного значения параметров поверхности раздела не нашел окончательного решения в работах Л.С. Клячко, А.В. Нестеренко, Л.В. Петрова, В. Хойслера, В.Х. Мак-Адамса, С. Миклея, Т. Мизушины и др.

Учитывая, что на контакте сред находится поверхностная фаза, и измерить истинные параметры поверхности раздела затруднительно, был применен графический способ их определения на основе экспериментальных данных распределения температуры и потенциала влажности в пограничных фазах. Важный раздел исследований был посвящен изучению состояния сред при постоянном значении потенциала влажности $\theta = \text{const}$.

Рассмотрим более подробно результаты одного из экспериментов, условия проведения которого определялись следующими параметрами:

- в объемной фазе воздуха – $t_c = 27,4$ °С, $t_m = 22,35$ °С;
- в объемной фазе воды – $t_{ж} = 15,3$ °С;
- скорость воздушного потока – $v = 0,79$ м/с;
- расстояние от передней кромки поддона – $l = 0,2$ м.

Были проведены замеры значений t_c , t_m и $t_{ж}$ (табл. 1) в пограничных фазах воздуха и воды на различном удалении от границы раздела сред, по результатам которых в координатах $H-t$, $H-\theta$ (H – расстояние по высоте от границы раздела сред до точки замера) строились линии распределения температур (t) и потенциала влажности (θ) в пограничных фазах. Результаты таких построений приведены на рис. 3. Параметры поверхности раздела определялись в точке пересечения продолжения линий распределения t и θ с границей раздела ($H = 0$). В рассматриваемом опыте $t_{п} = 17,6$ °С, $\theta_{п} = 48$ °В.

Таблица 1. Результаты экспериментального изучения полей температуры и потенциала влажности в пограничных фазах воздуха и воды ($l = 0,2$ м, $v = 0,79$ м/с, $\theta = \text{const}$), опыт № 40

Точки замера	H , мм	Воздух, °С		Вода, °С
		$t_c = 27,4$	$t_m = 22,35$	$t_{ж} = 15,3$
1	–0,4	–	–	17,5
2	–0,2	–	–	17,5
3	0,0	–	–	17,5
4	0,2	18,5	18,5	–
5	0,4	19,1	18,8	–
6	0,6	19,8	19,2	–
7	0,8	20,5	19,6	–
8	1,0	21,0	19,9	–

Из построений на рис. 3 видно, что температура поверхности, измеренная в эксперименте, практически соответствует температуре, полученной в результате графического построения с учетом толщины пограничной фазы. То же самое относится и к потенциалу влажности.

Таким образом, было установлено, что на границе раздела отсутствует скачок параметров. Отсутствие скачка параметров на границе раздела сред объясняется энергетически насыщенным состоянием поверхностной фазы, что согласуется с выводами теоретических исследований, представленных в работе [3].

Также было установлено, что при проведении эксперимента с $\theta = \text{const}$ ($\Delta P = 0,68$ кПа) отсутствовал процесс влагообмена между воздухом и водой,

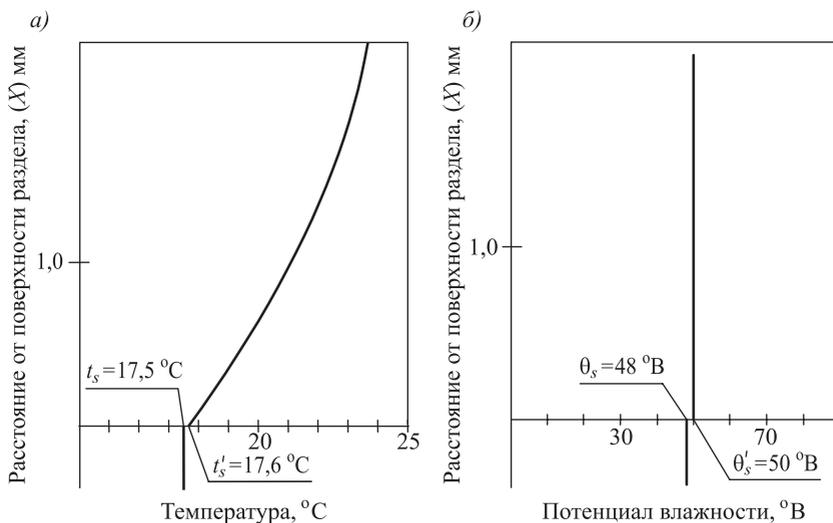


Рис. 3. Распределение температуры (а) и потенциала влажности (б) в пограничных фазах воздуха и воды при $v = 0,79$ м/с, $l = 0,2$ м (данные табл. 1)

t_n, θ_n – параметры поверхности раздела из построения полей температуры и потенциала влажности; t'_n, θ'_n – параметры поверхности раздела, измеренные в эксперименте

о чем свидетельствовало постоянство уровня жидкости в поддоне рабочей камеры. Это позволило сделать вывод о том, что процессы влагообмена в неизотермических условиях определяются разностью (или градиентом) потенциала влажности.

Необходимо отметить, что было обнаружено явление устойчивого динамического равновесия взаимодействующих сред при $\theta = \text{const}$, что выражалось в самопроизвольном поддержании данного состояния при небольших колебаниях параметров влажного воздуха в его объемной фазе, имевших место в процессе проведения эксперимента. Так, в данном опыте колебание t_c было от 24,7 до 27,1 °С, а t_m – от 22,35 до 22,1 °С. Изменение потенциала влажности составило от 48 до 46 °В. При этом произошло самопроизвольное изменение температуры поверхности воды от 17,5 до 17,35 °С, а потенциала влажности от 48 до 46 °В.

Таким образом, результатом всех изменений явилось сохранение состояния $\theta = \text{const}$, но при другом его значении.

Аналогичные результаты были получены и при других начальных условиях взаимодействия сред в пределах исследованного диапазона. Это стало подтверждением не только существования состояния $\theta = \text{const}$, но и того, что оно определяет условия термодинамического равновесия в системе «воздух–жидкость».

Приведенные выше результаты исследований подтверждают необходимость использования теории потенциала влажности для анализа и расчета процессов тепловлагообмена между воздухом и жидкостью.

Было также проведено экспериментальное изучение изоэнтальпийных состояний контактирующих сред, позволившее выявить особенности их протекания с учетом явлений на границе раздела.

Таблица 2. Результаты экспериментального изучения полей температуры и потенциала влажности в пограничных фазах воздуха и воды ($l = 0,2$ м, $v = 0,79$ м/с, $I = \text{const}$), опыт № 36

Точки замера	H , мм	Воздух, °С		Вода, °С
		$t_c = 19,6$	$t_m = 8,7$	$t_{ж} = 8,8$
1	-0,4	–	–	8,8
2	-0,2	–	–	8,8
3	0,0	–	–	8,8
4	0,2	12,3	8,7	–
5	0,4	13,0	8,7	–
6	0,6	13,7	8,7	–
7	0,8	14,3	8,7	–
8	1,0	14,9	8,7	–

Рассмотрим результаты одного из экспериментов, характеризуемых следующим сочетанием параметров контактирующих сред (табл. 2):

- параметры в объемной фазе воздуха – $t_c = 19,6$ °С, $t_m = 8,7$ °С;
- параметры в объемной фазе воды – $t_{ж} = 8,8$ °С;
- скорость воздушного потока – $v = 0,79$ м/с;
- расстояние от передней кромки поддона – $l = 0,2$ м.

По аналогии с вышерассмотренным опытом при $\theta = \text{const}$, на основе данных замеров t_c , t_m и $t_{ж}$ в пограничных фазах воздуха и воды, были построены линии распределения температуры (t) и потенциала влажности (θ) при $I = \text{const}$ (рис. 4). Определены параметры переходной фазы – $t_{п} = 11,6$ °С, $\theta_{п} = 17$ °В, а также нанесены на линии $H = 0$ экспериментальные значения параметров поверхности раздела – $t'_п = 8,8$ °С, $\theta'_п = 26$ °В.

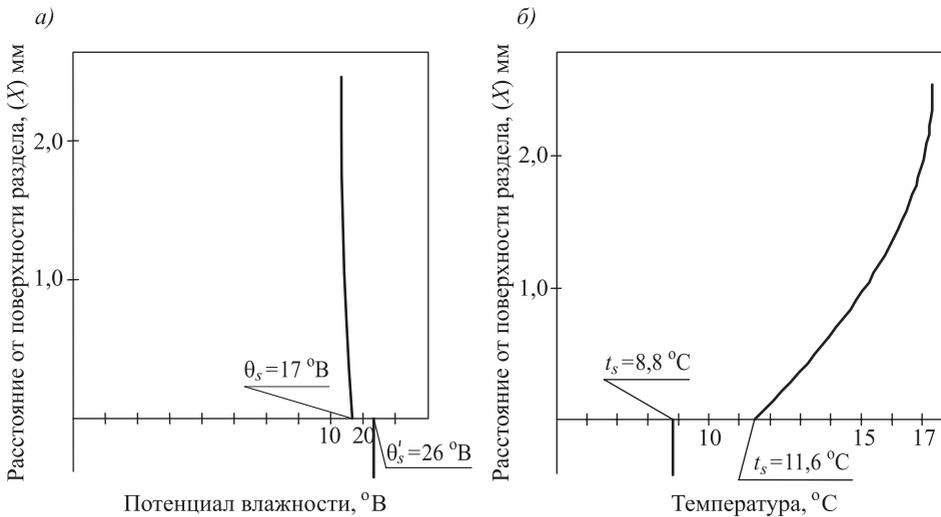


Рис. 4. Распределение потенциала влажности (а) и температуры (б) в пограничных фазах воздуха и воды при $v = 0,79$ м/с, $l = 0,2$ м (данные табл. 2)

$t_{п}$, $\theta_{п}$ – параметры поверхности раздела из построения полей температуры и потенциала влажности; $t'_п$, $\theta'_п$ – параметры поверхности раздела, измеренные в эксперименте

Построения на рис. 4 показывают, что $\Delta t = t_n - t'_n = 2,8 \text{ }^\circ\text{C}$, а $\Delta\theta = \theta'_n - \theta_n = 9 \text{ }^\circ\text{B}$, т.е. температура поверхности, измеренная в эксперименте, не соответствует полученной из построения полей температуры в пограничной фазе. То же самое относится и к потенциалу влажности. Таким образом, из построений видно, что на границе раздела сред имеет место скачок параметров.

Нанесение опытных точек на $I-d-\theta$ -диаграмму показало, что они расположены на линии $I = 26 \text{ кДж/кг} = \text{const}$, а состояние поверхностной фазы характеризуется точкой с параметрами $t = 11,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 70 \%$, т.е. наличие скачка параметров на границе раздела сред объясняется ненасыщенным состоянием переходной фазы.

Аналогичные результаты получены и при других начальных условиях взаимодействия $I = \text{const}$. Было установлено, что $\Delta t = t_n - t'_n$ составляет $2,5\text{--}3,8 \text{ }^\circ\text{C}$, а $\Delta\theta = \theta'_n - \theta_n = 4\text{--}10 \text{ }^\circ\text{B}$.

В результате обработки опытных данных получены критериальные зависимости с использованием потенциала влажности для определения локальных значений коэффициентов тепло- и влагообмена с учетом существования поверхностной фазы на границе раздела сред:

$$\text{Nu} = c_1 P_2^{0,33} \text{Re}^{0,74} k^{0,17}; \quad (3)$$

$$\text{Nu}_{\theta'} = c_2 (\text{Pr}_{\theta'})^{-2} \text{Re}^{1,08} k^{-0,28}, \quad (4)$$

где Nu , $\text{Nu}_{\theta'}$ – критерии Нуссельта;

Pr , $\text{Pr}_{\theta'}$ – критерии Прандтля;

$k = 1,018\text{--}1,033$; $c_1 = 0,046\text{--}0,052$; $c_2 = 0,0061\text{--}0,006$.

В критериальных зависимостях использован симплекс $k = T/T_n$, представляющий отношение температуры по сухому термометру в объемной фазе воздуха к температуре поверхности раздела и определяющий степень влияния состояния поверхностной фазы на процессы тепловлагообмена в системе «воздух–жидкость».

Таким образом, результаты исследований показали правомерность использования теории потенциала влажности для анализа протекания процессов тепло- и влагообмена с учетом явлений на границе раздела взаимодействующих сред.

Нанесение линий постоянных потенциалов влажности на $I-d$ -диаграмму позволило расширить область ее применения для анализа процессов изменения тепловлажностного состояния воздуха.

Экспериментально были установлены критериальные зависимости для Nu и $\text{Nu}_{\theta'}$, в которых использован симплекс $k = T/T_n$, учитывающий влияние на обменные процессы состояния поверхностной фазы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 175 с.
2. Джейкок М., Паффей Д. Химия поверхностей раздела фаз. М.: Мир, 1984.

3. Гогосов В.В., Налетова В.А. и др. Гидродинамика поверхностных явлений // Прикладная математика и механика. 1984. Т. 48, вып. 3.
4. Оно С., Кондо С. Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях. М.: Иностран. лит., 1963. 291 с.
5. Liss P.S., Balls P., Martinelli F.N., Coantic M. The effect of evaporation and condensation on gas transfer across an air-water interface // *Oceanol.* 1981. Acta 4. P. 129–138.
6. Lee R.J., Saylor J.R. The effect of a surfactant monolayer on oxygen transfer across an air/water interface during mixed convection // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2010. Vol. 53. P. 3405–3413.
7. Incropera F.P., De Witt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* // John Wiley & Sons, Inc., 2002.
8. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1985. 367 с.

Гвоздков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц.

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 22.10.15

Gvozdkov Alexandr Nikolaevich, PhD, ass. professor, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

HEAT AND MASS TRANSFER IN THE SYSTEM «AIR – WATER» FROM THE STANDPOINT OF THE HUMIDITY POTENTIAL THEORY

The article presents the results of theoretical and experimental studies on the application of the theory of humidity potential for calculating the heat and mass transfer between the air and water.

Based on the established dependence between the humidity potential and the partial pressure of water vapor in air at different temperatures, on the *I-d*-diagram were plotted lines of constant potential humidity $\theta = \text{const}$, which allowed to significantly expand the scope of its using for the analysis of the processes of heat and humidity changes air condition. Presents the results of experimental researches of processes of heat and mass transfer in the form of criterial equations for Nu , Nu_{θ} , considering the influence on the exchange process of the surface phase.

Key words: humidity potential, heat and humidity exchange, *I-d*-diagram, state $\theta = \text{const}$, surface phase, the temperature of the surface of the water.

REFERENCES

1. Bogoslovskiy V.N., Poz M.Ya. *Teplofizika apparatov utilizatsii tepla sistem otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [Thermophysics of spacecraft waste heat recovery systems for heating, ventilation and air conditioning]. Moscow, Stroyizdat, 1983. 175 p. (rus.)
2. Jacoc M., Paffey D. *Khimiya poverkhnostey razdela faz* [Chemistry of phase boundary surfaces]. Moscow, Mir, 1984 (rus.)
3. Gogosov V.V., Nalietova V.A. and others. *Gidrodinamika poverkhnostnykh yavleniy* [Hydrodynamics of surface phenomena]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Journal of applied mathematics and mechanics]. 1984. Vol. 48, iss. 3 (rus.)
4. Оно С., Кондо С. *Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях* [Molecular theory of surface tension in liquids]. Moscow, 1963. 291 p. (rus.)

5. Liss P.S., Balls P., Martinelly F.N., Coantic M. The effect of evaporation and condensation on gas transfer across and air-water interface *Oceanol.* 1981. Acta 4. Pp. 129–138.
 6. Lee R.J., Saylor J.R. The effect of a surfactant monolayer on oxygen transfer across an air/water interface during mixed convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2010. Vol. 53. Pp. 3405–3413.
 7. Incropera F.P., De Witt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* John Wiley & Sons, Inc., 2002.
 8. Bogoslovskiy V.N. *Teplovoy rezhim zdaniya* [The thermal regime of the building]. Moscow, Stroyizdat, 1985. 367 p. (rus.)
-

УДК 628. 349

К.А. КОВАЛЕНКО, Г.И. ПУШКАРЕВА

СОРБЦИОННОЕ УДАЛЕНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ОКСИДА МАРГАНЦА*

Исследованы сорбционные свойства марганцевой руды как природного источника оксида марганца для удаления меди и цинка из водных сред. В статических условиях определены оптимальные параметры сорбционного процесса для удаления ионов металлов до санитарных норм (время контакта, pH водной среды, расход сорбента).

Ключевые слова: сорбция, оксид марганца, марганцевая руда, медь, цинк.

Введение. Наибольшую опасность среди веществ, оказывающих негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека, представляют ионы тяжелых цветных металлов (медь, цинк, свинец, марганец, никель и др.). Длительное поступление металлов в организм с питьевой водой даже в относительно низких концентрациях может привести к их задержке и накоплению в нем, а впоследствии к развитию интоксикаций, сопровождающихся нарушением функционирования центральной нервной системы, внутренних органов, и другим изменениям. Высокий уровень загрязненности поверхностных, а в ряде случаев и подземных вод этими токсикантами связан, прежде всего, с активной антропогенной деятельностью человека. Основной вклад в загрязнение водных объектов металлами вносят сточные воды горнодобывающей промышленности, черной и цветной металлургии, машиностроительных, металлообрабатывающих, приборостроительных и других предприятий. В связи с чем очистка водных сред (природных и сточных вод) от ионов тяжелых металлов является актуальной задачей.

Одним из перспективных путей решения этой задачи можно рассматривать сорбционные процессы с использованием природных минеральных сорбентов, основные преимущества которых – относительно низкая стоимость и достаточно высокая сорбционная емкость.

В работах [1, 2] показано, что оксиды марганца, входящие в состав марганцевых руд, проявляют каталитические свойства по отношению к процессу окисления ионов железа и марганца, обладают окислительными и сорбционными свойствами по отношению к соединениям мышьяка. Цель наших исследований – изучение возможности использования марганцевых руд в процессах сорбционной очистки водных сред от ионов цинка и меди как наиболее распространенных и экологически опасных загрязнителей.

Методы исследований и обсуждение результатов. Исследования проводили на марганцевой руде одного из месторождений Сибири. Руду измельчали до крупности 0,5–3 мм на щековой дробилке, полученные фракции отмывали водой от глинистой составляющей и высушивали при ком-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00319).

натной температуре. Доизмельчение до 10–100 мкм проводили на центробежном истирателе: 30–40 % составляют частицы размером до 10 мкм, 40–60 % – 10–50 мкм, остальное – 50–100 мкм. Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии определен элементный состав руды: железо (23,23 %), марганец (21,25 %) и кремний (15,36 %); присутствуют алюминий (1,25 %), барий (1,36 %), калий (0,57 %), магний (0,24 %), фосфор (0,1 %) и прочие примеси в незначительном количестве. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что в руде преобладают криптоманан ($K_2Mn_8O_{16}$) и гетит ($FeO(OH)$), присутствуют кварц (SiO_2) и гематит (Fe_2O_3).

Изучение сорбционных свойств образцов руды проводили в статических условиях по стандартной методике [3]. Модельные растворы, приготовленные на водопроводной воде, с добавлением сульфатов цинка или меди, помещали в колбы, вносили навеску марганцевой руды и перемешивали на магнитных мешалках со скоростью 800 об/мин до достижения сорбционного равновесия. Затем сорбент отделяли фильтрованием, в фильтрате определяли остаточную концентрацию элементов. По полученным значениям рассчитывали сорбционную емкость руды по отношению к токсикантам и степень их извлечения. Измерение концентрации элементов в растворах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии.

Скорость достижения равновесного состояния (кинетика сорбции), наряду с сорбционной емкостью, является важной характеристикой сорбционного процесса и имеет практическое значение. Этот параметр определяли методом ограниченного объема. В конические колбы помещали по 0,2 дм³ однокомпонентного модельного раствора, содержащего цинк (2 мг/дм³) или медь (2,6 мг/дм³) в виде сульфатов и руду из расчета 1 г/дм³ для цинка, 0,1 г/дм³ для меди, и устанавливали их на магнитные мешалки. Через определенные промежутки времени руду отделяли на фильтре, в фильтрате определяли содержание соответствующего элемента. Рассчитывали величину сорбционной емкости по стандартной формуле. На основании полученных данных построены кинетические кривые сорбции (рис. 1). Время, достаточное для установления сорбционного равновесия, составляет 20–30 мин.

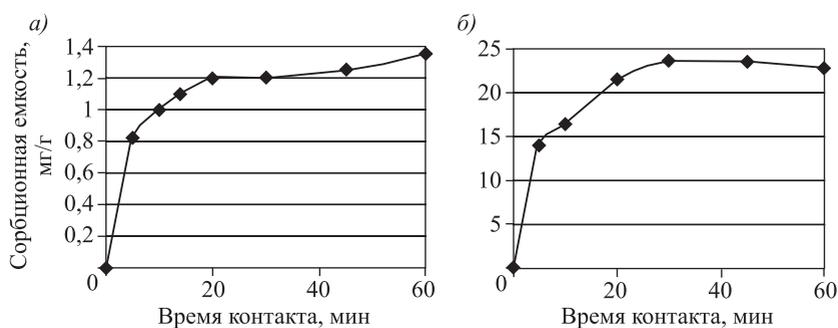


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции цинка (а) и меди (б) на марганцевой руде

Для определения сорбционной емкости руды по отношению к исследуемым элементам строили изотермы сорбции методом переменных концентраций на модельных растворах с содержанием цинка от 2,2 до 10,7 мг/дм³, рН–6,0 ÷ 6,2 или меди от 1,8 до 8,4 мг/дм³, рН–5,6 ÷ 5,8 (рис. 2). Перемешивание осуществляли при температуре раствора 22–24 °С в течение 30 мин.

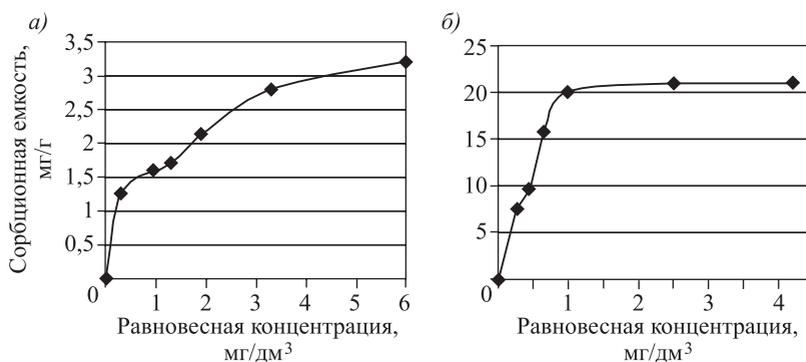


Рис. 2. Изотермы сорбции цинка (а) и меди (б) на марганцевой руде

Максимальная сорбционная емкость руды по отношению к цинку и меди в условиях эксперимента составляет 3,2 и 21 мг/г соответственно.

Полученные изотермы могут быть описаны математически уравнениями Фрейндлиха (1) или Ленгмюра (2):

$$A = \frac{K_L A_m C_p}{1 + K_L C_p}; \tag{1}$$

$$A = K_F C_p^{\frac{1}{n}}. \tag{2}$$

Здесь A – количество металла, сорбированное твердой фазой, отнесенное к ее массе (сорбционная емкость), мг/г;

C_p – равновесная концентрация металла в растворе, мг/дм³;

A_m – максимум сорбции или емкость монослоя Ленгмюра, мг/г;

K_L – константа сорбционного равновесия;

K_F – эмпирическая константа уравнения Фрейндлиха;

n – константа интенсивности сорбции, связанная с неоднородностью энергии системы и размером сорбируемых частиц [4, 5].

Коэффициенты уравнений 1, 2 сорбции цинка и меди рассчитывали, используя статистические функции MS Excel. Полученные значения представлены в таблице.

Сорбируемый металл	A_m (экспериментальное), мг/г	Модель Ленгмюра			Модель Фрейндлиха		
		K_L	A_m , мг/г	R^2	K_F	n	R^2
Zn	3,2	2,634	2,726	0,778	1,79	3	0,918
Cu	21	1,308	29,35	0,93	14,95	2,7	0,767

Примечание. R^2 – коэффициент корреляции.

Значения константы n (см. таблицу) указывают на то, что ионы меди и цинка сорбируются почти с одинаковой интенсивностью. Анализируя полученные значения коэффициентов корреляции, можно сделать вывод о том, что для описания сорбции цинка на марганцевой руде наиболее применимо уравнение Фрейндлиха ($R = 0,918$), для меди ($R = 0,93$) – уравнение Ленгмюра. Согласно мономолекулярной теории Ленгмюра [4, 5], медь сорбируется не по всей поверхности руды, а на активных центрах; активные центры считаются независимыми; каждый активный центр способен взаимодействовать только с одной молекулой сорбата, в результате на поверхности может обра-

зоваться только один слой сорбированных молекул; сорбция вызывается силами, близкими к химическим. Рассматривая сорбцию цинка по модели Фрейндлиха [4, 5], можно предположить, что между сорбированными частицами имеет место взаимодействие, активные центры не являются полностью независимыми друг от друга.

Теоретические и экспериментальные значения максимальной сорбции цинка и меди отличаются в 1,2 и 1,4 раза, на изотермах наблюдаются перегибы, это может быть связано с образованием второго слоя молекул или с одновременным протеканием нескольких видов сорбции (химической, физической, ионообменной).

Значительное влияние на сорбционный процесс оказывает кислотно-щелочное состояние водной среды. Снижение рН способствует уменьшению количества отрицательно заряженных участков поверхности для сорбции катионов. Точка нулевого заряда (ТНЗ) для оксидов / гидроксидов железа располагается в диапазоне 7–10, т.е. при низких значениях рН они не играют никакой роли в процессах сорбции катионов, так как в этих условиях указанные поверхности имеют положительный заряд. Оксид марганца имеет ТНЗ в диапазоне 2,8–4,5, поэтому при рН выше 4,5 оксид марганца меняет заряд поверхности на отрицательный, что имеет значение для сорбции катионов [5]. Зависимость сорбционных реакций катионов металлов от рН среды характеризуется, в частности, предпочтительной сорбцией их гидролизованых форм по сравнению со свободным ионом металла. Доля гидролизованых ионов металлов увеличивается с ростом рН. Поэтому представляет интерес исследование влияния рН на эффективность удаления исследуемых металлов на марганцевой руде. Согласно данным рис. 3, значения показателя рН водной среды, при котором достигаются санитарные нормы по остаточным концентрациям токсикантов, должны быть для цинка больше 6, для меди больше 5, т.е. значения рН очищаемой воды должно соответствовать рН начала осаждения соответствующих гидроокисей металлов, но не более рН, при которых начинается их растворение.

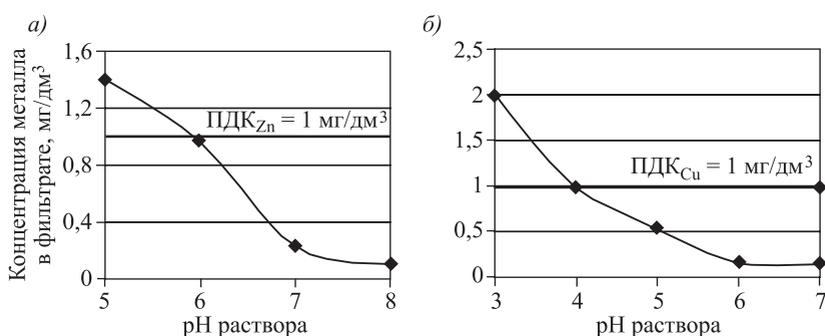


Рис. 3. Влияние рН очищаемой воды на удаление цинка (а) и меди (б) на марганцевой руде

Изучено влияние расхода марганцевой руды на степень извлечения загрязняющих веществ. В отдельные порции модельного раствора, содержащего цинк 2 мг/дм³ или медь 2,3 мг/дм³ при оптимальных значениях $pH_{Zn} - 6,2$ и $pH_{Cu} - 5,6$, добавляли навески руды от 0,5 до 5,0 г. Время перемешивания 30 мин. В фильтрах определяли остаточную концентрацию элементов и рассчитывали степень их извлечения в зависимости от расхода руды.

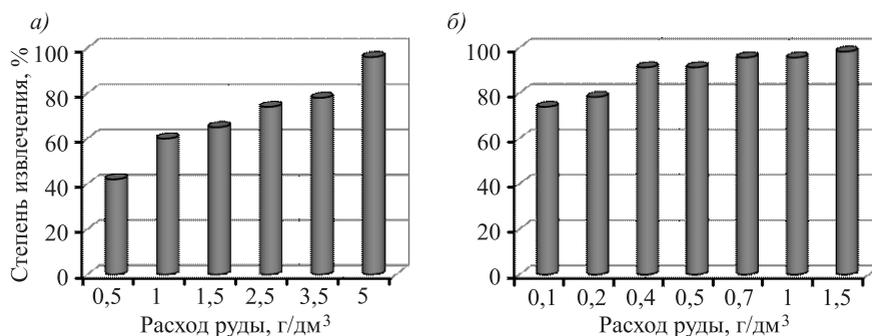


Рис. 4. Влияние расхода марганцевой руды на степень извлечения цинка (а) и меди (б)

Результаты представлены в виде диаграмм на рис. 4. Оптимальный расход руды для удаления цинка составляет 5 г/дм³ в условиях эксперимента, меди – 0,4 г/дм³, степень извлечения металлов – 96 и 92 % соответственно.

Выводы. В результате исследований установлено, что данная марганцевая руда проявляет сорбционную активность по отношению к цинку и меди. Изучены основные факторы (время контакта, рН водной среды, расход сорбента), влияющие на сорбционный процесс. Представленные в работе данные свидетельствуют о принципиальной возможности использования марганцевых руд, как природного источника оксида марганца, в процессах сорбционной очистки водных сред от ионов тяжелых цветных металлов до санитарных норм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пушкарева Г.И., Скитер Н.А. Возможность использования марганцевых руд при водоподготовке // ФТПРПИ. 2002. № 6. С. 103–107.
2. Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И., Коваленко К.А. О сорбционных свойствах марганцевых руд // ФТПРПИ. 2011. № 6. С. 118–122.
3. Методические рекомендации № 15. Сорбционное извлечение ценных компонентов из природных вод и технологических растворов / разраб. И.А. Клименко и др. – М.: ВИМС, 1981.
4. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел : пер. с англ. / ред. Г. Парфит, К. Рочестер. М.: Мир, 1986. 488 с.
5. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: аналит. обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.

