

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

**СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 2 (710)  
Февраль 2018 г.

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

---

---

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

П.А. Аббасов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ДВФУ, Владивосток  
В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград  
А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва  
М.И. Бальзаников, д-р техн. наук, проф., СГЭУ, Самара  
А.А. Волков, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., МАДГТУ (МАДИ), Москва  
В.Г. Гагарин, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ, Москва  
М.А.о. Гаджиев, д-р техн. наук, проф., АУАС, Баку, Азербайджан  
У. Гайсбаур, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет Штутгарта, Германия  
В.В. Дегтярев, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Й. Деспотович, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия  
В.Т. Ерофеев, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИ МордГУ им. Н.П. Огарева, Саранск  
Г.В. Есаулов, акад. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва  
В.И. Жаданов, д-р техн. наук, проф., ОГУ, Оренбург  
М. Иветич, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия  
В.А. Игнатъев, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград  
А.М. Караулов, д-р техн. наук, проф., СГУПС, Новосибирск  
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ЮЗГУ, Курск  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (*заместитель главного редактора*), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (*заместитель главного редактора*), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск  
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Ж.С. Нугузинов, д-р техн. наук, проф., КазМИРР, Караганда, Казахстан  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
А.И. Полищук, д-р техн. наук, проф., КубГАУ, Краснодар  
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск  
Н.А. Сапрыкина, поч. чл. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва  
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (*главный редактор*), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
И.С. Соболев, д-р техн. наук, проф., ННГАСУ, Нижний Новгород  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея  
Н.А. Цветков, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж  
В.Р. Чупин, д-р техн. наук, проф., ИНИТУ, Иркутск  
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции: 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113;  
Тел. +7 (383) 266 28 59; [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru); E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

<b>Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К.</b> Оптимизация технологических режимов получения золь-гель методом высокочистого микрокремнезема с частицами наноразмерного уровня .....	5
<b>Береговой В.А., Снадин Е.В.</b> Применение природных силицитов в технологии ячеистой керамики .....	13
<b>Бурученко А.Е., Харук Г.Н., Мушарапова С.И., Сергеев А.А.</b> Влияние карбоната кальция на формирование фазового состава керамики на основе легкоплавких и тугоплавких глин при обжиге .....	21
<b>Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С., Лобачев Д.А.</b> Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамического кирпича без применения традиционных природных материалов .....	30

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

<b>Феофанов Ю.А., Ряховский М.С.</b> Определение рабочих характеристик комбинированной сорбционной загрузки при очистке воды от нефтепродуктов и фенолов .....	42
--	----

### ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

<b>Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В.</b> Динамическое воздействие гравитационных поверхностных волн .....	53
--	----

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

<b>Столбов Ю.В., Столбова С.Ю., Пронина Л.А.</b> Методы расчета и обоснование допусков на строительные работы и геодезический контроль при возведении линейных сооружений .....	60
<b>Чиркунов Ю.А.</b> Нелинейное распространение тепла в неоднородном стержне при воздействии нестационарного источника тепла применительно к задачам зимнего бетонирования .....	70

### НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<b>Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д.</b> Определение эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате с винтовым теплообменным элементом .....	77
<b>Жилкин В.А.</b> Оценка правомочности методик и форм образцов для определения физико-механических свойств древесины .....	86
<b>Смирнов А.В., Белова А.И.</b> К определению прочности автомобильных дорог в Российской Федерации .....	100
<b>Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Пронин Д.Н.</b> Разработка тонкодисперсных упрочняющих добавок для цементных систем .....	109

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION  
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL  
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL  
INSTITUTIONS

# CONSTRUCTION

No. 2 (710)  
February 2018

Scientific-theoretical journal  
Published since March 1958  
Monthly

---

---

## EDITORIAL BOARD

P.A. Abbasov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Vladivostok, Russia  
V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia  
A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
M.I. Bal'zannikov, DSc (Eng), Prof., Samara, Russia  
A.A. Volkov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
V.A. Vorob'yov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
V.G. Gagarin, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia  
M.A.o. Hajiyev, DSc (Eng), Prof., Baku, Azerbaijan  
U. Gaisbauer, Dr. – Ing., Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Germany  
V.V. Degtyarev, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
J. Despotović, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia  
V.T. Erofeev, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saransk, Russia  
G.V. Esaulov, Acad. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow, Russia  
V.I. Zhadanov, DSc (Eng), Prof., Orenburg, Russia  
M. Ivetić, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia  
V.A. Ignat'ev, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia  
A.M. Karaulov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk, Russia  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Editor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (*Deputy Editor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
P. Lieblang, Dr., Prof., Technische Hochschule, Köln, Germany  
L.S. Lyakhovich, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Tomsk, Russia  
V.M. Mitasov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
V.I. Morozov, Cor. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia  
Zh.S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Kazakhstan  
Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg, Russia  
A.I. Polishchuk, DSc (Eng), Prof., Krasnodar, Russia  
G.I. Pustovetov, Cor. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk, Russia  
N.A. Saprykina, Hon. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow, Russia  
V.G. Sebeshev, Hon. Mem. RAACS, PhD, Prof. (*Editor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia  
Yu.L. Skolubovich, Cor. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia  
I.S. Sobol', DSc (Eng), Prof., Nizhniy Novgorod, Russia  
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia  
Jong Wan Hu, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea  
N.A. Tsvetkov, DSc (Eng), Prof., Tomsk, Russia  
Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh, Russia  
V.R. Chupin, DSc (Eng), Prof., Irkutsk, Russia  
Eun Chul Shin, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea

Responsible secretary N.V. Bitkina

*The editorial office's address:* 113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008 Russia;  
Phone number +7 (383) 266 28 59; [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru); E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## CONTENTS

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K.** Optimization of technological modes of obtaining the sol-gel method, high-purity silica with particles of nanoscale level ..... 5
- Beregovoy V.A., Snadin E.V.** The use of natural silicites in the technology of cellular ceramics ..... 13
- Buruchenko A.E., Kharuk G.N., Musharapova S.I., Sergeev A.A.** The influence of calcium carbonate on the structure formation of the ceramics during firing ..... 21
- Abdrakhimov V.Z., Kayrakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Lobachev D.A.** Use of waste fuel and energy complex in the production of ceramic bricks without the use of traditional, natural materials ..... 30

### LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION

- Feofanov Yu.A., Ryakhovskiy M.S.** Functional specifications of the combined sorption media loading during water purification from oil products and phenols ..... 42

### HYDRO-ENGINEERING CONSTRUCTION, HYDRAULICS AND ENGINEERING HIDROLOGY

- Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V.** The dynamic impact of gravity surface waves ..... 53

### TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Stolbov Yu.V., Stolbova S.Yu., Pronina L.A.** Methods of calculation and justification of tolerances for the construction works and geodesic control in the establishment of linear facilities ..... 60
- Chirkunov Yu.A.** Nonlinear dissemination of heat in the inhomogeneous rod under the influence of a non-stationary source of heat with application to the problems of winter concreting ..... 70

### SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

- Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D.** The definition of the equivalent diameter of pipe and annulus in the apparatus with a spiral heat-exchanging element ..... 77
- Zhilkin V.A.** Evaluation of the practicality of methods and forms of samples for the determination of physico-mechanical properties of wood ..... 86
- Smirnov A.V., Belova A.I.** To determine the strength of roads in Russian Federation ..... 100
- Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emel'yanov A.I., Pronin D.N.** The development of fine reinforcing additives for cement systems ..... 109

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.225: 620.18

В.П. СЕЛЯЕВ, А.А. СЕДОВА, Л.И. КУПРИЯШКИНА, А.К. ОСИПОВ

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧИСТОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА С ЧАСТИЦАМИ НАНОРАЗМЕРНОГО УРОВНЯ

Изучено влияние температуры прокаливания диатомита на качество синтезированного аморфного микрокремнезема. Показано влияние кислоты осадителя на качество полученного порошка. Описана методика синтеза аморфного кремнезема из прокаленного диатомита действием щелочи. Приведены результаты гранулометрического анализа порошков микрокремнезема из диатомита. Используемый метод измерения – лазерный дифракционный анализ. Разработаны технологические режимы, позволяющие получить порошки диоксида кремния золь-гель методом особо высокой чистоты с частицами наноразмерного уровня в заданном интервале.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** природный диатомит, температура прокаливания, синтезированный кремнезем, термостатирование, технологический режим, микрокремнезем, фильтр, рентгенофлуоресцентный анализ, гранулометрия.

Микрокремнезем в виде тонкодисперсных порошков является исходным материалом многоцелевого назначения и может быть использован для получения «чистых» многокомпонентных стекол для световодов, преформ для оптоволокон, увиолевых стекол для УФ-источников; теплоизоляционных материалов с теплопроводностью от 0,02 до 0,002 Вт/м · °К; высокопрочных бетонов и растворов. По данным на 1981 г. микрокремнезем во всем мире получали в виде отходов, которые образуются в процессе выплавки ферросилиция и его сплавов. Общий объем этого отхода составлял более 800 тыс. т, в том числе в США, России, Норвегии, Японии и Испании соответственно 200, 150, 120, 70 и 30 тыс. т и его хватало для производственных нужд. Однако в настоящее время ситуация резко изменилась в связи с сокращением объемов отходов, повышением требований к качеству микрокремнезема.

Для применения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема в сфере высоких технологий (производство вакуумной теплоизоляции) он должен содержать более 95 % диоксида кремния в виде частиц наноразмерного уровня (диаметром 50–200 нм). Поэтому проблема получения микрокремнезема актуальна и над ее решением работают многие ученые, научные коллективы

© Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., 2018

во всем мире, о чем свидетельствуют публикации и патенты на способы получения микрокремнезема [1–9]. Микрокремнезем высокого качества предлагают получать методами осаждения из природного минерального сырья [4, 5], сжигания растительных источников аморфного кремнезема [6], химических соединений – тетрахлорида кремния [7], щелочного гидролиза [8, 9].

В настоящее время объемы и качество продукции в РФ не отвечают современным требованиям, поэтому значительные объемы микрокремнезема завозятся из-за рубежа. Основные поставщики высококачественного диоксида кремния Германия, Япония, Швейцария по цене 96 долларов за 1 кг. Следовательно, создание технологии получения конкурентно-способного диоксида кремния особой чистоты и с крупностью зерен 50–400 нм является задачей актуальной, ее решение даст возможность повысить качество строительных композитов, теплоизоляционных изделий.

Наиболее дешевый и доступный способ – получение микрокремнезема из природных кремнесодержащих пород – диатомитов. Рассмотрено два способа получения микрокремнезема: методом сплавления диатомита со щелочными плавнями с последующим выделением кремниевой кислоты из силикат глыбы [5], золь-гель методом получения микрокремнезема без сплавления породы. Второй метод более экономичный и энергосберегающий. Поэтому целью настоящей работы является обоснование технологических режимов, позволяющих получить порошки диоксида кремния золь-гель методом особо высокой чистоты с частицами наноразмерного уровня в заданном интервале.

Для получения микрокремнезема золь-гель методом природный диатомит предварительно прокачивали для удаления влаги и органических веществ. При прокаливании диатомита прежде всего происходит удаление адсорбционной воды (100–300 °С), затем поровой воды (300–400 °С). Выгорание органических веществ наступает при температуре выше 400 °С. При температуре выше 500 °С возможен фазовый переход в диатомите β-кварца в α-кварц [10].

Длительность прокаливании не должна превышать 2 ч, так как увеличение продолжительности термической обработки диатомита более 2 ч может привести к разложению структуры породы.

После термической обработки измельченный диатомит отвешивали массой 25,00–50,00 г, помещали в коническую колбу емкостью 500–750 мл, добавляли 350 мл раствора NaOH различной концентрации (10, 20, 30%-й), накрывали часовым стеклом и выдерживали в криотермостате ТЖ-ТС-01/16К-40 при температуре 90 °С в течение 2 ч, периодически перемешивая. Соотношение Ж-Т фаз составляло 6:1 – 14:1.

Затем горячий раствор фильтровали, осаждали кремниевую кислоту концентрированными кислотами HCl или HNO<sub>3</sub> до кислой реакции раствора (pH 1–2). Раствор упаривали досуха, после чего сухой остаток обрабатывали концентрированной HCl и добавляли 200–250 мл горячей дистиллированной воды и нагревали до полного растворения солей. Нерастворимым оставался только гидратированный оксид кремния (IV) в виде хлопьевидной массы. После выдерживания осадок отфильтровывали, промывали на фильтре до отрицательной реакции на ион железа (III) с роданидом и хлорид-ионов

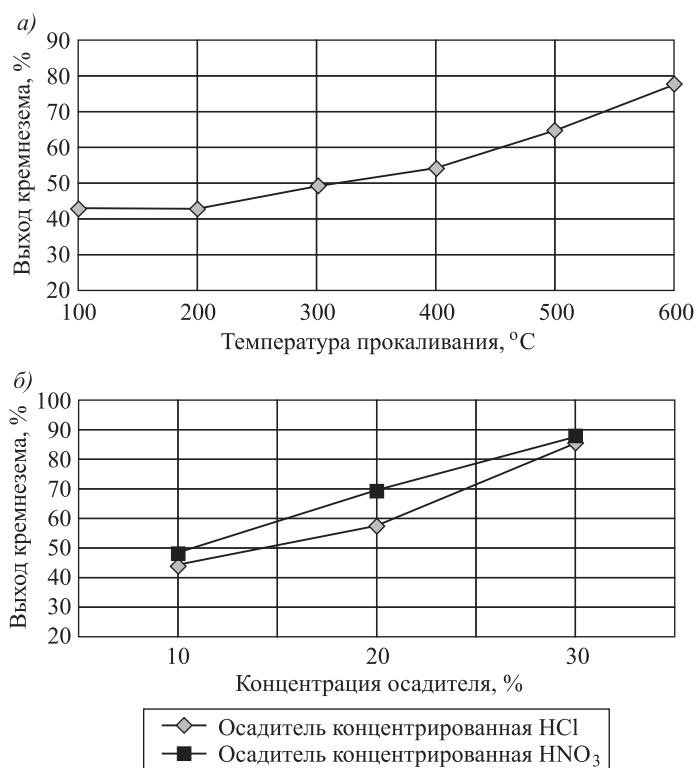


Рис. 1. Выход аморфного кремнезема от температуры прокаливания (а) и концентрации щелочи (б)

с нитратом серебра, подсушивали при 100–160 °С до постоянной массы. Выход аморфного кремнезема в зависимости от концентрации щелочи и температуры прокаливания представлен на рис. 1.

Установлено, что выход аморфного кремнезема зависит от температуры прокаливания и концентрации щелочи.

Химический анализ порошков синтезированного кремнезема показал (табл. 1), что он состоит на 95,36–99,63 % из оксида SiO<sub>2</sub>. Основные примеси NaCl и Na<sub>2</sub>O. Оксиды железа, алюминия, кальция, калия, титана со-

Таблица 1. Элементный состав кремнезема, синтезированного из диатомита W, %

T, °C	NaOH	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>
<i>Осадитель концентрированная HCl</i>									
500	10	99,39	–	0,0936	0,169	0,0526	0,035	0,0106	0,0096
	20	99,02	–	0,154	0,0996	0,0267	0,242	0,0110	0,0159
		99,30	–	0,0493	0,107	0,0260	0,148	0,0118	0,0172
	30	98,28	–	0,0193	0,112	0,0519	0,834	0,0385	0,0340
<i>Осадитель концентрированная HNO<sub>3</sub></i>									
500	10	99,13	0,48	–	0,134	0,0373	–	0,0113	0,0067
	20	97,13	1,14	–	0,175	0,181	0,567	0,0244	0,0152
	30	95,36	2,05	–	0,176	0,426	1,84	0,0251	0,0373

держатся в небольших количествах, которые можно отнести к микрокомпонентам.

Гранулометрический анализ дисперсных порошков микрокремнезема проводили с применением анализатора размера частиц Shimadzu SALD-3101, который предназначен для определения размеров частиц в мелкодисперсных средах в диапазоне от 50 нм до 500 мкм и успешно применяется для исследования различных минеральных порошков. Используемый метод измерения – лазерный дифракционный анализ. Диспергирование изучаемого материала происходит в ультразвуковом поле. Результаты гранулометрического анализа представляются в виде гистограмм и таблиц, позволяющих определять относительное содержание частиц, в заданном диапазоне крупности [11]. В настоящей работе исследовано влияние технологических режимов получения микрокремнезема на размеры частиц. Результаты гранулометрического анализа порошков микрокремнезема, синтезированного из диатомита, представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Размер частиц микрокремнезема в зависимости от температуры прокаливания природного диатомита и концентрации NaOH ( $\tau = 2$  ч, температура термостатирования 90 °С, Ж:Т = 14:1)**

Т, °С	С(NaOH), %	Диаметр частиц, мкм			
		в интервале	W, %		
			25	50	75
<i>Осадитель концентрированная HCl</i>					
100	20	0,260–0,563	0,321	0,355	0,394
200		0,260–0,563	0,325	0,360	0,399
300		0,260–0,563	0,322	0,357	0,396
400		0,260–0,563	0,321	0,356	0,394
500		0,260–0,563	0,337	0,376	0,431
600		0,260–0,563	0,332	0,370	0,424
500	10	0,108–0,404	0,130	0,142	0,156
	20	0,260–0,451	0,284	0,320	0,358
	30	0,291–0,563	0,338	0,375	0,430
<i>Осадитель концентрированная HNO<sub>3</sub></i>					
500	10	2,106–45,859	3,801	5,397	8,080
	20	2,106–45,859	3,746	5,318	7,961
	30	1,690–36,801	3,170	4,625	7,137

Анализ результатов исследования свидетельствует, что размер частиц синтезированного микрокремнезема находится в пределах от 10 до 400 нм и зависит от концентрации щелочи в растворе и не зависит от температуры прокаливания диатомита (рис. 2). С повышением концентрации щелочи размер частиц увеличивается. Размер частиц кремнезема зависит также от природы минеральной кислоты, которой выделяли кремниевую кислоту из щелочного раствора.



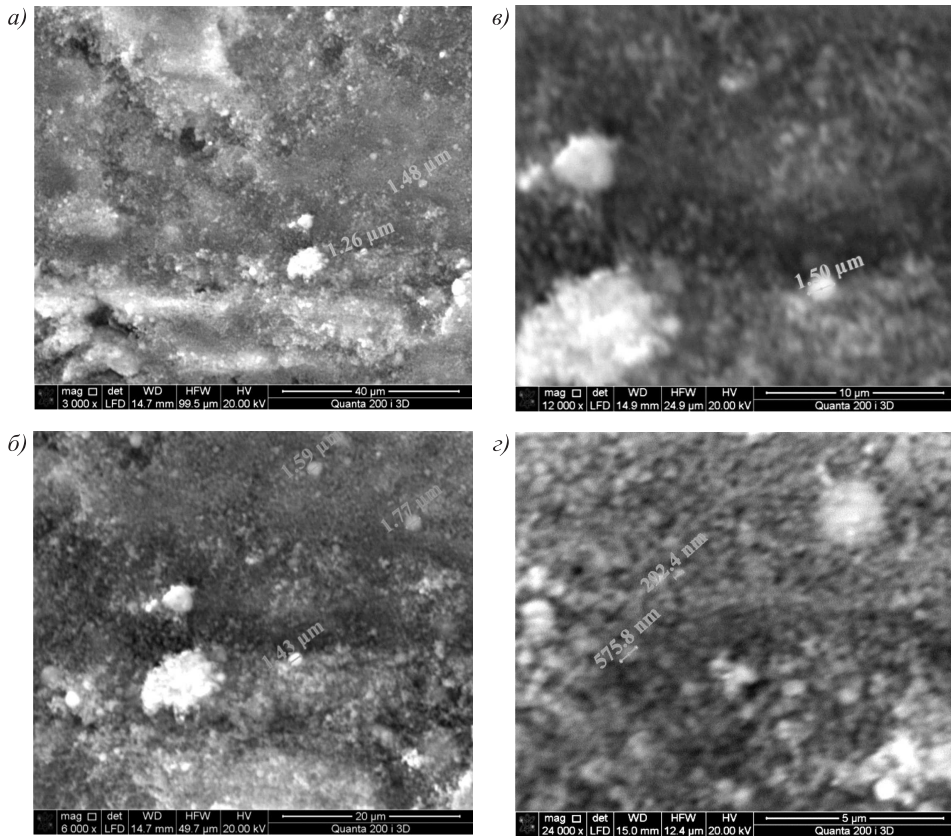


Рис. 2. Микрофотографии конденсированного микрокремнезема  
 а –  $\times 3000$ ; б –  $\times 6000$ ; в –  $\times 12\,000$ ; з –  $\times 24\,000$

**Выводы.** Разработан способ получения из диатомитов золь-гель методом порошков аморфного кремнезема, химический состав которого более чем на 99 % состоит из оксидов кремния с крупностью зерен 100–400 нм и выходом продукта до 87 %. Установлено, что выход кремнезема из диатомита составил 42,80–87,20 % в зависимости от условий синтеза.

Размер частиц порошков кремнезема колеблется от 0,108 до 0,404 мкм и зависит от концентрации щелочи в растворе, природы кислоты осадителя и не зависит от температуры прокаливания до 500 °С. Минимальный размер частиц кремнезема получен при обработке диатомита 10%-м раствором щелочи, отношение объема Ж:Т фаз равно 14:1.

По данным рентгенофлуоресцентного анализа синтезированный кремнезем содержит ~99,63 % оксида кремния  $\text{SiO}_2$  и незначительные примеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и др. Разработанный способ получения кремнезема из атемарского диатомита отличается простотой аппаратного оформления, дешевизной исходных материалов, небольшими затратами электроэнергии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Covindarao Venneti M.H. Utilization of rice hack a preliminary analysis // Journal of Scientific and Industrial Research. 1980. Vol. 39, No. 9. P. 495–515.

2. Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К. Изучение условий получения аморфного микрокремнезема из природного диатомита // Изв. вузов. Поволжский регион. Естественные науки. 2015. № 4. С. 84–993.
3. 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 // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 3. С. 5–13.
4. Пат. 2023664 Российская Федерация, МПК5 С 01 В 33/18, С 09 С1/28. Способ получения осажденного кремнеземного наполнителя / В.В. Деревянко, В.Ф. Соболев, Е.П. Попляков, Ю.Н. Зверев, В.М. Балабанов; заявитель Ленинский горно-химический завод, патентообладатель В.Ф. Соболев. № 5019457/26; заявл. 23.09.91; опубл. 30.11.94, Бюл. № 27.
5. Пат. 2526454 Российская Федерация, МПК С 01 В 33/18. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема / В.П. Селяев, А.К. Осипов, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина; патентообладатель Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. № 2013104054/05; заявл. 30.01.13; опубл. 20.08.14, Бюл. № 23.
6. Пат. 2061656 Российская Федерация, МПК6 С 01 В33/12. Способ получения аморфного диоксида кремния из рисовой шелухи / Л.А. Земнухова, В.И. Сергиенко, В.С. Каган, Г.А. Федорищева; заявитель и патентообладатель Институт химии Дальневосточного отделения РАН. № 94031518/26; заявл. 29.08.94; опубл. 10.06.96, Бюл. № 16.
7. Пат. 2378194 Российская Федерация, МПК С 01 В 33/18. Реактор синтеза диоксида кремния и способ его получения пламенным гидролизом / В.В. Вавилов, Г.И. Судьяров, П.А. Стороженко, А.Н. Поливанов, А.А. Кочурков; патентообладатель Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений. № 2008103719/15; заявл. 06.02.08; опубл. 10.01.10. Бюл. № 1.
8. Real C., Alcalá M.D., Griado J.M. Preparation of silica from rice husks // Journal of the American Chemical Society. 1996. Vol. 79, No. 8. P. 2012–2016.
9. Пат. 2058408 Российская Федерация, МПК6 С 22 В 34/12. Способ переработки титаносодержащего минерального сырья / Е.И. Мельниченко, Д.Г. Эпов, П.С. Гордиенко, И.Г. Масленникова, В.М. Бузник, В.В. Малахов; заявитель и патентообладатель Институт химии Дальневосточного отделения РАН. № 94021535/02; заявл. 15.06.94; опубл. 20.04.96, Бюл. № 35.
10. Филиппович Е.Н., Хацринов А.И., Скворцов А.В., Сулейманова А.З. Выбор оптимальных условий термической обработки диатомита Инзенского месторождения Ульяновской области для синтеза кристаллических силикатов натрия // Вестн. Технол. ун-та. 2010. № 5. С. 83–86.
11. Рухин Л.Б. Гранулометрический метод изучения пород. М.: Наука, 2002. 125 с.

**Селяев Владимир Павлович**, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: ntorm80@mail.ru

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

**Седова Анна Алексеевна**, канд. хим. наук, доц.

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

**Куприяшкина Людмила Ивановна**, канд. техн. наук, проф.;

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

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

**Осипов Анатолий Константинович**, канд. хим. наук, доц.

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

Получено 19.01.18

**Selyaev Vladimir Pavlovich**, Academician of RAASN, DSc, Professor;

E-mail: ntorm80@mail.ru

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Sedova Anna Alekseevna**, PhD, Ass. Professor

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna**, PhD, Professor;

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Osipov Anatoliy Konstantinovich**, PhD, Ass. Professor

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

## **OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL MODES OF OBTAINING THE SOL-GEL METHOD, HIGH-PURITY SILICA WITH PARTICLES OF NANOSCALE LEVEL**

The effect of temperature calcination of diatomite on the quality of the synthesized amorphous silica fume. The effect of acid precipitator on the quality of the resulting powder is shown. The technique of synthesis of amorphous silica from diatomite by alkali action is described. The results of granulometric analysis of powders of micro silica from diatomite. The measurement method used is laser diffraction analysis. Developed technological modes allow to obtain powders of silicon dioxide by the sol-gel method, very high purity with the particles of nanoscale level in a given interval.

**Key words:** natural diatomite, the calcination temperature, synthesized silica, thermostatings, technological mode, micro-silica, the filtrate, is x-ray fluorescence analysis, grain size distribution.

### REFERENCES

1. Covindarao Venneti M.H. Utilization of rice hack a preliminary analysis. Journal of Scientific and Industrial Research. 1980. Vol. 39, No. 9. Pp. 495– 515.
2. Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K. Izuchenie usloviy polucheniya amorfnoho mikrokremnezema iz prirodnogo diatomita [The study of the conditions for obtaining amorphous silica fume from natural diatomite]. Izvestiya vuzov. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki [News of Higher Educational Institutions. Volga region. Natural Sciences]. 2015. No. 4. Pp. 84–993. ( in Russian)
3. Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Sedova A.A., Osipov A.K., Neve-rov V.A., Nurlibaev R.E. Modelirovanie tekhnologicheskikh rezhimov modifikatsii prirodnogo diatomita dlya uvelicheniya sodержaniya amorfnoho dioksida kremniya [Modeling of technological modes of modification of natural diatomite increasing the content of amorphous silicon dioxide]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 3. Pp. 5–13. ( in Russian)
4. Pat. 2023664 Russian Federation, MPK5 S 01 V 33/18, S 09 S1/28. Sposob polucheniya osazhdennoho kremnezemnoho napolnitelya [A method of producing a precipitated silica filler]. V.V. Derevyanko, V.F. Sobolev, E.P. Poplyakov, Yu.N. Zverev, V.M. Balabanov; applicant Leninskiy gorno-khimicheskiy zavod, patentee V.F. Sobolev. No. 5019457/26; appl. 23.09.91; publ. 30.11.94, Bull. No. 27. (in Russian)

5. Pat. 2526454 Russian Federation, MPK S 01 V 33/18. Sposob polucheniya tonkodispersnogo amorfnoho mikrokreznnezema [A method of producing finely dispersed amorphous microsilica]. V.P. Selyaev, A.K. Osipov, A.A. Sedova, L.I. Kupriyashkina; patentee Ogarev Mordovian State University. No. 2013104054/05; appl. 30.01.13; publ. 20.08.14, Bull. No. 23. (in Russian)
6. Pat. 2061656 Russian Federation, MPK6 C 01 B33/12. Sposob polucheniya amorfnoho dioksida kremniya iz risovoy shelukhi [Method for producing amorphous silicon dioxide from rice husk]. L.A. Zemnukhova, V.I. Sergienko, V.S. Kagan, G.A. Fedorishcheva; applicant and patentee Institut khimii Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN. № 94031518/26; appl. 29.08.94; publ. 10.06.96, Bull. No. 16. (in Russian)
7. Pat. 2378194 Russian Federation, MPK S 01 V 33/18. Reaktor sinteza dioksida kremniya i sposob ego polucheniya plamennym gidrolizom [Silicon dioxide synthesis reactor and method of its production by flame hydrolysis]. V.V. Vavilov, G.I. Sud'yarov, P.A. Storozhenko, A.N. Polivanov, A.A. Kochurkov; patentee Gosudarstvennyy ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skiy institut khimii i tekhnologii elementoorganicheskikh soedineniy. No. 2008103719/15; appl. 06.02.08; publ. 10.01.10. Bull. No. 1. (in Russian)
8. Real C., Alcala M.D., Gracia J.M. Preparation of silica from rice husks. Journal of the American Chemical Society. 1996. Vol. 79. No. 8. Pp. 2012–2016.
9. Pat. 2058408 Russian Federation, MPK6 S 22 V 34/12. Sposob pererabotki titansoderzhashchego mineral'nogo syr'ya [Method of processing of titanium-containing mineral raw materials]. E.I. Mel'nichenko, D.G. Epov, P.S. Gordienko, I.G. Maslennikova, V.M. Buznik, V.V. Malakhov; applicant and patentee Institut khimii Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN. No. 94021535/02; appl. 15.06.94; publ. 20.04.96, Bull. No. 35. (in Russian)
10. Filippovich E.N., Khatsrinov A.I., Skvortsov A.V., Suleymanova A.Z. Vybora optimal'nykh usloviy termicheskoy obrabotki diatomita Inzenskogo mestorozhdeniya Ulyanovskoy oblasti dlya sinteza kristallicheskikh silikatov natriya [Selection of optimal conditions for thermal treatment of diatomite of Inzen Deposit of Ulyanovsk region for synthesis of crystalline sodium silicates]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta [Bull. Technological University]. 2010. No. 5. Pp. 83–86. (in Russian)
11. Rukhin L.B. Granulometricheskij metod izucheniya porod [The granulometric method of studying rocks]. Moscow, 2002. 125 p. (in Russian)

УДК 666.365

В.А. БЕРЕГОВОЙ, Е.В. СНАДИН

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ СИЛИЦИТОВ  
В ТЕХНОЛОГИИ ЯЧЕИСТОЙ КЕРАМИКИ**

Предложены технические решения, позволяющие использовать природные силициты в производстве ячеистой строительной керамики. Преобладание в природном сырье аморфного  $\text{SiO}_2$  с развитой микропористостью обеспечивает протекание процессов вибровспучивания шликерных масс, их последующее отвердевание и спекание. Получены экспериментальные данные о характере влияния компонентов состава на реотехнологические свойства шликеров и механические показатели керамики. Доказана целесообразность использования природных силицитов в качестве сырья для получения ячеистых обжиговых строительных материалов.