Коваленко Ксения Андреевна, канд. техн. наук, науч. сотр.; E-mail: kovalenko-ksusha@mail.ru

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

Пушкарева Галина Ивановна, ст. науч. сотр.; E-mail: galinapush@mail.ru

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 21.10.15

Kovalenko Kseniya Andreevna, PhD, scientist; E-mail: kovalenko-ksusha@mail.ru, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Pushkareva Galina Ivanovna, senior scientist; E-mail: galinapush@mail.ru, Chinal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM AQUEOUS MEDIA BY ADSORPTION ON NATURAL MANGANESE OXIDE

The analysis involves adsorption characteristics of manganese ore as a natural source of manganese oxide to be used to remove copper and zinc from aqueous media. Under static conditions, the optimal adsorption parameters (time of contact, aqueous medium pH, sorbent consumption) are defined for removal of metal ions down to sanitary standards.

Key words: sorption, manganese oxide, manganese ore, copper, zinc.

REFERENCES

1. Pushkareva G.I., Skiter N.A. *Vozmozhnost' ispol'zovaniya margantsevykh rud pri vodopodgotovke* [Possibilities of Manganese Ore Use in Water Treatment]. FTPrPI [J. Min. Sci.]. 2002. Vol. 38, No. 6. Pp. 618–621 (rus.)
2. Bochkarev G.R., Pushkareva G.I., Kovalenko K.A. *O sorbtsionnykh svoystvakh margantsevykh rud* [Sorption Properties of Manganese Ores]. FTPrPI [J. Min. Sci.]. 2011. Vol. 47, No. 6. Pp. 837–841 (rus.)
3. *Metodicheskie rekomendatsii No. 15. Sorbtsionnoe izvlechenie tsennykh komponentov iz prirodnykh vod i tekhnologicheskikh rastvorov* [Recommended Practice no. 15, Recovery of Valuable Components by Sorption from Natural Waters and Processing Medium]. Moscow, VIMS, 1981 (rus.)
4. *Adsorbtsiya iz rastvorov na poverkhnostyakh tvërдыkh tel* [Adsorption at Solid Body Surface from Solutions, (translated from engl. Parfit G. and Rochester K.)]. Moscow, Mir, 1986. 488 p. (rus.)
5. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Adsorbtsiya tyazhëlykh metallov pochvami i gornymi porodami. Kharakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii: analiticheskiy obzor* [Heavy Metal Adsorption in Soils and Rocks. Characteristics of a Sorbent, Conditions, Parameters, and Mechanisms of Adsorption: Analytical Review]. Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2009. 155 p. (rus.)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.А. КУТУМОВ, А.Н. КОРНЕЕВ, Д.Э. АБРАМЕНКОВ

ДРОССЕЛЬНЫЙ ПНЕВМОУДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ С ФУНКЦИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕПУСКОМ В КАМЕРУ ХОЛОСТОГО ХОДА И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Представляемая работа является продолжением описания процесса перепуска воздуха между рабочими камерами в механизмах, синтезированных с применением известных признаков-элементов, являющихся базой создания нового поколения пневмоударных механизмов для широкого применения в строительстве, горном деле и машиностроении.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, дроссельное воздухораспределение, перепуск, камера рабочего хода, камера холостого хода, трубчатый выпуск воздуха, синтез пневмоударного механизма.

Введение. В работе приведен анализ аналогов с указанием их недостатков и принимается техническое решение – синтезированный вариант пневмоударного механизма.

Синтез выполнен на базе известных признаков-элементов, приведенных в классификациях [1, 2], являющихся базой для создания нового поколения пневмоударных механизмов с широкими возможностями применения. Анализ пневмоударных механизмов с функциями управления процессом перепуска части воздуха из камеры рабочего хода в камеру холостого хода включает системы управления с изменяющимися расходами воздуха за счет последовательного перекрытия проходных сечений каналов перепуска.

Вариант пневмоударного механизма [3] представлен на рис. 1.

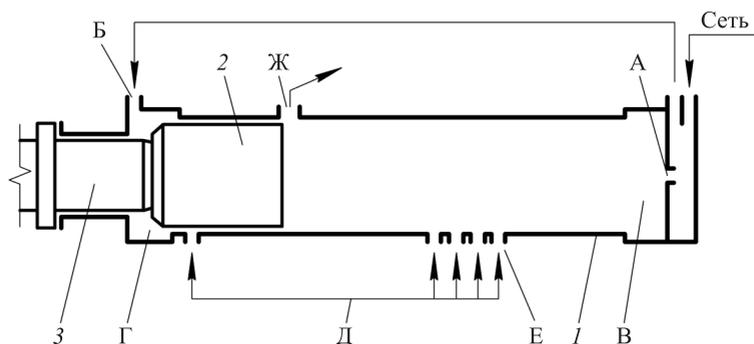


Рис. 1. Принципиальная схема пневмоударного механизма [3].
Обозначения см. в тексте

Сжатый воздух из сети постоянно поступает через дроссели А и Б в цилиндре 1 в камеру рабочего В и холостого Г хода. Частичный перепуск воздуха между камерами В и Г осуществляется через перепускной канал Д с ярусами каналов Е, расположенными в цилиндре со стороны камеры В, в зависимости от положения ударника 2. Опорожнение камер В и Г происходит попеременно через выпускной канал Ж.

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

К недостаткам механизма следует отнести: непроизводительный расход воздуха обеими камерами при их сообщении с атмосферой через выпускной канал в стенке цилиндра; перепускные каналы выполнены в стенке цилиндра, что обуславливает увеличение толщины стенок и массы цилиндра; перекрытие каналов перепуска осуществляется со стороны обеих камер, что приводит к увеличению местных сопротивлений перепускного тракта, потере внутренней энергии воздухом и снижению энергетических и экономических показателей рабочего процесса.

Вариант пневмоударного механизма [3] представлен на рис. 2.

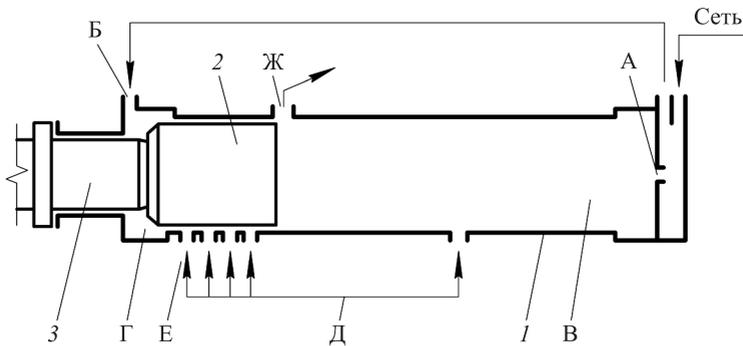


Рис. 2. Принципиальная схема пневмоударного механизма [3].
Обозначения см. в тексте

Сжатый воздух из сети постоянно поступает через дроссели А и Б в цилиндре 1 в камеру Г холостого хода. Частичный перепуск воздуха между камерами В и Г осуществляется через перепускной канал Д с ярусами каналов Е, расположенными в цилиндре со стороны камеры Г, в зависимости от положения ударника 2. Опорожнение камер В и Г происходит периодически через выпускной канал Ж в цилиндре. Под действием разности силовых импульсов со стороны камер В и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и наносит удары по инструменту 3.

К недостаткам механизма относятся все перечисленные для механизма, представленного на рис. 1. Дополнительно следует указать более сложное исполнение яруса перепускных каналов со стороны камеры холостого хода в сравнении с вариантом на рис. 1, где ярусы выполнены со стороны камеры рабочего хода, что позволяет увеличивать проходное сечение на впуске и поддерживать более высокое давление воздуха на выпуске в камеру холостого хода. Вариант исполнения канала перепуска в механизме на рис. 2 имеет более высокие значения местных сопротивлений и потерь энергии перепускаемого воздуха.

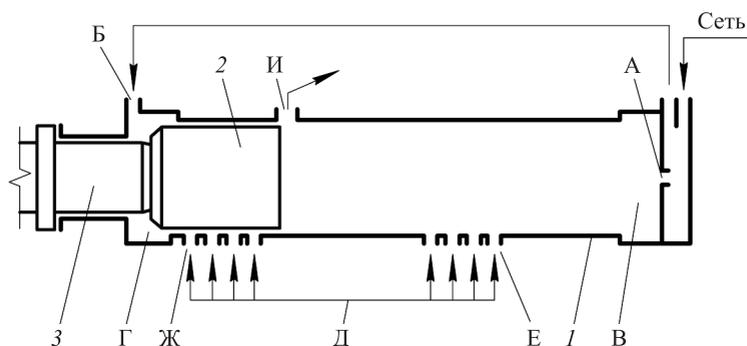


Рис. 3. Принципиальная схема пневмоударного механизма по варианту [3]. Обозначения см. в тексте

Вариант пневмоударного механизма [3] представлен на рис. 3.

Сжатый воздух из сети постоянно поступает через дроссели А и Б в цилиндре 1 в камеру рабочего В и холостого Г хода. Частичный перепуск воздуха между камерами В и Г происходит через перепускной канал Д с ярусами каналов Е и Ж на входе со стороны камер В и Г в цилиндре, в зависимости от положения ударника 2. Опорожнение камер В и Г осуществляется попеременно через выпускной канал И в стенке цилиндра.

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

Основные недостатки варианта, представленного на рис. 3, те же, как и у механизмов на рис. 1 и 2. Дополнительно следует отметить недостаток технического решения: ярусы перепускных каналов выполнены со стороны обеих камер и им свойственно удвоенное увеличение местных сопротивлений, что создает повышенные потери энергии перепускаемого воздуха и снижение энергетических и экономических характеристик пневмоударного механизма; двухстороннее выполнение ярусных каналов перепуска усложняет конструктивные и технологические свойства исполнения, что ведет к удорожанию изготовления механизма.

Вариант исполнения пневмоударного механизма [3] представлен на рис. 4. Техническое решение выполнено со щелевыми каналами перепуска и исключает недостатки варианта с ярусами перепускных каналов в виде круглых отверстий.

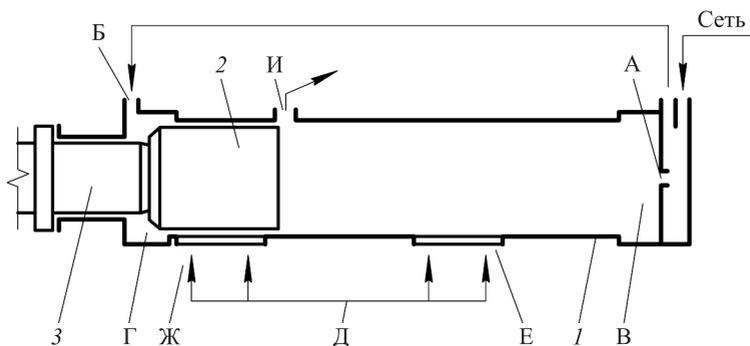


Рис. 4. Принципиальная схема пневмоударного механизма по варианту [3]. Обозначения см. в тексте

Сжатый воздух из сети постоянно поступает через дроссели А и Б в цилиндре 1 в камеру рабочего В и холостого Г хода. Частичный перепуск воздуха между камерами В и Г происходит через перепускной канал Д со щелевыми выходами Е и Ж, расположенными в цилиндре со стороны камер В и Г, в зависимости от положения ударника 2. Опорожнение камер В и Г осуществляется поперечной выпускной канал И. Под действием разности силовых импульсов со стороны камер В и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 3.

Техническому решению механизма на рис. 4, а также механизмов на рис. 1–3, и подобных им, свойственны общие недостатки: непроизводительный расход воздуха в период одновременного сообщения камер с атмосферой и сетью сжатого воздуха; управление перекрытием перепускных каналов ударником со стороны обеих камер.

Вариант принципиальной схемы пневмоударного механизма, синтезированного из известных признаков-элементов [1, 2], представлен на рис. 5.

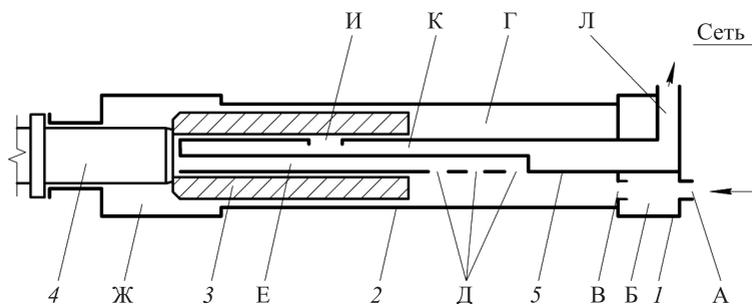


Рис. 5. Принципиальная схема синтезированного пневмоударного механизма по варианту [3]. Обозначения см. в тексте

Сжатый воздух поступает из сети по каналу А в предкамеру Б крышки 1 цилиндра 2, откуда по дроссельному каналу В в камеру Г рабочего хода. В зависимости от положения ударника 3, опертго на хвостовик 4 рабочего инструмента, воздух проходит по каналу в виде ярусов-каналов Д с диаметрами сечений, увеличивающихся в сторону хвостовика, и его продолжению в виде продольного канала Е в двухканальной трубке 5 в камеру Ж холостого хода.

Опорожнение камеры Ж осуществляется в зависимости от положения ударника после закрытия им радиального канала Д перепуска через радиальный канал И в трубке и его продолжению в виде продольного канала К и колленчатого канала Л в крышке. Под действием разницы силовых импульсов давления воздуха со стороны камер Ж и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику рабочего инструмента.

Ожидаемые положительные качества синтезированного пневмоударного механизма: снижение непроизводительного расхода воздуха за счет выпуска отработавшего воздуха только из камеры холостого хода; управление перекрытием перепускного канала ударником со стороны камеры рабочего хода; ярусные каналы перепуска выполнены с изменяющимся проходным сечением и так, что наибольшее проходное сечение канала перепуска расположено со стороны камеры холостого хода.

В данной работе авторы ограничиваются физико-математическим описанием рабочего процесса:

$V_{X0}, V_{П}, V_{P}$ – варьируемые объемы камеры холостого хода, предкамеры и камеры рабочего хода;

V_{X1}, V_{X2}, V_{X3} – варьируемые объемы камеры холостого хода, подключаемые последовательно;

$P_{AA}, P_C, P_{П}, P_P, P_{X0}, P_{X1}, P_{X2}, P_{X3}$ – давление воздуха в атмосфере, сети, в объемах камер $V_{П}, V_P, V_{X0}, V_{X1}, V_{X2}, V_{X3}$;

$\theta_{AA}, \theta_C, \theta_{П}, \theta_P, \theta_{X0}, \theta_{X1}, \theta_{X2}, \theta_{X3}$ – температура воздуха в атмосфере, сети, в объемах камер $V_{П}, V_P, V_{X0}, V_{X1}, V_{X2}, V_{X3}$;

$\Phi_{П}, \Phi_P, \Phi_{X0}, \Phi_{X1}, \Phi_{X2}, \Phi_{X3}$ – коэффициенты бародинамического процесса в объемах камер $V_{П}, V_P, V_{X0}, V_{X1}, V_{X2}, V_{X3}$;

$\Omega_{П}, \Omega_P, \Omega_{X0}, \Omega_{X1}, \Omega_{X2}, \Omega_{X3}$ – коэффициенты термодинамического процесса в объемах камер $V_{П}, V_P, V_{X0}, V_{X1}, V_{X2}, V_{X3}$;

$D_{И}, D_{Ц}, D_{У}, D_{Т}$ – варьируемые диаметры хвостовика инструмента, цилиндра, ударника, трубки;

$\omega_{AT}, \omega_{П}, \omega_P, \omega_{X0}, \omega_{X1}, \omega_{X2}, \omega_{X3}$ – варьируемые площади проходных сечений каналов выпуска, впуска и перепуска в объемах $V_{П}, V_P, V_{X0}, V_{X1}, V_{X2}, V_{X3}$;

$S_{У}, S_{Т}, S_{Ц}$ – варьируемые рабочие кольцевые площади ударника, трубки, цилиндра;

$m_{У}, m_{Т}, m_{ЦК}, m_{СК}, m_{К}$ – массы ударника, трубки, цилиндра, стакана, корпуса;

$m_{У}$ – по заданию, равная $2A_{У}/U_{У}^2$, где $A_{У}$ – энергия единичного удара, $U_{У}$ – скорость соударения ударника с хвостовиком инструмента;

$m_{Т}, m_{ЦК}, m_{СК}$ – определяются конструктивно;

$m_{К} = m_{ЦК} + m_{СК} + m_{Т}$;

$k_{У}, k_{К}$ – коэффициенты отскока ударника от хвостовика и корпуса от буртика инструмента;

$$k_{У} = \frac{U_{ОУ}}{U_{УУ}}, \quad k_{К} = \frac{U_{ОК}}{U_{УК}},$$

где $U_{ОУ}, U_{ОК}$ – скорости отскока ударника и корпуса после соударения;

$U_{УУ}, U_{УК}$ – скорости соударения ударника с хвостовиком и корпуса с буртиком инструмента;

$L_{У}$ – длина ударника;

a, b, c, d, e, f, h, q – варьируемые характерные длины участков выпуска и перепуска (рис. 6);

$x_{У}, x_{К}$ – перемещение ударника и корпуса пневмоударного механизма.

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

$$\varphi_j \equiv \varphi_i = \begin{cases} 0,2588 p_i \sqrt{\Theta_i} & \text{при } 0,5283 > p_i/p_j, \\ \frac{p_i \sqrt{\Theta_i} \sqrt{(p_i/p_j)^{2/k} - (p_i/p_j)^{(k+1)/k}}}{0,2588 p_j \sqrt{\Theta_j}} & \text{при } 0,5283 \leq p_i/p_j, \\ 0,2588 p_j \sqrt{\Theta_j} & \text{при } 0,5283 > p_j/p_i, \\ \frac{p_j \sqrt{\Theta_j} \sqrt{(p_j/p_i)^{2/k} - (p_j/p_i)^{(k+1)/k}}}{0,2588 p_i \sqrt{\Theta_i}} & \text{при } 0,5283 \leq p_j/p_i. \end{cases} \quad (1)$$

Ограничения для коэффициентов термодинамических процессов в зависимости от φ_{ij} –

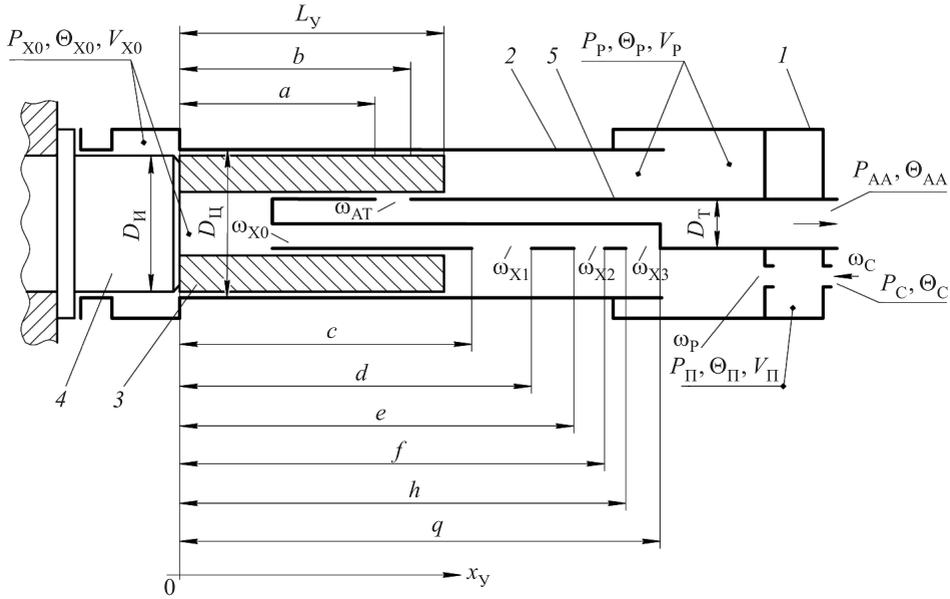


Рис. 6. Расчетная схема синтезированного пневмоударного механизма. Обозначения см. в тексте

$$\Omega_j \equiv \Omega_i = \begin{cases} k - (\Theta_i / \Theta_j) & \text{при } \varphi_{ij} \leq 0, \\ k - 1 & \text{при } \varphi_{ij} > 0, \\ k - (\Theta_j / \Theta_i) & \text{при } \varphi_{ij} \leq 0, \\ k - 1 & \text{при } \varphi_{ij} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Ограничения для перемещения ударника и корпуса –

$$\left(\frac{dx_y}{dt} \right)_O = - \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \quad (3)$$

$$\left(\frac{dx_K}{dt} \right)_O = - \left(\frac{dx_K}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_K \leq 0.$$

Физико-математическое описание рабочего процесса синтезированного пневмоударного механизма.

Бародинамическая составляющая процесса –

$$\begin{cases} \frac{dp_{II}}{dt} = \frac{k}{V_{II}} [W(\omega_{II}\varphi_{II} - \omega_P\varphi_P)], \\ \frac{dp_P}{dt} = \frac{k}{(V_P - x_y S_y)} \left[W(\omega_P\varphi_P - \omega_{X1}(x_y)\varphi_{X1} - \omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2} - \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3} + \right. \\ \left. + p_P \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{dp_{X0}}{dt} = \frac{k}{V_{X0}} [W(\omega_{X1}(x_y)\varphi_{X1} + \omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2} + \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3})], \end{cases} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_{X1}}{dt} &= \frac{k}{((V_{X0} + V_{X1}) + x_y S_y)} \left[W(\omega_{X1}(x_y)\varphi_{X1} + \omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2} + \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}) - \right. \\ &\left. - p_{X1} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{dp_{X2}}{dt} &= \frac{k}{((V_{X0} + V_{X1} + V_{X2}) + x_y S_y)} \left[W(\omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2} + \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}) - \right. \\ &\left. - p_{X2} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{dp_{X3}}{dt} &= \frac{k}{((V_{X0} + V_{X1} + V_{X2} + V_{X3}) + x_y S_y)} \left[W(\omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3} - \omega_{AT}(x_{AT})\varphi_{AT}) - \right. \\ &\left. - p_{X3} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right]. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Термодинамическая составляющая процесса –

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\theta_{\Pi}}{dt} &= \frac{\theta_{\Pi}}{p_{\Pi} V_{\Pi}} [W(\omega_{\Pi}\varphi_{\Pi}\Omega_{\Pi} - \omega_P\varphi_P\Omega_P)], \\ \frac{d\theta_P}{dt} &= \frac{\theta_P}{p_P (V_P - x_y S_y)} \left[W(\omega_P\varphi_P\Omega_P - \omega_{X0}\varphi_{X0}\Omega_{X0} - \omega_{X1}(x_y)\varphi_{X1}\Omega_{X1} - \right. \\ &\left. - \omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2}\Omega_{X2} - \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}\Omega_{X3}) + (k-1)p_P \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{d\theta_{X0}}{dt} &= \frac{\theta_{X0}}{p_{X0} V_{X0}} [W(\omega_{X1}(x_y)\varphi_{X1}\Omega_{X1} + \\ &+ \omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2}\Omega_{X2} + \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}\Omega_{X3})], \\ \frac{d\theta_{X1}}{dt} &= \frac{\theta_{X1}}{p_{X1} ((V_{X0} + V_{X1}) + x_y S_y)} \times \\ &\times \left[W(\omega_{X1}(x_y)\varphi_{X1}\Omega_{X1} + \omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2}\Omega_{X2} + \right. \\ &\left. + \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}\Omega_{X3}) - (k-1)p_P \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{d\theta_{X2}}{dt} &= \frac{\theta_{X2}}{p_{X2} ((V_{X0} + V_{X1} + V_{X2}) + x_y S_y)} \times \\ &\times \left[W(\omega_{X2}(x_y)\varphi_{X2}\Omega_{X2} + \omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}\Omega_{X3}) - (k-1)p_{X2} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right], \\ \frac{d\theta_{X3}}{dt} &= \frac{\theta_{X3}}{p_{X3} ((V_{X0} + V_{X1} + V_{X2} + V_{X3}) + x_y S_y)} \times \\ &\times \left[W(\omega_{X3}(x_y)\varphi_{X3}\Omega_{X3} - \omega_{AT}(x_{AT})\varphi_{AT}\Omega_{AT}) - (k-1)p_{X3} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right]. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Баромеханическая составляющая процесса –

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{S_y(p_{X0} + p_{X1} + p_{X2} + p_{X3} - p_p)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \frac{d^2 x_K}{dt^2} = \frac{S_y(p_{X0} + p_{X1} + p_{X2} + p_{X3} - p_p) + F_H}{m_K} & \text{при } x_K > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Площади диаметральных сечений канала выпуска ω_{AT} и перепуска ω_{X0} , ω_{X1} , ω_{X2} , ω_{X3} –

$$\omega_{AT} = \begin{cases} x_y < a & \omega_{AT} = 0, \\ a < x_y < b & \omega_{AT} = 0,5 \max \omega_{AT}, \\ x_y > b & \omega_{AT} = \max \omega_{AT}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_{X0} = \begin{cases} (x_y + L_y) < c & \omega_{X0} = \max \omega_{X0}, \\ c < (x_y + L_y) < d & \omega_{X0} = 0,5 \max \omega_{X0}, \\ (x_y + L_y) > d & \omega_{X0} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $\omega_{X0} = \omega'_{X1} + \omega'_{X2} + \omega'_{X3} = \omega_{X1}$;

$$\omega_{X1} = \begin{cases} (x_y + L_y) < c & \omega'_{X1} = \max \omega_{X1}, \\ c < (x_y + L_y) < d & \omega'_{X1} = 0,5 \max \omega_{X1}, \\ (x_y + L_y) > d & \omega'_{X1} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где $\omega'_{X1} = \omega_{X1} + \omega_{X2} + \omega_{X3}$;

$$\omega_{X2} = \begin{cases} (x_y + L_y) < e & \omega'_{X2} = \max \omega_{X2}, \\ e < (x_y + L_y) < f & \omega'_{X2} = 0,5 \max \omega_{X2}, \\ (x_y + L_y) > f & \omega'_{X2} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $\omega'_{X2} = \omega_{X2} + \omega_{X3}$;

$$\omega_{X3} = \begin{cases} (x_y + L_y) < h & \omega'_{X3} = \max \omega_{X3}, \\ f < (x_y + L_y) < q & \omega'_{X3} = 0,5 \max \omega_{X3}, \\ (x_y + L_y) > q & \omega'_{X3} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $\omega'_{X3} = \omega_{X3}$.

Рекомендации и пояснения к ограничениям и уравнениям процесса:

1. Площади ω_{AT} варьируются изменением ширины или длины участка $a-b$, а площади ω_{X1} , ω_{X2} , ω_{X3} – изменением ширины или длины участков $c-d$, $e-f$, $h-q$. При этом должны соблюдаться условия: $\omega_{AT} \ll \omega_{AA}$; $\omega_{X3} > \omega_{X2} > \omega_{X1}$; $(a + L_y) \geq q$.
2. Объемы V_{X0} и V_p определяются расчетом по [4] зависимостью $V_{X0} = V_p / \lambda$, где $\lambda = 6 \dots 7$. Объемы V_{X1} , V_{X2} , V_{X3} вычисляются по зависимостям: $V_{X1} = (V_{X0} + dS_y)$; $V_{X2} = (V_{X1} + (f - d) S_y)$; $V_{X3} = (V_{X2} + (q - f) S_y)$.
3. Площади диаметральных сечений приняты равными:

$$S_T = \omega_{AT} + \omega_{X1} + 3\delta_{CT}; \quad S_y = \frac{\pi}{4}(D_{Ц}^2 - D_T^2); \quad S_{Ц} = S_y + S_T; \quad D_{Ц} \approx D_y,$$

где δ_{CT} – толщина стенок трубки.

4. Проходные площади диаметральных каналов выпуска ω_{AT} и каналов перепуска ω_{X1} , ω_{X2} , ω_{X3} приняты с учетом коэффициента расхода воздуха $\mu_i = 1$. После уточнения конструктивных размеров пневмоударного механизма фактические значения μ_i для каждого сечения определяются продувкой каждого канала или расчетом, например, по справочнику [5] и принимаются геометрические размеры каналов ω_i .

Выводы. Рассмотренные материалы в виде аналогов и синтезированного из известных признаков-элементов пневмоударного механизма с перепуском воздуха между рабочими камерами показали следующее.

1. Процесс перепуска может дать положительный экономический эффект за счет снижения непроизводительного расхода воздуха.

2. Частные технические решения процесса перепуска будут обладать разными конструктивными и технологическими свойствами, применяемыми для различных условий эксплуатации, что можно видеть по ограничениям (3), учитывающим через коэффициенты отскока физико-механические свойства обрабатываемых материалов.

3. Пользуясь известными признаками-элементами, можно создавать технические решения пневмоударных механизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков Э.А., Абраменков Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: справ. пособие. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 430 с.
2. Кутумов А.А., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.
3. А.с. 1404321 СССР. Стенд для исследования дроссельных пневматических машин ударного действия / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов, В.В. Пичужков, опубл. 1988; Бюл. № 23.
4. Абраменков Э.А., Тимофеев Г.Ф. Исследование пневмоударного механизма с дроссельным воздушораспределением и разработка инженерной методики его расчета. Новосибирск: НТО НИСИ им. В.В. Куйбышева, 1973. Гос. рег. № 73021180. 96 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Кутумов Алексей Анатольевич, д-р техн. наук, проф.

Рубцовский институт (филиал) Алтайского государственного технического университета

Корнеев Андрей Николаевич, асп.

Рубцовский институт (филиал) Алтайского государственного технического университета

Абраменков Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 20.10.15

Abramenkov Eduard Aleksandrovich, DSc, professor;

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

Kutumov Alexey Anatol'evich, DSc, professor; Rubtsovsk Institute branch of Altai State Technical University, Russia

Korneev Andrei Nikolaevich, post-graduate student, Rubtsovsk Institute branch of Altai State Technical University, Russia

Abramenkov Dmitriy Eduardovich, DSc, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

THROTTLE MECHANISM PNEUMOSHOCK CONTROL FUNCTION BYPASS IN THE CHAMBER IDLE AND ITS PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION

The presented work is a continuation of the description of the process air bleed between the working chambers in the mechanisms, synthesized using known features elements that are the basis of creating a new generation of pneumatic percussive mechanism for widespread use in construction, mining and engineering.