**Ключевые слова:** природные силициты, ячеистая керамика, получение, свойства.

**Введение.** Легкая и ячеистая строительная керамика отличается долговечностью, пожаробезопасностью и биостойкостью [1, 2]. Ее способность к процессам сорбции и десорбции водяных паров, а также экологичность способствуют созданию материалов для внутренней отделки, формирующей комфортные параметры микроклимата помещений [3, 4]. В отличие от зарубежных стран отечественное производство ячеистой строительной керамики проходит этап становления. Выпуск таких изделий (в основном способом выгорающих добавок) сосредоточен на нескольких заводах, оборудованных зарубежными технологическими линиями. Общий объем ячеистой керамики в структуре производства стеновых керамических материалов не превышает 5–8 %.

Применение альтернативных сырьевых ресурсов в виде природных силицитов для получения обжиговых строительных материалов носит ограниченный характер. Преобладание в составе термически активного кремнезема с развитой природной микропористостью способствует формированию пиропластичных масс при относительно невысоких температурах обжига. Это предопределяет перспективность использования данного вида нетрадиционного природного сырья в технологиях легкой и ячеистой керамики.

**Материалы и методы исследования.** Основной минеральный компонент (природный силицит) – опочные породы [5, 6]:

а) кремнистый тип характеризуется стабильным минеральным составом, включающим аморфный  $\text{SiO}_2$  (78–85 %), обломочный песчано-алевритовый материал (12–15 %) и карбонатные включения (1,5–2,5 %);

б) трепеловидный тип отличается от кремнистого аналога присутствием в составе до 10–15 % монтмориллонита за счет уменьшения доли аморфного кремнезема;

- газообразователь – перекись водорода ( $H_2O_2$ );
- разжижающие добавки –  $Na_4P_2O_7$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2SiO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$  и др.;
- катализаторы процесса выделения газа – тонкодисперсный уголь.

Для оценки влияния минералогического состава природного силицита, а также щелочных добавок-модификаторов на структуроформирующие процессы при обжиге были сняты термограммы опочных шихт (рис. 1) и рентгенограмма модифицированного состава.

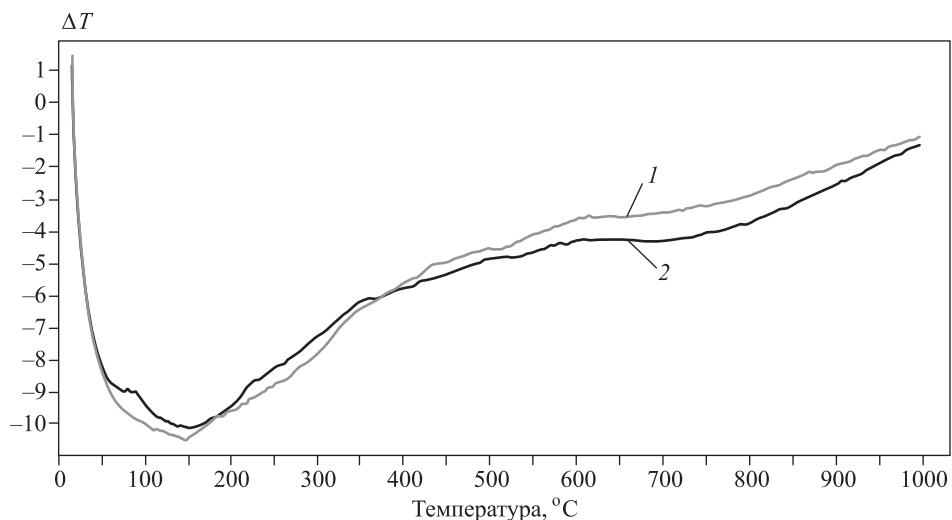


Рис. 1. Термограммы шихт на основе природных силицитов  
1 – кремнистый тип; 2 – трепеловидный тип

Анализ термограмм показывает, что в процессе подъема температуры до 720–800 °С последовательно протекают процессы обезвоживания сырьевой массы, окисления органических примесей, полиморфные превращения кварца и твердофазные реакции взаимодействия компонентов опочной шихты. Многокомпонентный состав трепеловидной опоки приводит к увеличению эндоэффектов в областях 150 и 700 °С, что обусловлено удалением адсорбционной воды и дегидратацией глинистых минералов. Процесс нагрева можно разделить на следующие температурные зоны:

- I (120–200 °С) – удаление свободной воды и воды, адсорбированной на поверхности микропор в структуре опоки, а также глины;
- II (350–550 °С) – испарение воды опалового кремнезема, дегидратация минералов глины и выгорание органических примесей;

Таблица 1. Количество и температура расплава многокомпонентных систем

Расплав	Количество расплава, %	Химический состав активной части сырьевой смеси, % по массе				Температура расплава, °С
		SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
		85,1	1,0	0,65	0,85	
N <sub>1</sub>	3,1	73,5	5,2	21,3		725
K <sub>1</sub>	3,4	73,0	1,9		25,1	720
ΣN <sub>1</sub> +K <sub>1</sub>	6,5					722,5

- III (570–580 °С) – полиморфные превращения кварца;
- IV (720–800 °С) – образование силикатного расплава с участием термоактивированного кремнезема.

В качестве компонентов сырьевой смеси, формирующих при обжиге упрочняющие низкотемпературные эвтектики, использовали добавки  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  или  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (1,5–2,0 %), а также тонкомолотые стекла (8–10 %). Температуру образования и количество силикатного расплава оценивали по химическому составу термически активной части сырьевой смеси. Нижняя температурная граница спекания ( $T_{(N_1+K_1)}$ ) обусловлена началом процесса формирования легкоплавких эвтектик –  $\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  ( $N_1$ ) и  $\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  ( $K_1$ ) [7, 8]:

$$T_{(N_1+K_1)} = N_1 T_{N_1} / (N_1 + K_1) + K_1 T_{K_1} / (N_1 + K_1), \quad (1)$$

где  $T_{N_1}$  и  $T_{K_1}$  – соответственно температуры образования расплава состава  $N_1$  и  $K_1$ ;  $N_1+K_1$  – общее содержание расплавов для данных составов, %.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Расчетные данные показывают, что с превышением порогового значения температуры ( $\approx 722$  °С) частицы силицитов формируют силикатный расплав за счет эвтектик ( $\text{R}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{CaO}$ ) в количестве до 6,5 %.

Рентгенограмма обожженной опоки с добавкой  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  отличается от контрольного состава оплыванием пиков кварца в углах 19–21° за счет возрастания степени остекловывания структуры (рис. 2).

Ячеистая керамика плотностью 400–500 кг/м<sup>3</sup> на основе природных силицитов была получена методом вибровспучивания шликера, содержащего добавку газообразователя, с последующим обжигом затвердевшего сырца (рис. 3). Параметры процесса вспенивания: частота 1200–1500 об/мин, амплитуда (эллипсоидная траектория) 3–5 мм, продолжительность 3 мин.

Сырьевая смесь на основе природных опок не содержит каких-либо свя-

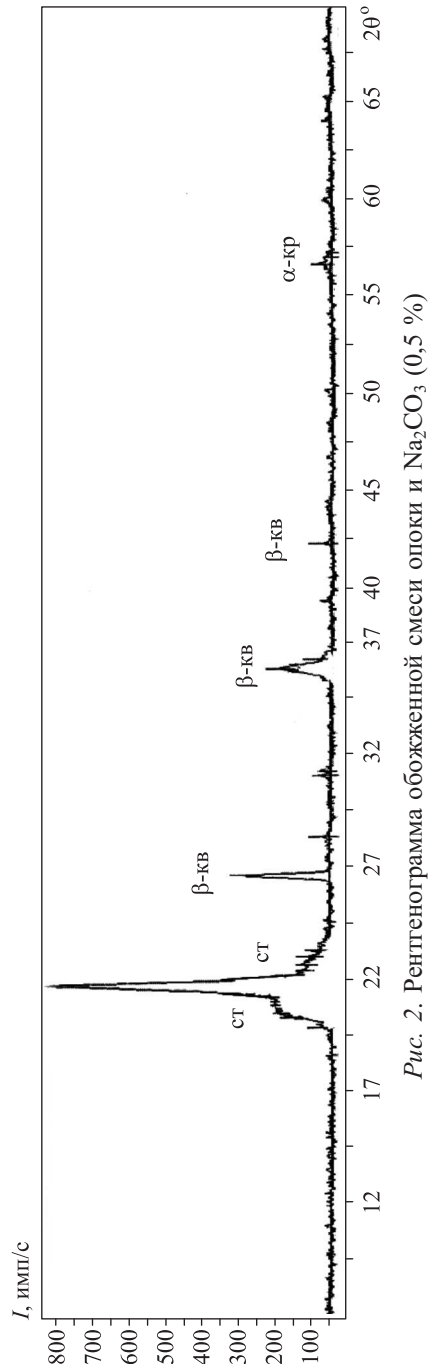


Рис. 2. Рентгенограмма обожженной смеси опоки и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (0,5 %)

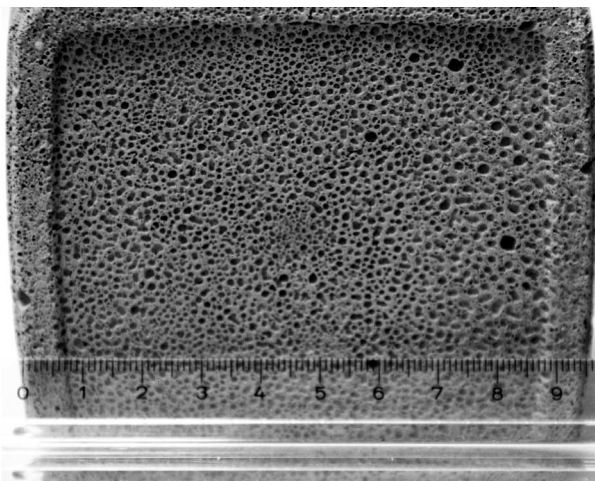


Рис. 3. Структура ячеистой керамики

зующих добавок, а процесс схватывания свежеприготовленной пеноминеральной массы обеспечивается высокой скоростью и обратимостью процесса тиксотропного разжижения шликера. Усилению эффекта тиксотропного восстановления пластической прочности способствует наличие в составе 0,5–1,5 Na-содержащих добавок, проявляющих сильный водоредуцирующий эффект. Это позволило снизить водотвердое отношение в сырьевой смеси до 0,40–0,45. В процессе сушки химически модифицированного сырца происходит дополнительный набор прочности, обусловленный отвердеванием геля кремниевой кислоты [9, 10].

При выборе разжижающей добавки было исследовано влияние солей на подвижность шликера (рис. 4, 5).

Анализ данных позволил заключить, что для шликеров на основе природных силицитов увеличение эффекта разжижения обусловлено размером гидратной оболочки вводимых добавок ( $\text{Li}_2^+(0,340 \text{ нм})$ ;  $\text{Na}^+(0,240 \text{ нм})$ ;  $\text{K}^+(0,170 \text{ нм})$ ).

Катионы, имеющие минимальный размер в гидратированном состоянии ( $\text{K}^+$ ), способны к повышенной концентрации [7]. Это приводит к снижению подвижности шликера за счет повышения величины экранирования потенциалопределяющих ионов на поверхности опоки, что снижает величину их электрокинетического потенциала и ширину диффузионной части.

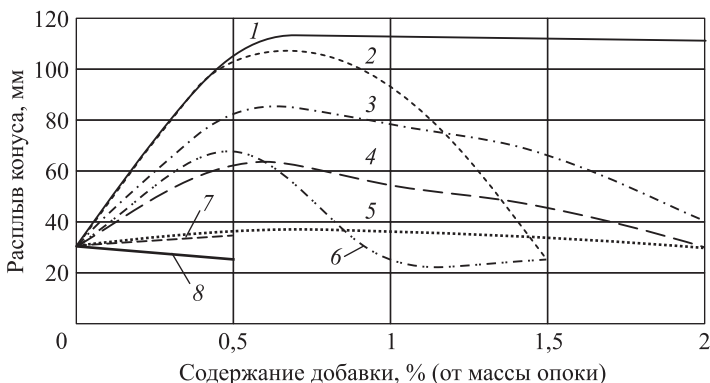


Рис. 4. Влияние Na-содержащей добавки на подвижность шликера

1 –  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ; 2 –  $\text{NaOH}$ ; 3 –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 4 –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 5 –  $\text{NaF}$ ;  
6 –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ; 7 –  $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ; 8 –  $\text{NaCl}$



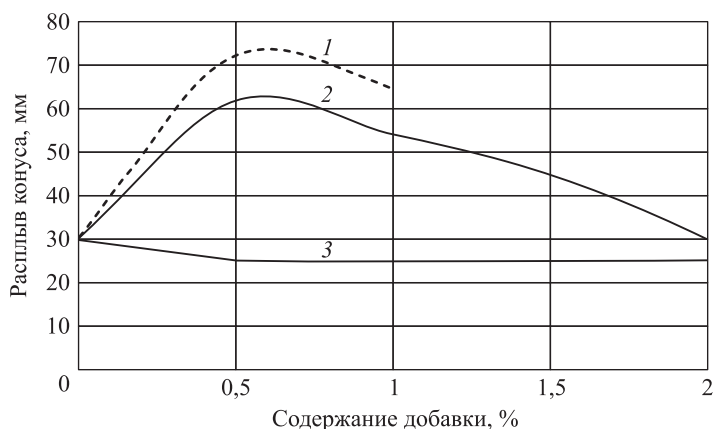


Рис. 5. Влияние вида катиона добавки на подвижность шликера  
1 – Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; 2 – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; 3 – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Анализ данных показывает, что карбонат натрия является разжижающей добавкой, проявляющей существенный водоредуцирующий эффект, что способствует формированию более плотного и прочного материала-основы ячеистой керамики. В сочетании с фактором доступности добавка Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> была выбрана в качестве предпочтительного модификатора.

Материал-основа ячеистой керамики, полученный путем обжига при температурах 900–930 °С в течение 3–4 ч сырцовый массы без ее предварительного вспенивания, характеризуется плотностью 1100–1250 кг/м<sup>3</sup>. Взаимосвязь средней плотности и прочности материала-основы характеризуют данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Взаимосвязь средней плотности и прочности материала-основы

Средняя плотность $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	400–450	450–500*	...	1100–1150	1200–1250
$R_{сж}^{обж}$ , МПа	1,4–1,6	3,0–3,2	...	10,0–10,5	19,5–20,0

\* С добавлением порошка тонкомолотого стекла.

Показатели свойств сырцовых масс приведены в табл. 3.

Для исследования особенностей работы материала-основы под действием механической нагрузки были получены диаграммы нагружения и рассчитан модуль упругости образцов (рис. 6, 7).

Таблица 3. Состав и свойства сырца

Состав	Компоненты, %	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	Усадка возд., %	$R_{сж}$ , МПа
1 (базовый)	Опока (99 %), Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1 %), В/Т = 0,5	1167	5,3	3,1
2	Базовый + стекловолокно (5 %)	1059	2,6	2,8
3	Базовый + порошок тарного стекла (10 %)	1192	5,25	2,25
4	Базовый + порошок оконного стекла (10 %)	1211	5,15	2,67
5	Базовый + порошок оптического стекла (10 %)	1174	4,6	1,88

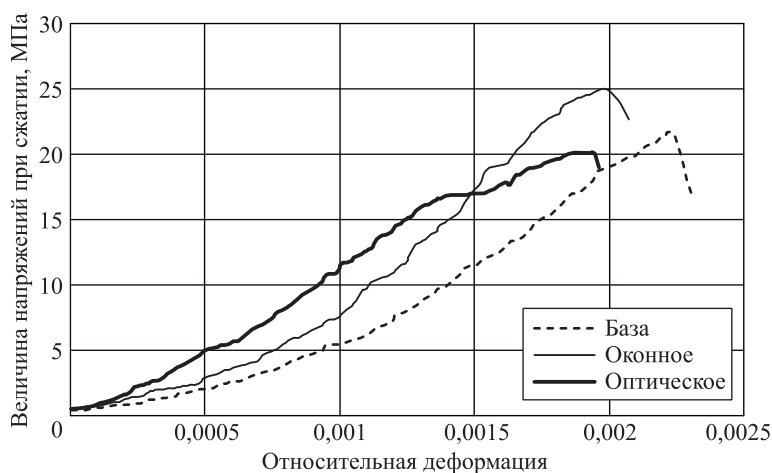


Рис. 6. Диаграммы нагружения материала-основы

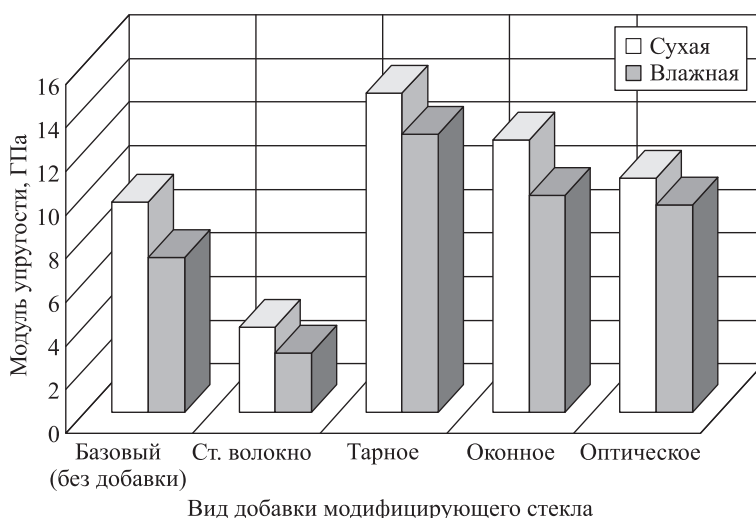


Рис. 7. Модуль упругости материала-основы: влияние наполнителя

Результаты испытаний материала-основы ячеистой керамики показаны в табл. 4.

**Анализ результатов и выводы.** Одним из основных недостатков, сдерживающих применение пористой керамики, является узость сырьевой базы и применение устаревших способов формирования ячеистой структуры.

Таблица 4. Свойства материала-основы ячеистой керамики

Состав	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	Усадка, %		$R_{сж}$ , МПа		$R_{низ}$ , МПа		$K_{вод}$	$W_m$ , %
		огневая	общая	сухой	влажный	сухой	влажный		
1	1200	2,53	7,7	19,5	17,5	6,0	5,31	0,90	42,4
2	1050	3,19	5,9	8,21	8,0	3,5	3,08	0,97	44,4
3	1215	3,83	8,45	24,2	20,2	6,7	6,22	0,83	36,8
4	1216	3,15	8,15	24,9	20,8	6,5	6,03	0,83	35,7
5	1224	3,41	7,85	20,9	19,3	4,6	3,68	0,92	37,8

Исследования подтверждают возможность создания теплоэффективной керамики с ячеисто-микропористой структурой, формируемой способом химического разложения жидкого газообразователя и фиксируемой за счет реализации способности химически модифицированной сырьевой суспензии к быстрому тиксотропному восстановлению пластической вязкости.

Использование природных силицитов в качестве минеральной основы керамического шликера дает возможность получить:

– без искусственной поризации смеси – керамические изделия со средней плотностью 1150–1200 кг/м<sup>3</sup> и прочностью 24–25 МПа;

– методом вибровспучивания – ячеистую керамику плотностью 400–450 кг/м<sup>3</sup> и прочностью 1,5–2,0 МПа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Береговой В.А., Костин Д.С., Береговой А.М. Теплоизоляционная газостеклокерамика на основе кремнистых горных пород // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 43–50.
2. Котляр В.Д., Лапунова К.А. Технологические особенности опок как сырья для стеновой керамики // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 11–12. С. 25–31.
3. Geng C., Zhang Q. Diatomite ultra-microporous high-strength heat-insulating heat-preserving firebrick and manufacturing method there of. Pat. CN101774817, 2010.
4. Guo Z., Du Y., Zhang W. Decoration acoustic absorption sheet material of tripolite and method for producing the same. Pat. CN101428999, 2008.
5. Береговой В.А. Моделирование структуры и прогнозирование свойств пористых композиционных материалов на стеклокристаллической матрице // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 22–29.
6. Котляр В.Д., Талпа Б.В. Опoki – перспективное сырье для стеновой керамики // Строит. материалы. 2007. № 2. С. 31–33.
7. Масленникова Г.Н., Харитонов Ф.Я., Дубов И.В. Расчеты в технологии керамики. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
8. Павлушкин Н.М. Стекло. М.: Стройиздат, 1973. 487 с.
9. Береговой В.А., Снадин Е.В. Использование технологических масс на основе химически активированного природного сырья в производстве ячеистого стекла // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 3. С. 24–30.
10. Мелконян Р.Г. Технология получения калиевого и натриевого жидких стекол путем гидротермально-щелочной переработки аморфных горных пород // Техника и технология силикатов. 2012. Т. 19. № 4. С. 20–26.

**Береговой Виталий Александрович**, д-р техн. наук; E-mail: vabereg@rambler.ru  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
**Снадин Евгений Валерьевич**, асп.; E-mail: techbeton@pguas.ru  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено после доработки 19.01.18

**Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich**, DSc; E-mail: vabereg@rambler.ru  
Penza State University of Architecture and Construction, Russia  
**Snadin Evgeniy Valer'evich**, Post-graduate Student; E-mail: techbeton@pguas.ru  
Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **THE USE OF NATURAL SILICITES IN THE TECHNOLOGY OF CELLULAR CERAMICS**

Technical solutions are proposed, that allow the use of natural silicates in the production of cellular building ceramics. The predominance of natural raw materials of amorphous SiO<sub>2</sub> with developed microporosity provides processes vibrasphere slip of the masses, their subsequent compaction and sintering. Experimental data on the nature of the influence of composition components on the rheological properties of glycerol and mechanical properties of ceramics are obtained. Proved the feasibility of using natural silicites as raw materials for obtaining of honeycomb fired building materials.

**Key words:** natural silicites, cellular ceramics, obtaining, properties.

### **REFERENCES**

1. Beregovoy V.A., Kostin D.S., Beregovoy A.M. Teploizolyatsionnaya gazosteklokeramika na osnove kremnistykh gornykh porod [Thermal insulation porous glass ceramics on basis of silicaclay mountain sorts]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 10. Pp. 43–50. (in Russian)
2. Kotlyar V.D., Lapunova K.A. Tekhnologicheskie osobennosti opok kak syr'ya dlya stenovoy keramiki [Technological features of flasks as raw material for wall ceramics]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2009. No. 11-12. Pp. 25–31. (in Russian)
3. Geng C., Zhang Q. Diatomite ultra-microporous high-strength heat-insulating heat-preserving firebrick and manufacturing method there of. Pat. CN101774817, 2010.
4. Guo Z., Du Y., Zhang W. Decoration acoustic absorption sheet material of tripolite and method for producing the same. Pat. CN101428999, 2008.
5. Beregovoy V.A. Modelirovanie struktury i prognozirovanie svoystv poristykh kompozitsionnykh materialov na steklokristallicheskoy matritse [Modeling of structure and property prediction of porous composite materials on glass-ceramic matrix]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4. Pp. 22–29. (in Russian)
6. Kotlyar V.D., Talpa B.V. Opoki – perspektivnoe syr'e dlya stenovoy keramiki [Gaize – promising raw material for wall ceramics]. *Stroitel'nye materialy* [Construction and building materials]. 2007. No. 2. Pp. 31–33. (in Russian)
7. Maslennikova G.N., Haritonov F.Ya., Dubov I.V. Raschety v tekhnologii keramiki [The calculations in technologies of the ceramics]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 320 p. (in Russian)
8. Pavlushkin N.M. Steklo [Glass]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 487 p. (in Russian)
9. Beregovoy V.A., Snadin E.V. Ispol'zovanie tekhnologicheskikh mass na osnove khimicheskii aktivirovannogo prirodnogo syr'ya v proizvodstve yacheistogo stekla [The use of technological materials based on chemically activated natural raw materials in the production of cellular glass]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 3. Pp. 24–30. (in Russian)
10. Melkonyan R.G. Tekhnologiya polucheniya kalievogo i natrievogo zhidkikh stekol putem gidrotermal'no-shchelochnoy pererabotki amorfnykh gornykh porod [Technology of receiving potassium and sodium liquid glasses by hydro-termo-alkaline processing of amorphous rocks]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov* [The technician and technology of silicates]. 2012. T. 19, No. 4. Pp. 20–26. (in Russian)

УДК 691.42 : 66.041.9 : 620.18

А.Е. БУРУЧЕНКО, Г.Н. ХАРУК, С.И. МУШАРАПОВА, А.А. СЕРГЕЕВ

**ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ  
НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА КЕРАМИКИ  
НА ОСНОВЕ ЛЕГКОПЛАВКИХ И ТУГОПЛАВКИХ ГЛИН  
ПРИ ОБЖИГЕ**

Образованный при распаде  $\text{CaCO}_3$  в интервале 800–900 °С оксид кальция обуславливает зарождение и рост кристаллов анортита и волластонита. При содержании карбоната кальция в керамической массе до 15 % и температуре обжига 1150 °С образуется анортит, при содержании 20 % и более в основном формируется волластонит. Зарожденные кристаллы анортита и волластонита армируют керамический черепок, тем самым обеспечивая изделиям высокие прочностные свойства.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** керамические массы, обжиг, формирование керамического черепка, структура, прочность.

На свойства стеновой, строительной и тонкой керамики в большей степени влияют фазовый состав и текстура. Они зависят от вида глин и вводимых добавок. В производстве обычно используются легкоплавкие, тугоплавкие и огнеупорные глины. Особый интерес представляют легкоплавкие и тугоплавкие, так как имеют более низкую огнеупорность, что позволяет производить обжиг при невысоких температурах. Однако изделия, изготовленные из них, не всегда имеют необходимые прочностные характеристики. Это обусловлено тем, что кроме глинистых минералов они содержат примеси в виде кварца, полевого шпата, карбонатов, оксидов железа и т.д., которые оказывают влияние на формирование фазового состава керамического черепка и температуру обжига. Особого внимания заслуживает карбонат кальция, который после разложения при обжиге предопределяет образование жидкой фазы и новых минералов [1–3]. К ним относятся анортит, волластонит, муллит и т.д., которые, имея пластинчатые, длинно-столбчатые и игольчатые кристаллы, армируют изделие, придавая ему высокие физико-механические свойства [4–7]. Целью данной работы является исследование влияния количественного содержания карбоната кальция на формирование анортито-волластонитовой структуры в керамических массах при обжиге.

В статье представлены результаты исследований по получению анортито-волластонитовой структуры керамики на основе легкоплавкой и тугоплавкой глин. Рассматривались керамические массы на основе глин Кубековского и Компановского месторождений с добавлением мела ( $\text{CaCO}_3$ ) и отходов обогащения цветных металлов ОАО «Красцветмет» (белый кек), содержащих карбонат кальция, который способствует в процессе обжига образованию анортита ( $\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) и волластонита ( $\text{CaOSiO}_2$ ) [8].

© Бурученко А.Е., Харук Г.Н., Мушарапова С.И., Сергеев А.А., 2018

Таблица 1. Химический состав глин Кубековского, Компановского месторождений и отходов обогащения цветных металлов

Сырье	Массовое содержание, %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	п.п.п.
Глина Кубековского месторождения	56,4	13,8	5,78	7,18	2,30	1,90	1,25	–	11,3
Глина Компановского месторождения	67,4	18,5	3,08	1,63	1,89	1,06	0,12	–	5,5
Отходы обогащения цветных металлов	2,14	1,32	0,21	33,5	1,08	–	–	19,2	42,2

Химический состав глин и отходов обогащения цветных металлов приведен в табл. 1.

Как показал рентгенофазовый анализ, у легкоплавкой глины основными глинистыми минералами являются монтмориллонит и гидромусковит. Из непластичных минералов присутствуют кварц, полевой шпат в виде ортоклаза и альбита, карбонат кальция и, в незначительном количестве, гематит (рис. 1).

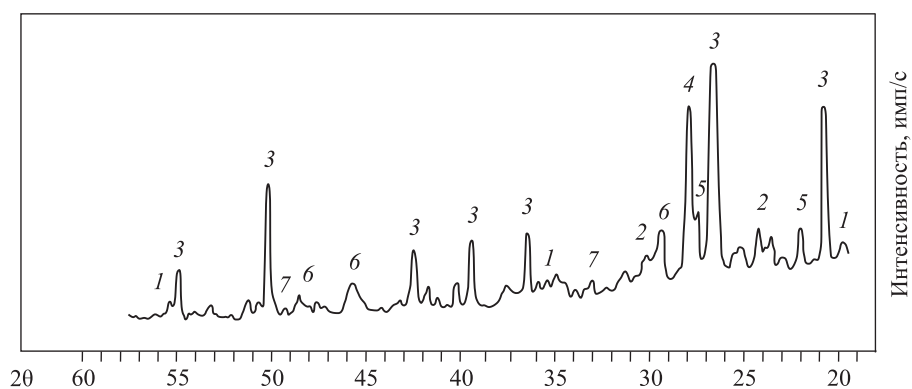


Рис. 1. Дифрактограмма глины Кубековского месторождения

1 – монтмориллонит; 2 – гидромусковит; 3 – кварц; 4 – альбит; 5 – ортоклаз; 6 – карбонат кальция; 7 – гематит

Основной глинистый минерал тугоплавкой глины Компановского месторождения – каолинит. В небольшом количестве содержится монтмориллонит. Неглинистые минералы представлены кварцем и альбитом, которые присутствуют в незначительных количествах. Минеральный состав отходов обогащения цветных металлов включает в себя карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>), ангидрид (CaSO<sub>4</sub>), двухводный гипс (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O). Железистая составляющая представлена гематитом (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Для проведения исследований готовились опытные керамические массы по обычной технологии, включающей в себя размол исходного сырья до остатка на сите 0,05 не более 5–7 %, перемешивание составов, увлажнение до 10–12 % и формование образцов диаметром и высотой 2 см при давлении 20 МПа.

После сушки образцы обжигались в силитовой печи при 500–1250 °С с интервалом 50 °С и выдержкой при конечной температуре 10 мин. У обожженных образцов рассчитывали огневую усадку, водопоглощение, определяли прочность на сжатие и проводили рентгенофазовый анализ. Содержание минералов в глинах, исходных керамических массах и обожженных образцах оценивали по высоте линий интенсивности их рентгеновских дифракционных максимумов.

Анализ изменения линий интенсивности минералов на дифрактограммах позволил изучить фазовый состав керамических масс и образование новых минералов.

Формирование структуры керамики при нагревании с различным содержанием  $\text{CaCO}_3$  отслеживали и по изменению электропроводности [9, 10]. Для этого в образцы при формовании вводились электроды, которые затем подсоединялись к измерительной установке с компьютером. Далее производился равномерный нагрев в печи от 20 до 1150 °С.

Кривые изменения линий интенсивности минералов рентгеновских дифракционных максимумов от температуры обжига образцов глины Кубековского месторождения представлены на рис. 2.