Key words: air percussion mechanism, throttling air distribution, bypass, stroke camera, the camera is idle, venting tube, air percussion synthesis mechanism.

REFERENCES

1. **Abramenkov E.A., Abramenzov D.E.** Pnevmaticheskie mekhanizmy mashin udarnogo deystviya: drossel'nye, struynnye, bezzolotnikovye, besklapannye: spravochnoe posobie [Pneumatic machinery machines impact: butterfly, ink, bezzolotnikovye, valveless: Right. Collec.]. Novosibirsk, Publishing house Novosib. University Press, 1993. 430 p. (rus.)
2. **Kutumov A.A., Abramenzov D.E., Abramenzov E.A.** Navesnye pnevmaticheskie moloty dlya razrabotki mērzlykh gruntov [Mounted pneumatic hammers for frozen soil]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2008. 376 p. (rus.)
3. A.p. 1404321 USSR. Stend dlya issledovaniya drossel'nykh pnevmaticheskikh mashin udarnogo deystviya [Stand for investigation of throttle pneumatic percussive machines]. E.A. Abramenzov, A.G. Bogachenkov, V.P. Bryzgalov, V.V. Pichuzhkov. Publ. 1988, Bull. No. 23 (rus.)
4. **Abramenkov E.A., Timofeev G.F.** Issledovanie pnevmoudarnogo mekhanizma s drossel'nyim vozdukhoraspredeleniem i razrabotka inzhenernoy metodiki ego raschēta [Research pneumoshock mechanism to throttle air distribution and development of the engineering technique of its calculation]. Novosibirsk, NTO NISI them. V.V. Kuibyshev, 1973, State. Reg. No. 73021180. 96 p. (rus.)
5. **Idelchik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance]. M., Mechanical engineering, 1975. 559 p. (rus.)

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 614.83+502/.504

**YANG HUI-NING, CHEN JEN-HOW, CHIU HOME-JO, KAO TING-JIA,
 TSAI HSIAO-YUN, CHEN JENQ-RENN**

**ЯН ХУНИН, ЧЭНЬ ЦЯНЬХАО, ЧЖАО ХУНЧЖОУ, ГАО ТИНЦЗЯ,
 ЦАЙ СЯОЮНЬ, ЧЭНЬ ЦЯНЬВАНЬ**

**KAOSIUNG VAPOUR EXPLOSION – A DETAILED ANALYSIS OF
 THE TRAGEDY IN THE HARBOUR CITY**

**ВЗРЫВ ГАЗА В ГАОСЮНЕ – ПОДРОБНЫЙ АНАЛИЗ ТРАГЕДИИ
 В ПОРТОВОМ ГОРОДЕ**

On the midnight of July 31st, 2014, a catastrophic vapor explosion occurred in the downtown of Kaohsiung city. The incident was initiated from a leak of an underground pipeline transporting pressurized propylene liquid. Analysis of pipeline operation logs and pipeline break release modeling suggested that at least 90 000 kg of propylene leaked, entered the underground trench and spread into the trench 4,5 km in distance before meeting an ignition source some three hours later after the leak. The ignition caused a significant vapor explosion which blew out the road above the underground trench, damaged more than one hundred vehicles on the road with thirty two fatalities and more than three hundred injuries. This article takes an in-depth look at the explosion incident covering the events leading to the explosion, explosion damage, cause of the leak, spread of the leak, and identification of a probable ignition source. Lessons learnt and recommendations are given to prevent and mitigate the occurrence of similar incidents.

В полночь 31 июля 2014 г. в центре г. Гаосюн произошел катастрофический взрыв газа. Происшествие было инициировано утечкой сжиженного пропилена из подземного трубопровода, по которому он транспортировался под давлением. Изучение записей работы трубопровода и моделирование истечения из поврежденного участка показали, что предположительно 90 000 кг пропилен попали в подземную траншею и распространились по ней на расстояние 4,5 км до того, как встретит источник возгорания примерно через три часа. Воспламенение вызвало значительный взрыв, который снес дорогу над подземной траншеей, повредил более 100 машин, 32 человека стали его жертвами, более 350 получили ранения. В статье всесторонне рассматривается феномен взрыва, описываются события, приводящие к нему, ущерб, причины утечки, ее распространение и установление возможных источников возго-

© Hui-Ning Yang, Jen-How Chen, Home-Jo Chiu, Ting-Jia Kao, Hsiao-Yun Tsai, Jenq-Renn Chen, 2015

© Ян Хунин, Чэнь Цзяньхאו, Чжао Хунчжоу, Гао Тинцзя, Цай Сяюнь, Чэнь Цзяньвань, 2015

рания. Извлечены уроки и даны рекомендации по предотвращению и уменьшению риска возникновения подобных происшествий.

К е у w o r d s: gas explosion, pipeline, pressurized propilen liquid, gas leak, propagation of explosion, damages, injury.

К л ю ч е в ы е с л о в а: взрыв газа, трубопровод, сжиженный пропилен, утечка газа, распространение взрыва, повреждения, ущерб.

1. Introduction. Vapour cloud explosion is one of the most destructive events in the chemical process industries [1]. Vapour cloud explosion is normally initiated by leak of a large amount of flammable vapour, dispersion of the vapour cloud in air, and finally ignition of the cloud leading to combustion, flame propagation and generation of overpressure. The destructive nature of vapour cloud explosion has been documented in well-known incidents such as Flixborough explosion in 1976, Pasadena explosion in 1989, and more recently the BP Texas City explosion in 2005 [1, 2].

In 2013, a devastating confined vapour explosion occurred in storm drains in Qingdao, China, which resulted in 62 fatalities and 136 injuries [3]. The explosion was resulted from a leak of a crude oil pipeline with about 2000 000 kg of crude oil spilled into the city storm drains and spread several kilometres upstream and downstream. A larger but less documented incident was the gas explosion in Guadalajara, Mexico, in 1992 [4] in which gasoline was leaked into sewer through a corroded pipeline. There were 252 fatalities and more than 1500 injuries. Key factors contributing to the large number of fatalities and injuries in these two incidents are due to the very large quantity of flammable mass leaked and they occurred near or inside the well-populated communities in addition to the confinement in the sewer or drain. With growing process in-

1. Введение. Взрыв облака газа – одно из самых разрушительных явлений в химико-перерабатывающей промышленности [1]. Взрыву обычно предшествует утечка большого объема огнеопасного газа, затем происходит растворение облака газа в воздухе и, наконец, его воспламенение, приводящее к горению, распространению пламени и образованию повышенного давления. Разрушительный характер взрыва газового облака был зарегистрирован в таких известных инцидентах, как взрывы в Фликсборо (1976 г.), Пасадене (1989 г.) и Техас-Сити в 2005 г. (British Petroleum) [1, 2].

В 2013 г. в Циндао (Китай) опустошающий взрыв газа в ограниченном пространстве произошел в ливневой канализации, который привел к 62 жертвам и 136 раненым [3]. Взрыв явился следствием утечки из трубопровода сырой нефти и попадания около 2000 000 кг ее в ливневую канализацию с распространением вверх и вниз по течению. Более крупным, но менее задокументированным событием стал взрыв газа в Гвадалахаре (Мексика) в 1992 г. [4], когда бензин из поврежденного коррозией трубопровода излился в канализационный коллектор. Погибли 252 человека и более 1500 были ранены. Ключевые факторы, обусловившие большое число жертв и пострадавших в этих двух происшествиях, – огромное количество излившейся огнеопасной массы и то, что это случилось рядом или внутри густонаселенных мест, с накоплением в коллекторе или канализационной трубе. С ростом обрабатывающих производств и развитием городов взрыв газа станет главной угрозой, которую нужно тщательно

dustries and city development, confined vapour explosion will be the major hazard that must be carefully assessed when process industries interact with the city.

In the present work, we described a confined vapour explosion occurred in the downtown of Kaohsiung City, Taiwan, on the midnight of July 31st, 2014. The incident was initiated from a leak of a corroded underground pipeline transporting pressurized propylene. The leak entered the underground storm water trench, spread more than 4,5 km, and finally met an ignition source some three hours later after the leak. Although this incident bears similarities to the Qindao explosion and Guadalajara explosion, there was a subtle difference in that the present case was a leak from a pressurized, flashing liquid which would vaporize completely upon leak into ambient environment while the later cases dealt with flammable liquids with only partial vaporization. Challenges and recommendations are given to prevent and mitigate the occurrence of similar incidents.

2. Event leading to the explosion. The pipeline related to the incident is a high-pressure line connecting the LCY Chemical Corporation Tashe Plant and the harbour terminal company, China General Terminal & Distribution Corporation (CGTDC). It is a four inches pipe buried about 1 m below grade with a total distance of about 27 km solely devoted to transporting liquid propylene. Its route was planned in 1986 and operation started in 1993. A total of three underground pipelines, one 8-in ethylene line, one 6-in propylene line, and one 4-in propylene line, were built at the same time by Taiwan CPC Corporation and the 4-in line was transferred to LCY after the erection. Initially, the

оценивать, если промышленные предприятия располагаются в городе.

В статье описывается взрыв газа в ограниченном пространстве, происшедший в деловой части г. Гаосюн (Тайвань) ночью 31 июля 2014 г. Причиной случившегося стала утечка сжиженного пропилена из поврежденного коррозией подземного трубопровода, по которому он транспортировался под высоким давлением. Поток попал в ливневую канализацию, распространился по ней более чем на 4,5 км и в конце концов (примерно через 3 ч после возникновения утечки) встретился с источником воспламенения. Хотя этот случай имеет сходство со взрывами в Циндао и Гвадалахаре, его особенностью является то, что вытекшая горючая жидкость полностью испарилась в окружающую среду, в то время как два других инцидента были связаны с частичным испарением опасных жидкостей. Даны предложения и рекомендации по предотвращению и уменьшению риска подобных событий.

2. Происшествие, ставшее причиной взрыва. Трубопровод, имеющий отношение к аварии, является линией высокого давления, связывающей завод корпорации LCY Chemical Corporation Tashe (LCY) и расположенный в гавани терминал компании China General Terminal & Distribution Corporation (CGTDC). Это 4-дюймовая труба, заглубленная примерно на 1 м и имеющая общую протяженность около 27 км, предназначенная исключительно для транспортировки жидкого пропилена. Трасса была спроектирована в 1986 г. и начала работать в 1993 г. В это время корпорацией Taiwan CPC Corporation были построены три подземных трубопровода – один 8-дюймовый для этилена и два для пропилена – 6- и 4-дюймовый, последний из которых после монтажа был передан в распоряжение LCY. Первоначально 4-дюймовая труба была подключена к терминалу Taiwan CPC Corporation Cianjhen. Впоследствии была построена допол-

4-in line was connected to the Taiwan CPC Corporation Cianjhen terminal. Subsequently, an extension line to CGTDC terminal was built as a second supply source. Although the pipeline route had carefully avoided the major downtown residential area, 25 years later most part of the pipeline is now surrounded by commercial and residential buildings.

On 20:46 July 31st 2014, an unknown white fog was reported to come out intermittently from manholes of the storm trench beneath the junction of Ersheng 1st Road, Kaixuan 2nd and Kaixuan 3rd Roads. Fire fighters from Kaohsiung City Fire Bureau arrived the site on 20:50, secured the area and began spraying water on the fog. An incident command post was also setup in the foot path of the road junction. Efforts were made to identify the leak materials and leak source but were in vain. By 21:50 with conflict information on the leak source and unknown leak gases, the on-scene commander from Fire Bureau decided to call EPA Southern Environmental Incidents Specialist Team, which is operated by Southern Centre of Emergency Response of Toxic Substances, National Kaohsiung First University of Science & Technology, for on-scene analysis.

On 22:20, a small explosion in the manhole of storm water trench occurred about 1 km away from the initial leak scene. The explosion did not escalate. Around 22:35, the EPA Specialist Team arrived the site. Efforts were made to identify the gas and find the leak source. Around 22:50, a major white smoke was found coming out from nearby light rail construction site underground trench opening. EPA Specialist Team entered the light rail construction site to perform gas sampling and analysis. This opening was considered as the source of the

нительная линия к CGTDC как второй источник снабжения. Хотя трасса была достаточно удалена от главной жилой части города, в настоящее время, спустя 25 лет, большая часть трубопровода окружена коммерческими и жилыми зданиями.

31 июля 2014 г. в 20:46 поступило сообщение о неизвестном белом тумане, периодически появляющемся над люками ливневой канализации ниже пересечения дорог 1-й Эрсена и 2-й и 3-й Кайсюана. Пожарные из городского пожарного бюро Гаосюна прибыли на место в 20:50, оцепили зону и стали поливать туман водой. В непосредственной близости от места происшествия был размещен командный пункт. Были предприняты попытки определить вещество и источник утечки, но они оказались безуспешными. В 21:50, располагая противоречивой информацией о месте утечки и неизвестном газе, командир группы из пожарного бюро решил вызвать для выполнения анализов на месте южную команду специалистов по экологическим происшествиям из Environmental Protection Agency (EPA), находившуюся под управлением Южного центра экстренного реагирования на токсические вещества (Первый национальный университет науки и технологий, г. Гаосюн).

В 22:20 в люке ливневой канализации на расстоянии около 1 км от места первоначальной утечки произошел небольшой взрыв, не получивший развития. В 22:35 прибыла команда специалистов из EPA, и были сделаны попытки определить газ и найти источник утечки. Около 22:50 был обнаружен сильный белый туман, выходящий из отверстия расположенной поблизости подземной траншеи на стройплощадке скоростного трамвая. Команда специалистов зашла на площадку для забора образцов газа и выполнения анализов. Указанное отверстие было определено как источник

leak and the site was considered as the hot zone with restricted entry. An online Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy was also setup about 100 m from the command post in Kaixuan 3rd Roads to identify the unknown gases. Air samples were also taken back for FTIR analysis. Unfortunately, explosion occurred before the air sample was fed into FTIR which blew up not only the FTIR spectrometer but also the vehicle and injured five EPA Specialist Team members. Thus, there was no clear conclusion regarding the leak gas, the leak source and the source owner before the explosion. Formal confirmation of the leak gas to be propylene was delayed to 6:30 am the following day by another FTIR spectrometer from EPA Specialist Team on the intact storm water trench in Ersheng 1st Road.

Investigation after the explosion revealed the pressure transmitter on the side of Taiwan CPC pipeline connected to LCY pipeline recorded a sudden drop of pipeline pressure from 4,2 to 1,37 MPa on 20:43. Both CGTDC and LCY Tashe Plant did not installed pressure transmitter on their side of pipeline. Only pressure gauges and flow meters were installed. Subsequently, LCY Tashe Plant operator found in the control room that the pipeline flow meter indicated zero flowrate. LCY operator phoned CGTDC operator in CGTDC control room. CGTDC operator found that the flowrate from the pump was abnormal and reached 33 000 kg/hr, well above the normal flow rate of 23 000 kg/hr. The operator also found that the pumping pressure was dropped from 4,0~4,5 to 2,7 MPa and further dropped to 1,8 MPa, while the electric current for the pump motor rose from 120~130 amperes to 180 amperes. The operator then shut off the pump and pipeline isolation valve. The pipeline pressure dropped to

утечки и площадка обозначена как опасная зона с ограниченным входом. В 100 м от командного пункта на 3-й дороге Кайсюана был установлен инфракрасный Фурье-преобразователь (FTIR) спектроскопии для опознания неизвестного газа. Также были взяты пробы воздуха для анализа с помощью FTIR. К сожалению, до того как образцы были введены в FTIR, произошел взрыв, который повредил не только FTIR-спектрометр, но и автомобиль, а также ранил пять членов команды специалистов EPA. Таким образом, не было точного представления о том, утечка какого газа произошла, где располагался источник и кто его владелец. Формальное заключение о том, что вытекающий газ является пропиленом, было дано специалистами EPA только в 6:30 утра следующего дня с помощью другого FTIR-спектрометра на неповрежденной трубе ливневой канализации у 1-й дороги Эрсена.

Выполненное после взрыва расследование показало, что датчик давления, установленный на стороне трубопровода Taiwan CPC, соединенного с линией LCY, в 20:43 записал внезапное падение давления в трубе с 4,2 до 1,37 МПа. Ни CGTDC, ни завод LCY не имели записывающих датчиков давления – были установлены только манометры и расходомеры. Позже оператор LCY Tashe обнаружил в диспетчерской, что расходомер показал нулевое поступление, и позвонил оператору в диспетчерскую CGTDC. Тот увидел, что поток от насоса был аномальным, достигая 33 000 кг/ч, – много больше нормы в 23 000 кг/ч; он также заметил, что давление насоса упало с 4~4,5 до 2,7 МПа и затем понизилось еще до 1,8 МПа, при этом электрический ток в двигателе насоса увеличился со 120~130 до 180 А. Тогда оператор выключил насос и запорный клапан трубопровода, после чего давление в трубе упало до 1,3~1,35 МПа. Инженеры с обеих

1,3~1,35 MPa after the shutoff. The engineers of the two sites discussed and decided instead of carrying out a pressure test at pumping pressure, a static pressure test with isolation valves at both sides of pipeline closed was carried out. The pipeline pressure maintained at the propylene vapour pressure of 1,3~1,35 MPa. By 22:00, LCY manager demanded to start pumping again. By 22:15 pumping restarted but CGTDC pipeline flow meter indicated a flowrate of 24 500 kg/hr yet LCY operator found that their flow meter indicated a flowrate of 6000 to 7000 kg/hr. Engineers of both companies agreed that such flowrate discrepancy should be resolved later. On 23:23, a CGTDC foreman for the next shift smelled propylene near Kaixuan 3rd road on his way to work. He suspected that it could be a leak from their pipeline and thus he rushed to CGTDC plant. He arrived 10 minutes later, expressed his concern to control room operator and ordered the shutdown of the pump. By 23:57, explosion occurred. Neither companies informed the Kaohsiung City Fire Bureau or any government agencies regarding the flow rate and pumping pressure abnormalities even after the explosion. Clearly, the slow response and negligence of operators in combined with production oriented plant manager were the major contributing factors for the catastrophic explosion.

3. The Explosion and the damage. Without any warning, an explosion occurred near the command post on 23:57 July 31st. The explosion was occurring beneath the road surface with a smoke erupting out from the storm water trench manhole, followed by road surface crack, and a large fire erupted out. The road surface was blown out and pushed upwards all vehicles and personnel on the road and then collapsed to the trench. Fig. 1

сторон после обсуждения решили провести проверку статического давления с закрытыми с двух сторон запорными клапанами, вместо того, чтобы выполнить измерения давления при работающем насосе. Давление в трубопроводе установилось на уровне давления пропиленового пара 1,3~1,35 МПа. В 22:00 менеджер LCY потребовал возобновить перекачку. В 22:15 работа насоса была возобновлена, но расходомер на трубопроводе CGTDC показал поток в 24 500 кг/ч, в то время как оператор LCY обнаружил, что данные их расходомера – от 6000 до 7000 кг/ч. Инженеры обеих компаний согласились, что это несоответствие расходов может быть разрешено позднее. В 23:23 руководитель следующей смены CGTDC по дороге на работу почувствовал запах пропилена вблизи 3-й дороги Кайсюана. Он заподозрил, что это могла быть утечка из их трубопровода, и поэтому поспешил на завод CGTDC. Прибыв 10-ю минутами позже, он высказал свое предположение диспетчеру и распорядился выключить насос. В 23:57 произошел взрыв. Ни одна из компаний не сообщила пожарному бюро г. Гаосюн или другим правительственным учреждениям о нарушениях в расходе и давлении перекачки даже после взрыва. Ясно, что медленные действия и небрежность операторов в сочетании с нацеленностью руководителя завода на продолжение работы стали главными факторами, способствовавшими катастрофическому взрыву.

3. Взрыв и вызванные им повреждения. Взрыв произошел без каких-либо предварительных признаков 31 июля в 23:57 вблизи от командного пункта, под дорогой, с выбросом дыма из люков ливневой канализации, растрескиванием дорожного полотна и прорывом большого огня. Дорожное покрытие взлетело, подбросило вверх весь транспорт и персонал, а затем обрушилось в траншею. На рис. 1 по-



Fig. 1. The explosion affected area, the distribution of casualties and the pipeline route

Рис. 1. Зона поражения взрыва, распределение погибших людей и маршрут трубопровода

shows the explosion affected area, the distribution of casualties and the pipeline route. The explosion propagated along the Kaixuan 2nd road to the north and Kaixuan 3rd road to the south along the storm water trench. At the end of Kaixuan 2nd road, the explosion propagated towards Sanduo 1st road and its junction to Wuqing 2nd road. A total of 4,5 km road were blown out.

Fig. 2 shows photos of explosion damage at different roads. The junction of Sanduo 1st road and Wuqing 2nd road suffered the largest fatalities and injuries as indicated in fig. 2, *a*. Wuqing 2nd road is famous for many midnight snack shops. A total of fourteen civilian were killed by the blast wave and fire ball while more than one hundreds were injured. Another factor contributed to the significant fatalities in this area is that the road surface covering the storm water trench was only about 0,5 m which is very thin comparing with the 1~2 m in other roads. The explosion not only blew out the road surface but also shattered the road into small fragment and debris. Casualties

казаны зона поражения взрыва, распределение погибших и маршрут трубопровода. Взрыв распространился по канализационной траншее на север вдоль 2-й дороги и на юг вдоль 3-й дороги Кайсюана. У конца 2-й дороги Кайсюана взрыв пошел в направлении 1-й дороги Сандуо и ее пересечения со 2-й дорогой Вукинг. В общей сложности взорвалось около 4,5 км дорог.

Рис. 2 показывает разрушения от взрыва на различных дорогах. Пересечение 1-й дороги Сандуо со 2-й дорогой Вукинг отмечено наибольшим числом жертв и раненых, как обозначено на рис. 2, *a*. 2-я дорога Вукинг известна большим числом ночных закусочных. Взрывной волной и огненным шаром были убиты 14 граждан, более 100 ранены. Еще один фактор, способствовавший значительным жертвам в этой зоне, – это равная всего лишь 0,5 м толщина дорожного покрытия над траншеей ливневой канализации, что очень мало в сравнении с 1–2 м на других дорогах. Взрыв не только снес дорожное покрытие, но и раздробил его на мелкие фрагменты и осколки. Большинство поражений были вызваны ударами осколков и пламенем взрыва.

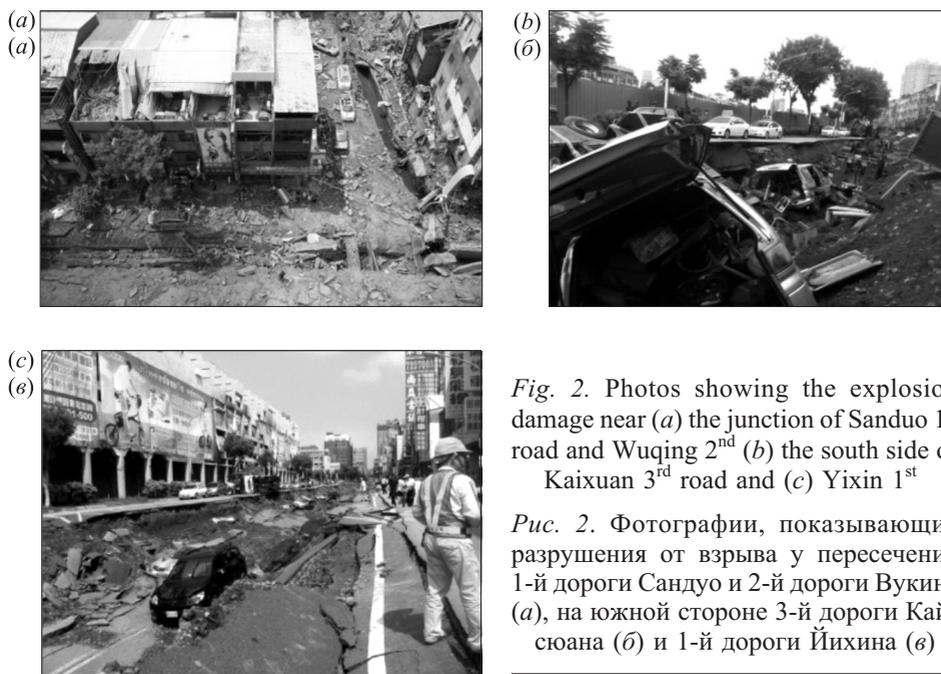


Fig. 2. Photos showing the explosion damage near (a) the junction of Sanduo 1st road and Wuqing 2nd (b) the south side of Kaixuan 3rd road and (c) Yixin 1st

Рис. 2. Фотографии, показывающие разрушения от взрыва у пересечения 1-й дороги Сандуо и 2-й дороги Вукинг (а), на южной стороне 3-й дороги Кайсюана (б) и 1-й дороги Йихина (в)

were most caused by the debris impact and the explosion flame.

The second largest fatalities were occurred in the junction of Kaixuan 2nd road, Kaixuan 3rd road, and Ers-heng 1st Road which centred around the incident command post. Fire trucks that parked on the Kaixuan 2nd and 3rd roads and were overturned by blown out road as shown in fig. 2, b. More than twenty fire fighting trucks were damaged along with three emergency response vehicles from EPA Specialist Team. Seven of the ten fatalities on this road junction were fire fighters. The explosion damage on the south side of Kaixuan 3rd road and Yixin 1st Road was less severe compared with other area as shown in fig. 2, c. It is likely that most explosion energy was dissipated by the thick road surface on top of the storm water trench. The explosion on the Yixin 1st road continued through the storm water trench near Guanghua 3rd road eventually vented through the No. 5 boat canal and blown out the canal terminal.

Второе по числу смертельных случаев место – узел 2-й и 3-й дорог Кайсюана и 1-й дороги Эрсена, которые сосредоточились вокруг созданного командного пункта. Пожарные машины, припаркованные на 2-й и 3-й дорогах Кайсюана, были опрокинуты взорванной дорогой, как показано на рис. 2, б. Было повреждено более двадцати противопожарных грузовиков и три машины экстренного реагирования команды специалистов EPA. Семь из десяти погибших на этом пересечении дорог были пожарными. Повреждения от взрыва на южной стороне 3-й дороги Кайсюана и 1-й дороги Йихина были менее серьезными в сравнении с другими зонами (рис. 2, в). Похоже на то, что большая часть энергии взрыва была рассеяна толстым дорожным покрытием над траншеей ливневой канализации. Взрыв на 1-й дороге Йихина распространился по канализационной траншее у 3-й дороги Гангуа и в конце концов вышел через судовой канал № 5, разрушив терминал канала.

4. Analysis of leak. 4.1. *The leak point.* After the explosion, a large jet fire developed near the junction of Ersheng 1st Road and Kaixuan 3rd Road as shown in fig. 3, *a*. This was the largest fire after the explosion and it lasted till 6 am the following day. As the fire diminished gradually, it can be seen clearly that the fire was coming out from a branch of storm water trench as indicated in fig. 3, *b*. Clearly, this would be the source of leak.

4. Анализ утечки. 4.1. *Место утечки.* После взрыва возник большой очаг огня у пересечения 1-й дороги Эршена и 3-й дороги Кайсюана, как показано на рис. 3, *a*. Это был самый крупный пожар после взрыва, продолжавшийся до 6:00 утра следующего дня. По мере того, как пожар постепенно уменьшался, становилось ясным, что огонь выходит из ответвления траншеи ливневой канализации, как видно из рис. 3, *b*. Понятно, что здесь могло быть место утечки.

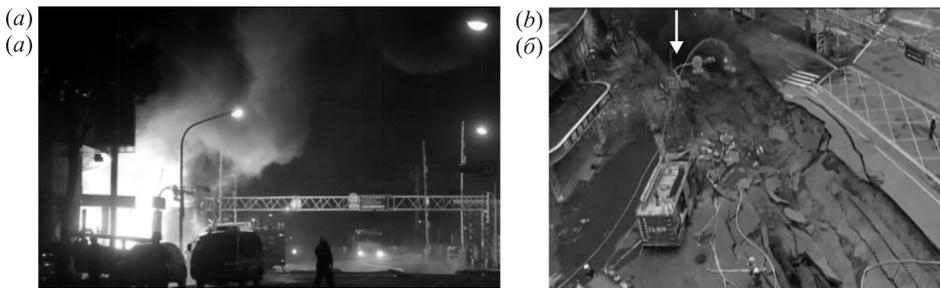


Fig. 3. Photos of the fire after the explosion on the north side of junction of Kaixuan 3rd road and Ersheng 1st road. Time of the photos: (a) 12:00 am (b) 06:00 am

Рис. 3. Фотографии пожара после взрыва к северу от пересечения 3-й дороги Кайсюана и 1-й дороги Эршена в 12:00 ночи (a) и 6:00 утра (b)

Subsequent inspection of the trench branch with jet fire revealed that there were three pipelines passing through the trench. The 4-in line was completely exposed in air and had a break opening of 4 by 7 cm as shown in fig. 4. The 6-in and 8-in lines were located next to the 4-in line, partially exposed in air, and remained intact. Inspection of the leaked pipeline also showed pipeline wall thickness great-

Последующее обследование ветки траншеи, где был огонь, показало, что траншею пересекали три трубопровода. 4-дюймовая труба полностью повисла в воздухе, и в ней имелся пролом размером 4×7 см (рис. 4). Расположенные далее 6- и 8-дюймовая трубы были частично раскрыты и остались неповрежденными. Исследование трубопровода, из которого произошла утечка, обнаружило, что толщина стенки

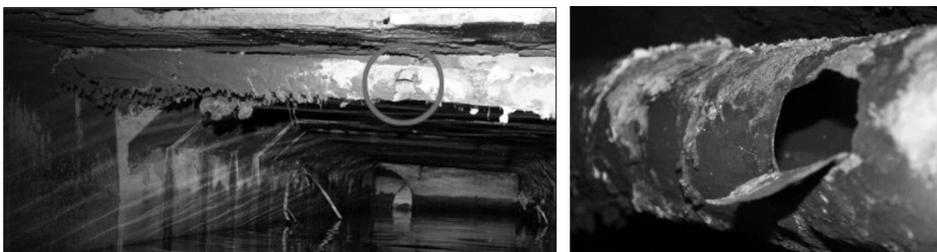


Fig. 4. Photos of the storm water trench, the 4-in propylene pipeline and the break
Рис. 4. Фотографии траншеи ливневой канализации, 4-дюймового трубопровода пропилена и отверстия в трубе

ly reduced from its original 6 mm to less than 1 mm by corrosion from the humid ambient environment in the trench.