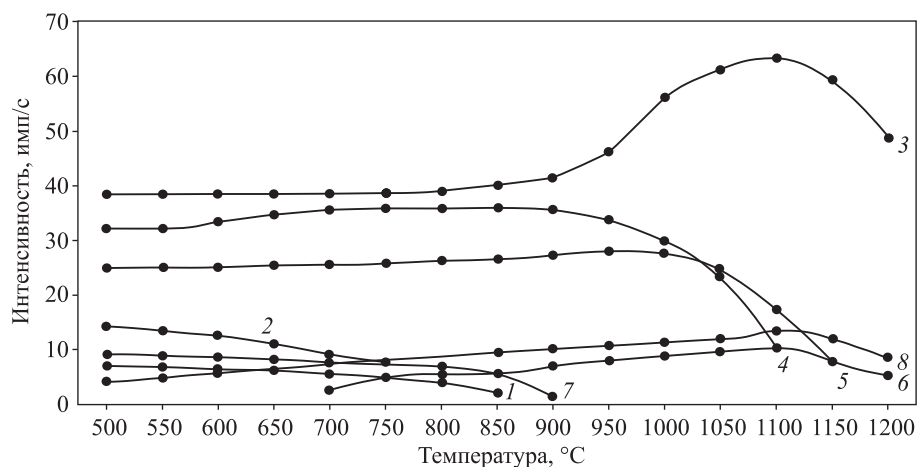


Рис. 2. Изменение линий интенсивности минералов рентгеновских дифракционных максимумов от температуры обжига образцов глины Кубековского месторождения

1 – монтмориллонит; 2 – гидромусковит; 3 – кварц; 4 – альбит; 5 – ортоклаз;  
6 – анортит; 7 – карбонат кальция; 8 – гематит

Как видно из графика, с распадом кристаллической решетки гидромусковита, монтмориллонита, карбоната кальция наблюдается формирование анортита, количество которого увеличивается с появлением жидкой фазы за счет плавления альбита и ортоклаза.

Образование анортита предопределяет снижение скорости уменьшения удельного сопротивления образца. Графики зависимости удельного сопротивления образцов от температуры обжига приведены на рис. 3.

Для исследования влияния карбоната кальция на формирование структуры керамики в легкоплавкую глину вводили от 10 до 40 % мела ( $\text{CaCO}_3$ ).

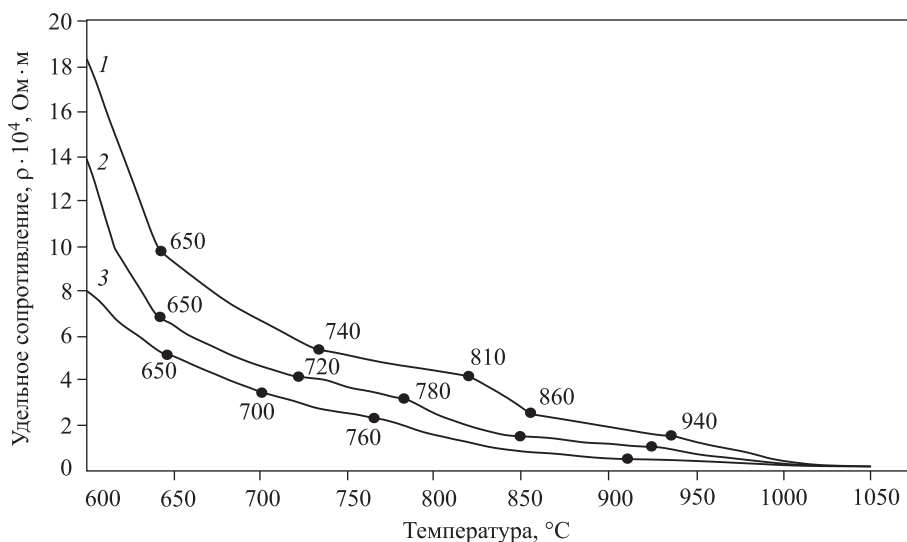


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления образцов глины Кубековского месторождения с различным содержанием  $\text{CaCO}_3$  от температуры обжига  
 1 – 100 % глина; 2 – 80 % глина + 20 %  $\text{CaCO}_3$ ; 3 – 60 % глина + 40 %  $\text{CaCO}_3$

Изменение относительного количественного содержания минералов в составах масс на основе легкоплавкой глины представлено на рис. 4.

Из анализа кривых зависимости удельного сопротивления образца и изменения линий интенсивности минералов на дифрактограммах от температуры обжига глины Кубековского месторождения с различным содержанием  $\text{CaCO}_3$  видно, что на разных этапах обжига удельное сопротивление и ско-

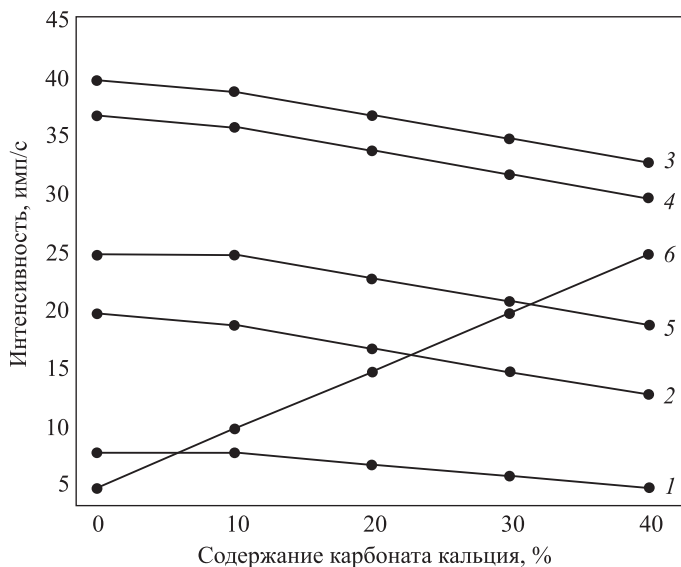


Рис. 4. Изменение линий интенсивности минералов глины Кубековского месторождения в зависимости от содержания карбоната кальция

1 – монтмориллонит; 2 – гидромусковит; 3 – кварц; 4 – альбит;  
 5 – ортоклаз; 6 – карбонат кальция



рость его изменения разные. Это указывает на различие проходящих процессов в этих температурных интервалах. Кристаллические решетки основной массы монтмориллонита и гидромусковита распадаются в интервале 570–740 °С. При температурах 740–810 °С происходит их дальнейшее замедленное разрушение. Продолжение нагревания от 810 до 920–950 °С приводит к распаду карбоната кальция. При температуре 940 °С начинает образовываться жидкая фаза за счет плавления альбита, в которой происходит формирование кристаллов анортита, что на кривых изменение удельного сопротивления отмечается снижением скорости электропроводности.

У образцов, изготовленных из чистой глины и обожженных при 1050 °С, фазовый состав представлен кварцем, альбитом, ортоклазом и небольшим количеством анортита, гематита и стеклофазы. Однако их прочность мала (~10–12 МПа), так как при данной температуре образовалось незначительное количество стеклофазы и анортита.

Общий анализ дифрактограмм, снятых с образцов с содержанием карбоната кальция от 10 до 40 % после обжига при разных температурах, и кривых изменения электропроводности показал, что в образцах с содержанием  $\text{CaCO}_3$  до 15 % происходит формирование анортита, а с содержанием свыше 20 % идет рост кристаллов волластонита (рис. 5). Это можно объяснить тем, что при содержании в керамической массе карбоната кальция свыше 15 % его распад при 950 °С дает достаточное количество оксида кальция, который обеспечивает как рост кристаллов волластонита, так и образование жидкой фазы.

Аналогичное влияние карбонат кальция оказывает на формирование анортито-волластонитовой структуры керамики и при его введении в тугоплавкую глину. В керамическую массу добавлялись отходы аффинажного

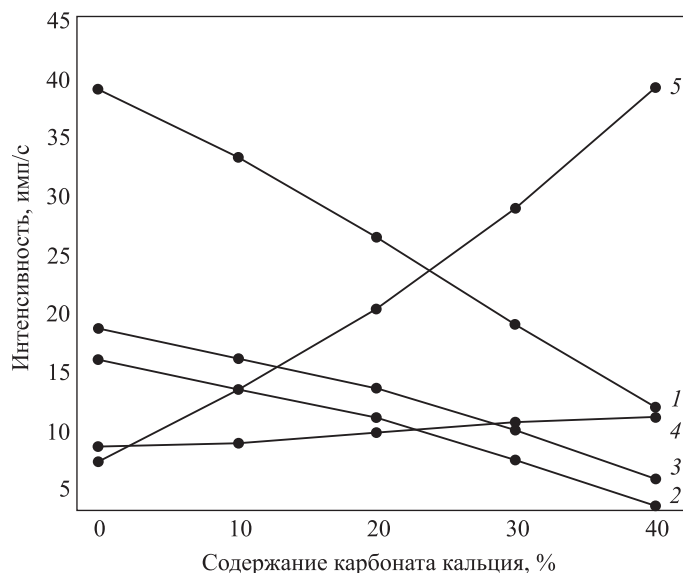


Рис. 5. Изменение линий интенсивности минералов у образцов из глины Кубековского месторождения с различным содержанием карбоната кальция, обожженных при 1050 °С  
1 – кварц; 2 – альбит; 3 – ортоклаз; 4 – анортит; 5 – волластонит

производства (белый кека). Образцы формовались, обжигались и исследовались таким же образом, как и образцы на основе легкоплавкой глины.

На дифрактограммах, снятых с образцов с различным содержанием кека и обожженных при 1150 °С, видно, что увеличение содержания карбоната кальция в массе приводит к наибольшему росту линий интенсивности волластонита (рис. 6). При этом отмечается и рост прочности образцов. Их прочность из чистой глины составляла 32 МПа, у образцов «90 % глина + 10 % кека» – 36, а у образцов состава «80 % глина + 20 % кека» – 54 МПа.

Физико-механические свойства образцов разных составов, обожженных при различных температурах, представлены в табл. 2.

Таким образом, в массах, изготовленных на основе легкоплавких и тугоплавких глин, при обжиге до 1150 °С карбонат кальция влияет на формирова-

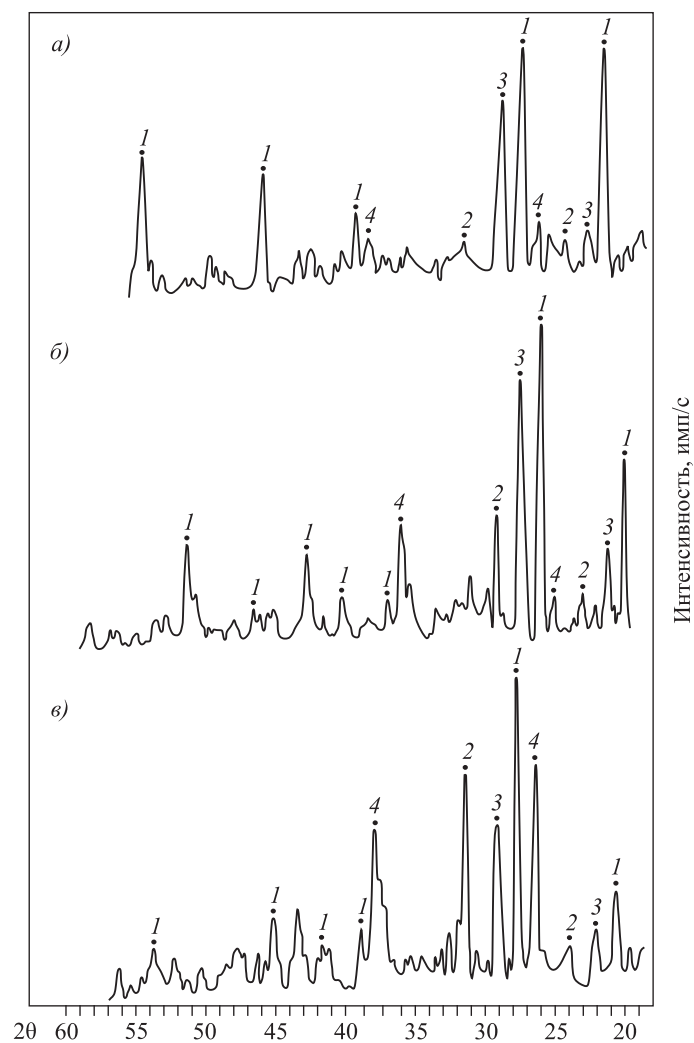


Рис. 6. Дифрактограмма компановской глины, обожженной при 1050 °С, с добавками белого кека

а – 90 % глина + 10 % кека; б – 80 % глина + 20 % кека;

в – 60 % глина + 40 % кека

1 – кварц; 2 – волластонит; 3 – анортит; 4 – ангидрид

Таблица 2. Физико-механические свойства образцов из компановской глины с различным содержанием белого кека

t, °C	Огневая усадка, %			Водопоглощение, %			Прочность на сжатие, МПа		
	состав			состав			состав		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
850	0,15	-1,3	-0,2	11,8	12,3	12,7	26	31	27
900	0,15	-1,2	-0,2	11,6	11,8	12,4	27	32	26
950	0,17	-1,0	-0,1	11,3	11,3	12,2	27,5	32	26
1000	0,2	-0,7	0,1	11,0	10,7	11,9	28	32	26
1050	0,2	-0,5	0,3	10,4	10,3	11,7	28	32,5	27
1100	0,3	-0,2	0,8	8,9	9,25	11,4	29	33	37
1150	0,7	0,8	1,8	7,5	7,5	8,2	32	36	54
1200	1,3	1,4	2,6	6,3	5,3	1,7	47	54	37

Примечание. Составы: 1 – компановская глина; 2 – компановская глина 90 % + кек белый 10 %; 3 – компановская глина 80 % + кек белый 20 %.

ние фазового состава керамических материалов, обеспечивая образование анортито-волластонитовой структуры. При содержании его в массах до 15 % в процессе обжига образуется в основном анортит, а свыше 20 %, наряду со слабым ростом кристаллов анортита, происходит интенсивный рост кристаллов волластонита. Сформированные кристаллы анортита и волластонита армируют керамический черепок и тем самым обеспечивают изделиям высокие прочностные свойства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубехин А.П., Верченко А.В., Яценко Н.Д. Зависимость прочности керамогранита от фазового состава // Строит. материалы. 2014. № 8. С. 30–32.
2. Рыщенко М.И., Федоренко Е.Ю., Чиркина М.А. и др. Микроструктура и свойства низкотемпературного фарфора // Стекло и керамика. 2009. № 11. С. 26–29.
3. Верещагин В.И., Козик В.В., Сырямкин В.И., Погребенков В.М., Борило Л.П. Полифункциональные неорганические материалы на основе природных и искусственных соединений. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2002. 359 с.
4. Ивлева И.В., Немец И.И. Структурно-текстурные особенности теплоэффективного композиционного материала на основе глин различного минералогического состава // Стекло и керамика. 2015. № 3. С. 17–21.
5. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А. Исследование и прогнозирование твердофазных реакций при обжиге керамических матричных композитов // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 7. С. 23–35.
6. Салахов А.М., Кабиров Р.Р., Морозов В.П., Арискин Р.А., Валимухаметова А.Р., Арискина К.А. Исследование структуры и фазового состава в процессе их термической обработки // Строит. материалы. 2017. № 9. С. 18–23.
7. Столбоушкин А.Ю., Бердов Г.И., Столбоушкин О.А., Злобин В.И. Влияние температуры обжига на формирование структуры керамических стеновых материалов из тонкодисперсных отходов обогащения железных руд // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 1. С. 33–41.

8. Яценко М.Д., Яценко Е.А., Закарлюка С.Г. Фазовый состав и свойства строительной керамики в зависимости от содержания карбоната кальция и оксида железа // *Стекло и керамика*. 2016. № 9. С. 7–10.
9. Бурученко А.Е., Верещагин В.И., Мушарапова С.И. Исследование физико-химических процессов методом измерения электропроводности в керамических массах при обжиге // *Строит. материалы*. 2017. № 9. С. 26–30.
10. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тарасов Б.М. *Электротехнические материалы*. Л.: Энергия, 1969. 408 с.