4.2. *Amount of the leak.* It is important to estimate the leak rate and amount of leaked in order to assess the potential damage and evacuation zone. The leak rate was dominated by leak opening and the pipeline pressure. Fig. 5, a shows the pipeline pressure recorded at Taiwan CPC Cianjhen terminal which is a branch line to the CGTDC and LCY pipeline. As the Taiwan CPC Cianjhen terminal was close to CGTDC pumping station, the recorded pressure can be a good approximation of the upstre-

трубы значительно меньше изначальных 6 мм, доходя до 1 мм вследствие коррозии во влажной окружающей среде траншеи.

4.2. *Объем утечки.* Важно оценить расход и объем утечки для того, чтобы определить потенциальный ущерб и зону эвакуации. Основное влияние на расход оказывают отверстие утечки и давление в трубопроводе. Рис. 5, а представляет запись давления, сделанную в терминале Taiwan CPC Cianjhen, который является ответвлением линии трубопровода CGTDC и LCY. Поскольку этот терминал расположен вблизи от насосной станции CGTDC, зарегистрированное давление может считаться хорошим приближением к

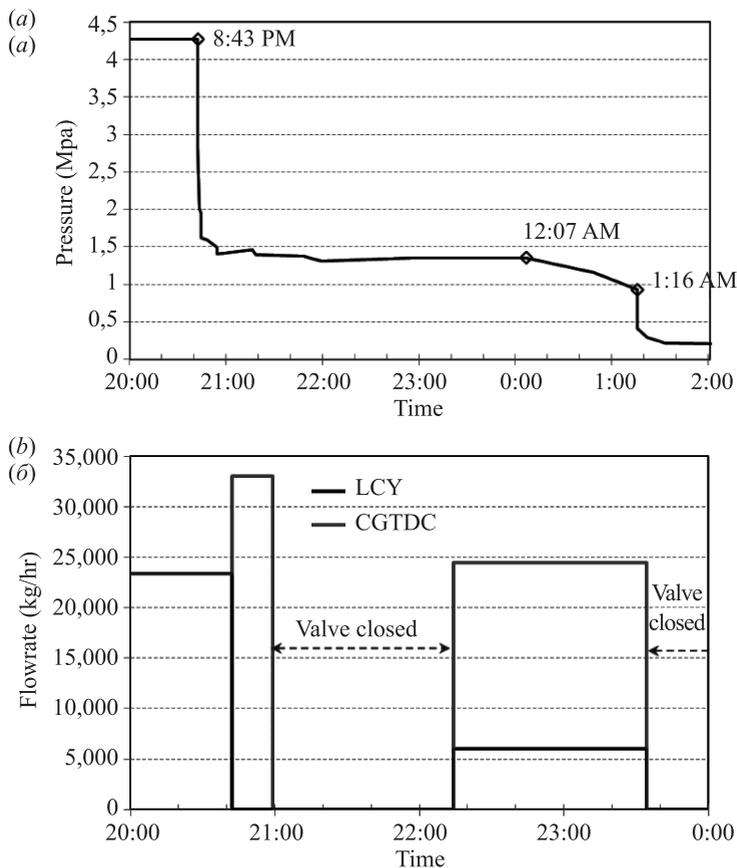


Fig. 5. Pipeline pressure recorded at Taiwan CPC Cianjhen terminal, a branch line to the CGTDC and LCY pipeline (a). Recorded flowrate on CGTDC and LCY side (b)

Рис. 5. Давление в трубопроводе, записанное в терминале Taiwan CPC Cianjhen, ответвлении линии трубопровода CGTDC и LCY (a); запись расхода на стороне CGTDC и LCY (б)

am pressure of the leak. As the boiling point of propylene is far below the ambient pressure, the leak from the pipeline may or may not flash depending on the upstream pressure. If the upstream pressure is higher than the saturation vapor pressure, the propylene may leak out as a liquid before flashing (Crowl and Louvar, 2012). If however the upstream pressure is close to the saturation pressure, flashing is expected and the typical two-phase flashing flow across an orifice may be used (*ibid.*).

As *fig. 5, a* indicates that the pipeline upstream pressure after the break was very close to propylene saturation pressure, flashing two-phase flow will be the dominant mode of leak. Although more detailed modeling can be done for the two-phase pipe flow, Chen et al. [5] showed that the liquid dried out is expected to occur in about 10 s for a 100 m pipeline containing pressurized propane and butane. In the present case with very long pipeline and long leak time of more than 1 hr, liquid dry out was also expected near the break and the vapor choked flow equation (Crowl and Louvar, 2012) can be a good estimation of leak rate.

Fig. 5, b showed the recorded flowrate on CGTDC and LCY side. The area difference between the two records will be the amount lost during pumping and mostly in liquid form. Direct integration gives 34 000 kg. For the valve closed period, a total of 97 min, the loss is calculated to be 56 800 kg from the vapour choked flow equation and 160 000 kg from the flashing flow equation. The latter is far larger than the possible pipeline inventory of 100 000 kg based on the 27 km of pipeline volume and propylene density. As expected, the value from

давлению потока выше положения утечки. Так как точка кипения пропилена намного ниже атмосферного давления, то воспламенение зависит от давления выше по потоку от положения утечки. Если давление в потоке выше, чем давление насыщенного пара, пропилен может изливаться как жидкость вплоть до воспламенения (Crowl and Louvar, 2012). Однако, если давление в потоке близко к давлению насыщения, то может воспламениться газ, и можно рассматривать процесс как типичное двухфазное горение по всему сечению канала (там же).

Как показывает *рис. 5, а*, давление потока в трубопроводе после прорыва было очень близко к давлению насыщения пропилена, поэтому горящий двухфазный поток будет доминировать. Без использования подробного моделирования двухфазного потока в трубе Чэнь и др. [5] показали, что прекращение истечения жидкости произойдет примерно за 10 с для трубопровода длиной 100 м, содержащего сжатый пропан и бутан. В данном случае с очень длинной трубой и длительным временем истечения (более 1 ч), можно предположить отсутствие жидкости вблизи отверстия, тогда расход газа через отверстие можно оценивать на основе уравнения запертого течения пара (Crowl and Louvar, 2012).

Рис. 5, б представляет запись расходов на стороне CGTDC и LCY. Разность площадей графиков будет объемом, потерянным при перекачке, главным образом в жидкой форме. Прямое интегрирование дает 34 000 кг. За период, когда запорный клапан был закрыт, общей продолжительностью около 97 мин, расчет по уравнению запертого течения пара дает оценку потери в 56 800 кг, а по уравнению потока с горением – 160 000 кг. Последнее значение намного больше 100 000 кг – вместимости трубопровода длиной 27 км с учетом плотности пропилена. Как и ожидалось, объем, полученный расче-

vapour choked flow calculation is considered a more realistic value compared with that from flashing flow equation. Thus, a total of 90 000 kg propylene was estimated to leak before the ignition.

4.3. *Spread of the leak.* Although the source of the leak was confirmed, it is important to know how the leak in the trench was spread to cause such a large damage. Subsequent investigation revealed that there were two storm water trench branches, one being directly beneath the Ersheng Road but is only 7 m in length and sealed in the other end, the other being about 10 m north of the dead ended branch and housed the pipelines. The later was then connected to the trench beneath Ersheng Road. Fig. 6 put up a schematic diagram showing all the trenches and trench openings. The trench branch that housed the pipeline had a manhole upstream which was the manhole with the suction sound. As the pipe break was facing towards the main trench, the break leak would form a jet and entrained significant air from upstream and thus the manhole. Thus, the direction of the leak is in consistent with the finding of suction sound in the upstream

том для дросселированного потока пара, представляется более реалистичным в сравнении с тем, что дает уравнение горящего потока. Таким образом, объем пропилена, вытекшего до воспламенения, оценен в 90 000 кг.

4.3. *Распространение утечки.* Кроме установления места утечки важно знать, как происходило распространение газа по траншее, чтобы был нанесен такой большой ущерб. Последующее расследование показало, что имелись две ветви траншеи ливневой канализации – одна непосредственно под Эрсен Роуд, но длиной всего 7 м и закрытая на другом конце, другая в 10 м к северу от тупиковой ветви и через нее проходили трубопроводы. Эта ветвь соединена с траншеей под Эрсен Роуд. На рис. 6 дано схематическое изображение всех траншей и канализационных люков. Вверх по течению в траншее, пересекаемой трубопроводами, имелся люк, в котором был слышен звук всасывания воздуха. Так как пролом в трубе был обращен в сторону основной траншеи, то утечка из отверстия могла образовать струю и вызвать значительное движение воздуха сверху, т.е. через люк. Таким образом, направление потока согласуется с обнаруженным звуком всасывания в распо-

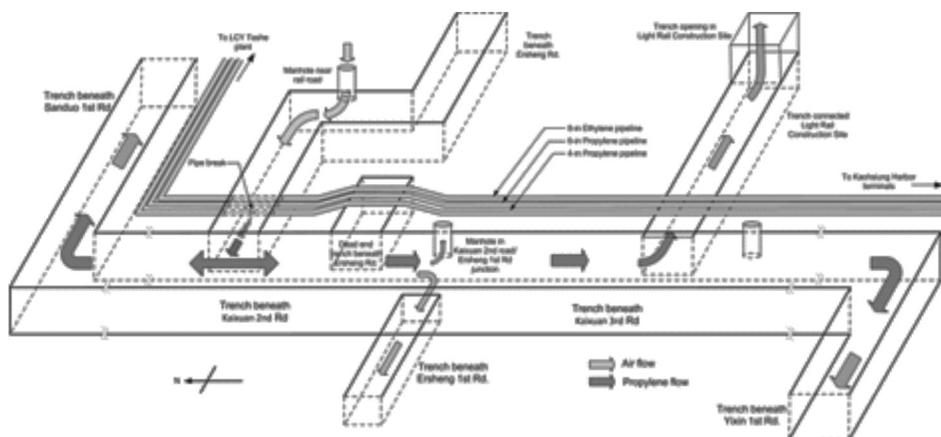


Fig. 6. Schematic diagram of storm water trench, the pipeline, and the spread of the leak propylene

Рис. 6. Схема траншей ливневой канализации, трубопровода и распространения утечки пропилена

manhole. It is also consistent with the fact that there was virtually no damage in Ersheng road.

In addition, the leak jet entered the main trench and spread both sides to Kaixuan 2nd and 3rd roads. This is in agreement with the fact that the manhole on the junction of Kaixuan 2nd road and Ersheng 1st road was the initial spot of vapour spread out of the trench to ground. Furthermore, a branch on the Kaixuan 2nd road was connected to the light rail construction site with a very large opening of 3 by 3 m. This opening provided the least resistance for propylene vapour to escape to the ground and was considered the major source of leak before the explosion. Interestingly, the opening also provided a vent during explosion which reduced the explosion overpressure in that branch and therefore the ground above the branch was intact.

As the main storm water trench beneath Kaixuan 2nd and 3rd roads were connected to Sanduo 1st road and Yixin 1st road, respectively, majority of the vapour spread along Kaixuan 2nd and 3rd roads and then to Yixin road and Sanduo 1st road where the entire road surface above the trench was blow out. The trench beneath Sanduo 2nd road was however not connected to the trench beneath Sanduo 1st road and thus remained intact. The trench beneath Ruilong road was connected to the trench beneath Yixin 1st road but suffered only minor damage owing to its smaller dimension. Finally, the damage on the Ersheng 1st road was also minor as compared with those of Kaixuan 2nd and 3rd roads with road surface remained intact. This was again caused by the smaller trench dimension and reduced branch flow. In fact, all the branches connected to the main trench were mostly intact without road surface blow out.

ложенном выше люке, а также с тем фактом, что на Эрсен Роуд не было фактически никаких повреждений.

Кроме того, струя утечки дошла до главной траншеи и распространилась в обе стороны ко 2-й и 3-й дорогам Кайсюана. Это согласуется с тем фактом, что пересечение 2-й дороги Кайсюана и 1-й дороги Эрсена было начальной точкой выхода газа из траншеи на поверхность. Более того, ответвление на 2-й дороге Кайсюана было связано со стройплощадкой скоростного трамвая с большим отверстием размером 3×3 м, которое обеспечило наименьшее сопротивление прорыву пара пропилен на поверхность и считалось основным источником утечки до взрыва. Интересно, что отверстие обеспечило отток во время взрыва, уменьшивший взрывное давление в этой ветви, вследствие чего над ней не было повреждений земли.

Поскольку основная канализационная траншея под 2-й и 3-й дорогами Кайсюана связана с траншеями под 1-й дорогой Сандуо и 1-й дорогой Йихина, соответственно большая часть газа распространилась вдоль 2-й и 3-й дорог Кайсюана и затем 1-й дорогой Йихина и 1-й дорогой Сандуо, где все дорожное покрытие над траншеями было взорвано. Однако траншея под 2-й дорогой Сандуо не была связана с траншеей под 1-й дорогой Сандуо и поэтому осталась неповрежденной. Траншея под Жуйлун Роуд соединялась с траншеей под 1-й дорогой Йихина, но получила лишь незначительные повреждения благодаря своим меньшим размерам. Наконец, повреждения на 1-й дороге Эрсена также были незначительными в сравнении со 2-й и 3-й дорогами Кайсюана, где дорожное покрытие осталось целым. Это было обусловлено малыми размерами траншеи и уменьшенным потоком в ветви. Фактически все ответвления от главной траншеи в основном не получили повреждений и дорожное покрытие над ними не было взорвано.

In summary, the spread of the vapour flow in the trench was in consistent with the damage of the road. The spread of the leak vapour in the underground trench was governed by the flow resistance which is in turn affected by trench dimension, branched flow and trench opening to ground. Finally, the area with most vapour escaped do not necessarily corresponds to the leak source but rather depends on the size of opening to ground. These findings will be useful for all incident commanders dealing with underground pipeline leak incidents provided that all underground trenches are well documented and available during the incident. Unfortunately, the lack of information on the complicated trench network in the present case has prevented the on-scene commander from making a proper judgment regarding the leak source and potential evacuation zone.

5. Analysis of ignition source.

An additional factor contributing to the vapour explosion is the ignition source. It is crucial to identify the exact ignition source so that a better site control in any future incident can be taken. As the ignition occurred more than three hours after the leak, it is difficult to determine the exact ignition source owing to very wide dispersed release. Several available videos from road surveillance cameras, vehicle driving records, and reporter cameras were used to review the direction of fire and explosion propagation. All videos pointed to the junction of Ersheng and Kaixuan Roads as the initiation location. In addition, a video taken by a journalist near the command post captured the explosion sound, a white smoke erupting out of a manhole on the road junction. This is the only video captured the moment before and after the ignition and thus confirmed that

В целом распространение потока газа по траншее сопровождалось повреждениями дороги. Продвижением газа в подземной траншее управляло сопротивление потоку, на которое в свою очередь влияли размеры траншеи, разветвления потока и отверстие траншеи, открытое наружу. Наконец, зона с наибольшим скоплением газа не обязательно соответствует месту утечки, но скорее зависит от размера отверстия, выходящего на поверхность земли. Эти результаты будут полезны для руководителей аварийно-спасательных работ, имеющих дело со случаями утечек из подземных трубопроводов, при условии, что все подземные траншеи хорошо задокументированы и доступны во время происшествий с ними. К сожалению, отсутствие информации о сложной сети траншей в рассмотренном инциденте препятствовало выработке руководителем работ на месте аварии правильных заключений относительно источника утечки и потенциальной зоны эвакуации.

5. Анализ источника воспламенения. Дополнительным источником, способствующим взрыву газа, является источник воспламенения. Крайне важно определить его для того, чтобы наилучшим образом контролировать место в любом будущем происшествии. Поскольку воспламенение произошло более чем через три часа после утечки, трудно точно определить источник возгорания вследствие очень широкого рассеяния выброса. Для обзора направления распространения огня и взрыва были использованы различные доступные видеозаписи с дорожных камер наблюдения, авторегистраторов и репортерских камер. Все источники указали на пересечение Эрсен Роуд и Кайсюан Роуд как исходное место. Дополнительно на видео, снятом журналистом рядом с командным пунктом, зарегистрированы звук взрыва и белый туман, извергающийся из люка на пересечении дорог. Это единственная запись, захватившая момент

the junction of Ersheng 1st road and Kaixuan Road was the area with the first ignition.

As the area were blocked for traffic, the only available ignition sources were the fire trucks which remained running to provide firewater. In fact, there was a fire truck near the junction of Ersheng 1st road and Kaixuan Road as shown in fig. 3, *b*. Further investigation revealed that the fire truck was sit on top of an electrical cable junction box cover. The electrical cable junction box is not sealed but usually drained to nearby storm water trench. It is very likely that the vapour in the storm water trench spread out into the junction box, and eventually escaped the cover to meet the truck engine and ignited. The analysis suggests the importance of strict control of ignition source during a flammable release. In fact, the only safe outcome of such a large release of flammable vapour into a confined space is a slow dilution to below flammability limit. Either premature ignition or recovery of flammable vapour is extremely difficult and risky to do.

6. Conclusions. This article presents the first reported incident with leak and explosion of pressurized, flashing liquid in a storm water trench. The present case provided numerous lessons learnt and recommendation for preventing similar incidents in the future.

Firstly, a flammable leak into an underground trench is an important scenario and should not be overlooked in risk assessment of underground pipeline transporting flammable liquids or gases.

Secondly, correct information on the underground pipeline and trench is crucial for the on-scene emergency regarding such leak. The spread of the leak vapor in the underground trench

до и после воспламенения и таким образом подтвердившая, что пересечение Эрсен Роуд и Кайсюан Роуд было зоной первого воспламенения.

Поскольку район был закрыт для транспорта, единственными возможными источниками воспламенения были пожарные машины, продолжавшие движение, чтобы обеспечивать подачу воды для тушения огня. Фактически рядом с пересечением Эрсен Роуд и Кайсюан Роуд находилась пожарная машина, как показывает рис. 3, *б*. Дальнейшее расследование выявило, что она стояла над крышкой узла электрических кабелей. Коробка соединения электрических кабелей не запечатана и обычно дренируется в ближайшую ливневую канализацию. Очень похоже на то, что газ из траншеи канализации проник в кабельную соединительную коробку и, в конце концов, вырвался из-под ее крышки, встретился с двигателем грузовика и воспламенился. Анализ указывает на важность строгого контроля за источником воспламенения во время огнеопасного выброса. Единственный безопасный выход в случае столь большого выброса огнеопасного газа в ограниченное пространство – его медленное растворение до уровня ниже предела воспламеняемости. Как преждевременное загорание, так и перекрытие огнеопасного газа чрезвычайно трудны и опасны в исполнении.

6. Заключение. Статья представляет первое описание происшествия с утечкой и взрывом сжатой воспламеняющейся жидкости в траншее ливневой канализации. Данный случай послужил основой для многочисленных извлеченных уроков и рекомендаций по предотвращению подобных инцидентов в будущем.

Во-первых, огнеопасная утечка в подземную траншею – это важный сценарий, который нельзя не учитывать при оценке рисков для подземного трубопровода, транспортирующего легко воспламеняющиеся жидкости или газы.

was governed by the flow resistance. A detailed storm water trench plot plan with all manhole opening is needed to identify the vapor spread dynamics.

Thirdly, the impact volume of a flammable leak into an underground trench is equivalent to the gas diluted into its flammability limits with the UFL being the realistic case and LFL being the conservative case. With known trench cross-sectional area, the impact length can be estimated from the leak rate and the UFL and LFL. For a pressurized, flashing liquid flow, the mass leak flow rate can be estimated from vapour choked flow equation.

Finally, the only safe way for disposing a flammable vapour leak in an underground trench is to allow the vapour being dispersed to concentration below the flammable limit. This would take significant time and thus the control of ignition source is crucial.

Во-вторых, правильная информация о подземном трубопроводе и траншее крайне важна для действий в чрезвычайной ситуации, связанной с такого рода утечкой. На распространение вытекшего газа по подземной траншее влияло сопротивление потоку. Для определения динамики распространения газа необходим подробный план участка подземной ливневой канализации с обозначением всех отверстий люков.

В-третьих, воздействующий объем огнеопасной утечки в подземную траншею эквивалентен газу, разбавленному до его предела воспламеняемости, причем верхний предел воспламеняемости (UFL) является реалистичным, а нижний предел (LFL) – консервативным случаем. При известном поперечном сечении траншеи продолжительность воздействия может быть оценена по расходу утечки, UFL и LFL. Для находящегося под давлением потока огнеопасной жидкости масса утечки может быть рассчитана по уравнению запертого течения пара.

Наконец, единственный безопасный путь существования утечки огнеопасного газа в подземной траншее – позволить газу раствориться до концентрации ниже предела воспламеняемости. Для этого требуется значительное время, поэтому крайне важен контроль за источником воспламенения.

REFERENCES

1. Crowl D.A., Louvar J.L. *Chemical Process Safety*, 3rd. Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2011.
2. *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards*, second ed. American Institute of Chemical Engineers, New York, CCPS (Center for Chemical Process Safety), 2010.
3. Zhu Y., Qian X.M., Liu Z.Y., Huang P., Yuan M.Q. Analysis and assessment of the Qingdao crude oil vapor explosion accident: Lessons learnt. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015. Vol. 33. Pp. 289–303.
4. Mexico: Information on a gas explosion in Guadalajara in April 1992 and on subsequent investigations into the causes of this incident. IRB (Immigration and Refugee Board of Canada), 1996. 1 July 1996, MEX24190.E, <http://www.refworld.org/docid/3ae6ab8294.html>, assessed July 25, 2015.
5. Chen J.R., Richardson S.M., Saville G. Modelling of two-phase blowdown from pipelines- II. A simplified numerical method for multi-component mixtures. *Chem. Eng. Sci.* 1995. Vol. 50 (13). Pp. 2173–2187.

Hui-Ning Yang, Team Leader, Southern Center of Emergency Response of Toxic Substances. b: PhD Students, Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science & Technology, Kaohsiung, Taiwan

Jen-How Chen, Deputy Team Leader, Southern Center of Emergency Response of Toxic Substances, Taiwan

Home-Jo Chiu, Team Member, Southern Center of Emergency Response of Toxic Substances, Taiwan

Ting-Jia Kao, Team Leader, Southern Center of Emergency Response of Toxic Substances, PhD Students, Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science & Technology, Kaohsiung, Taiwan

Hsiao-Yun Tsai, Deputy Director, Southern Center of Emergency Response of Toxic Substances. Assistant Professor, Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science & Technology, Kaohsiung, Taiwan

Jenq-Renn Chen, Director, Southern Center of Emergency Response of Toxic Substances, Distinguished Professor, Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science & Technology, Kaohsiung, Taiwan; E-mail: jrc@nkfust.edu.tw

Хунин Ян, рук. подразделения Центра ликвидации последствий утечек ядовитых веществ Южного Тайваня; асп. факультета безопасности, здоровья и охраны окружающей среды Первого национального университета науки и технологий, г. Гаосюн, Тайвань

Цзяньхао Чэнь, зам. рук. подразделения Центра ликвидации последствий утечек ядовитых веществ Южного Тайваня

Хунчжоу Чжао, сотр. подразделения Центра ликвидации последствий утечек ядовитых веществ Южного Тайваня

Тинцзя Гао, рук. подразделения Центра ликвидации последствий утечек ядовитых веществ Южного Тайваня; асп. факультета безопасности, здоровья и охраны окружающей среды Первого национального университета науки и технологий, г. Гаосюн, Тайвань

Сяюнь Цай, зам. директора Центра ликвидации последствий утечек ядовитых веществ Южного Тайваня; ассистент проф. факультета безопасности, здоровья и охраны окружающей среды Первого национального университета науки и технологий, г. Гаосюн, Тайвань

Цзяньвань Чэнь, директор Центра ликвидации последствий утечек ядовитых веществ Южного Тайваня; вед. проф. факультета безопасности, здоровья и охраны окружающей среды Первого национального университета науки и технологий, г. Гаосюн, Тайвань

Получено 30.10.15

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.191.747:536.24

И.В. КАЛИНИЧ, Г.В. СМОЛЬНИКОВ, Г.В. САКАШ

I.V. KALINICH, G.V. SMOL'NIKOV, G.V. SAKASH

ТЕПЛОТДАЧА ОТ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНВЕЙЕРНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

HEAT TRANSFER FROM THE SURFACE OF HEATED MATERIALS DURING CONVEYER TRANSPORTATION

Проведены экспериментальные исследования с целью получения данных, необходимых при проектировании систем отопления и вентиляции галерей, в которых осуществляется конвейерная транспортировка нагретых материалов. Приведены описание экспериментальной установки, методика проведения и обработки результатов исследований. Определены факторы, влияющие на теплообмен нагретых материалов при конвейерной транспортировке, получены эмпирические зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи, которые позволяют рассчитать тепловыделения с поверхности данных материалов.

Pilot studies for data acquisition which are necessary at design of heating and ventilation systems in galleries in which there is a conveyor transportation of heated materials are conducted. The description of experimental installation, technique of carrying out and processing of researches results is provided. The factors influencing heat exchange of heated materials at conveyor transportation are defined, empirical dependences for calculation of heat transfer coefficients which allow to calculate thermal emissions from a surface of these materials are received.

К л ю ч е в ы е с л о в а: коэффициент конвективной теплоотдачи, тепловой поток, теплообмен, теплоотдача, температурный фактор.

К e y w o r d s: convection heat transfer coefficient, heat flow, heat exchange, heat transfer, temperature factor.

Для обеспечения нормируемых параметров микроклимата в конвейерных галереях нагретых материалов необходима организация эффективной работы систем отопления и вентиляции. При проектировании вышеуказанных инженерных систем нужны данные о коэффициентах теплоотдачи от поверхности транспортируемых материалов, которые можно получить в результате экспериментов.

For ensuring the normalized microclimate parameters in conveyor galleries of heated materials, the organization of effective work of systems of heating and ventilation is necessary. For this purpose, at design of the above engineering systems, the heat transfer coefficients from a surface of the transported materials which can be received as a result of pilot studies are necessary.

© Калинич И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В., 2015

© Kalinich I.V., Smol'nikov G.V., Sakash G.V., 2015

Исследования теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке в галереях проводились на экспериментальной установке (рис. 1).

Принятая в экспериментальной установке схема регулирования температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций галереи позволила измерить конвективный и лучистый тепловые потоки, поступающие от поверхности конвейеров. С целью исключения поступления теплового потока от нижней поверхности исследуемой цилиндрической пластины и каркаса конвейера в экспериментальной установке применялась система охлаждения каркаса конвейера. Охлаждение осуществлялось водой, которая от распределительного устройства подавалась в секции конвейеров. Расход воды регулировался при помощи пережимных устройств и устанавливался таким, чтобы средняя температура воды, циркулирующей в секции конвейера, была равна температуре воздуха под конвейером в среднем сечении секции.

При проведении исследований определялись следующие величины:

- 1) расход воздуха, проходящий через галерею;
- 2) температура воздуха на входе и выходе из галереи;
- 3) локальные температуры исследуемой поверхности цилиндрической пластины.

Расход воздуха устанавливался по перепаду давлений в камере статического давления и коллекторе по методике, изложенной в работе [1]. В качестве регистрирующего прибора использовался микроманометр типа МКВ-250-0,02 класса точности 0,02 и пределом измерений 0–250 кг/м².

Температуры воздуха на входе и выходе из галереи измерялись лабораторными ртутными термометрами с ценой деления шкалы 0,1 °С и пределом измерений 0–50 °С. Локальные температуры поверхности цилиндрической пластины определялись хромель-копелевыми тер-

Studies of heat exchange materials in conveying the galleries were carried out in a pilot plant, a schematic diagram is shown in fig. 1.

Temperature control circuit inside the surface of walling gallery adopted in an experimental installation made it possible to measure the convective and radiation heat flow from the surface of conveyors. Cooling system of the conveyor frame was used in experimental installation in order to avoid heat flow from the lower surface of the cylindrical plate and conveyor frame. Cooling was carried out with the help of circulating water, which was fed from the dispenser into the conveyor section. Water flow rate was regulated by means of pinch device and adjusted so that the average temperature of the water circulating in the conveyor section was equal to the air temperature below the conveyor in the middle cross section.

During the investigation the following values were determined:

- 1) air flow passing through the gallery;
- 2) air temperature at the inlet and outlet of the gallery;
- 3) local temperatures of cylindrical plate surface under study.

Air flow was determined by difference of pressure in the chamber of static pressure and in a collector by the method described in [1]. As a recording device micromanometer type МКВ-250-0,02 was used, class of accuracy 0,02 and yield measurement 0–250 kg / m².

The air temperature at the inlet and outlet of the gallery was measured by laboratory mercury thermometers with scale interval 0,1 °С and offered measurement 0–50 °С. Local cylindrical plate surface temperature was measured by chromel – copel thermocouples installed in seven sec-

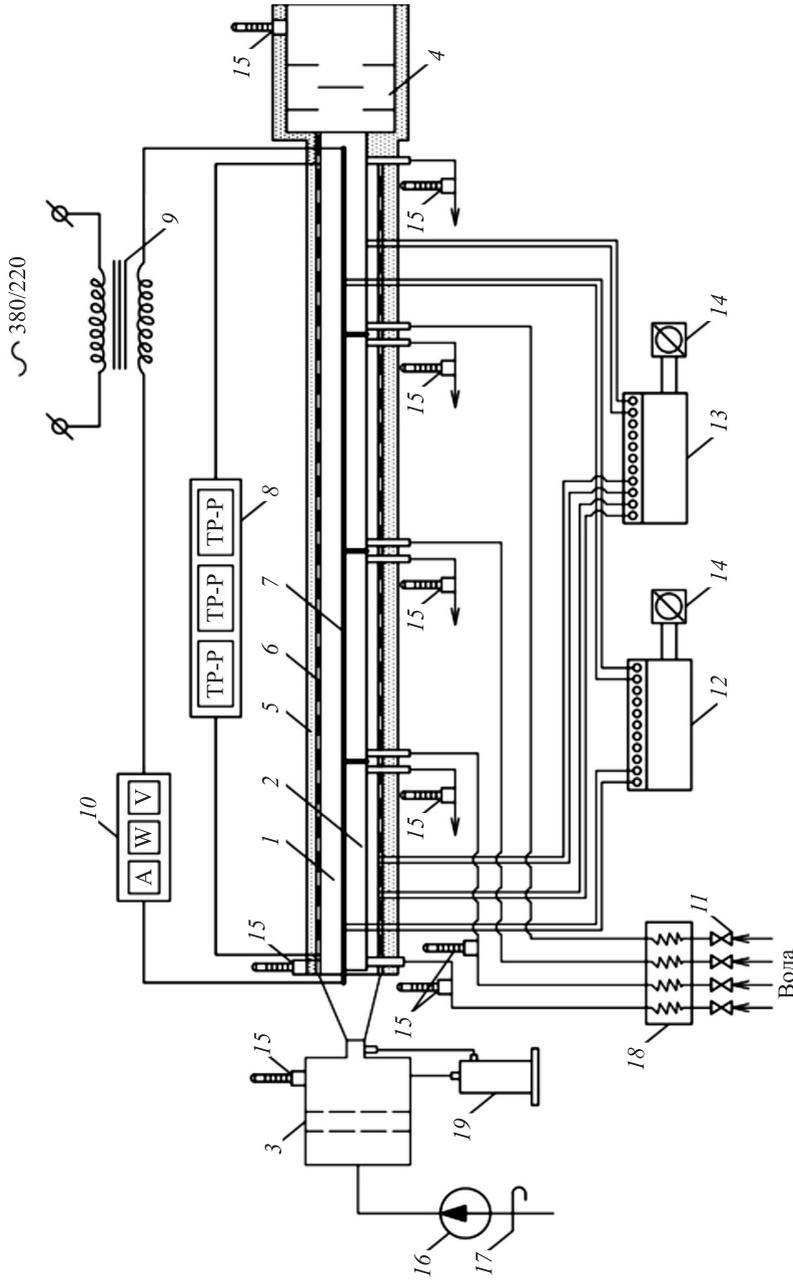


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования теплообмена

1 – галерея; 2 – конвейер; 3 – камера давления с коллектором; 4 – камера смешения; 5 – теплоизоляция из пенопласта; 6 – обогреваемые ограждающие конструкции; 7 – исследуемая пластина; 8 – трансформаторы АОМИ 40-20-77-4И; 9 – силовой трансформатор РНО-220-40; 10 – электроизмерительный комплект; 11 – регуляторы расхода воды; 12 – потенциометр ЭПП-4; 13 – потенциометр ЭПП-09; 14 – переключающий элемент; 15 – термометр; 16 – вентилятор; 17 – регулирующая заслонка; 18 – термостат ТС-24; 19 – микроманометр МКВ-250-0,02

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation for heat exchange investigation

1 – gallery; 2 – conveyor; 3 – pressure chamber with a collector; 4 – mixing chamber; 5 – thermal insulation from polyfoam; 6 – warmed building envelope; 7 – investigated plate; 8 – transformers АОМИ 40-20-77-4И; 9 – power transformer РНО-220-40; 10 – electric set; 11 – water consumption regulators; 12 – potentiometer КСП-4; 13 – potentiometer ЭПП-09; 14 – switch; 15 – thermometer; 16 – ventilator; 17 – control valve; 18 – thermostat ТС-24; 19 – micromanometer МКВ-250-0,02

мопарами, которые устанавливались в семи сечениях пластины, по три в каждом сечении. Термопары изготавливались из проволоки диаметром 0,1 мм. За регистрирующие приборы были приняты потенциометры КСП-4 с классом точности 0,25 и пределами измерений 0–100 и 0–600 °С.

Для каждого режима вычислялись следующие величины:

1) локальные числа Нуссельта и Рейнольдса для рассматриваемого сечения цилиндрической пластины:

$$Nu_x = \frac{\alpha_{кх} x}{\lambda_{вх}}; \quad (1)$$

$$Re = \frac{v_{вх} x}{\nu_{вх}}; \quad (2)$$

2) средние числа Нуссельта, Рейнольдса и Грасгофа для всей исследуемой поверхности цилиндрической пластины:

$$Nu_k = \frac{\alpha_k l}{\lambda_b}; \quad (3)$$

$$Re = \frac{v_b x}{\nu_b}; \quad (4)$$

$$Gr = \frac{g l^3 (\bar{t}_c - \bar{t}_b)}{\nu_b^2 T_b}, \quad (5)$$

где $\alpha_{кх}$ – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м² · К);
 x – расстояние до рассматриваемого сечения галереи, м;
 $\lambda_{вх}$ – коэффициент теплопроводности, рассчитанный по средней температуре воздуха в рассматриваемом сечении галереи, Вт/(м · К);
 $v_{вх}$ – скорость, рассчитанная по средней температуре воздуха в рассматриваемом сечении галереи, м/с;
 $\nu_{вх}$ – коэффициент кинематической вязкости, рассчитанный по средней температуре воздуха в рассматриваемом сечении галереи, м²/с;

tions of the plate, three in each section. The thermocouples were made of wire 0,1 mm in diameter. During recording instruments potentiometers КСП-4 were adopted with an accuracy class 0,25, and outside measurements 0–100 and 0–600 °С.

For each mode, the following values were calculated:

1) Nusselt and Reynolds's local numbers for the considered section of a cylindrical plate:

2) averages of Nusselt, Reynolds and Grashof for whole studied surface of a cylindrical plate:

where $\alpha_{сх}$ – local convection coefficient, W/(m² · K);
 x – distance to the considered section of gallery, m;
 $\lambda_{ах}$ – coefficient of heat transmission calculated on average air temperature in the considered section of gallery, W/(m · K);
 $v_{ах}$ – speed calculated on average air temperature in the considered section of gallery, m/s;
 $\nu_{ах}$ – coefficient of kinematic viscosity calculated on average air temperature in the considered section of gallery, m²/s;

α_k – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м² · К);

l – длина цилиндрической пластины, м;

λ_b – коэффициент теплопроводности, рассчитанный по среднеобъемной температуре воздуха в галерее, Вт/(м · К);

v_b – скорость, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха в галерее, м/с;

ν_b – коэффициент кинематической вязкости воздуха, рассчитанный по среднеобъемной температуре воздуха в галерее, м²/с;

\underline{g} – ускорение свободного падения, м/с²;

t_c – среднеинтегральная температура поверхности цилиндрической пластины, которая определялась путем интегрирования профиля локальных температур поверхности, °С;

t_b – среднеобъемная температура воздуха в галерее, которая определялась как среднеарифметическое значение температур воздуха на входе и выходе в галерею, °С;

T_b – температура воздуха в галерее, К.

Локальные коэффициенты конвективной теплоотдачи рассчитывались по формуле:

$$\alpha_{кх} = \frac{q_k}{t_c - t_b}, \quad (6)$$

где q_k – удельный конвективный тепловой поток, Вт/м²;

t_c – локальная температура поверхности цилиндрической пластины, °С;

t_b – средняя по сечению температура воздуха, которая определялась расчетом по измеренным значениям температуры воздуха на входе и выходе из галереи, учитывая линейный закон распределения температуры воздуха по длине галереи, °С.

Средние коэффициенты конвективной теплоотдачи цилиндрической пластины рассчитывались по формуле:

$$\alpha_k = \frac{q_k}{t_c - t_b}. \quad (7)$$

α_c – average convection coefficient, W / (m² · K);

l – length of cylindrical plate, m;

λ_a – coefficient of heat transmission calculated on medium – volume air temperature in gallery, W/(m · K);

v_a – speed calculated on medium – volume air temperature in gallery, m/s;

ν_a – coefficient of kinematic viscosity of air calculated on medium – volume air temperature in gallery, m²/s;

\underline{g} – acceleration of gravity, m/s²;

t_s – average integral temperature of a surface of a cylindrical plate which was defined by integration of a profile of local temperatures of a surface, °C;

t_a – medium-volume air temperature in gallery which was defined as arithmetic – mean value of air temperatures on an entrance and an exit to gallery, °C;

T_a – air temperature in the gallery, K.

Local convection heat transfer coefficients calculated by the formula:

where q_c – convective heat flux, W/m²;

t_s – local temperature of a surface of a cylindrical plate, °C;

t_a – air temperature, average on section, which was defined by calculation for the measured values of air temperature on an entrance and an exit from gallery, considering the linear law of distribution of air temperature on length of gallery, °C.

Average convection heat transfer coefficients of cylindrical plate calculated on a formula:

Удельный конвективный тепловой поток вычислялся по методу энтальпии, приведенному в работе [2]:

$$q_k = \frac{c_b G_b (t''_b - t'_b)}{F_c}, \quad (8)$$

где G_b – масса воздуха, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха, кг;

c_b – удельная теплоемкость воздуха, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха, Дж/(кг · К);

t'_b – температура воздуха на входе в галерею, °С;

t''_b – температура воздуха на выходе из галереи, °С;

F_c – площадь поверхности цилиндрической пластины, м².

С целью исследования локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи было проведено 115 опытов. По данным опытов был выполнен расчет средних коэффициентов конвективной теплоотдачи при измерениях: числа Рейнольдса $Re = (8,7 - 43) \cdot 10^5$; температурного фактора от 1,8 до 14,1 и углов наклона галереи от 0 до 30°.

Локальные коэффициенты конвективной теплоотдачи в каждом опыте рассчитывались в семи сечениях пластины на определенных расстояниях от входа: 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,75; 1,25; 1,75 м. В каждом сечении локальный коэффициент конвективной теплоотдачи определялся в трех точках пластины, а затем производилось его осреднение по сечению. Для расчета локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи использовались формулы (6) и (7).

Обработка методом наименьших квадратов полученных результатов позволила получить эмпирическую зависимость для расчета локальных коэффициентов конвективной теплоотдачи при транспортировке материалов в конвейерных галереях:

$$Nu_x = 0,014 Re_x^{0,89}. \quad (9)$$

Convective heat flux is calculated using the enthalpy given in [2]:

where G_a – mass of air calculated on medium – volume air temperature, kg;

c_a – specific heat capacity of air calculated on medium – volume air temperature, J / (kg · K);

t'_a – air temperature at the entrance to the gallery, °C;

t''_a – air temperature at the outlet of the gallery, °C;

F_s – surface area of a cylindrical plate, m².

To study the local and average convection heat transfer coefficients 115 experiments were carried out. According to the experiments calculation of average convection heat transfer coefficients was performed in the measurements: value of the Reynolds number $Re = (8,7 - 43) \cdot 10^5$; temperature factor of 1,8 to 14,1 and tilt angles of gallery from 0 to 30°.

Local convection heat transfer coefficients in each experiment were calculated in the seven sections of the plate at a certain distance from the entrance: 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,75; 1,25; 1,75 m. In this case, in each section of the local convection heat transfer coefficient was determined at three points of the plate, and then averaging was carried out on section. To calculate the local and average convection heat transfer coefficients were used formulas (6) and (7).

Processing method of least squares of the results yielded the empirical relationship for calculating the local convection heat transfer coefficients during transportation materials in conveyor galleries:

— Данное уравнение справедливо при $t_c = 40-90$ °С, в диапазоне чисел $Re_x = (0,2-30) \cdot 10^5$. В уравнении (9) за определяющий размер принята текущая координата x , отсчитываемая от начала пластины, за определяющую температуру t_b . Скорость воздуха рассчитывалась по сечению галереи при температуре t_b .

Исследования влияния угла наклона модели галереи на конвективный теплообмен позволяют сделать вывод, что при увеличении угла наклона модели до 30° теплообмен уменьшается на 6–8 %. Данное значение находится в пределах точности экспериментальных исследований, поэтому в нашем случае можно пренебречь влиянием угла наклона модели на конвективный теплообмен.

Данные экспериментального исследования конвективного теплообмена выражаются зависимостью $Nu_x = f(Re)$ для средних коэффициентов конвективной теплоотдачи при различных значениях чисел Грасгофа. Критерий Грасгофа изменялся в диапазоне $Gr = (20,7-55,1) \cdot 10^{10}$. По результатам исследований определено, что влияние естественной конвекции на конвективный теплообмен незначительно. Это согласуется с данными, приведенными в работе [3]. Опытные данные, полученные для средних коэффициентов теплоотдачи, обобщены критериальной зависимостью:

$$Nu_x = 0,26Re^{0,67}, \quad (10)$$

которая определена в интервалах изменения: $Re = (9-35) \cdot 10^5$; $Gr = (20,7-55,1) \cdot 10^{10}$; $\bar{t}_c = 40-90$ °С; $\varphi = 0-30^\circ$. В уравнении (10) за определяющий размер принята длина цилиндрической пластины – l , за определяющую температуру – среднеобъемная температура воздуха в галерее \bar{t}_b . Скорость воздуха подсчитывалась по среднему сечению галереи.

— This equation is valid for $t_s = 40-90$ °С, in the range of numbers $Re_x = (0,2-30) \cdot 10^5$. In equation (9) for determining the size of the accepted current coordinate x , measured from the beginning of the plate, for determining the temperature t_a . Air velocity was calculated from the cross section of the gallery at t_a .

According to studies of the effect of the angle of inclination of the gallery model on convective heat exchange conclusion can be made that increasing the angle of inclination about 30° to model the heat exchange is reduced by 6–8 %. This value is within the accuracy of experimental studies, so we can ignore the influence of the angle of the model on convective heat exchange.

Data of experimental study of convective heat exchange medium is presented $Nu_x = f(Re)$ by the dependence of the coefficients of convection heat transfer at various Grashof numbers. Grashof criterion varied in the range $Gr = (20,7-55,1) \cdot 10^{10}$. According to the research it was found that the effect of natural convection on convective heat exchange is negligible. This is consistent with the data given in [3]. The experimental data obtained for the mean heat transfer coefficients are generalized by criteria relationship:

which is defined in the ranges of change: $Re = (9-35) \cdot 10^5$; $Gr = (20,7-55,1) \cdot 10^{10}$; $\bar{t}_s = 40-90$ °С; $\varphi = 0-30^\circ$. In the equation (10) for the defining size is taken the length of cylindrical plate – l , for the defining temperature – medium – volume air temperature in gallery – \bar{t}_a . Air velocity was calculated according to the average cross section of the gallery.

Как видно из приведенных зависимостей, конвективный теплообмен уменьшается при увеличении температурного фактора. Уменьшение коэффициента конвективной теплоотдачи связано с увеличением толщины пограничного слоя. Полученные данные согласуются с результатами исследований, приведенных в работах [3, 4], согласно которым при увеличении температурного фактора наблюдается уменьшение теплообмена.

Обработка результатов исследований конвективного теплообмена высокотемпературных материалов позволила получить эмпирическую зависимость для расчета средних коэффициентов конвективной теплоотдачи:

$$\text{Nu}_k = 0,28\text{Re}^{0,67}\Psi^{-0,11}, \quad (11)$$

где Ψ – температурный фактор.

Уравнение справедливо при температурах материала от 100 до 500 °C в диапазоне чисел Рейнольдса $\text{Re} = (8,5 - 43) \cdot 10^5$. Температурный фактор Ψ определяется отношением среднеинтегральной температуры поверхности цилиндрической пластины к среднеобъемной температуре воздуха в галерее.

Влияние температурного фактора на общий коэффициент теплоотдачи незначительно. Обработка данных позволила получить зависимость для расчета коэффициентов общей теплоотдачи при конвейерной транспортировке высокотемпературных материалов:

$$\text{Nu}_o = 1,48\text{Re}^{0,5}. \quad (12)$$

Данное уравнение справедливо при температуре материала от 100 до 500 °C в диапазоне чисел $\text{Re} = (8,5 - 4,5) \cdot 10^5$.

Экспериментальные данные могут быть сопоставлены с результатами работ [3–6], в которых рассматривался теплообмен пластин в свободном турбулентном потоке и теплообмен при конвейерной транспортировке. Данное сравнение представлено на рис. 2.

As it can be seen from the above dependencies, convective heat exchange decreases with increasing temperature factor. Reduction of the convection heat transfer coefficient is due to the increased thickness of the boundary layer. These findings are consistent with the results of research, given in [3, 4], according to which with increasing temperature factor takes place a decrease of heat exchange.

Processing the results of studies of convective heat exchange of high – temperature materials allowed obtaining empirical relationship to calculate medium convection heat transfer coefficients:

where Ψ – the temperature factor.

The equation is valid for temperatures of materials from 100 to 500 °C in the range of Reynolds numbers $\text{Re} = (8,5 - 43) \cdot 10^5$. The temperature factor Ψ is determined by the ratio average integral temperature of the cylindrical plate surface to average volume air temperature in the gallery.

Effect of temperature factor on the overall heat transfer coefficient is negligible. Processing of the data yielded the dependence of the coefficients for the calculation of the overall heat transfer conveying high-temperature materials:

The resulting equation is valid at material temperatures from 100 to 500 °C in the range of Reynolds numbers $\text{Re} = (8,5 - 4,5) \cdot 10^5$.

Obtained experimental data can be compared with the results of [3 – 6] in which the heat exchange plates were examined in the free turbulent flow and heat exchange conveyor. This comparison is presented in fig. 2.

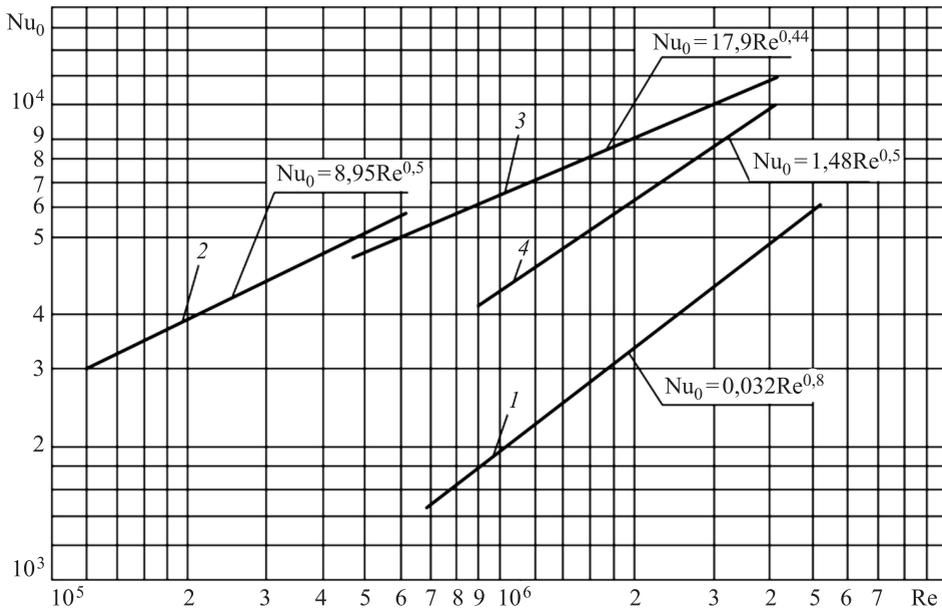


Рис. 2. Сравнение результатов исследования теплообмена:

1 – данные работ [3, 4]; 2 – данные работы [2]; 3 – данные работы [6]; 4 – данные исследований авторов

Fig. 2. Comparison of the results of heat exchange study

1 – data [3, 4]; 2 – data [2]; 3 – data [6]; 4 – data research of the author

Сравнивая уравнение (12) с уравнением теплообмена пластины в свободном турбулентном потоке [3, 4]:

$$Nu_0 = 0,032 \cdot Re^{0,8}, \quad (13)$$

можно сделать вывод, что в нашем случае интенсивность теплообмена в 2–2,3 раза выше. Это объясняется тем, что течение воздуха осложнено наличием ограждающих конструкций, вызывающих дополнительную турбулизацию потока. Теплоотдающая поверхность находится в ядре потока, что ограничивает рост пограничного слоя и ведет к дополнительному проникновению пульсаций скорости в пограничный слой. Наличие конвейеров способствует возникновению циркуляционных потоков, которые тоже увеличивают теплообмен.

Сравнивая полученные результаты с ранее выполненными исследованиями [5] в диапазоне $Re = (5-50) \cdot 10^4$:

$$Nu_0 = 8,95 \cdot Re^{0,5} \quad (14)$$

Comparing the equation (12) with the equation of heat exchange plates in the free turbulent flow [3, 4]:

it can be concluded that in this case the heat exchange rate is of 2–2,3 times higher. This is due to the fact that the air flow in this case is complicated by the presence of walling, causing additional turbulence flow. Heat supplying surface in this case is in the core flow, which limits the growth of the boundary layer, and leads to further penetration of velocity fluctuations in the boundary layer. Presence of conveyers also contributes to the circulation flow, which also increases heat exchange.

By comparing the results with previous studies [5] in the range: $Re = (5-50) \cdot 10^4$:

и результатами работы [6] в диапазоне $Re = (5-40) \cdot 10^5$:

$$Nu_0 = 17,9 \cdot Re^{0,44}, \quad (15)$$

можно сделать вывод, что интенсивность теплообмена в наших исследованиях меньше на 40–60 %. Это объясняется тем, что в работах [5, 6] исследования теплообмена проводились на одинаковых по конструкции установках, в которых нагревательные элементы, имитирующие транспортируемый материал, изготовлялись из двух сложенных асбоцементных пластин, между которыми укладывалась нихромовая проволока. Вследствие этого, теплоотдача в воздух галереи происходила как с верхней, так и с нижней поверхности пластин, а при расчете коэффициента теплоотдачи весь тепловой поток относился только к верхней поверхности пластины. Исходя из этого, были получены завышенные коэффициенты теплоотдачи. Кроме того, воздух в модель галереи подавался плоской струей, вследствие чего нарушалось моделирование на начальном участке.

Таким образом, полученные в результате исследований данные можно считать более полно отражающими процесс теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке в галереях.

Выводы 1. При конвейерной транспортировке нагретых материалов с температурой поверхности от 40 до 90 °C влияние угла наклона и естественной конвекции на конвективный теплообмен является незначительным.

2. При конвейерной транспортировке нагретых материалов с температурой от 100 до 500 °C на конвективный теплообмен оказывает влияние температурный фактор. С увеличением температурного фактора коэффициент конвективной теплоотдачи уменьшается.

3. При конвейерной транспортировке нагретых материалов с температурой от 100 до 500 °C температурный фактор влияет на общий коэффициент теплоотдачи незначительно.

and the results are presented in [6] in the range $Re = (5-40) \cdot 10^5$:

it can be concluded that the heat exchange rate in our study is less by 40–60 %. This is because in [5, 6] heat exchange studies were carried out on similar plant design, in which the heating elements simulating the transported material, were made from two folded asbestos-cement plates, between which were placed the nichrome wires. Consequently, heat transfer to the air gallery occurred from both the top and the bottom surfaces of the plates and the heat transfer coefficient when calculating the whole heat flow applied only to the upper surface of the plate. On this basis, excessive heat transfer coefficients were obtained. Moreover, the air fed into the experimental model plane jet, thereby disturbed modeling the initial section.

Thus, it can be considered that the results of our research data more completely reflect the process of heat exchange with the hot material conveyor galleries.

Conclusions. 1. During convection of heated materials with a surface temperature of 40 to 90 °C the effect of the angle of inclination of natural convection on convective heat exchange is negligible.

2. At conveyor transportation of heated materials with a temperature from 100 to 500 °C the temperature factor has impact on convective heat exchange. With increase in a temperature factor the convection heat transfer coefficient decreases.

3. During convection of heated materials with temperatures ranging from 100 to 500 °C temperature factor is slightly affected by the overall heat transfer coefficient.

4. Полученные эмпирические зависимости (9)–(12) позволяют определить локальные и средние коэффициенты общей и конвективной теплоотдачи при конвейерной транспортировке нагретых материалов с температурой от 40 до 500 °С и рассчитать тепловой поток, поступающий от поверхности данных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВОК-пресс, 2008. 209 с.
2. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1979. 320 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1981. 416 с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
5. Нейков О.Д., Лочачёв И.Н., Шумилов Р.Н. Аспирация паропылевых смесей при обеспыливании технологического оборудования. Киев: Наук. думка, 1974. 128 с.
6. Маринченко В.М. Внешний тепло- и массообмен при конвейерной транспортировке зернистых материалов // Тез. докл. III Всесоюз. конф. «Механика сыпучих материалов». Одесса, 1975. С. 271–272.
4. The received empirical dependences (9)–(12) allow to define local and average convection heat transfer coefficients at conveyor transportation of heated materials with a temperature from 40 about 500 °С and to calculate the heat flow arriving from a surface of these materials.

REFERENCES

1. Posokhin V.N. Aerodynamica ventilyatsii [Aerodynamics ventilation]. Moscow, AVOK-press, 2008. 209 p. (rus.)
2. Osipova V.A. Eksperimental'noe issledovanie protsessov teploobmena [Experimental study of heat exchange processes]. Moscow, Energiya, 1979. 320 p. (rus.)
3. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow, Energiya, 1981. 416 p. (rus.)
4. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of the theory of heat exchange]. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p. (rus.)
5. Neykov O.D., Lochachëv I.N., Shumilov R.N. Aspiratsiya paropylevykh smesey pri obespylivanii tekhnologicheskogo oborudovaniya [Aspiration vapor mixes with the dust dedusting process equipment]. Kiev, Naukova dumka, 1974. 128 p. (rus.)
6. Marinchenko V.M. Vneshniy teplo- i massoobmen pri konveyernoy transportirovke zernistykh materialov [External heat and mass transfer in the conveying of granular materials]. Tezisy dokladov III Vsesoyuznoy konferentsii «Mekhanika sypuchich materialov» [Abstracts of III All-Union Conference «Mechanics of bulk materials»]. Odessa, 1975. Pp. 271–272 (rus.)

Калинич Илья Викторович, асп.;

E-mail: il-k@mail.ru

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

Смольников Геннадий Васильевич,
канд. техн. наук, доц.;

E-mail: genad123@mail.ru

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

Сакаш Геннадий Викторович, д-р
техн. наук, проф.;

E-mail: gsakash@sfu-kras.ru

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

Kalinich Ilya Viktorovich, post-graduate student; E-mail: il-k@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Smol'nikov Gennadiy Vasilyevich, PhD, ass. professor; E-mail: genad123@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Sakash Gennadiy Viktorovich, DSc, professor; E-mail: gsakash@sfu-kras.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Получено 15.10.15

УДК 691.328.4

Е.П. МАТУС, А.П. ПИЧУГИН

**ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА
С МАЛЫМ ПРОЦЕНТОМ АРМИРОВАНИЯ**

Приводятся данные экспериментов по определению трещиностойкости при статическом нагружении сталефибробетона для монолитных полов с малым объемным процентом армирования (0,25–0,5 %). Применялись фибры различных форм и размеров. Показано, что эффективно использовать фибробетон с фибрами длиной 50 мм, диаметром 1 мм с загнутыми концами из стальной проволоки. Рациональным по работе разрушения является состав с содержанием 30 кг/м³ такой фибры, что подтверждает обоснованное применение фибробетона с малым процентом армирования для повышения трещиностойкости монолитных полов различного назначения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сталефибробетон, полы промышленных зданий, трещиностойкость.

Стальная фибра широко используется при бетонировании полов в помещениях промышленных зданий [1, 2]. В настоящее время нет общепринятых методик расчета полов из сталефибробетона. Согласно правилу смесей для дисперсно-армированных композитов [3–5], армирование стальной фиброй заметно повышает предел прочности при растяжении и сжатии при содержании фибры в бетоне не менее 80 кг/м³. Однако практическое применение фибробетона в полах со значительно меньшим содержанием фибры (20–40 кг/м³, что соответствует объемному проценту армирования 0,25–0,5 %), подтверждает его эффективность [6, 7], несмотря на то что влияние фибр на свойства фибробетона при таком малом расходе еще недостаточно изучено.

Известно, что введение фибр в бетон значительно повышает его трещиностойкость при содержании волокон более 50 кг/м³ [8]. В настоящей работе излагаются результаты определения трещиностойкости сталефибробетона с содержанием дисперсной арматуры менее 50 кг/м³.

Образцы сталефибробетона получены в лаборатории ЗЖБИ-12, г. Новосибирск. Данное предприятие имеет большой опыт приготовления бетонных смесей для конструкций полов промышленных зданий (складских одноэтажных помещений и т.д.). Состав бетонной смеси для образцов соответствовал бетону, используемому для изготовления монолитных фибробетонных полов без применения традиционной арматуры толщиной от 100 мм по заранее подготовленному основанию: ПЦ М500 ОАО «Искитимцемент» 355 кг/м³, песок Мк = 1,8 755 кг/м³, щебень фракции 5–20 1050 кг/м³, вода 180 л/м³, гиперпластификатор (пантархит) 2,485 кг/м³. Класс такого бетона по прочности на сжатие В25, марка по водонепроницаемости W6, по морозостойкости F100, подвижность П4. Расход фибры обычно назначается в диапазоне 20–40 кг/м³, поэтому для сравнения были изготовлены образцы с различным содержанием фибр: 20, 30 и 40 кг/м³.

Чаще всего в полах используются фибры (далее обозначим их как фибры № 1) длиной 50 мм, диаметром 1 мм с загнутыми концами из стальной проволоки. Представляет интерес, как изменяются определяемые свойства фибробетона с различными видами стальных фибр. Поэтому были изготовлены образцы с другими видами фибр (также широко применяемыми в производстве): № 2 – длиной 38 мм, диаметром 0,65 мм с загнутыми концами из стального листа, № 3 – длиной 40 мм, диаметром 0,5 мм, волновая, латунированная.

Размеры образцов выбраны по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», согласно которому для бетона с размером щебня не более 20 мм при испытаниях на растяжение при изгибе допускается использование призм размером 100×100×400 мм.

Образцы изготовлены с трещиной в растянутой зоне глубиной 35 мм от поверхности и длиной 100 мм. Предварительно в середину пустых форм в перпендикулярном длине формы направлении устанавливались тонкие стальные пластины. В пластинах сделаны равномерно распределенные небольшие отверстия, в которые были вставлены фибры. Количество фибр в пластине подбиралось в соответствии с заданным коэффициентом армирования: процентное отношение площади сечения всех фибр в пластине к площади пластины было равно половине значения коэффициента армирования в образце (половине – чтобы учесть неупорядоченную ориентацию фибр в бетоне).