**Бурученко Александр Егорович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: buruchenko.ae@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

**Харук Галина Николаевна**, канд. физ.-мат. наук, доц.;

E-mail: galinaharuk@gmail.com

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

**Мушарапова Светлана Ильинична**, ст. препод.; E-mail: swetmush@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

**Сергеев Александр Алексеевич**, инж.; E-mail: quake97@bk.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено после доработки 15.01.18

**Buruchenko Aleksandr Egorovich**, DSc, Professor; E-mail: buruchenko.ae@mail.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Kharuk Galina Nikolaevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: galinaharuk@gmail.com

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Musharapova Svetlana I'lnichna**, Senior Lecturer; E-mail: swetmush@mail.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Sergeev Aleksandr Alekseevich**, Engineer; E-mail: quake97@bk.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **THE INFLUENCE OF CALCIUM CARBONATE ON THE STRUCTURE FORMATION OF THE CERAMICS DURING FIRING**

The effect of calcium carbonate on the formation during firing of the ceramic structure on the basis of fusible and refractory clays is studied. Formed as a result of decomposition of calcium carbonate in the interval 800–900 °C calcium oxide causes the emergence and growth of crystals of wollastonite and anortite. When the content of the calcium carbonate in the ceramic mass to 15 %, firing at 1150 °C predetermines the formation of anortite. When the content is 20 % or more mainly formed wollastonite. The formation anorthite-wollastonite structure ceramic crock provides the high strength properties of products.

**Key words:** ceramic masses, firing process, of ceramic crock, structure, strength.

### **REFERENCES**

1. Zubekhin A.P., Verchenko A.V., Yatsenko N.D. Zavisimost' prochnosti keramogranita ot fazovogo sostava [The strength of granite from the phase composition]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2014. No. 8. Pp. 30–32. (in Russian)
2. Ryshchenko M.I., Fedorenko E.Yu., Chirkina M.A. et al. Mikrostruktura i svoystva nizkotemperaturnogo farfora [Microstructure and properties of low temperature porcelain]. *Steklo i keramika* [Glass and ceramics]. 2009. No. 11. Pp. 26–29. (in Russian)

3. Vereshchagin V.I., Kozik V.V., Syryamkin V.I., Pogrebenkov V.M., Borilo L.P. Polifunktsional'nye neorganicheskie materialy na osnove prirodnnykh i iskusstvennykh soedineniy [Multifunctional inorganic materials based on natural and artificial compounds]. Tomsk, 2002. 359 p. (in Russian)
4. Ivleva I.V., Nemets I.I. Strukturno-teksturnye osobennosti teploeffektivnogo kompozitsionnogo materiala na osnove glin razlichnogo mineralogicheskogo sostava [Structural-textural characteristics of heat-efficient composite material on the basis of clays of different mineralogical composition]. Steklo i keramika [Glass and ceramics]. 2015. No. 3. Pp. 17–21. (in Russian)
5. Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A. Issledovanie i prognozirovaniye tverdogfaznykh reaktsiy pri obzhige keramicheskikh matrichnykh kompozitov [Investigation and forecasting of solid-phase reactions during firing of ceramic matrix composites]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 7. Pp. 23–35. (in Russian)
6. Salakhov A.M., Kabirov R.R., Morozov V.P., Ariskin R.A., Valimukhametova A.R., Ariskina K.A. Issledovanie struktury i fazovogo sostava v protsesse ikh termicheskoy obrabotki [Investigation of structure and phase composition in the process of their thermal treatment]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2017. No. 9. Pp. 18–23. (in Russian)
7. Stolboushkin A.Yu., Berdov G.I., Stolboushkin O.A., Zlobin V.I. Vliyaniye temperatury obzhiga na formirovaniye struktury keramicheskikh stenovykh materialov iz tonkodispersnykh otkhodov obogashcheniya zheleznykh rud [Firing temperature impact on structure forming in ceramic wall materials produced of fine dispersed iron ore enrichment wastes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 1. Pp. 33–41. (in Russian)
8. Yatsenko M.D., Yatsenko E.A., Zakarlyuka S.G. Fazovyy sostav i svoystva stroitel'noy keramiki v zavisimosti ot sodержaniya karbonata kal'tsiya i oksida zheleza [Phase composition and properties of building ceramics in dependence on the content of calcium carbonate and iron oxide]. Steklo i keramika [Glass and ceramics]. 2016. No. 9. Pp. 7–10. (in Russian)
9. Buruchenko A.E., Vereshchagin V.I., Musharapova S.I. Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov metodom izmereniya ehlektroprovodnosti v keramicheskikh massakh pri obzhige [Study of the chemical and physical processes by measuring electrical conductivity in ceramic masses during the firing]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2017. No. 9. Pp. 26–30. (in Russian)
10. Bogoroditskiy N.P., Pasyukov V.V., Tarasov B.M. Ehlektrotekhnicheskie materialy [Electrical materials]. Leningrad, 1969. 408 p. (in Russian)

УДК 691.42 : 539.4

**В.З. АБДРАХИМОВ, А.К. КАЙРАКБАЕВ, Е.С. АБДРАХИМОВА,  
Д.А. ЛОБАЧЕВ****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ  
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА  
БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ  
ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В результате работы получен керамический кирпич на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья. Исследования показали, что использование золы легкой фракции и шлака Красноярской ТЭЦ-2 в качестве щелочесодержащего, а шлака Ново-Иркутской ТЭЦ в качестве железосодержащего плавней позволяет получить керамический кирпич марки 125 на основе межсланцевой глины без применения природных традиционных материалов. Использование отходов топливно-энергетического комплекса позволит утилизировать многотонные техногенные отложения и снижать антропогенную нагрузку во многих регионах России.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** межсланцевая глина, «зеленая» экономика, зола легкой фракции, шлак от сжигания бурых углей, железосодержащий шлак, керамические материалы, отходы энергетики.

**Введение.** Экологическая ситуация в России характеризуется высоким уровнем антропогенного воздействия на природную среду, значительными экологическими последствиями прошлой экономической деятельности. В 40 субъектах РФ 54 % городского населения находятся под воздействием загрязненного воздуха, сточные воды очищаются недостаточно хорошо, практически во всех регионах страны состояние земель ухудшается [1]. Программа Организации Объединенных Наций по охране окружающей среды (UNEP) определяет «зеленую» экономику как инструмент, приводящий к повышению благосостояния людей и социального равенства и значительно снижающий неблагоприятное воздействие на окружающую среду и риски экологической деградации.

Под «зеленой» экономикой подразумевается производство различного рода очистного оборудования, утилизация вторичных ресурсов и отходов, оказание экологических услуг и пр. [2, 3]. В этом случае «зеленая» экономика оказывается лишь частью «большой» экономики. Очевидно, что вряд ли возможно «мирное» сосуществование «зеленой» и природно-ресурсной («коричневой») экономики.

В настоящее время эффективность работы всех отраслей промышленности необходимо оценивать с точки зрения баланса между массой основного продукта и объемом образуемых техногенных отходов. Наиболее

© Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С., Лобачев Д.А., 2018

неблагополучны в этом плане предприятия топливно-энергетического комплекса, а именно тепловые электрические станции (ТЭЦ) – источники массированных атмосферных выбросов и крупнотоннажных твердых отходов. Топливо-электроэнергетический комплекс является одним из основных «загрязнителей» окружающей природной среды. Это выбросы в атмосферу (48 % всех выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36 % всех сбросов), а также образование твердых отходов (30 % всех твердых загрязнителей) [4].

К отходам топливно-энергетического комплекса относятся продукты, получаемые при добыче, обогащении и сжигании твердого топлива. Эту группу отходов разделяют по источнику образования, виду топлива, числу пластичности минеральной части отходов, содержанию горючей части, зерновому и химико-минералогическому составу, степени плавкости, интервалу размягчения, степени вспучиваемости и т.д.

Длительное хранение отходов теплоэнергетики в золоотвалах способствует попаданию вредных веществ и ионов тяжелых металлов в воду и почву. По оценкам автора работы [3], антропогенная составляющая формирования качества поверхности вод уже соизмерима с природной составляющей, что представляет угрозу устойчивому водопользованию. Совершенно очевидно, что нужно снижать антропогенную нагрузку посредством внедрения региональных нормативов, изменения платы за загрязнение водных объектов и использование отходов энергетики в производстве строительных материалов.

**Цель работы:** получение керамического кирпича на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья.

**Управление отходами.** Необходимость организации управления отходами возникла вследствие конфликта между производственной деятельностью человека и окружающей природной средой, приведшего к нарушению устойчивости биосферы. Поэтому появление этого направления деятельности человека неслучайно и может быть рассмотрено как следствие естественной эволюции биосферы на пути ее перехода на новый этап развития – ноосферу, предполагающий разумное регулирование отношений между человеком и природой. В европейских странах и США уровень утилизации золошлаковых отходов значительно выше. Так, использование золошлаковых отходов достигает, %: в США – 25, Великобритании – 53, Франции – 65, Германии – 75.

Производство керамических материалов – одна из самых материалоемких отраслей народного хозяйства, поэтому рациональное использование топлива, сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором ее успешного развития в условиях проводимой экономической реформы [4–6]. В связи с этим применение в керамических материалах отходов сырья приобретает особую актуальность.

Иерархия управления отходами послужила толчком к возникновению и бурному развитию новой отрасли – отрасли управления отходами, называемой отраслью XXI в., которая привела к перевороту в области обращения со всеми видами антропогенных отходов. Во всех развитых стра-

нах количество образующихся отходов неуклонно сокращается, доля перерабатываемых возрастает, а доля отходов, размещаемых в природных средах, приближается к нулю. Только в ЕС оборот новой отрасли приблизился в 2005 г. к 100 млрд евро, а количество созданных рабочих мест – к 3,5 млн [7].

Значительная часть извлекаемых природных ресурсов используется не рационально. Известно, что ресурсоемкость единицы ВВП в России в 2 раза выше, чем в США, и в 4 раза выше, чем в Западной Европе [8]. Энергоемкость единицы ВВП в России также в 2 раза выше, чем в США, и более чем в 3 раза выше, чем в странах Западной Европы и Японии. Это означает, что для производства 1 т продукции в России вовлекается в 2–4 раза больше природных ресурсов, а неиспользуемая их часть выбрасывается в окружающую среду в виде твердых, жидких и газообразных отходов.

**Сырьевые материалы.** *Межсланцевая глина* образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) и является отходом горючих сланцев. По числу пластичности относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 24–28) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см<sup>3</sup>. Химический оксидный состав межсланцевой глины представлен в табл. 1, а гранулометрический (фракционный) – в табл. 2.

Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюда, монтмориллонита и кальцита. Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюда.

Для снижения температуры обжига керамических материалов в состав шихты вводили плавни и интенсификаторы спекания: зола легкой фракции, шлак от сжигания бурых углей (шлак Красноярской ТЭЦ-2) и железосодержащий шлак ТЭЦ.

Таблица 1. Химический состав компонентов, мас. %

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	П.п.п.
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20
Зола легкой фракции	58–59	21–22	5,0–5,5	3–4	1,0–1,5	8–9	0,5–1,0
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	54–55	5–7	9–10	22–24	3,0–3,5	3,0–3,5	0,2–0,5
Железосодержащий шлак ТЭЦ	53–55	4–6	30–32	1–2	0,3–0,8	1–2	8–10

Таблица 2. Фракционный состав компонентов, %

Компонент	Размер частиц, мм				
	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,0001
Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
Зола легкой фракции (угли Кузбасского бассейна)	18,4	35,3	30,4	12,4	3,5
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	17,9	34,9	31,3	13,5	2,6
Железосодержащий шлак ТЭЦ	65,8	24,5	9,1	0,5	0,1



К плавням относятся такие материалы, которые в процессе обжига вступают во взаимодействие со связующим веществом (как правило, глинистым), образуя более легкоплавкие соединения, чем чистое связующее вещество, поэтому введение плавней в состав керамических материалов способствует снижению температуры спекания изделий. Плавни можно разбить на три основные группы: щелочесодержащие, щелочно-земельные и железосодержащие. В.Ф. Павлов упоминал, что оксид железа является интенсификатором спекания при обжиге керамических материалов [9]. Минерализующая роль оксидов неоднократно исследовалась, при этом отмечалось, что оксид железа одна из наиболее эффективных добавок [5, 6, 9, 10].

В работах [6, 9, 10] было показано, что ввод железа в керамическую массу как химически чистым оксидом, так и с железосодержащими добавками позволил при температурах 1100 °С получить черепок с водопоглощением менее 5 %. Повышенное содержание оксида железа в сырьевых материалах способствует вхождению катиона  $Fe^{3+}$  в кремнекислородный каркас в составе групп  $[Fe^{3+}O^4]$  [6, 9]. Температура обжига определяется прочностью стеклообразного каркаса и более тугоплавкой силикатной составляющей. Встраивание тетраэдров  $[Fe^{3+}O^4]$  в кремнекислородный каркас вызывает его ослабление по отношению к тепловым колебаниям и ведет к уменьшению температуры обжига. Технологические показатели плавней и интенсификатора спекания представлены в табл. 3.

Таблица 3. Технологические показатели плавней и интенсификатора спекания

Компонент	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание стеклофазы, %	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Огнеупорность, °С
<i>В качестве щелочесодержащего плавня</i>					
Зола легкой фракции (угли Кузбасского бассейна)	350–500	2,53–2,60	80–90	2700–3000	1150
<i>В качестве кальцийсодержащего плавня</i>					
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	600–700	2,68–2,75	70–80	1900–2500	1300
<i>В качестве железосодержащего интенсификатора спекания</i>					
Железосодержащий шлак ТЭЦ	800–1000	3,05–3,15	70–80	1800–2000	1250–1280

**Зола легкой фракции.** Зола гидроудаления Усть-Каменогорской ТЭЦ получается в результате пылевидного сжигания углей Кузнецкого бассейна в котлах (см. табл. 1–3). Схема разбивки золоотвала по зонам в зависимости от физико-механических характеристик показана на рис. 1 [6].

По мере движения золы из зоны I в IV более плотные и тяжелые частицы оседают в зонах I и II. Зола легкой фракции уносится водой на периферию золоотвала как наиболее легкий компонент (см. рис. 1).

В табл. 4 приведены физико-механические показатели золы ТЭЦ в зависимости от места ее нахождения.

Провести четкую границу между зонами невозможно, зола с высоким содержанием стеклофазы встречается и в первых двух зонах, но в IV зоне

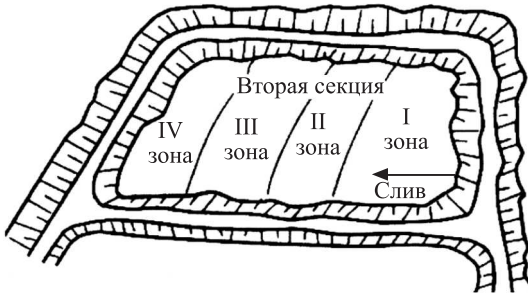


Рис. 1. Схема разбивки золоотвала по зонам в зависимости от физико-механических характеристик

габитуса, оплавленные кристаллы кварца призматического и бипирамидального габитусов, обширные поля стеклофазы, ромбоэдрические кристаллы анортита, кристаллы полевого шпата в виде октаэдров, скопление кристаллов муллита игольчатого облика.

она содержит наибольшее количество стеклофазы (80–90 %) и практически в ней отсутствуют несгоревшие частицы (п.п.п. менее 1 %, см. табл. 4). На рис. 2 показана микроструктура золы легкой фракции.

В золе легкой фракции представлены различные минералы: одиночные кристаллы магнетита псевдокубической сингонии, гематит октаэдрического

Таблица 4. Физико-механические характеристики золы по зонам

Зона золоотвала	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание стеклофазы, %	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Потери при прокаливании, %
I	700–800	2,80–2,85	49–55	1900–3000	7,0–11,0
II	600–700	2,75–2,85	50–65	3000–4000	3,8–8,3
III	500–700	2,60–2,75	65–80	3000–3500	0,78–1,30
IV	350–500	2,53–2,60	80–90	2700–3000	0,64–0,98

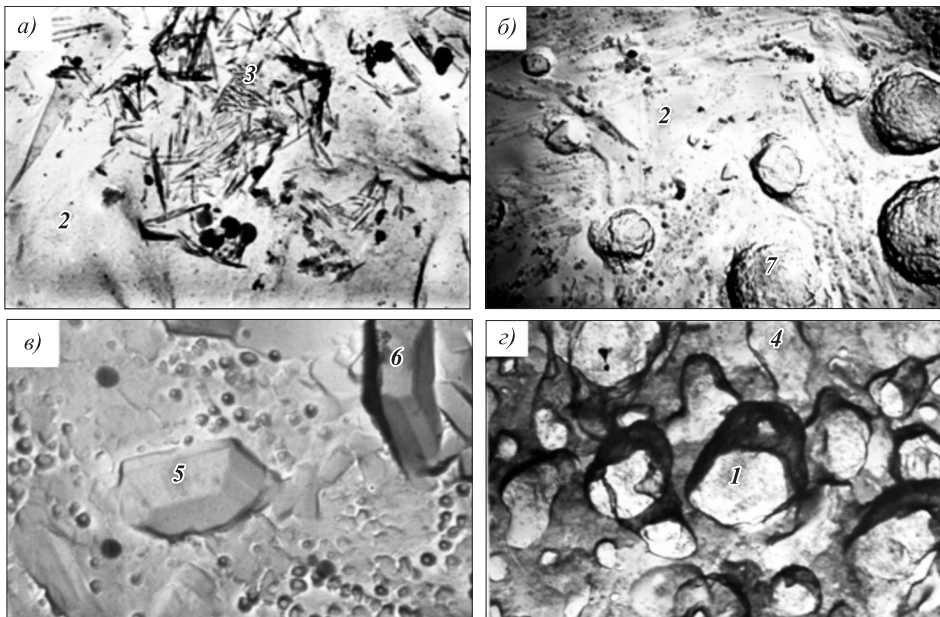


Рис. 2. Микроструктура золы легкой фракции

1 – магнетит псевдокубической сингонии; 2 – стекло; 3 – муллит (псевдоморфоза стекла с игольчатым муллитом); 4 – кварц; 5 – ромбоэдрические кристаллы анортита; 6 – полевого шпата в виде октаэдров; 7 – гематит октаэдрического габитуса  
Увеличение: а и в × 8000; б и г × 10000

Рентгенофазовый состав исследуемой золы легкой фракции проводился на дифрактометре ДРОН-6 с использованием  $\text{CoK}\alpha$ -излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град/мин.

На рентгенограмме (рис. 3, *a*) для золы легкой фракции характерны интенсивные линии кварца ( $d/n = 0,185; 0,205; 0,230; 0,255; 0,342$  и  $0,443$  нм), присутствие линии  $d/n = 0,224; 0,243; 0,251; 0,270$  и  $0,365$  нм обусловлено гематитом, линии  $d/n = 0,313; 0,321$  и  $0,375$  нм говорят о наличии анортита,  $d/n = 0,200; 0,211; 0,220$  и  $0,339$  нм – муллита.

Количественный минералогический состав золы легкой фракции представлен следующими минералами, мас. %: стекловидные частицы 50–55, стекла 20–25, кварц 8–12, гематит 4–5, анортит 3–5, полевой шпат 5–8, муллит 2–4.

**Шлак Красноярской ТЭЦ-2.** Красноярская ТЭЦ-2 – тепловая электростанция, работающая на бурых углях, одна из крупнейших ТЭЦ в Сибири, входит в состав Открытого акционерного общества «Енисейская территориальная генерирующая компания (ТГК-13)» в качестве производственного филиала. Это самая экономичная станция от Урала до Дальнего Востока по удельному расходу условного топлива на единицу продукции (см. табл. 1–3). Имея повышенное содержание оксидов железа, кальция и щелочей, шлак от сжигания угля будет способствовать спеканию керамического кирпича при относительно невысоких температурах обжига.

На рентгенограмме (рис. 3, *b*) порошка шлака отмечаются характерные интенсивные линии ( $d/n = 0,181; 0,255; 0,342$  и  $0,443$  нм) кварца, присутствие линии  $d/n = 0,200; 0,211; 0,220$  и  $0,339$  нм обусловлено муллитом,  $d/n = 0,270$  и  $0,365$  нм – гематитом,  $d/n = 0,196; 0,2087; 0,227; 0,313; 0,321$  и  $0,375$  нм – анортитом, а линии  $d/n = 0,246; 0,292$  и  $0,403$  нм – кристобалитом.

Исследования минералогического состава шлака показали, что кристаллическая фаза в нем присутствует в незначительных количествах (не более 20–30 %, см. табл. 3). Аморфная фаза составляет порядка 70–80 %.  $N_{\text{ср}}$  аморфной фазы равна 1,56–1,60, что, очевидно, связано с переходом некоторой части оксида железа в стекло и образование железистых стекол (рис. 4).

Жидкая фаза является той средой, которая вначале накапливает щелочи, а затем при достижении соответствующих условий (температуры, вязкости и др.) «передает» их зернам кварца [6, 9, 10]. Микрогетерогенность силикатных расплавов обуславливает, в конечном счете, создание ионами в расплавах структурно упорядоченных групп, напоминающих строение кристаллической фазы, выделяющейся из расплава. Эти группы называют часто сиботаксическими [6, 9, 10]. Они, в сущности, и становятся при охлаждении центрами кристаллизации.

Действительность такого механизма трудно подтвердить экспериментально, но он представляется очевидным: зерна кварца, оксидов железа и полевого шпата в массе глинистых компонентов разобщены, окружены глинистыми минералами и в подавляющем большинстве случаев непосредственно не контактируют друг с другом. В связи с этим щелочи и оксиды железа, чтобы достичь зерен кварца, предварительно должны обогатить и соответственно преобразовать «глинистую связку».

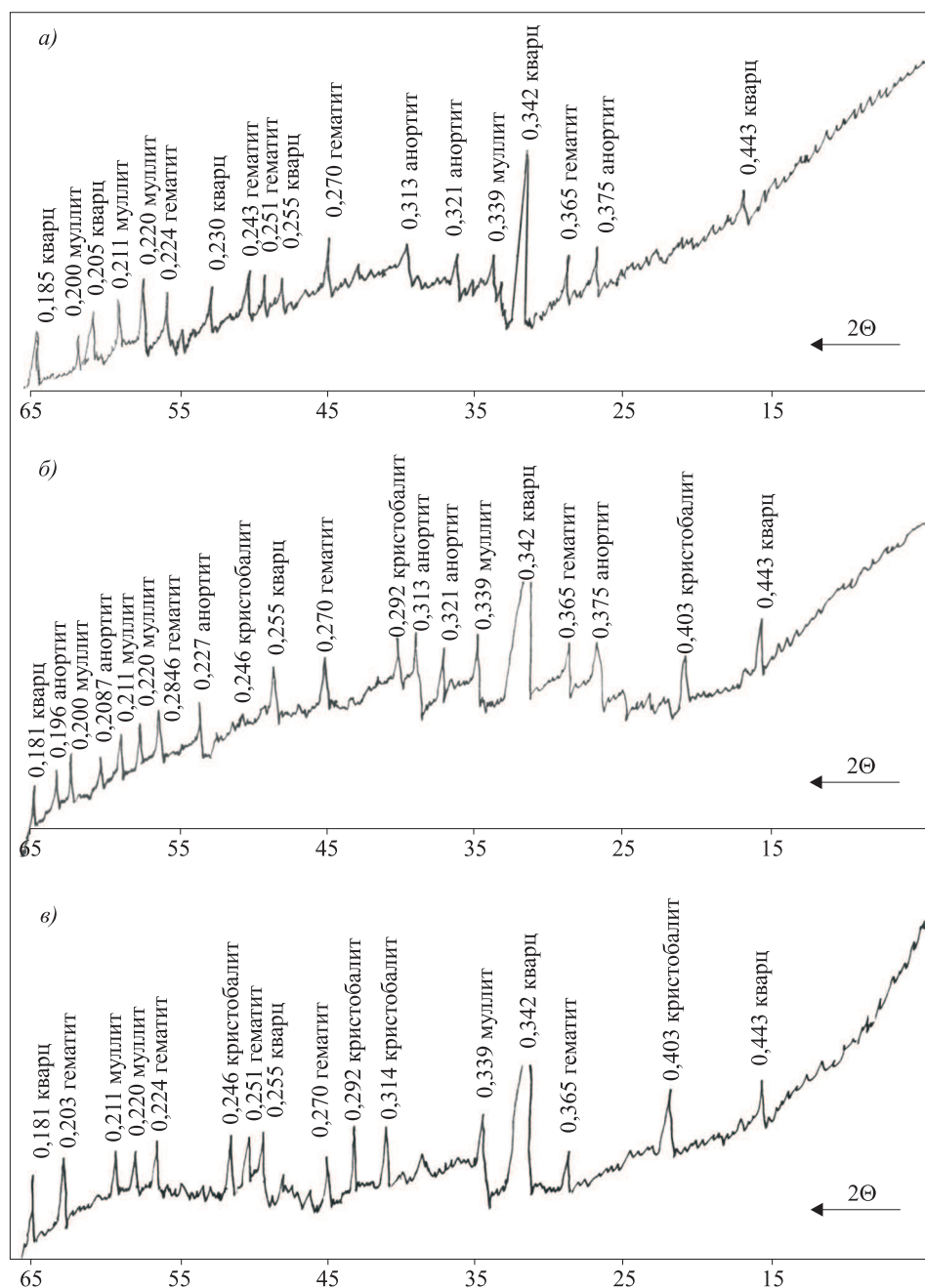


Рис. 3. Рентгенограммы золы легкой фракции (а), шлака от сжигания бурого угля Красноярской ТЭЦ-2 (б) и железосодержащего шлака (в)

Наличие муллита ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) в исследуемом шлаке, как и в золе легкой фракции, будет способствовать и образованию муллита при обжиге керамического кирпича. Именно муллит придает основные физико-механические свойства керамическим материалам.

Механизм кристаллизации муллита в керамических материалах, как указывалось в работах [6, 9, 10], включает две стадии: образование центров кристаллизации (зародышей) и рост кристаллов в них. По-видимому, при

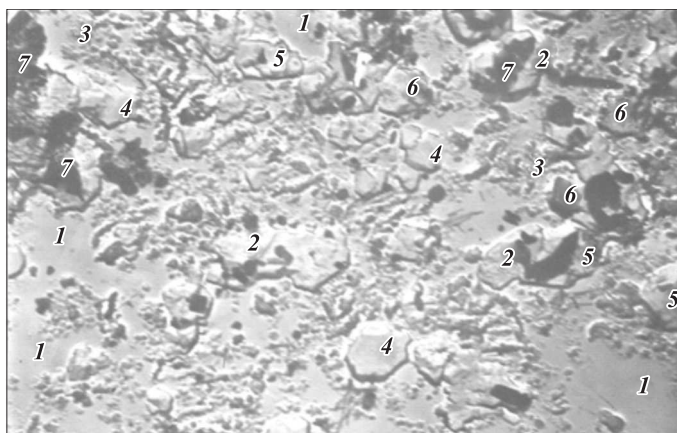


Рис. 4. Микроструктура шлака от сжигания бурого угля  
 1 – обширные поля стеклофазы; 2 – мелкие оплавленные и одиночные призматические кристаллы кварца; 3 – первичный (чешуйчатый) муллит; 4 – гематит октаэдрического облика; 5 – ромбоэдрические кристаллы анортита; 6 – кристобалит тетрагональной сингонии; 7 – органические включения (рентгеноаморфная фаза)  
 Увеличение  $\times 5000$

обжиге кирпича, при использовании в составах керамических масс золошлака, будет происходить гетерогенная кристаллизация муллита.

На рис. 4 представлены обширные поля стеклофазы, мелкие оплавленные кристаллы кварца, одиночные призматические оплавленные кристаллы кварца, кристаллы гематита октаэдрического облика; ромбоэдрические кристаллы анортита и крупные кристаллы  $\alpha$ -кристобалит тетрагональной сингонии.

**Железосодержащий шлак ТЭЦ.** Ново-Иркутская ТЭЦ является основным источником тепла системы централизованного теплоснабжения Иркутска и участвует в покрытии электрических нагрузок энергосистемы Сибири. Теплоцентрально запроектирована для сжигания бурых углей Восточной Сибири. Количество твердых остатков для каменных и бурых углей колеблется от 15 до 40 %. Шлаки представляют собой агрегированные частицы (см. табл. 1–3).

Важно иметь в виду, что процесс восстановления оксидного железа в закисное сопровождается повышением молекулярной концентрации реагирующих оксидов, так как из одной молекулы  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  образуются  $2\text{FeO}$ . Если вспомнить из физической химии одно из следствий закона Рауля, согласно которому температура плавления смеси понижается пропорционально молекулярной концентрации реагирующих веществ, то становится понятным [6, 9, 10], что процессы восстановления оксидов железа резко интенсифицируют переход глины из хрупкого в пиропластическое состояние.

На рентгенограмме (рис. 3, в) порошка шлака отмечаются характерные интенсивные линии ( $d/n = 0,181; 0,255; 0,342$  и  $0,443$  нм) кварца, присутствие линии  $d/n = 0,211; 0,220$  и  $0,339$  нм обусловлено муллитом,  $d/n = 0,203; 0,224; 0,251; 0,270$  и  $0,365$  нм – гематитом, а линии  $d/n = 0,246; 0,292; 0,314$  и  $0,403$  нм – кристобалитом.

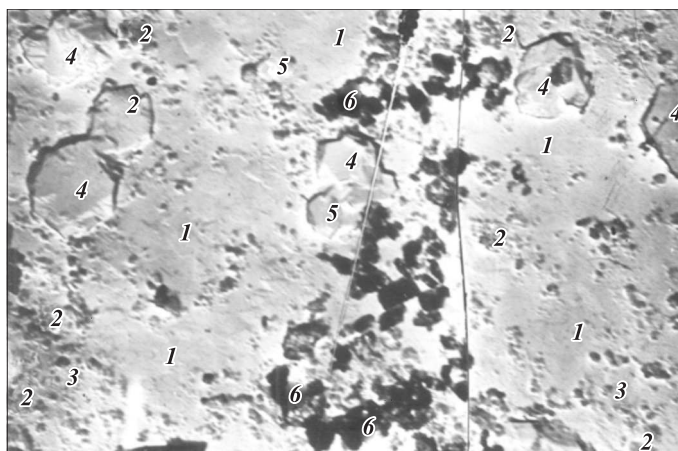


Рис. 5. Микроструктура железосодержащего шлака  
 1 – стеклофаза; 2 – оплавленные кристаллы кварца призматического и бипирамидального габитуса; 3 – первичный (чешуйчатый) муллит; 4 – гематит призматического и ромбоэдрического габитуса; 5 – кристобалит тетрагональной сингонии; 6 – органические включения (рентгеноаморфная фаза)  
 Увеличение  $\times 5000$

Изучение фазового состава железосодержащего шлака проводили так же, как и золы легкой фракции и красноярского шлака, с помощью электронного микроскопа ЭМБ-100БР методом реплик на просвет (рис. 5).

Исследование минералогического состава железосодержащего шлака показало, что кристаллическая фаза в нем присутствует в количестве 35–45 %. Аморфная фаза составляет порядка 55–65 %.  $N_{cr}$  аморфной фазы равна 1,60–1,64, что, очевидно, связано с переходом большей части оксида железа в стекло и образованием железистых стекол. На рис. 5 представлены значительные поля стеклофазы в шлаке; скопления мелких и оплавленных кристаллов кварца призматического и бипирамидального габитуса; большое количество кристаллов гематита (крупных и средних) призматического и ромбоэдрического габитуса; отдельные кристаллы  $\alpha$ -кристобалит тетрагональной сингонии.

**Экспериментальная часть.** Керамическую массу для получения керамических материалов изготавливали из составов, представленных в табл. 5. Компоненты измельчали до прохождения сквозь сито № 063, после чего тщательно перемешивали и полученную шихту увлажняли до влажности 20–22 %. Из увлажненной шихты пластическим способом формовали образцы в натуральную величину кирпича размером 120 $\times$ 250 $\times$ 65 мм.