Для изготовления каждой серии образцов сухие компоненты смеси вместе с фибрами засыпались в лабораторный смеситель принудительного действия и перемешивались. Заливалась часть воды затворения, смесь перемешивалась, добавлялась оставшая вода с пластификатором. Затем смесь окончательно перемешивалась, укладывалась в формы и уплотнялась штыкованием (для лучшего заполнения смесью пространства возле пластины). Количество компонентов смеси подбиралось таким образом, чтобы ее полностью использовать, тем самым обеспечив заданное содержание фибр в образцах.

После 28 сут твердения в нормальных условиях образцы испытывались в лаборатории кафедры ЖБК НГАСУ (Сибстрин) по схеме трехточечного изгиба (рис. 1).

Согласно ГОСТ 29167–91 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» допускается проведение равновесных испытаний с фиксацией текущих размеров развивающейся магистральной трещины и соответствующих значений прикладываемой нагрузки. Поэтому нагружение осуществлялось следующим образом: записывались начальные значения индикаторов перемещений, затем нагрузка увеличивалась на 0,5 кН со скоростью прогиба в месте

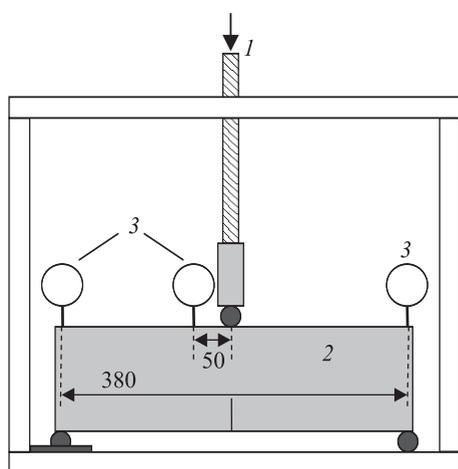


Рис. 1. Схема испытания образцов
1 – нагружающий шток; 2 – образец; 3 – индикаторы перемещений часового типа (погрешность 0,01 мм)

приложения нагрузки 0,02–0,2 мм/с, снова измерялись перемещения и трещина; далее нагрузка опять увеличивалась и т.д. Прогиб в месте приложения нагрузки рассчитывался линейризацией показаний контрольных индикаторов. Суммарные удельные энергозатраты на разрушение рассчитывались как площадь под кривой нагрузка–прогиб (работа разрушения), деленная на площадь сечения образца.

Измерения производились до достижения трещиной величины 5 мм. Диаграммы нагрузка–перемещение приведены на рис. 2, 3, а обработанные результаты представлены в таблице.

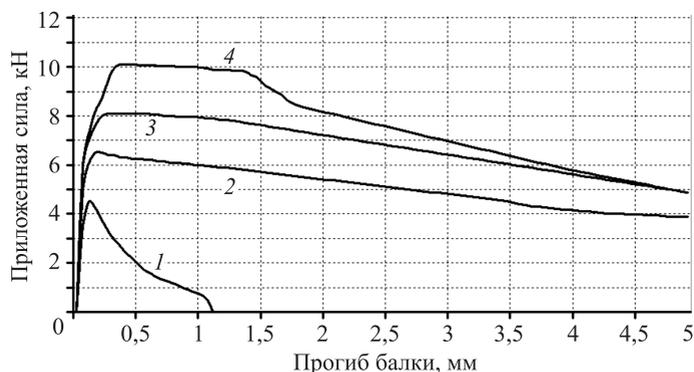


Рис. 2. Диаграммы нагружения образцов с фибрами № 1
1 – неармированные образцы; 2 – содержание фибры 20 кг/м³;
3 – 30 кг/м³; 4 – 40 кг/м³

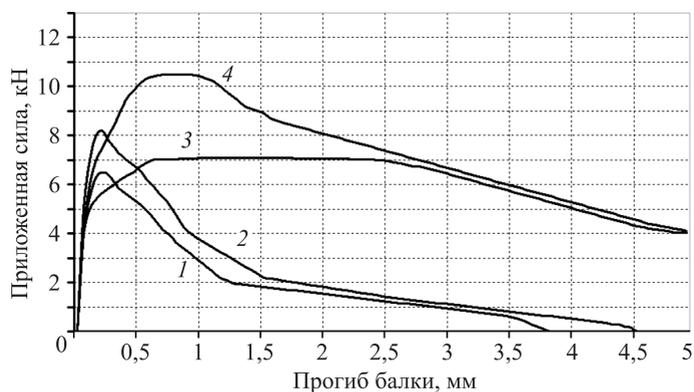


Рис. 3. Диаграммы нагружения образцов с фибрами
1 – № 2 (содержание 20 кг/м³); 2 – № 2 (40 кг/м³);
3 – № 3 (20 кг/м³); 4 – № 3 (40 кг/м³)

Как видно из таблицы, армирование приводит к значительному росту суммарной работы разрушения бетона: минимум в 4 раза у образцов с фибрами № 2 (при содержании фибр 20 кг/м³) и максимум в 16 раз у образцов с фибрами № 1 (при содержании фибр 40 кг/м³). Армированные образцы даже при раскрытии магистральной трещины продолжают выдерживать значительную нагрузку.

Наибольшие значения работы разрушения выявлены у образцов с фибрами № 1, 3. Однако у образцов с фибрами № 3 наблюдалось раскрытие трещины до достижения максимального значения нагрузки. У всех образцов

Результаты испытания образцов

Фибра, №	Содержание фибры, кг/м ³	Максимальное значение нагрузки, кН	Удельная работа до раскрытия трещины 5 мм, кДж/м ²	Предел прочности при сжатии, МПа
–	–	4,5±0,3	0,33*	49,7±4,9
1	20	6,5±0,7	3,35	45,8±5,6
1	30	8,1±0,6	4,62	47,5±3,5
1	40	10,2±0,8	5,20	47,0±5,8
2	20	6,4±0,7	1,20*	51,5±2,9
2	40	8,2±0,6	1,42*	48,7±3,2
3	20	7,1±1,2	4,10	46,4±2,5
3	40	10,5±1,0	4,47	48,3±3,1

* Разделение на части происходило до достижения трещиной значения в 5 мм.

с волновой фиброй одновременно происходило раскрытие двух трещин в растянутой зоне образца (рис. 4). Этот эффект, по-видимому, обусловлен геометрией фибры: часть волновой фибры растягивается при раскрытии трещины. Кроме того, отмечалось уменьшение подвижности смеси (с П4 до П3) с волновой фиброй при укладке ее в формы, а также образование «ежей». Работа разрушения образцов с фиброй № 2 меньше чем с фиброй

№ 1 в 3–3,5 раза, что объясняется меньшим нормативным сопротивлением растяжению таких фибр (580 МПа против 860 МПа согласно данным производителя фибры).

После испытаний на изгиб из образцов выпилены кубы 100×100×100 мм, которые были испытаны на сжатие. Оказалось, что армирование в диапазоне случайной погрешности не повлияло на предел прочности бетона при сжатии.

Можно сделать заключение, что при устройстве полов предпочтительно использовать

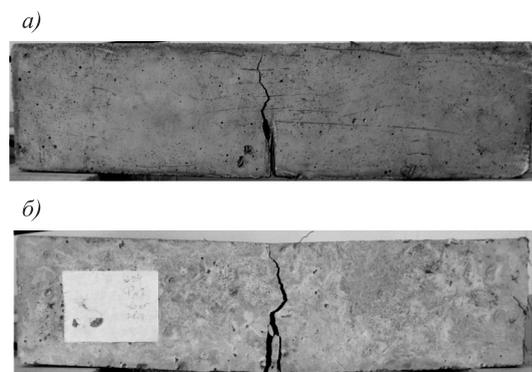


Рис. 4. Характер трещинообразования у образцов с фибрами
 а – № 1, 2 (одна магистральная трещина); б – № 3 («раздвоение» трещины)

бетон с фибрами № 1. Работа разрушения у образцов с такими фибрами увеличивалась по сравнению с неармированными образцами в 10, 14 и 16 раз при содержании фибры 20, 30, 40 кг/м³ соответственно. С точки зрения экономии фибры, достаточным для значительного увеличения работы разрушения является состав с содержанием фибры 30 кг/м³, так как при увеличении содержания фибры до 40 кг/м³ прирост работы разрушения составляет только 14 %. При содержании 20 кг/м³ большую роль играет случайность попадания фибр в сечение, что приводит к снижению обеспеченности необходимой прочности: при использовании фибр с таким расходом относительная погрешность значений нагрузки, соответствующей началу движения магистральной трещины, доходила до 17 % (у фибр № 3).

Таким образом, количественно подтверждена обоснованность применения фибробетона с малым процентом армирования для повышения трещиностойкости монолитных полов различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов В.И., Пухаренко Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестн. МГСУ. 2014. № 3. С. 189–196.
2. Ватин Н.И., Войлоков И.А. Промышленные полы со слоем износа из фибробетона // Стройпрофиль. 2006. № 8. С. 53–57.
3. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирования прочности фибробетона // Строит. материалы. 2004. № 10. С. 47–50.
4. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. М.: Изд-во АСВ, 2011. 642 с.
5. Pucharenko Yu., Morozov V. Structural model and strength predicting of fiber-reinforced concrete // World Applied Sciences J. 2013. Vol. 23, Spec. iss. (Problems of architecture and construction). P. 111–116.
6. Колчеданцев Л.М., Войлоков И.А., Горб А.М. Влияние технологических факторов на качество покрытий полов из фибробетона // Строит. материалы. 2010. № 8. С. 34–37.
7. Войлоков И.А. Сталефибробетон в слоях износа покрытий промышленных полов // Пром. и граждан. стр-во. 2010. № 9. С. 64–67.
8. Зерцалов М.Г., Хотеев Е.А. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона // Вестн. МГСУ. 2014. № 5. С. 91–99.

*Матус Евгений Петрович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: matus_evg@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*Пичугин Анатолий Петрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gmu@nsau.edu.ru
Новосибирский государственный аграрный университет*

Получено после доработки 28.10.15

Matus Eugeny Petrovich, PhD, ass. professor; E-mail: matus_evg@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Pichugin Anatoliy Petrovich, DSc, professor; E-mail: gmu@nsau.edu.ru, Novosibirsk State Agrarian University, Russia

FRACTURE TOUGHNESS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE WITH A LOW PERCENTAGE OF REINFORCEMENT

Data of experiments on determination of fracture toughness at static loading of steel fiber reinforced concrete for monolithic floors with small volume percent of reinforcing (0,25–0,5 %) are provided. Used a fiber of different shapes and sizes. It is shown that the effective use of fiber-reinforced concrete with fiber length 50 mm and diameter 1 mm with curved ends of steel wire. Rational work of destruction is part of the content of such fibers 30 kg/m³, which confirms a reasonable use of fiber-reinforced concrete with low reinforcement ratio for increasing the fracture toughness of monolithic floors for various purposes.

Key words: steel fiber reinforced concrete, floors of industrial buildings, crack.

REFERENCES

1. Morozov V.I., Pukharenko Yu.V. Effectivnost' primeneniya fibrobetona v konstruktsiyakh pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [The efficacy of fiber-reinforced concrete in structures under dynamic loads]. Vestnik MGSU. 2014. No. 3. Pp. 189–196 (rus.)
2. Vatin N.I., Voylokov I.A. Promyshlennye poly so sloem iznosa iz fibrobetona [Industrial floors from wear and tear layer of fiber-reinforced concrete]. Stroyprofile. 2006. No. 8. Pp. 53–57 (rus.)
3. Pukharenko Yu.V. Printsipy formirovaniya struktury i prognozirovaniya prochnosti fibrobetona [Principles of formation of structure and forecasting the strength of fibre-reinforced concrete]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2004. No. 10. Pp. 47–50 (rus.)
4. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov [Composites based on dispersion reinforced concrete]. Moscow, Publisher CRS, 2011. 642 p. (rus.)
5. Pucharenko Yu., Morozov V. Structural model and strength predicting of fiber-reinforced concrete. World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 23, Spec. iss. (Problems of Architecture and Construction). Pp. 111–116.
6. Kolchedantsev L.M., Voylokov I.A., Gorb A.M. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na kachestvo pokrytiy polov iz fibrobetona [Influence of technological factors on the quality of coatings of floors from fiber-reinforced concrete]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2010. No. 8. Pp. 34–37 (rus.)
7. Voylokov I.A. Stalefibrobon v sloyakh iznosa pokrytiy promyshlennykh polov [The fiber reinforced concrete in layers wear coatings of industrial floors]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2010. No. 9. Pp. 64–67 (rus.)
8. Zertsalov M.G., Hoteyev E.A. Eksperimental'noe opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti fibrobetona [Experimental characterization of fracture toughness of fiber-reinforced concrete]. Vestnik MGSU. 2014. No. 5. Pp. 91–99 (rus.)

УДК 691.001

А.Н. ХАРХАРДИН

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР*

Приводятся результаты расчета основных топологических свойств дискретных систем: дисперсных материалов, простых веществ и излучения. Методами дискретной топологии получены величины фундаментальных физических постоянных: постоянной Планка, современное значение постоянной Хаббла, скорости распространения света и др. Рассчитано содержание водорода и гелия, темной материи, темной энергии вакуума в современной Вселенной.

Ключевые слова: дисперсные материалы, топологические переходы, темная материя и темная энергия, скорость света, постоянная Планка, постоянная Хаббла.

Дискретные системы – это вещества, излучения и темные субстанции современной Вселенной, состоящие из элементов дискретности с плотностью систематической (трансляционной – регулярной) укладки $\eta_1 \leq \pi/3\sqrt{2}$ и с произвольной их упаковкой $\eta_1 \leq 1/(\sqrt{3}-1)^6$ в трехмерном пространстве на различном размерном уровне. Единство непрерывного и дискретного в окружающем нас мире, излучения и вещества, жидкого и твердого его состояния приводит к необходимости рассматривать изучаемые объекты в единстве геометрии и физики – дискретной топологии. Дискретная топология изучает как упорядоченные (кристаллические) структуры, так и неупорядоченные физические состояния объектов материального мира, естественным образом или искусственно наделенных дискретностью на различном размерном уровне корпускулярных образований от атома до космических тел. Математическим аппаратом ее исследований являются полученные нами основные [1] и новые топологические закономерности дискретных систем, проявляющих корпускулярно-волновой дуализм:

– рекуррентное уравнение топологических (фазовых) переходов (ФТП):

$$\eta = \eta_1 \left[1 - \frac{1}{3k \ln[2000(\sqrt{3}-1)^9 \eta_1^5]} \right] = \eta_1 \left[1 - \frac{1}{3k \ln(120,753857_1^5)} \right], \quad (1)$$

где η_1 – плотность упаковки элементов дискретности излучения или вещества в плотной фазе;

– полидисперсное распределение элементов дискретности (частиц зернистых материалов) при высокоплотной случайной упаковке в системе (в смеси для проектирования эффективных композитов [2]):

$$d_n/D = [1/10\eta_1 (\sqrt{3}-1)^p]^n, \quad (2)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 11.1550.2014К.

где D , η_1 – средний размер наибольших элементов дискретности вещества (частиц узкой фракции зернистого материала) и плотность их упаковки соответственно.

Из выражения (2) при $n = 1, p = 6, p = 3$ и $p = 0$ следует:

– теоретическая (каноническая) плотность произвольной упаковки сферических частиц при отсутствии сил трения и их взаимодействия, первая критическая (каноническая) и вторая критическая плотности упаковки взаимодействующих элементов дискретности соответственно:

$$\eta_{1\tau} \leq 1/10(\sqrt{3}-1)^{6; 3; 0} \leq 0,64976; \quad \eta_{c1} \leq 0,2549; \quad \eta_{c2} \leq 0,1;$$

– стандартные значения η_1 вычисляются из величины второй критической плотности упаковки элементов дискретности излучения и вещества дискретных систем – $\eta_{c2} = 0,1$:

$$\eta_i = (0,1/k_i^n)^{0,2}, \quad (3)$$

где

$$k_1 = [1/10(\sqrt{3}-1)^3]^{1/3} / [1/10(\sqrt{3}-1)^6] \approx 0,634053 / 0,64976 = 0,9758269.$$

Из этого выражения для зернистого вещества и излучения при $n = 0 \dots 6$ получим: $\eta_1 = 0,630957; 0,6340528; 0,6371635; 0,640289423105; 0,64343068928; 0,64658736384; 0,6497595264$;

– минимальный линейный размер объема вещества (аппарата с зернистым слоем, контрольных образцов композитов и пр.) из выражения (2) при отсутствии (пристеночного) влияния ($n = 3$) плотности упаковки элементов дискретности в поверхностных слоях [1, 3]:

$$d/D \geq [10\eta(\sqrt{3}-1)^3]^n (\Phi_{\text{ч}}/\Phi_{\text{ан}}) \geq (3,923\eta)^3 (\Phi_{\text{ч}}/\Phi_{\text{ан}}) \geq 60,38\eta^3 (\Phi_{\text{ч}}/\Phi_{\text{ан}}), \quad (4)$$

где η, d – плотность упаковки элементов дискретности и средний их размер; $\Phi_{\text{ан}}, \Phi_{\text{ч}}$ – коэффициент формы объема вещества и элементов дискретности, $\Phi_i \leq 1$;

– для размера кластерных образований и наночастиц, при котором проявляются их необычные свойства [4], выражение (4) в данном случае преобразуем к следующим видам:

$$D = (3,923\eta_1)^{3n} d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^3)^n d / \eta_1^{1/9} = \quad (5)$$

$$= (60,38\eta_{c1})^n d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^{n'})^n d / \eta_1^{1/9};$$

$$= \quad \eta \quad \eta \quad = \quad \eta^{n'} \quad \eta \quad (6)$$

$$D = (\eta_1 / \eta_{c2})^{3n} d = (\eta_1 / 0,1)^{3n} d = (1000\eta_1^3)^n d, \quad (7)$$

где $n' = (11,5 \dots 12 \dots 12,4 \dots 15 \dots 16)/3$ определяет первую критическую плотность систематической (регулярной) укладки атомов, а $n'' = (18 \dots 18,4 \dots 19 \dots 23)/3$ – вторую критическую плотность их упаковки при $\eta_1 = 0,6802 \dots 0,6883 \dots 0,6981 \dots 0,7405$ соответственно; для произвольной упаковки элементов дискретности вещества – микро- и наночастиц дисперсных материалов: $\eta_{c1} = \eta_1^{(9 \dots 10 \dots 10,5)/3}$, а $\eta_{c2} = \eta_1^{(13,5 \dots 15 \dots 16)/3}$ при $\eta_1 = 0,6038 \dots 0,64029 \dots 0,64976$;

– индекс амплитуды плотности упаковки элементов дискретности вещества и излучения и из выражения (3) получим:

$$C_3 = \eta_{c2} / k_1^n, \quad \text{при } n = 0 \quad C_3 \leq \eta_{c2} \approx 0,1,$$

$$k_1^{1...6} = [(0,634053...0,633473) / 0,64976]^{1...6},$$

$$C_3 = \eta_1^n = 0,74048^{23/3} = \eta_{c2} \approx 0,1 \quad \text{и} \quad C_3 = \eta_{c1} \eta_1^m = (0,2549...0,2542) \eta_1^m,$$

$$\eta_{c1} = (0,634053...0,633473)^3,$$

где $m = 2$ – для случайных и $m = (7...9,3)/3$ – для систематических укладок шаров;

– для элементов дискретности вещества:

$$C_3 \leq (0,6402894...0,6371635...0,6340528...0,630957)^5 \leq 0,1076...0,1,$$

$$C_3 \leq \eta_{c1} \eta_1^2 \leq 0,2549 \cdot 0,64976^2 \leq 0,6402894^5 \leq 0,10761718778,$$

$$C_3 = \eta_{c1} \eta_1 = 0,74048^5 \cdot 0,74048^{8/3} = 0,22262 \cdot 0,74048^{8/3} \approx 0,1;$$

– для элементов дискретности излучения:

$$C_3 = 0,646587^{16/3} ... (0,63999...0,633473...0,630957)^5 \approx 0,1,$$

$$C_3 = \eta_1^3 \eta_1^2 = 0,6334728^3 \cdot 0,6465874^2 = 0,2542 \cdot 0,6465874^2 = 0,1062768,$$

$$C_3 \geq \eta_1^3 \eta_1^2 \geq 0,2542 \cdot (0,646587...0,63999...0,633473...0,630957)^2 \geq 0,1063...0,1.$$

Каноническая и средняя плотности случайной упаковки элементов дискретности в плотном зернистом (дисперсном) состоянии вещества, а также элементов дискретности вещества и излучения при критическом, псевдожидком, псевдотвердом и далее при псевдотвердом их физическом состоянии соответственно будут равны:

$$\eta_1 = (\eta_{c1})^{1/3} = [1/10(\sqrt{3}-1)^3]^{1/3} = 0,25490381^{1/3} = 0,634052826,$$

$$\eta_1 = (0,6402894 \cdot 0,6340528)^{1/2} = 0,6371635,$$

$$\eta_1 = 1/10(\sqrt{3}-1)^3 = 0,254903810567665797 \rightarrow$$

$$\rightarrow 0,447584998986761523 \rightarrow 0,54938193018442289 \rightarrow 0,6334728405241922.$$

Отсюда для излучения можно получить еще ряд величин η_1 :

$$\eta_1 = (0,64658736 \cdot 0,63347284)^{1/2} = 0,639996511;$$

$$\eta_1 = (0,6399965 \cdot 0,63347284)^{1/2} = 0,636726 \text{ и т.д.}$$

Величина $\eta_1 = 0,63347284$ определяет собственный объем грамм-моля атомов гелия в виде:

$$V_c = C/0,63347284^{10/3} = 4,5804344 \text{ см}^3,$$

где C – постоянная размерности, $C = 1 \text{ см}^3$.

При $V_c = 4,5804 \text{ см}^3$ радиус атома гелия $r = 1,2199558 \text{ \AA} = 0,122 \text{ нм}$. Экспериментальный (справочный) результат $r = 0,122 \text{ нм}$.

Плотность упаковки атомов гелия при критическом состоянии:

$$\eta_{\text{кр}} = 0,2549 \cdot 0,64976^2 (\pi / 3\sqrt{2}) = 0,6402894^5 \cdot 0,74048 = 0,0796884.$$

Так как $V_c = 4,5804 \text{ см}^3/\text{моль}$, то критический объем гелия будет равен:

$$V_{\text{кр}} = 4,58043 \text{ см}^3/\text{моль} / 0,07969 = 54,479 \text{ см}^3/\text{моль}.$$

Экспериментальный (справочный) результат – $V_{\text{кр}} = 54,474 \text{ см}^3/\text{моль}$.

Запишем уравнение (4) для излучения и вещества в зависимости от η_1 в виде:

$$D/\eta_1^n d = 60,38^n = 1; 60,38; 3645,37; 220096,456; 13288748... \quad (8)$$

Первая из этих констант входит в уравнение (4) для определения критических размеров кластеров и наночастиц ($n = 0..5$) и минимального линейного размера аппарата с дисперсным (зернистым) материалом при отсутствии пристеночного влияния ($n = 3$) [1, 3].

Третья константа уравнения (8) содержится в выражении для определения величины постоянной Планка. Запишем выражение (4) с восхождением по коэффициенту ($n = 3$) на более высокий уровень дискретности вещества*:

$$(D/d) = (60,37693\eta_i)^n = 1; 60,377 \eta_i; 3645 \eta_i^2; \mathbf{220096\eta_i^3} \dots$$

Данное равенство при $n = 3$ преобразуем к виду:

$$(D/d)kC \leq (60,3769286\eta_i)^3 kC = 220096,456\eta_1 \eta_2 \eta_3 kC.$$

Левую часть этого равенства обозначим h/\bar{e} и, подставляя полученные выше значения η_i для излучения и вещества, имеем:

$$h/\bar{e} = 220096(0,54938193 \cdot 0,447584999 \cdot 0,25490381) k C,$$

где C – коэффициент размерности, $C = 1 \cdot 10^{-21} \text{ эрг} \cdot \text{с}/\text{ед. CGSE}$.

При $k = 0,9999671818563986$ – величина, полученная при восхождении по уравнению (1) от $\eta_1 = 0,64028942310500804$ до 1:

$$\begin{aligned} h/\bar{e} &= 1,37955579850489462893 \cdot 10^4 \cdot 0,9999671818564 \cdot 10^{-21} \text{ эрг} \cdot \text{с}/\text{ед. CGSE} = \\ &= 1,379510524044593151254647 \cdot 10^{-17} \text{ эрг} \cdot \text{с}/\text{ед. CGSE}. \end{aligned}$$

Согласно современным данным [5]:

$$\begin{aligned} h/\bar{e} &= 6,62606896 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}/(1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,1\text{с} \cdot 2,99792458 \cdot 10^{10} \text{ см}/\text{с}) = \\ &= 1,379510132183684 \cdot 10^{-17} \text{ эрг} \cdot \text{с}/\text{ед. CGSE}, \end{aligned}$$

где $\bar{e} = 1,602176487 \cdot 10^{-29} \text{ Кл} \cdot 0,1\text{с} \cdot 2,99792458 \cdot 10^{10} \text{ см}/\text{с} = 4,80320427187535 \times 10^{-10} \text{ ед. CGSE}$;

$2,99792458 \cdot 10^{10} \text{ см}/\text{с}$ – справочная величина скорости распространения света.

Масса покоя электрона:

$$\begin{aligned} m_e &= R_\infty c h^3 / 2\pi^2 e^4 k_4^{1/2} = 1,09737315685 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \cdot 2,9979245577 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с} \times \\ &\quad \times 0,1\text{с} \cdot (6,6260707929145 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с})^3 / \\ &\quad / 2\pi^2 (4,803204236157 \cdot 10^{10} \text{ ед. CGSE})^4 0,9999671818^{1/2} = \\ &= 9,1095394(9,109534) \cdot 10^{-31} \text{ кг}. \end{aligned}$$

Скорость света как одна из фундаментальных физических величин является мировой константой. Считая, что скорость света зависит от отношения плотности энергий излучения и вещества в процессе развития Вселенной,

* Критические размеры наночастиц выделены жирным шрифтом.

т.е. от плотности упаковки в них элементов дискретности и структуры, представим ее в виде

$$c = dM(\eta_{и} / \eta_{в})^{nc\eta}, \quad (9)$$

где d, M – размерность пространства ($d = 3$) и единица измерения скорости света, $M = 10^8$ м/с;

$\eta_{и}$ и $\eta_{в}$ – плотность упаковки элементов дискретности излучения и вещества;

η_c и η – соответственно критическая плотность случайной упаковки элементов дискретности вещества ($\eta_c \leq 0,1 \dots 0,2549$) и амплитудная плотность их упаковки.

Амплитудные (в плотной фазе флуктуаций) плотности случайной упаковки элементов дискретности топологических пространств получают из выражения (3), записанного в виде:

$$\eta = [0,1/(\eta_{к} / \eta_{1\max})^n]^{1/m}, \quad (10)$$

где $\eta_{к}, \eta_{1\max}$ – каноническая и наибольшая плотности случайной упаковки элементов дискретности излучения и вещества;

n – уровни развития структуры топологических пространств, $n = 0 \dots 5$;

m – показатель, определяющий период развития топологического пространства Вселенной, $m = 0 \dots 5$; $m = 0 \dots 1$; $2 \dots 4$ – в ранний и в поздние периоды развития Вселенной, $m = 5$ – в настоящий период развития.

Из выражения (9) следует, что при $\eta_c \eta \rightarrow 0$ в ранний период развития Вселенной скорость света равна $10^8 d$ м/с = 300 000 км/с. Из выражения (10) на ранней стадии развития Вселенной ($m = 1, n = 0$) получим: $\eta \leq 0,1$. Скорость света в настоящий период развития Вселенной ($\eta_c \leq 0,1, \eta \leq 0,646587$) равна:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} (0,633472840524/0,640289423105)^{0,064658736384} = 2,9979245577 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Величины содержания энергии вещества ε_1 , межгалактического газа, звезд и нейтрино ε_r , энергии темной материи ε_2 и темной энергии вакуума ε_3 можно получить непосредственно по уравнению ФТП (1) при $\sigma_{\max}(\eta_1) = 0,9999671818564$ и $\sigma_{\max}(\eta_1) = 1$ в ряду главной последовательности фазового изменения вещества и содержания материальных субстанций в холодной, ячеистой структуре Вселенной:

$$\begin{aligned} 1 &\rightarrow 0,930465076654 \rightarrow 0,86050635728386 \rightarrow 0,7895528450 \rightarrow \\ &\rightarrow 0,7166952664 \rightarrow \mathbf{0,64032674326744} \rightarrow 0,5571091981 \rightarrow \\ &\rightarrow 0,457738137416 \rightarrow 0,2856168242\dots \rightarrow 0,22092884, \\ 0 &\rightarrow \mathbf{0,0695349} \rightarrow 0,13949364 \rightarrow \mathbf{0,210447155} \rightarrow 0,2833047 \rightarrow \\ &\rightarrow 0,359673257 \rightarrow 0,4428908 \rightarrow 0,542262 \rightarrow \\ &\rightarrow \mathbf{0,714383175784\dots} \rightarrow 0,77907116, \quad (11) \\ 0,9999671818564 &\leftarrow 0,93043216287 \leftarrow 0,86047312695 \leftarrow \\ &\leftarrow 0,7895189656627 \leftarrow 0,7166601858958 \leftarrow \mathbf{0,640289423105} \rightarrow \\ &\rightarrow 0,5570672723 \rightarrow 0,457683678247 \rightarrow 0,285467268311 \rightarrow \dots \rightarrow 0,220928, \end{aligned}$$

$$0 \rightarrow 0,069567837(0,069535019) \rightarrow 0,13952687 \rightarrow \\ \rightarrow 0,2104810343473 \rightarrow 0,283339814 \rightarrow 0,359673257 \rightarrow \\ \rightarrow 0,4429327277 \rightarrow 0,54231632175 \rightarrow 0,714532731689... \rightarrow 0,779072. \quad (12)$$

Содержание энергии вещества ε_1 во Вселенной равно:

$$\varepsilon_1 = (\sigma_{\max} - \sigma)\eta_i / (1... \sigma_{\max}) 100 \%, \quad (13)$$

где σ_{\max} , σ – плотности упаковки элементов дискретности субстанций в точках «перегретого» и «переохлажденного» их состояний, т.е. $\sigma_{\max} \geq 1$, а $\sigma \leq 1$ при восхождении по уравнению (1) от данного значения η_i (величины их выделены жирно).

$$\varepsilon_1 = 100(1,022405 - 0,9529177)0,7404805 / (1...1,022405) = 5,145...5,033 \%,$$

$$\varepsilon_1 = 100(0,9999672 - 0,930432)0,640289431 / (1...0,9999672) = 4,45 \%,$$

$$\varepsilon_1 = 100(1 - 0,930465)0,640326745 / 1 = 4,45 \%,$$

$$\varepsilon_1 = 100(0,999710249 - 0,93017443)0,63999651 / (1...0,999710249) = 4,45 \%.$$

Содержание энергии межгалактического газа, звезд и нейтрино ε_r во Вселенной:

$$\varepsilon_r = \varepsilon - \varepsilon_1 = (\sigma_{\max} - \sigma)(1 - \eta_i) / (1... \sigma_{\max}). \quad (14)$$

$$\varepsilon_r = 100(1,02240 - 0,9529177)(1 - 0,7404805) / (1...1,02240) = 1,80...1,76 \%,$$

$$\varepsilon_r = 100(0,99971 - 0,930174)(1 - 0,63999651) / (1...0,99971) = 2,5 \%,$$

$$\varepsilon_r = 100(0,9999672 - 0,930432)(1 - 0,6402894) / (1...0,999967) = 2,5 \%,$$

$$\varepsilon_r = 100(1 - 0,930465)(1 - 0,640326743) / 1 = 2,5 \%.$$

Содержание энергии темной материи в современной Вселенной определяется по величине первой критической плотности упаковки элементов ее дискретности:

$$\varepsilon_2 = \eta_{cl} = 100\eta_1^n \%. \quad (15)$$

Из этого выражения для конденсата – вещества при $\eta_1 = 0,6340528...0,74048$ получим:

$$\varepsilon_2 = 100(0,634053^{10/3} ... 0,640289^{10/3} ... 0,64976^{3,45} ... 0,7405^5) \% = \\ = (21,90...22,625...22,59...22,26) \%.$$

При этом содержание энергии вещества ε_1 и межгалактического газа ε_r , темной материи ε_2 и энергии вакуума ε_3 во Вселенной соответственно равно:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_r = (1 - 0,930465) = (4,45 + 2,5) = 0,0695; \varepsilon_2 = 21,05 \text{ и } \varepsilon_3 = 71,45 \%,$$

что находится в пределах:

$$\varepsilon_3 = 100 \% - (6,95 + 21,05...22,26) \% = 72,0...70,78 \%,$$

где $\eta_1 = 0,2105^{0,2} ... 0,22262^{0,2} = 0,7322...0,7405$.

По данным В.А. Рубакова [6], содержание энергии темной материи в современной Вселенной составляет 20–25 %, темной энергии вакуума – 70–75 %, энергии вещества – 5 %, энергии звезд – 0,5 % и нейтрино – 1–0,3 %.

Количество обменной энергии излучения с темной материей и с темной энергией вакуума в современной Вселенной равно соответственно:

$$\Delta \varepsilon_2 = (0,7404805 - 0,21045^{0,2} \dots 0,22262^{0,2}) 100 \% = 0,828236 \dots 0 \%$$

Либо

$$\Delta \varepsilon_2 = 100 \% / [2000(\sqrt{3}-1)^9 \dots 0,22262^{0,2}] = 0,828131 \dots 0 \%,$$

$$\Delta \varepsilon_3 = (0,7404805 - 0,7143832) 100 \% = 2,6097 \%,$$

$$\Delta \varepsilon_3 = (0,7404805 - 0,7145327) 100 \% = 2,5948 \%$$

Количества обменной энергии излучения с энергией вакуума и темной материей определяют содержание водорода и гелия в современной Вселенной:

$$H = 0,026097 / (0,00828 + 0,026097) 100 \% = 75,91 \%,$$

$$He = 100 \% - 75,91 \% = 24,09 \%$$

Постоянная Хаббла одна из неоднозначных величин со времени ее открытия.

Оценочная величина постоянной Хаббла современной Вселенной:

$$H_0 = \eta_{c1} / 2\eta_{c2} (\sqrt{3}-1)^{13} \approx$$

$$\approx (0,2549 \dots 0,2542) \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) / 2 \cdot 0,1 (\sqrt{3}-1)^{13} \approx 73,5 \dots 73,3 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}).$$

Уточним величину постоянной Хаббла по содержанию темной энергии вакуума во Вселенной и по значению величин ряда (11, 12), где $\eta = 1$ и $\eta = 0,9999671818$ соответственно:

$$H_0 = (\eta_{c1} / 2\eta_{c2} \eta_1^5) (\eta_{1 \max} / \eta_1)^m \leq (\eta_{c1} / 2 \cdot 0,01\eta_1^5) (\eta_{1 \max} / \eta_1)^m \leq$$

$$\leq (\eta_{c1} / 2 \cdot z\eta_1^5) (\eta_{1 \max} / \eta_1)^m \leq$$

$$\leq (0,2542 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) / 2 \cdot 0,01 \cdot 0,714383^5) \cdot (0,7404805 / 0,714383)^2 \leq$$

$$\leq 68,5 (0,7404805 / 0,714383)^2 \leq 73,3943649822 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}),$$

где η_{c1} , η_{c2} – канонические значения первой и второй критической плотности упаковки элементов дискретности: $\eta_{c1} = 0,63347284^3 = 0,25420494767$ – для излучения и $\eta_{c1} = 0,634052826^3 = 0,2549038106$ – для вещества; $\eta_{c2} = 0$; η_1 – современная плотность их упаковки – выделены жирно в ряду (11) либо (12);

m – показатель взаимодействия элементов дискретности: для кулоновского $m = 2$, а для сильного их взаимодействия $m \geq 16/3$;

$\eta_{1 \max}$ – плотность систематической упаковки сферических элементов дискретности, $\eta_{1 \max} = \pi / 3\sqrt{2} = 0,7404805$;

z – относительная величина уменьшения частоты электромагнитных волн (красное смещение) на расстоянии распространения света от источника (v_0) к приемнику (v) в результате диссипации их энергии, $z = (v_0 - v) / v = v_n / v$.

На больших и малых расстояниях согласно С.Б. Алеманову $z \approx 0,01$ [7].

Возраст вакуумной составляющей Вселенной равен:

$$t_0 = 1/H_0 \geq 1/73,3943649822 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) \geq 13,6250242 \cdot 10^9 \text{ лет} \geq \\ \geq 13,6250242 \text{ млрд лет.}$$

Величину постоянной Хаббла относительно содержания темной материи во Вселенной при сильном ($n = 16/3$) взаимодействии элементов ее дискретности вычислим по формуле:

$$H_0 = (\eta_{c1}/2\eta_{c2}^2 \eta'_{c1})(\eta_{1 \max}/\eta_1)^m = (\eta_{c1}/2z\eta'_{c1})(\eta_{1 \max}/\eta_1)^m = \\ = (\eta_{c1}/2 \cdot 0,01\eta'_{c1})(\eta_{1 \max}/\eta_1)^m,$$

где η'_{c1} – установившаяся критическая плотность упаковки элементов дискретности при топологических переходах вещества, определяемая в ряду (11) или (12).

$$H_0 = (0,2549 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,210447)(0,7404805/0,714383)^{16/3} = \\ = 60,562427321(0,7404805/0,714383)^{16/3} = 73,3346827717723 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}).$$

Возраст темной материи Вселенной:

$$t_0 = 1/H_0 = 1/73,3346827717723 = 13,63611271234565 \text{ млрд лет.}$$

Относительно темной энергии вакуума и значению величин ряда (12), где $(k) \eta_{1 \max} = 0,9999671818564$, получим:

$$H_0 = (0,2542/k^2 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/ \\ /2 \cdot 0,01 \cdot 0,714532731689^5)(0,7404805/0,71453273)^2/k^2 = \\ = 68,2406827938951(0,7404805/0,71453273)^2/k^2 = \\ = (73,28689937461/0,9999672^2) = 73,29170989139245 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}).$$

Возраст вакуумной составляющей Вселенной при этом равен:

$$t_0 = 1/H_0 = 1/73,29170989139245 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) = 13,6441079281934 \text{ млрд лет.}$$

Относительно содержания темной материи во Вселенной получим:

$$H_0 = (0,2549/k^{16/3} \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) / \\ /2 \cdot 0,01 \cdot 0,210481037)(0,7404805/0,71453273)^{16/3} = \\ = 60,563278 \cdot 1,20954294 = 73,2538855 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}).$$

Возраст темной материи современной Вселенной равен:

$$t_0 = 1/H_0 = 1/73,2538855 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) = 13,651153 \text{ млрд лет.}$$

Средние значения величин, полученных относительно энергии вакуума и темной материи, и возрасты их соответственно равны:

$$H_0 = (73,3943649822 \cdot 73,29170989139245)^{0,5} = 73,343019476555 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}),$$

$$t_0 = 1/H_0 = 1/73,343019476555 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) = 13,6345627319 \text{ млрд лет,}$$

$$H_0 = (73,3346827723 \cdot 73,2538855)^{0,5} = 73,2942729 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}),$$

$$t_0 = 1/H_0 = 1/73,2942729 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) = 13,643631 \text{ млрд лет.}$$

Наиболее вероятные значения величин постоянной Хаббла, вычисленные по топологическим параметрам вакуума и темной материи, а также возраст вакуумного образования и темной материи соответственно составят:

$$H_0 = 73,343019476555 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}), \quad t_0 = 13,634562732 \text{ млрд лет},$$

$$H_0 = 73,2942729 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}), \quad t_0 = 13,643631 \text{ млрд лет}.$$

Из результатов расчета следует, что возраст темной материи на 8–10 млн лет больше вакуумного образования при расширении Вселенной. На сегодняшний день считается, что наиболее вероятное значение $H_0 = 73,2 \pm 0,2$ [8].

Кратность яркости звезд при установлении звездной величины определяется по величине плотности случайной (произвольной) упаковки одинаковых шаров:

$$D_{n-1}/d_n = [10\eta_1(\sqrt{3}-1)^3] = (3,923 \cdot 0,640326745 \dots 0,6402894231)^{n-1} = 2,512^{n-1}.$$

Плотность упаковки элементов дискретности темной материи, к величине которой приведет вакуумное расширение, $\eta_{c1} = (\pi/3\sqrt{2})^{16/3} = 0,7404805^{16/3} = 0,20140611$ совпадает с максимумом длины волны $\lambda \approx 0,201406$, получаемой из уравнения Планка для излучения черного тела.

Оставшееся время на расширение Вселенной до начала ее сжатия:

– относительно вакуумного пространства во Вселенной

$$\Delta t = 1/(0,2542 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,2014^{5 \cdot 3/16})(0,7404805/0,2014^{3/16})^2 -$$

$$- 13,634562732 \text{ млрд лет} = 17,51515952968 - 13,634562732 \approx 3,87 \text{ млрд лет},$$

полный цикл расширения и сжатия пульсирующей однородной Вселенной составляет:

$$t_{\Pi} = 17,51515953 \cdot 2 \approx 35,03 \text{ млрд лет};$$

– относительно темной материи

$$\Delta t = 1/(0,2549k^5 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,2014^{5 \cdot 3/16})(0,7404805/0,2014^{3/16})^{16/3} -$$

$$- 13,63611271375 \text{ млрд лет} = 17,47000 - 13,636 \approx 3,834 \text{ млрд лет},$$

полный цикл расширения и сжатия пульсирующей Вселенной:

$$t_{\Pi} = 17,47 \cdot 2 \approx 34,94 \text{ млрд лет}.$$

Для полного возраста пульсирующей Вселенной, начиная от точки сингулярности, где $0 \leq n \leq 1$, а $m \geq 16/3 \rightarrow \infty$, может быть получено несколько решений (для периодов ее развития):

$$T = 1/(0,2549/k^n \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,2014^n)(0,7404805/0,2014^n)^m.$$

При $m = 16/3$, $m = 23/3$ и $m \rightarrow \infty$:

$$T = 1/(0,2549 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,2014^0)(0,7404805/0,2014^0)^{16/3} =$$

$$= 15,8 \text{ млрд лет},$$

$$T = 1/(0,2549 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,7404805)(0,7404805/0,2014^{3/16})^{16/3} =$$

$$= 58,1 \text{ млрд лет},$$

$$T = 1/(0,2549 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,7404805)(0,7404805/0,2014^0)^{23/3} =$$

$$= 581,5 \text{ млрд лет},$$

$$T = 1/(0,2549 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,2014^0)(0,7404805/0,2014^0)^{23/3} = \\ = 785,325 \text{ млрд лет},$$

$$T = 1/(0,2549 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})/2 \cdot 0,01 \cdot 0,2014^0)(0,7404805/0,2014^0)^{m \rightarrow \infty} \rightarrow \infty.$$

Таким образом, методы дискретной топологии позволяют рассчитать содержания энергии вещества, темной материи и темной энергии вакуума во Вселенной и их взаимосвязь, которая до настоящего времени не была установлена. Их величины вписываются в интервал литературных данных [6]. Можно предположить, что содержание энергии субстанций Вселенной лучшим образом отражает ее структуру, так как разброс их величин находится в более узком интервале.

Содержание энергии вещества с упорядоченной структурой во Вселенной $\varepsilon_1 \approx 5,15 \%$, а с неупорядоченной структурой $\varepsilon_1 \approx 4,45 \%$. Содержание энергии межгалактического газа, звезд и нейтрино с упорядоченной структурой $\varepsilon_r \approx 1,8 \%$, что противоречит их физическому состоянию, а с неупорядоченной структурой $\varepsilon_r \approx 2,5 \%$ и соответствует ему.

Плотность упаковки элементов дискретности темной материи $0,2105 \dots 0,2226$ соответствует критическому состоянию вещества. При низкой температуре и глубоком вакууме следует предположить, что критическое состояние темной материи является постоянным источником электромагнитного излучения, подобно тому, как вблизи термодинамической критической точки вещества наблюдается звуковой шум. Взаимодействие элементов дискретности темной материи (показатель степени в ее уравнениях m) больше, чем кулоновского взаимодействия их в темной энергии вакуума. В данных условиях темная материя проявляет необычное свойство – гравитационное отталкивание наряду с местным гравитационным притяжением космических тел, что обеспечивает их орбитальную и галактическую относительную устойчивость.

Взаимодействие излучения с темной энергией вакуума и с темной материей приводит к развитию в них флуктуаций плотности и снижению средней плотности упаковки элементов дискретности с образованием вещества. Гравитация отрицательного давления вакуума и темной материи ведет к гравитационному расширению Вселенной с возрастающей скоростью. Наблюдаемое возрастание скорости удаленных звезд и галактик связано с круговым движением их на периферии, что предопределяет последующее сжатие Вселенной.

В настоящее время возраст Вселенной $13,6441\text{--}13,6361$ млрд лет, а на закате ее расширения достигнет $17,5$ млрд лет. Полный цикл расширения и сжатия пульсирующей Вселенной составит 35 млрд лет. Есть основания полагать, что первичным является материя, которая бесконечна во времени и в пространстве, а вторичным – вакуум Вселенной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хархардин А.Н. Структурная топология дисперсных материалов. Белгород: Изд-во Белгород. гос. технол. ун-та (БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2011. 288 с.
2. Лесовик В.С., Строкова В.В., Володченко А.А. Влияние наноразмерного сырья на процессы структурообразования в силикатных системах // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 13–17.

3. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979. С. 176.
4. Чижик С.Л. Размерные явления при фазовом переходе жидкость – кристалл // Журн. эксперимент. и теорет. физики. 1985. Т. 88, вып. 5. С. 1706–1717.
5. Каршенбойм С.Г. Новые рекомендованные значения фундаментальных физических постоянных (КОДАТА–2006) // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. № 10. С. 1057–1062.
6. Рубаков В.А. Иерархии фундаментальных констант // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. № 4. С. 407–413.
7. Алеманов С.Б. Квантовый закон Хаббла (Квантовый закон космологического красного смещения) // Инженерная физика. 2014. № 3.
8. Горелик И.Ю. Константа Хаббла как угловая скорость света в замкнутой Вселенной: URL: <http://www.00cities.org/igorelik/datru.html>. (дата обращения 10.10.2015).

*Хархардин Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: s-nsm@intbel.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 20.10.15

Kharkhardin Anatoliy Nikolaevich, DSc, professor; E-mail: s-nsm@intbel.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

TOPOLOGICAL PROPERTIES OF LARGE-SCALE STRUCTURES

Results of calculation of the basic topological properties of discrete systems are resulted: disperse materials, simple substances and radiation. Methods of discrete topology receive sizes of fundamental physical constants: Planck's constant, modern value of a constant of Hubble, speed of distribution of light and others. The maintenance of hydrogen and helium, a dark matter, dark energy of vacuum in the modern Universe is calculated.

Key words: disperse materials, topological transformations, dark matter and dark energy, speed of light, Planck's constant, Hubble's constant.

REFERENCES

1. Kharkhardin A.N. Structurnaya topologiya dispersnykh materialov [Structural topology of dispersed materials]. Belgorod, BSTU named after V.G. Shukhov, 2011. 288 p. (rus.)
2. Lesovik V.S., Strokova V.V., Volodchenko A.A. Vliyanie nanorazmernogo syr'ya na protsessy strukturoobrazovaniya v silikatnykh sistemakh [Influence of nano- size raw materials on structure formation of silicate systems]. Bull. of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2010. No. 1. Pp. 13–17 (rus.)
3. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskiy D.A. Apparaty so statsionarnym zernistym sloem [Apparatus with a stationar granular bed]. Leningrad: Chemistry, 1979. P. 176 (rus.)
4. Chizhik S.L. Razmernye yavleniya pri fazovom perekhode zhidkost' – kristall [Size phenomenon at phase transformation «liquid – a crystal»]. Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki [Journal of experimental and theoretic physic]. 1985. Vol. 88, No. 5. Pp. 1706–1717 (rus.)
5. Karshenboym S.G. Novye rekomendovannye znacheniya fundamenal'nykh fizicheskikh postoyannykh (Kodata–2006) [New recommended values of fundamental physic constants]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in physical Sciences]. 2008. Vol. 178, No. 10. Pp. 1057–1062 (rus.)

6. Rubakov V.A. Ierarkhii fundamental'nykh constant [Hierarchy of fundamental constants]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in physical Sciences]. 2007. Vol. 177. No. 4. Pp. 407–413 (rus.)
 7. Alemanov S.B. Kvantovyy zakon Khabbla (Kvantovyy zakon kosmologicheskogo krasnogo smeshcheniya) [Hubble's quantum law (the Quantum law Astronomical red displacement)]. Inzhenernaya fizika [Engineering physics]. 2014. No. 3 (rus.)
 8. Gorelik I.Yu. Konstanta Khabbla, kak uglovaya skorost' sveta v zamknutoy Vselennoy [Hubble's Constant as an angular velocity of light in the closed Universe] URL: <http://www.00cities.org/igorelik/datru.html> (date of access: 10.10.2015) (rus.)
-

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 620.194.8

Г.Ф. РУДЗЕЙ, Л.А. АДЕГОВА, В.В. ДУБИНИН

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ С ОТВЕРСТИЕМ ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Исследованы характеристики усталостной долговечности образцов из листового материала АК4-1АТ1 с дорнированным отверстием и образцов с заклепкой, установленной с натягом после предварительного воздействия агрессивной среды (3%-го раствора NaCl) и статической силовой нагруженности в процессе экспозиций. При моделировании программы испытаний строительной конструкции с применением метода конечных элементов осуществлен расчет усталостной долговечности. Выявлено значительное влияние коррозионной среды на ресурс образцов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: образцы с отверстием, коэффициенты уравнений регрессии, ресурсные характеристики, напряженно-деформированное состояние, коррозия, кривые усталости.

Актуальной задачей является повышение ресурсных характеристик элементов конструкций с концентраторами напряжений. Существуют различные способы решения данной проблемы: дорнирование отверстий с помощью протяжки штифта с натягом, установка крепежа с гарантированным натягом, создание с помощью локального пластического деформирования стопоров на пути развития усталостной трещины и др. Обобщая опыт контактов Boeing с НИАТ, О.С. Сироткин в работе [1] особо подчеркнул, что наиболее интересными оказались разработки в области управления напряженно-деформированным состоянием в высокоресурсных конструкциях.

Определены диапазоны положительного влияния вышеизложенных технологических операций на ресурсные характеристики конструктивных образцов с отверстием и образцов заклепочных соединений. Показано, например, что при дорнировании отверстий удастся повысить усталостную долговечность образцов почти на порядок. Технологические параметры дорнирования должны быть определены с учетом критериев статической прочности и усталостной долговечности конструктивных элементов. При постановке заклепок с натягом в пластине в области отверстия возникают значительные остаточные сжимающие напряжения. Применение заклепок с компенсатором приводит к повышению усталостной долговечности образцов заклепочного соединения при циклическом растяжении в рабочем диапазоне нагрузок в 3–4 раза. Однако необходимо оценить, как влияют

вышеуказанные технологии на сопротивление усталости конструктивных элементов, работающих в агрессивных средах.

В данной работе испытаны образцы с отверстием $d = 6$ мм на усталость в исходном состоянии, после пластического деформирования области отверстия единичной нагрузкой $P = 0,7 P_p$ (где P_p – разрушающая нагрузка) и после протяжки штифта с натягом через отверстие (радиальный натяг 5 %). Образцы с различной предысторией подвержены экспозиции на воздухе и в 3%-м водном растворе NaCl в течение $\tau = 180$ сут. Партия образцов с упрочненным отверстием была также предварительно выдержана в агрессивной среде под напряжением $\sigma_{ст} = 80$ МПа (коррозия под напряжением). Образцы изготовлены из листового материала АК4-1АТ1 толщиной 3 мм, ширина рабочей зоны 80 мм. Для ресурсных испытаний использована машина ЦДМ-Пу-10 (частота нагружения 12,5 Гц, $\sigma_{max} = 160$ МПа, $\sigma_{min} = 30$ МПа).

Для оценки ресурсных характеристик элементов с отверстием при программном или случайном нагружении нужны кривые усталости. На основании результатов испытаний на уровне напряжения $\sigma_{max} = 160$ МПа осуществлено моделирование кривых усталости. Методика расчета кривых усталости по результатам ограниченного объема испытаний с помощью линейного регрессионного анализа [2, 3] представлена в работах [4, 5]. Для исследуемых образцов при отнулевом нагружении уравнение кривой усталости записано в виде:

$$\lg N_i = a + b \lg \sigma_{max i} = a + (1,68 - 0,41a) \lg \sigma_{max i}. \quad (1)$$

Испытав образцы на одном уровне нагружения и получив значение N_i , можно вычислить коэффициенты уравнения a , b и рассчитать значения долговечности при других уровнях напряжения. Важно только не выйти за пределы линейности функции $\lg N = f(\lg \sigma_{max})$.

Вычисленные коэффициенты уравнений регрессии a и b , экспериментальные и расчетные значения усталостной долговечности образцов при действии коррозионной среды приведены в таблице. Кривые усталости представлены на рис. 1.

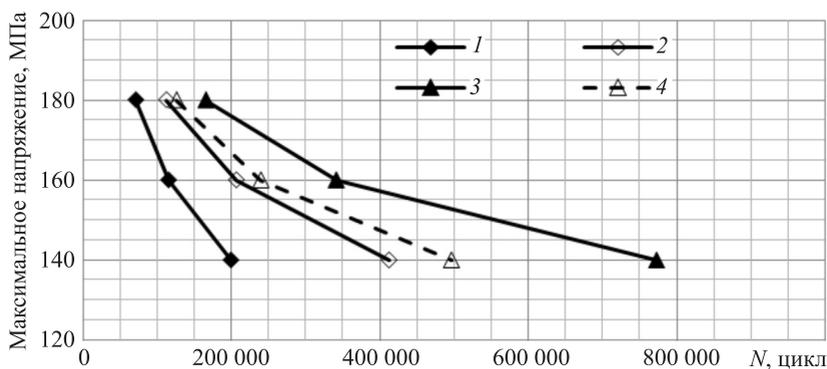


Рис. 1. Кривые усталости образцов

1 – исходное состояние; 2 – после единичного деформирования $P = 0,7 P_p$;
3 – после натяга 5 %; 4 – после натяга 5 % и выдержки в 3%-м растворе NaCl при $\sigma_{ст} = 80$ МПа, $\tau = 180$ сут

Расчет ресурсных характеристик образца после коррозионной предыстории при программном нагружении проведен на основании традиционной методики [6, 7], включающей в себя следующие этапы:

1. Создание конечно-элементной модели;
2. Определение граничных условий;
3. Задание циклограммы нагружения;
4. Анализ напряженно-деформированного состояния. Определение наиболее нагруженных (критических) зон конструкции;
5. Обработка циклограмм напряжений методом «полных циклов» для каждой критической зоны с получением спектра напряжений в виде асимметричных циклов с экстремумами σ_{\max} , σ_{\min} ;
6. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по вносимому усталостному повреждению отнулевым циклам по формуле:

$$\sigma_{0i} = \begin{cases} \sqrt{\sigma_{\max}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}, & \sigma_m \geq 0 \\ \sqrt{2}(0,6\sigma_{\max} - 0,4\sigma_{\min}), & \sigma_m < 0, \quad \sigma_{\max} > 0, \\ 0, & \sigma_{\max} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

здесь $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ – среднее напряжение цикла;

7. Определение согласно гипотезе линейного суммирования повреждений максимального значения одного отнулевого цикла, эквивалентного по вносимому усталостному повреждению всему блоку нагружения:

$$\sigma_{0\max} = \sqrt[m]{\sum(n_i \sigma_{0i}^m)}, \quad (3)$$

где n_i – число отнулевых циклов с максимальным значением σ_{0i} ; m – показатель кривой усталости;

8. Подбор базовых кривых усталости стандартных образцов, описываемых уравнением:

$$N\sigma_{\text{бр}}^m = A_{\text{бр}}, \quad (4)$$

здесь $A_{\text{бр}}$ – параметр кривой усталости, зависящий от свойств материала и конструктивно-технологических особенностей конструкции; $\sigma_{\text{бр}}$ – напряжение образца в сечении брутто;

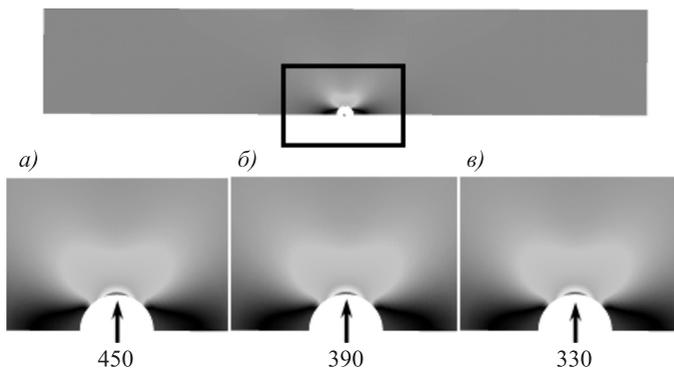


Рис. 2. Распределение максимальных главных напряжений, МПа. Нагружение по торцам модели при $\sigma_{\max} = 150$ (а), 130 (б), 110 (в) МПа

Уравнения кривых усталости и усталостная долговечность образцов

Состояние образца	Коррозийная предыстория		Коэффициенты уравнений регрессии		Экспериментальные (*) и расчетные значения долговечности N_p , цикл при уровнях σ_{max} , МПа			Уравнения кривой усталости	Расчетные значения долговечности при программном нагружении N_p , цикл
	среда, выдержка τ , сут	$\sigma_{ст}$, МПа	a	b	180	160 (*)	140		
Исходные образцы	Воздух	0	14,1152	-4,1072	71 157	115 400	199 800	$N \sigma_{бр}^{4,11} = 6,2378 \cdot 10^{13}$	256 315
Дорнирование отверстия $P = 0,7P_p$	Воздух	0	16,7397	-5,1832	112 182	206 600	413 000	$N \sigma_{бр}^{5,19} = 2,2004 \cdot 10^{16}$	557 408
Натяг 5 %	Воздух	0	19,0097	-6,1140	166 316	341 800	773 400	$N \sigma_{бр}^{6,11} = 3,2838 \cdot 10^{18}$	1083 876
Натяг 5 %	3%-й раствор NaCl, $\tau = 180$	80	17,4034	-5,4554	125 879	239 400	496 200	$N \sigma_{бр}^{5,46} = 9,5551 \cdot 10^{16}$	677 507

9. Вычисление расчетной долговечности из соотношения:

$$N_p = \frac{A_{бр}}{\sigma_{0max}^m} K_{tg}^m, \quad (5)$$

здесь $K_{tg} = 3,02$ – коэффициент концентрации напряжений (при расчете по сечению брутто).

Программный блок нагружения строительной конструкции представляет собой отнулевое нагружение ($\sigma_{min} = 0$) и состоит из одного цикла $\sigma_{max} = 150$ МПа, 20 000 циклов $\sigma_{max} = 130$ МПа и 100 000 циклов $\sigma_{max} = 110$ МПа.

Был проведен конечно-элементный анализ, и на рис. 2 представлено распределение максимальных главных напряжений для различных случаев нагружения.

Расчетная оценка долговечности при программном нагружении образцов с различной коррозионной предысторией проведена на основании формул (1–5) и представлена в таблице.

По результатам работы можно сделать вывод, что операции упрочнения привели к увеличению долговечности в диапазоне $140 \text{ МПа} \leq \sigma_{max} \leq 180 \text{ МПа}$ в среднем соответственно в 1,9 и 3,3 раза. После натяга 5 % и последующей выдержки в среде 3%-го раствора NaCl в течение 180 сут при $\sigma_{ст} = 80$ МПа отмечено снижение долговечности (по сравнению с результатами после натяга) в 1,5 раза, но долговечность по сравнению с исходным состоянием образцов выше в 2,2 раза.

Рассмотренные методы и результаты исследований могут быть использованы при выборе упрочняющих технологий по критерию усталостной долговечности при оценке ресурсных характеристик изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сироткин О.С., Плихунов В.В., Бородкин А.А., Кравченко С.В., Митропольская Н.Г., Соколов Б.Б., Gane David H., Weber Gary R., Johanson Brett M. Опыт совместных технологических проектов Boeing – НИИТ. Современные научные проблемы и технологии в гражданской авиации. 20 лет сотрудничества ученых России и компании Boeing (1993–2013). М.: Наука, 2013. С. 279–296.
2. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справ. М.: Машиностроение, 2005. 344 с.
3. Зако Л. Статистическое оценивание / пер. с нем., под ред. Ю.П. Адлера, Б.Г. Горского. М.: Статистика, 1976. 598 с.
4. Рудзей Г.Ф. О взаимосвязи параметров кривой усталости и возможности прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций // Деформация, разрушение материалов. 2014. № 1. С. 41–48.
5. Белов В.К. и др. Определение коэффициентов коррекции для получения достоверных характеристик усталостной долговечности элементов конструкций ЛА // Полет. 2011. № 7. С. 42–46.
6. Адегова Л.А. Повышение точности оценки численного прогнозирования усталостной долговечности высоконагруженных зон конструкций самолетов с использованием модифицированных кривых усталости // Науч. вестн. НГТУ. 2014. № 3 (56). С. 160–170.
7. Стрижус В.Е. Методика расчетов на усталость элементов авиационных конструкций с использованием рейтингов усталости // Научн. вестн. Моск. гос. техн. ун-та граждан. авиации. 2008. № 130. С. 47–59.

*Рудзей Галина Фёдоровна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: galina_rudzey@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Адегова Людмила Алексеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: adegova@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Дубинин Владимир Васильевич, начальник сектора; E-mail: dvv147@yandex.ru
Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, г. Новосибирск*

Получено после доработки 12.10.15

Rudzey Galina Fedorovna, DSc, professor, E-mail: galina_rudzey@mail.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Adegova Ludmila Alexeevna, PhD, ass. professor, E-mail: adegova@mail.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Dubinin Vladimir Vasil'evich, chif of sector, E-mail: dvv147@yandex.ru, Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

**IMPACT ON CHANGE CORROSIVE ENVIRONMENTS
FATIGUE LIFE OF SAMPLES WITH HOLES AFTER
STRENGTHENING TECHNOLOGY**

The characteristics of the fatigue life of samples of sheet material with AK4-1AT1 dornirovannym hole and samples with rivets installed with interference after prior exposure to aggressive environment (solution 3 % NaCl) and static force loading during the exposures. In the simulation test program building structure using the finite element method Implemented calculation of the fatigue life. Revealed a significant effect of corrosive environment on resource images.

Key words: images with a hole, the coefficients of the regression equations, resource characteristics, stress-strain state, corrosion, durability curves.

REFERENCES

1. Sirotkin O.S., Plikhunov V.V., Borodkin A.A., Kravchenko S.V., Mitropolskaya N.G., Sokolov B.B., Gane David H., Weber Gary R., Johanson Brett M. Opyt sovmestnykh tekhnologicheskikh proektov Boeing–NIAT. Sovremennye nauchnye problemy i tekhnologii v grazhdanskoj aviatsii. 20 let sotrudnichestva uchënykh Rossii i kompanii Boeing (1993–2013) [The experience of joint technological projects BOEING - NIAT. Modern science and technology issues in civil aviation. 20 years of Russian scientists and companies Boeing (1993-2013)]. Moscow, Science, 2013. Pp. 279–296 (rus.)
2. Stepanov M.N., Shavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki resul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik [Statistical methods for processing the results of mechanical tests: Directory]. Moscow, Engineering, 2005. 344 p. (rus.)
3. Zako L. Statisticheskoe otsenivanie [Statistical evaluation; translated from the German and edited by Y.P. Adler, B.G. Gorski]. Moscow, Statistics, 1976. 598 p. (rus.)
4. Rudzey G.F. O vzaimosvyazi parametrov krivoy ustalosti i vozmozhnosti prognozirovaniya ustalostnoy dolgovechnosti elementov konstruksiy [On the relationship between the parameters of the fatigue curve and the possibility of predicting the fatigue life of structural elements]. Deformatsiya, razrushenie materialov [Deformation, destruction of materials]. 2014. No. 1. Pp. 41–48 (rus.)
5. Belov V.K. et al. Opredelenie koeffitsientov korrektsii dlya polucheniya dostovernykh kharakteristik ustalostnoy dolgovechnosti elementov konstruksiy LA [Determination of correction factors to obtain reliable durability characteristics of elements of designs of LA] Polyot. 2011. No. 7. Pp. 42–46 (rus.)
6. Adegova L.A. Povyshenie tochnosti otsenki chislennogo prognozirovaniya ustalostnoy dolgovechnosti vysokonagruzennykh zon konstruksiy samolëtov s ispol'zovaniem modifitsirovannykh krivykh ustalosti [Improve the accuracy of numerical prediction of fatigue durability evaluation of heavily loaded aircraft designs zones using modified fatigue curvess]. Scientific NSTU Herald. 2014. No. 3 (56). Pp. 160–170 (rus.).
7. Strizhius V.E. Metodika raschetov na ustalost' elementov aviatsionnykh konstruksiy s ispol'zovaniem reytingov ustalosti [Methods of calculation of the fatigue element aerostructures using ratings fatigue]. Research Bulletin of Moscow State Technical University of civil aviation. 2008. No. 130. Pp. 47–59 (rus.)

УКАЗАТЕЛЬ

статей, опубликованных в 2015 г. (с № 1 по № 12)

Сколубович Ю.Л., Дегтярев В.В., Линовский С.В., Яненко А.П. Развитие научной деятельности в Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете (Сибстрин) № 4

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Готман А.Л. Исследование работы пирамидальных штампованных свай на действие вертикальной нагрузки и их расчет № 10

Дмитриева Т.Л., Нгуен Ван Ты. Математическое моделирование процессов автоматизированного проектирования железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий с оптимальными параметрами № 1

Добрачев В.М., Вершинин Д.С. Новое конструктивное решение жестких узлов стальных каркасов зданий № 7

Митасов В.М. Новые подходы к расчету железобетонных конструкций № 4

Низовцев М.И., Белый В.Т., Стерлягов А.Н. Новая теплоизоляционная фасадная система зданий на основе панелей с вентилируемыми каналами № 10

Талантова К.В. Определение области рационального фибрового армирования с помощью программных средств при проектировании конструкций на основе сталефибробетона № 10

Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С. Исследование стадии обжатия элемента бетонной конструкции, армированной канатом № 6

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Гребенюк Г.И. Совершенствование методов расчета и оптимизации динамически нагруженных стержневых систем № 4

Дукарт А.В. К определению установившихся колебаний линейной системы при произвольной периодической возмущающей нагрузке № 8

Дукарт А.В. Стационарные режимы колебаний линейной неконсервативной системы при периодических воздействиях произвольного вида № 9

Инжутов И.С., Локтев Д.А., Рожков А.Ф. Анализ влияния податливости узловых соединений деревянного сетчатого свода с ортогональной сеткой № 4

Курбацкий Е.Н., Нгуен Ван Хунг. Напряженно-деформированное состояние грунта при распространении поверхностных волн Рэлея № 1

Миренков В.Е., Шутов В.А., Полуэктов В.А. Идентификация координат трещиноподобных дефектов в пластине № 10

Миренков В.Е., Шутов В.А., Полуэктов В.А. К вопросу учета собственного веса упругих конструкций № 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Абдрахимов В.З., Никулина Е.Ю., Абдрахимова Е.С. Инновационные направления по использованию отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамических материалов № 9

Абдрахимов В.З., Рошупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Колпаков А.В. Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих и высокоглиноземистых отходов № 8

- Абдрахимов В.З., Рощупкина И.Ю., Колпаков А.В., Кайракбаев А.К.** Структурированный высокопористый материал на основе жидкого стекла для теплоизоляции трубопроводов № 6
- Анваров Б.Р., Латыпова Т.В., Латышов В.М., Крамар Л.Я.** К вопросу о механизме повреждения железобетона при коррозии выщелачивания № 2
- Безбородов В.Г.** Структурирование глинистой керамики стеклом, синтезированным из растворов солей и кремнеэтилового эфира № 6
- Белан И.В., Пичугин А.П., Денисов А.С., Хританков В.Ф.** Изучение структуры и процесса массопереноса в затвердевших строительных растворах из сухих смесей № 1
- Бердов Г.И., Виноградов С.А., Машкин А.Н., Хританков В.Ф.** Диэлькометрический анализ влияния раствора электролита на свойства цементных материалов № 8
- Бердов Г.И., Елесин М.А., Кириленко А.В.** Газобетон на основе известково-серного затворителя № 9
- Бердов Г.И., Машкин Н.А.** Перспективные направления совершенствования составов и технологии строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ № 4
- Ерофеев В.Т., Старцев О.В., Смирнов И.В., Максимова И.Н., Ерастов В.В., Махоньков А.Ю.** Ударная прочность эпоксидных полимербетонов № 11–12
- Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А., Старостина И.А., Ягунд Э.М., Кузнецова Л.М.** Поверхностное усиление ПВХ полиизоцианатом № 3
- Кара-сал Б.К., Серен Ш.В., Монгуш Д.С.** Полевошпатоцеолитовая порода как сырье для изготовления керамических стеновых материалов № 2
- Карасёв Н.П., Себелев И.М.** Статистические методы контроля качества цемента в ГОСТ 30515–2013 № 5
- Колпаков А.В., Абдрахимов В.З.** Исследование процессов горения при обжиге теплоизоляционного изделия из межсланцевой глины и золошлакового материала № 7
- Копаница Н.О., Сафронов В.Н., Ковалева М.А., Саркисов Ю.С.** Активация сырьевых компонентов и формовочных смесей в производстве теплоизоляционных материалов № 5
- Кузнецова И.Н., Косач А.Ф., Ращупкина М.А., Гутарева Н.А.** Влияние основных минералов цементного камня на его структуру и свойства № 8
- Логанина В.И., Пышкина И.С.** Стойкость известковых покрытий с добавкой на основе синтезированных гидросиликатов № 1
- Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В.** Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня № 3
- Машкин А.Н., Бердов Г.И., Виноградов С.А., Хританков В.Ф.** Диэлькометрический анализ процесса гидратационного твердения цементного камня № 2
- Машкин А.Н., Бердов Г.И., Виноградов С.А., Хританков В.Ф.** Диэлькометрическое исследование влияния режимов тепловлажностной обработки на свойства цементного камня № 3
- Мирюк О.А.** Магнезиальные композиты различной структуры № 5
- Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Веселкова М.П.** Смешанный шлакопортландцемент на шлаках разной тонкости помола № 9
- Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Садрашева А.О.** Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня. Часть 2 № 1
- Пименов С.И., Ибрагимов Р.А.** Особенности гидратации цемента и кинетика твердения тяжелого бетона в зависимости от параметров тепловлажностной обработки № 9
- Рахимбаев Ш.М., Половнева А.В., Аниканова Т.В.** Влияние новых добавок электролитов на свойства мелкозернистого бетона № 11–12

- Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р.** Влияние добавок в портландцемент прокаленной и молотой глины с содержанием 62 % каолинита на прочность цементного камня № 2
- Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Осипов А.К., Неверов В.А., Нурлыбаев Р.Е.** Моделирование технологических режимов модификации природного диатомита для увеличения содержания аморфного диоксида кремния № 3
- Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К.** Влияние концентрации фосфорной кислоты и степени наполнения цеолитсодержащей породы на прочность цементного камня № 8
- Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И., Сыромясов В.А., Фомина О.А., Дружинин М.С., Злобин В.И.** Влияние температуры обжига на спекание керамического черепка из отходов обогащения углистых аргиллитов № 10
- Ядыкина В.В., Тоболенко С.С., Траутвайн А.И.** Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичного асфальтобетона на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности № 2

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданын Н.А.** К вопросу обработки сигналов навигационной системы при автоматическом дистанционном управлении машинами дорожно-строительного комплекса № 8
- Герасимов В.В., Коробова О.А., Исаков А.К., Михальченко О.Ю.** Управление безопасностью территориальных строительных систем № 4
- Герасимов В.В., Коробова О.А., Исаков А.К., Сафарян Г.Б.** Управление безопасностью эксплуатационного периода строительных объектов № 6
- Грузин В.В., Абраменков Д.Э., Есбергенов К.Б., Богатырева Т.В.** Технология подготовки оснований площадок открытого хранения материальных средств № 2
- Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Никифорова Е.Н., Гусев Б.Н.** Разработка методики формирования конкурентоспособного ассортимента предприятия по производству строительных материалов № 6
- Злодеев А.В., Титов М.М., Волков М.С.** Расчет технологии зимнего бетонирования по методу «термос» с использованием критериев подобия № 2
- Калугин Ю.Б.** Графоаналитическая модель и приближенный метод оценки сроков выполнения проекта с вероятностными временными параметрами № 7
- Калугин Ю.Б.** Универсальный метод оценки сроков выполнения проекта с вероятностными временными параметрами № 1
- Калугин Ю.Б., Жарый Д.А.** Особенности оптимизации календарных графиков с вероятностными временными параметрами № 3
- Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н.** Комплексная оценка конкурентных преимуществ предприятия по производству строительных материалов № 3
- Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н., Никитина Т.Ю., Никифорова Е.Н.** Методика оценки оптимального ассортимента предприятия по производству геотекстильных строительных материалов № 10

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П.** Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях № 8
- Гарибин П.А., Ольховик Е.О., Шабанов С.В.** Методология организации непрерывного мониторинга технического состояния ГТС водного транспорта № 2
- Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А.** Математическое моделирование напряженного состояния сталежелезобетонных турбинных водоводов в трехмерной постановке № 6

- Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Соколова В.А.** Опыт проектирования хвостохранилища комбинированного типа № 9
Кузнецов Г.И. Накопители промышленных отходов в зоне вечной мерзлоты № 4

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

- Азаров В.Н., Кошкарёв С.А.** К модели улавливания пыли в сепарационных устройствах с фильтрующе-взвешенным слоем в стройиндустрии № 2
Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д. Змеевиковые теплообменники и их математическое описание № 7
Бройда В.А. Характеристики стабилизатора расхода вентиляционного воздуха прямого действия № 7
Варсегова Е.В., Посохин В.Н. Об условиях предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом № 11–12
Гвоздков А.Н. Тепло- и влагообмен в системе «воздух–вода» с позиции теории потенциала влажности № 11–12
Денисихина Д.М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен № 5
Иванова С.Д., Амбросова Г.Т., Ксенофонтова О.В., Функ А.А., Ганзориг Шонхор, Леонова Е.Н. К вопросу определения степени рециркуляции активного ила при очистке сточных вод методом нитрификации и денитрификации № 3
Коваленко К.А., Пушкарева Г.И. Сорбционное удаление ионов тяжелых металлов из водных сред с использованием природного оксида марганца № 11–12
Костин В.И. Влияние нестационарных внутренних теплопоступлений на выбор ограждающих конструкций № 4
Костин В.И. Регулирование насосов и вентиляторов в системах теплоснабжения и климатизации № 11–12
Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Механическая регенерация иммобилизованного ила в биореакторе с двурядной продольной аэрацией № 5
Малявина Е.Г., Цыганков А.В. Влияние различных факторов на темп остывания помещения после отключения теплоснабжения № 1
Рохлецова Т.Л., Савельев Е.Г., Кияница Л.А. Применение поэтажных коллекторов для квартирных систем отопления № 3
Сакаш Г.В. Особенности очистки воды водохранилищ-охладителей ТЭС от органических веществ № 1
Сальва А.М. Магистральное и групповое водоснабжение населенных пунктов в заречных районах Центральной Якутии № 6
Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Крутков А.Е. Повышение эффективности очистки сточных вод предприятий угледобывающей промышленности № 4
Сколубович Ю.Л., Соппа М.С., Синеева Н.В. Моделирование нестационарных характеристик движения частиц контактной массы в реакторе-осветлителе № 7
Степанов В.С., Сухарева О.В., Баймачев Е.Э., Линкевич Д.С. Исследование энергоэффективности сплит-систем кондиционирования воздуха № 2
Уляшева В.М., Ермоленко Н.М., Кошкарёв А.Ю. Численное моделирование теплообмена через неутепленные полы на грунте № 7
Шацкий В.П., Гулевский В.А. Об эффективности работы водоиспарительных пластинчатых охладителей воздуха в комбитоннельной системе вентиляции птицеводческого помещения № 10
Шиляев М.И., Хромова Е.М. К вопросу о влиянии сил поверхностного натяжения и динамической вязкости водных растворов полимеров на параметры обезвоживания угольных суспензий № 10

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Богомолов А.Р., Широкова С.Н. Адаптация модели абсорбционной очистки газов в форсуночных скрубберах на хемосорбционные процессы № 3

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Широкова С.Н. Оценка эффективности двухступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки дымовых газов котельных и ТЭС, работающих на угле № 2

Щинников П.А., Синельников Д.С. Энергоснабжение при малоэтажном строительстве при отсутствии инфраструктуры № 7

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

Ефименко С.В., Сухоруков А.В., Ефименко В.Н. Обоснование расчетных значений характеристик глинистых грунтов Западно-Сибирского региона № 7

Киселёв В.П., Шевченко В.А., Василовская Г.В., Иванова Л.А., Ворончихин В.Д. Модификация свойств нефтяного дорожного битума № 5

Киселёв В.П., Шевченко В.А., Василовская Г.В., Иванова Л.А., Ворончихин В.Д. Устойчивость к старению нефтяного дорожного битума, модифицированного малокарбоксилированными полибутадиенами № 3

Щепотин Г.К., Машкин Н.А. Повышение морозоустойчивости земляного полотна автомобильных дорог № 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Абраменков Э.А. Создание эффективных средств механизации технологических процессов в строительстве № 4

Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Дмитриев М.П., Малышев М.С., Чоен Олзийбаяр. Пневмоударный механизм с перепуском между камерами рабочего и холостого хода и его физико-математическое описание № 8

Абраменков Э.А., Кутумов А.А., Корнеев А.Н., Абраменков Д.Э. Баро- и термодинамика процесса перепуска воздуха между рабочими камерами пневмоударного механизма и его физико-математическое описание № 10

Абраменков Э.А., Кутумов А.А., Корнеев А.Н., Абраменков Д.Э. Дроссельный пневмоударный механизм с функцией управления перепуском в камеру холостого хода и его физико-математическое описание № 11–12

Дмитриев М.П., Абраменков Д.Э., Гайдучик М.И., Гэндэн Баттулга, Малышев М.С., Абраменков Э.А. Пневматический ударный механизм молота с аккумуляционной и тормозной камерами и его физико-математическое описание № 9

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Акимова М.И. Система застройки главных площадей городов Западной Сибири № 7

Акимова М.И., Чечулина А.С. Уплотненная застройка крупных городов: зарубежный и отечественный опыт № 6

Бальзаникова Е.М., Самогоров В.А. Архитектурные особенности промышленных объектов Самарской губернии конца XIX – начала XX в. № 5

Городков А.В., Самохова Н.А. Акустический режим рекреационных территорий города и его оптимизация средствами озеленения периферийных зон № 9

Каримов А.М. Методологические, инфраструктурные и организационные предпосылки модернизации градостроительной деятельности в современных социально-экономических условиях № 4

Кетова Е.В., Нижегородцева Ю.Е. Основные особенности возникновения и развития инженерных систем водозабора на территории Сибирского региона с конца XVII до начала XX в. № 5

- Колпакова М.Р., Туманик Г.Н.** Прогноз перспективного расселения в Сибири и на Дальнем Востоке № 4
- Панчуков Н.А.** Об одном виде пространственной конструкции и особенностях ее использования через информационное моделирование № 6
- Семикин П.П., Бацунова Т.П.** Особенности объемно-пространственных решений высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии № 1
- Семикин П.П., Бацунова Т.П., Семикин П.В.** Модульность в архитектуре высотных зданий № 5
- Строева Н.Н., Бацунова Т.П.** Классификация велнес-центров в городской среде № 9
- Хунин Ян, Цзяньхао Чэнь, Хуанчжоу Чжао, Тинцзя Гао, Сяюнь Цай, Цзяньвань Чэнь.** Взрыв газа в Гаосюне – подробный анализ трагедии в портовом городе (оригинал на английском языке) № 11–12

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Адегова Л.А.** Применение модифицированных кривых усталости для расчетной оценки долговечности тонкостенных элементов конструкций № 3
- Адищев В.В., Карпов Е.В., Демешкин А.Г., Карпицкая Ю.Р., Мальцев В.В., Иванов А.И.** Применение оптической системы Correlated Solutions Vic 3D для построения диаграмм деформирования бетона № 8
- Азаров В.Н., Кошкарёв С.А.** К описанию сушки дисперсных строительных материалов при обеспыливании выбросов систем аспирации стройиндустрии в сепарационных устройствах с фильтрующе-взвешенным слоем № 3
- Богданов В.С., Александрова Е.Б., Рудакова Е.В., Богданов Д.В.** Расчет потребляемой мощности винтового грохота № 7
- Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В.** Влияние немонотонной зависимости плотности от температуры на движение соленой воды № 8
- Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В.** Гравитационные волны в продольно колеблющемся контейнере № 6
- Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В.** Гравитационные поверхностные волны при продольной качке контейнера, частично заполненного жидкостью № 1
- Веселов В.В., Беляков В.А., Сальников В.Б.** Решение нестационарной и нелинейной тепловой задачи промерзания–оттаивания грунта методом конечных элементов № 2
- Высоцкий Л.И.** Замечания к определению эквивалентной шероховатости № 8
- Высоцкий Л.И.** О константе Кармана. Ч а с т ь I № 6
- Высоцкий Л.И.** О константе Кармана. Ч а с т ь II № 7
- Гальперин Е.М.** Установление состава и количества показателей, определяющих состояние системы подачи и распределения воды № 7
- Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Аношкина О.О., Терехов В.И.** Исследование теплообмена моделей системы зданий. Ч а с т ь 1. Отдельно стоящие призмы различной высоты № 8
- Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Терехов В.И.** Исследование теплообмена моделей системы зданий. Ч а с т ь 2. Две призмы, находящиеся в следе № 9
- Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Аношкина О.О., Терехов В.И.** Исследование теплообмена моделей системы зданий. Ч а с т ь 3. Две призмы при поперечном их смещении № 10
- Зиганшин А.М., Посохин В.Н., Бадькова Л.Н., Гимадиева Г.А.** Численное моделирование течения в двухмерном тройнике № 5
- Калинич И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В.** Теплоотдача от поверхности нагретых материалов при конвейерной транспортировке № 11–12

- Князева И.А., Золотонос Я.Д., Лисовский В.А.** Изготовление теплообменных элементов на базе пружинно-витых каналов № 8
- Кошелева О.Э., Борисовская Н.Е.** Исследование свойств магнитной жидкости № 1
- Коянкин А.А., Илизаров А.Г.** Развитие методики расчета балки кусочно-постоянного сечения, выполняемого с использованием прерывателей Герсеванова № 3
- Кузавов В.Т.** Кавитационное разрушение материалов в спиральных структурах в постановке вибрационной эрозии № 6
- Кургузов В.Д., Демешкин А.Г.** Зарождение трещин на поверхности концентраторов напряжений в виде круговых отверстий при сжатии образцов из квазихрупкого материала № 9
- Ленивцев А.Г., Дуданов И.В., Лаптева И.В.** Процесс накопления механических примесей в силовых передачах машин с учетом воздухообмена с окружающей средой № 1
- Матус Е.П., Пичугин А.П.** Трещиностойкость сталефибробетона с малым процентом армирования № 11–12
- Немировский Ю.В., Ажермачев А.В.** Синтез гибридных ферменных конструкций № 1
- Немировский Ю.В., Батулин А.А.** Метод расчета деформативности и прочности одноставровых и двуставровых железобетонных стержней № 10
- Плевков В.С., Уткин Д.Г.** Работа сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении № 6
- Родевич В.В., Арзамасцев С.А.** К расчету железобетонных элементов на изгиб с кручением № 9
- Романенко В.С., Богданов В.С.** Методика расчетов конструктивно-технологических параметров горизонтальной валковой мельницы № 6
- Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Сафронов В.Н., Кугаевская С.А.** Влияние магнитного поля на свойства дисперсных систем № 7
- Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н.** Численное моделирование движения капель при распыливании жидкости пористыми вращающимися распылителями.
Часть 1. Результаты расчета траекторий движения капель в неподвижном воздухе № 9
- Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н.** Численное моделирование движения капель при распыливании жидкости пористыми вращающимися распылителями.
Часть 2. Расчет траекторий капель в аппаратах с ПВР № 10
- Семикопенко И.А., Воронов В.П., Жуков А.А.** Теоретическое исследование процесса смешивания компонентов в помольно-смесительном агрегате на базе мельницы дезинтеграторного типа № 5
- Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С.** Моделирование упругопластического сцепления арматуры с бетоном № 2
- Федорова Н.Н., Вальгер С.А.** Моделирование взаимодействия потока воздуха с гибкой пластиной № 4
- Хархардин А.Н.** Топологические свойства дискретных систем № 5
- Хархардин А.Н.** Топологические свойства крупномасштабных структур № 11–12
- Хархардин А.Н., Нелюбова В.В., Строкова В.В.** Топологические свойства дисперсных материалов и других дискретных систем № 10
- Хархардин А.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В.** Дискретная топология дисперсных материалов и простых веществ № 2
- Шиляев М.И., Хромова Е.М., Гладкова Ю.С.** Сравнение энергозатрат на обезвоживание угольного концентрата в центрифугах, вакуум-фильтрах и фильтр-прессах № 9

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

Пичкурова Н.С., Карелин В.Д. Экспериментальные исследования железобетонных изгибаемых элементов с замоделированными трещинами № 5

Рудзей Г.Ф., Адегова В.В., Дубинин В.В. Влияние коррозионной среды на изменение усталостной долговечности образцов с отверстием после упрочняющих технологий № 11–12

ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

Жулин А.Г., Елизарова О.Д. Удаление железа из сапропелевых стоков № 7

Саленко С.Д., Гостеев Ю.А. К оценке ветровых воздействий на сооружения № 1

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Владимиров С.А. Уникальный опыт ОАО «Газпром» по управлению сложнейшими крупномасштабными инвестиционными проектами № 9

Нуждин Л.В. Актуальная книга по свайным фундаментам № 10

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Замечательный ученый-практик и инноватор (к 80-летию Владимира Ивановича Костина) № 1

Выдающийся ученый международного масштаба в области гидродинамики (Олегу Федоровичу Васильеву – 90 лет) № 8

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется в редакцию на *русском языке*. Зарубежные авторы могут присылать статьи на *английском языке*. Возможна публикация статьи одновременно в двух вариантах — на русском и английском языках. В этом случае оформляются два текста статьи — на русском языке и точный перевод на английский. Вместе с рукописью представляются:

- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;
- *рекомендация* соответствующего академического (кафедры) или научного подразделения (заверенная выписка из протокола заседания подразделения);
- *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись.

Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от Word 97 до Word 10; от Windows XP до Windows 10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу по середине. Объем рукописи — до 12 страниц А4, включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

3. Состав рукописи статьи, правила и образец оформления см. на Internet-сайте журнала http://izvuzstr.sibstrin.ru/sample_of_article/a

а) русскоязычная часть:

- индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
 - инициалы, фамилии авторов;
 - название статьи;— аннотация объемом до 1/3 страницы текста (не менее 80 слов);
 - ключевые слова (не менее 5);
 - текст статьи;
 - следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
 - аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом использовании;
 - формулы набирают шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, в статье должен быть необходимый минимум формул; все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента);
 - русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом; латинские буквы — курсивом;
 - во избежание смещения сходных изображений прописных и строчных букв *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *п*, *I* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
 - иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 dpi, с расширением cdr (предпочтительно) или .doc, фотографии — TIFF или JPEG; надписи и цифры набирать шрифтом Times New Roman, иллюстрации, в том числе фотографии, должны иметь хорошую проработку деталей и должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки);
 - иллюстрации распечатываются в двух экземплярах, с подписями к ним, размер иллюстрации — не более 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4;
 - таблицы печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
 - библиографический список (не менее 8 ссылок), составляется по следующим правилам: в список включаются *только опубликованные работы*, в порядке упоминания в статье, ссылки на них в тексте статьи даются арабскими цифрами в квадратных скобках, в списке не должно быть нормативных документов (ГОСТов, СНиПов, технических регламентов, правовых актов и т.п. неавторизованных источников) — ссылки на них даются в тексте статьи в развернутом виде или в форме подстрочных сносок, библиографический список следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (примеры см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibliograficheskogo_list/), ссылки на интернет-сайты не допускаются;
 - для статей из зарегистрированных *электронных журналов* указываются фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта журнала и дата обращения к электронному ресурсу;
- сведения об авторах: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

б) англоязычная часть:

- сведения об авторах — последовательно для каждого:
- фамилия, имя, отчество полностью, транслитерированные в латинские символы по системе BGN (использовать таблицу «правила транслитерации» см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN_PCGN_romanization/);

(Окончание правил)

- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления), ученые звания (Professor, Assistant Professor, Academician of..., Cor. Member of... — профессор, доцент, академик ..., член-корреспондент ...), другое — Senior Lecturer (ст. преподаватель), Engineer (инженер), Post-graduate Student (аспирант), Student (студент);
 - официальное англоязычное название организации (учреждения), города (если не упоминается в названии организации), страны;
- название статьи;
- аннотация;
- ключевые слова (Keywords);
- библиографический список;
- для зарубежных источников на латинице — с сохранением оригинального описания;
 - для ссылок на русскоязычные источники — транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов и название статьи; затем в квадратных скобках — название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, —, // и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pp., в конце — (rus.).
4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).
5. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению; авторы могут сообщить редакции данные о специалистах по профилю статьи. Доработанную после рецензии статью присылать в электронном виде.
6. Корректурa статьи может предоставляться по запросу автора.
7. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.
8. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики ф. и. о. полностью, звания и контактная информация. Электронная версия обязательна.
9. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

**НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

<p>Строительные конструкции</p> <p>Теория инженерных сооружений</p> <p>Строительные материалы и изделия</p> <p>Экономика и организация строительства</p> <p>Автоматизация и технология строительного производства</p> <p>Гидротехническое строительство</p> <p>Санитарная техника</p>	<p>Строительство автомобильных дорог и мостов</p> <p>Строительные и дорожные машины</p> <p>Научные проблемы архитектуры и экологии</p> <p>Научно-методический раздел</p> <p>В лабораториях вузов</p> <p>Внедрение научных достижений в производство</p> <p>Научная информация</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

На 2-е полугодие 2015 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3300 р.

цена отдельного номера — 550 р.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 11–12 (683–684) 2015

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*