Таблица 5. Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, мас. %			
	1	2	3	4
1. Межсланцевая глина	100	90	90	90
2. Зола легкой фракции	–	10	–	–
3. Шлак Красноярской ТЭЦ-2	–	–	10	–
4. Железосодержащий шлак ТЭЦ	–	–	–	10

Таблица 6. Физико-механические показатели

Показатель	Состав			
	1	2	3	4
Механическая прочность при сжатии, МПа	12,4	13,8	13,2	14,5
Механическая прочность при изгибе, МПа	2,2	2,4	2,3	2,8
Морозостойкость, циклы	24	28	27	34
Водопоглощение, %	12,8	12,8	13,4	12,4
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,59	0,68	0,59	0,72

Физико-механические свойства обожженных керамических кирпичей представлены в табл. 6.

Как видно из табл. 6, полученные керамические кирпичи из отходов топливно-энергетического комплекса без применения традиционных природных материалов соответствуют марке М125.

**Выводы.** На основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природных традиционных материалов получены керамические материалы с высокими физико-механическими показателями. Исследования выявили, что эффективное использование природных ресурсов, сохранение и увеличение природного капитала, уменьшение загрязнения, низкие углеродные выбросы, предотвращение утраты экосистемных услуг и биоразнообразия способствуют переходу к «зеленой» экономике и позволят увеличить благосостояние населения, а также снизить риски негативного влияния на окружающую среду. Использование отходов энергетики в производстве керамических материалов даст возможность значительно утилизировать промышленные отходы, сэкономить дефицитные традиционные природные материалы, расширить сырьевую базу строительных материалов и внесет значительный вклад в охрану окружающей среды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведев Д.А. утвердил основы госполитики в области экологии до 2030 года // Электронное периодическое издание «РИАН. Ру». URL: <http://eco.ria.ru/nature/20120430/638295819.html> (дата обращения: 14.05.2012).
2. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К. Использование отходов золоторудного месторождения, нефтехимии и энергетики в производстве керамических материалов – перспективное направление для «зеленой» экономики // Экология и промышленность России. 2015. № 5. С. 37–41.
3. Беспалова К.В. Оценка экологического состояния, региональное нормирование и плата за загрязнение водных объектов // Вестн. Самар. гос. экон. ун-та. Спец. вып. 2014. С. 66–73.
4. Справочник инженера по охране окружающей среды (эколога). М.: Инфра-инженерия, 2005. 864 с.
5. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Классификация техногенного сырья предприятий металлургии и энергетики по ее функциональной пригодности в производстве керамических материалов // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 10. С. 33–36.
6. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Физико-химические процессы структурообразования в керамических материалах на основе отходов цветной металлургии и энергетики. Усть-Каменогорск: Вост.-Казахст. гос. техн. ун-т, 2000. 375 с.

7. Putz H.-J., Hamm U., Schabel S. Final fate of residues from the German recovered paper processing industry // Research Forum on Recycling, Quebec City, Sept. 27-29. 2004. PARTAC. 2004. P. 239–244.
8. Волынкина Е.П., Коротков С.Г. Подготовка специалистов в области переработки отходов в Сибирском государственном индустриальном университете // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе: Сб. докл. второй Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2008. С. 18–23.
9. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 240 с.
10. Сулейменов С.Т. Физико-химические процессы структурообразования строительных материалов и минеральных отходов промышленности. М.: Мanusкрип, 1996. 298 с.

**Абдрахимов Владимир Закирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный экономический университет

**Кайракбаев Аят Крымович**, канд. физ.-мат. наук, доц.  
Казахско-Русский международный университет, Актобе, Казахстан

**Абдрахимова Елена Сергеевна**, канд. техн. наук, доц.  
Самарский государственный национальный исследовательский университет

**Лобачев Дмитрий Анатольевич**, ст. препод.; E-mail: 2245115@mail.ru  
Самарский государственный технический университет

Получено после доработки 23.01.18

**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, DSc, Professor; E-mail: 3375892@mail.ru  
Samara State University of Economics, Russia

**Kayrakbaev Ayat Krymovich**, PhD, Ass. Professor  
Kazakh-Russian International University, Aktobe, Kazakhstan

**Abdrakhimova Elena Sergeevna**, PhD, Ass. Professor  
Samara State National Research University, Russia

**Lobachev Dmitriy Anatolyevich**, Senior Lecturer; E-mail: 2245115@mail.ru  
Samara State Technical University, Russia

## **USE OF WASTE FUEL AND ENERGY COMPLEX IN THE PRODUCTION OF CERAMIC BRICKS WITHOUT THE USE OF TRADITIONAL, NATURAL MATERIALS**

As a result of work it is received: production of ceramic bricks on the basis of waste of fuel and energy complex without the use of natural traditional raw materials. Studies have shown that the use of light fraction ash as an alkali-containing slag Krasnoyarsk CHPP-2 as an alkali-containing, and slag Novo-Irkutsk CHPP as an iron-containing smoother allows to obtain a ceramic brick of the brand 125 on the basis of inter-shale clay without the use of natural traditional materials. The use of waste fuel and energy complex will allow to dispose of multi-ton man-made deposits and reduce the anthropogenic load in many regions of Russia.

**Key words:** mislava clay, “green” economy, ash light fraction, the slag from the combustion of brown coal, iron slag, ceramic materials, waste of energy.

### **REFERENCES**

1. Medvedev D.A. utverdil osnovy gospolitiki v oblasti ekologii do 2030 goda [Medvedev D.A. approved the principles of state policy in the field of ecology until 2030] Electronic periodical “RIAN. Ru”. Available at: <http://eco.ria.ru/nature/20120430/638295819.html> (accessed 14.05.2012). (in Russian)



2. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S., Kayrakbaev A.K. Ispol'zovanie otkhodov zolotorudnogo mestorozhdeniya, neftekhimii i energetiki v proizvodstve keramicheskikh materialov – perspektivnoe napravlenie dlya “zelenoy” ekonomiki [Use of waste gold Deposit, petrochemicals and energy in the production of ceramic materials is a promising direction for green economy]. *Ecologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia]. 2015. No. 5. Pp. 37–41. (in Russian)
3. Bespalova K.V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya, regional'noe normirovanie i plana za zagryaznenie vodnykh ob'ektov [Assessment of ecological condition, regional regulation and the payment for pollution of water objects]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State University of Economics]. Special edition. 2014. Pp. 66–73. (in Russian)
4. Spravochnik inzhenera po okhrane okruzhayushchey sredy (ecologa) [The engineering Handbook on environmental protection (ecologist)]. Moscow: Infra-engineering, 2005. 864 p. (in Russian)
5. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Klassifikatsiya tekhnogenogo syr'ya predpriyatiy metallurgii i energetiki po ee funktsional'noy prigodnosti v proizvodstve keramicheskikh materialov [Classification of technogenic raw materials of mills according to their functional serviceability in production of ceramic materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2004. No. 10. Pp. 33–36. (in Russian)
6. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Fiziko-khimicheskie protsessy strukturoobrazovaniya v keramicheskikh materialakh na osnove otkhodov tsvetnoy metallurgii i energetiki [Physical and chemical processes of structure formation in ceramic materials based on wastes of non-ferrous metallurgy and power engineering]. Ust'-Kamenogorsk: East-Kazakhstan state technical University, 2000. 375 p. (in Russian)
7. Putz H.-J., Hamm U., Schabel S. Final fate of residues from the German recovered paper processing industry // Research Forum on Recycling, Quebec City, Sept. 27-29. 2004. PARTAC. 2004. Pp. 239–244.
8. Volynkina E.P., Korotkov S.G. Podgotovka spetsialistov v oblasti pererabotki otkhodov v Sibirskom gosudarstvennom industrial'nom universitete [Training of experts in the field of waste processing of the Siberian state industrial University]. *Upravlenie otkhodami – osnova vosstanovleniya ekologicheskogo ravnovesiya v Kuzbasse: sbornik dokladov vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Waste Management – the basis for restoration of ecological balance in the Kuzbass: a Collection of papers of the second International scientific-practical conference]. Novokuznetsk, 2008. Pp. 18–23. (in Russian)
9. Pavlov V.F. Fiziko-khimicheskie osnovy obzhiga izdeliy stroitel'noy keramiki [Physico-chemical principles of firing building ceramic products]. Moscow, Stroyizdat, 1977. 240 p. (in Russian)
10. Suleymenov S.T. Fiziko-khimicheskie protsessy strukturoobrazovaniya stroitel'nykh materialov i mineral'nykh otkhodov promyshlennosti [Physical and chemical processes of structure formation in building materials and mineral wastes of industry]. Moscow, Manuscrip, 1996. 298 p. (in Russian)

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



УДК 628.316

**Ю.А. ФЕОФАНОВ, М.С. РЯХОВСКИЙ**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ СОРБЦИОННОЙ ЗАГРУЗКИ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ И ФЕНОЛОВ**

Рассматривается возможность формирования комбинированных сорбционных загрузок с развитой переходной поверхностью с помощью разных марок товарных активированных углей с различной структурой, объемом и размером пор. Такие загрузки необходимы для эффективной очистки природных и сточных вод, содержащих смесь растворенных органических примесей с разной крупностью молекул. Приведены результаты исследований по выбору оптимального вида комбинированной загрузки и определению ее рабочих характеристик при извлечении из водных растворов нефтепродуктов и фенолов.

**Ключевые слова:** очистка воды от растворенных органических загрязнений, адсорбционная очистка воды, комбинированная загрузка, активированные угли, сорбенты с развитой переходной пористостью, динамическая и статическая емкость сорбента.

**Введение.** Для глубокой очистки природных и сточных вод от растворенных органических примесей (РОП) с успехом применяется сорбция как наиболее эффективный метод очистки. Этот метод позволяет извлекать из воды такие широко распространенные и экологически опасные РОП, как нефтепродукты, фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества и другие, и достигать нормативных показателей качества очищенной воды.

Эффективность использования сорбционных материалов определяется составом и свойствами загрязняющих веществ, видом сорбента, его сорбционной способностью к данному виду или видам загрязнений, условиями проведения процесса (температура, давление и др.). Основными рабочими характеристиками сорбентов, применяемых для извлечения из воды РОП, являются их динамическая и статическая сорбционные емкости по видам загрязнений. Эти характеристики во многом определяются площадью активной поверхности сорбента, которая, в свою очередь, обусловлена степенью развития его внутренней пористости.

Размеры и суммарный объем пор служат техническими характеристиками активированных углей (АУ), определяющими их адсорбционную способ-

© **Феофанов Ю.А., Ряховский М.С., 2018**

ность. Общая пористость АУ составляет обычно 60–75 % его объема, а удельная площадь поверхности внутренних пор – 400–900 м<sup>2</sup> на 1 г сорбента. При этом существенное влияние имеет структура пористости сорбента по их размерам. В зависимости от преобладающего размера пор АУ делят на мелкопористые, крупнопористые и угли с переходной пористостью [1–7]. Принятая классификация пористости сорбентов (по М.М. Дубинину, 1947) разделяет ее на микропоры диаметром до 2 нм (20 Å), мезопоры – от 2 до 50 нм (20–500 Å) и макропоры диаметром более 50 нм. К переходной пористости отнесены поры диаметром от 2 до 100 нм. Удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) микропор АУ обычно составляет 500–1000 м<sup>2</sup>/г, переходная пористость имеет  $S_{уд} = 200–500$  м<sup>2</sup>/г, у макропор  $S_{уд} = 0,5–2,0$  м<sup>2</sup>/г [1–4, 6].

Микропоры играют определяющую роль в процессах адсорбции растворенных органических веществ, имеющих малые размеры молекул (менее 1 нм). Переходные поры позволяют адсорбировать из растворов примеси с молекулами больших размеров (более 2,0 нм), сорбционная значимость переходных пор может вносить существенный вклад в общую сорбционную емкость сорбента. Макропоры в сорбционном процессе выполняют роль каналов, по которым осуществляется транспорт загрязняющих веществ к микро- и мезопорам. Адсорбционная емкость макропор не имеет существенного значения, ввиду малой величины их удельной поверхности [1, 6].

Для характеристики активности АУ при оценке их адсорбционной емкости используют различные показатели: активность по йоду (йодное число) и метиленовому синему, статическая и динамическая емкость сорбента по определенному виду загрязнений. Активность по йоду связана с развитой микропористой структурой сорбента, а активность по метиленовому синему характеризует процесс сорбции молекул больших размеров (диаметром >2 нм), протекающих на поверхности мезо- и макропор (ГОСТ 4453–74).

Поглощающая способность сорбента по разным видам загрязнений определяется его статической и динамической емкостью по этим веществам. Величины статической и динамической емкости адсорбента зависят от вида загрязнения (или загрязнений), его концентрации, состава воды и определяются опытным путем (ГОСТ 33588–2015, ГОСТ 33589–2015).

**Основная часть.** Одним из главных направлений повышения эффективности процесса очистки природных и сточных вод методом сорбции, увеличения производительности сорбентов являются разработка новых видов активированных углей, создание модифицированных, комплексных и комбинированных загрузок и др. [1–4, 7, 8].

Технические характеристики адсорбента должны соответствовать конкретному виду обрабатываемой воды, составу и концентрации содержащихся в ней загрязнений, в частности, параметры пористой структуры сорбента должны быть соразмерны величине молекул загрязнений [9]. Так, использование микропористых АУ для удаления из воды ряда органических веществ с большим размером молекул будет неэффективно из-за сферической недоступности микропор для них. В этом случае необходимо иметь АУ с развитой переходной пористостью. Однако получение таких углей связано со значительными затратами сырья и энергии (обгар достигает 75 % и выше [10]) и экономически не оправдано.

Среди основных видов растворенных органических веществ техногенного происхождения, которые загрязняют воды поверхностных и подземных водных объектов, наиболее распространены и экологически опасны нефтепродукты и соединения фенольной группы [8, 10, 11]. При одновременном присутствии этих видов РОП в очищаемой воде для их очистки, учитывая существенную разницу размеров молекул загрязнений (усредненный размер молекул фенола 0,71 нм, нефтепродуктов 1,8 нм), необходимо применять адсорбенты с переходной пористостью от микро- до макропор. Такую сорбционную загрузку с развитой переходной поверхностью можно создать, используя для этого совместно разные марки АУ с различной структурой, объемом и размером пор и формируя из них комбинированную загрузку. Пособно располагая разные виды АУ внутри сорбционного фильтра, комбинируя соотношение и объемы этих слоев, можно создавать сорбционную загрузку с разными переходной пористостью и переходной поверхностью.

Основная цель работы заключалась в создании комбинированной сорбционной загрузки с переходной пористостью из отечественных товарных АУ разных марок и определении ее сорбционной емкости для извлечения из водных растворов нефтепродуктов и фенолов.

Для создания комбинированной сорбционной загрузки (КСЗ) был использован активированный уголь крупнопористый марки БАУ-А и мелкопористый марки МАУ-2А. КСЗ представляет собой двухслойную загрузку из АУ указанных марок, причем нижний слой загрузки фильтра состоит из угля марки МАУ-2А, а верхний слой – из угля марки БАУ-А. В соответствии с диапазоном пористости этих видов АУ уголь марки БАУ-А используется, главным образом, для адсорбции нефтепродуктов, а уголь марки МАУ-2А – для сорбции фенолов. Таким образом, искусственно создается требуемая переходная пористость и поверхность, в результате чего адсорбционная емкость загрузки увеличивается. Разница в насыпной плотности и структуре гранул (частиц) выбранных АУ в такой загрузке позволяет производить ее промывку и регенерацию без нарушения состава. Угли указанных марок производятся на одинаковой основе, что дает возможность осуществлять их совместную регенерацию традиционными способами.

Технические характеристики выбранных видов углей:

– Уголь марки БАУ-А – уголь березовый активный дробленый, суммарная пористость по воде 1,54 см<sup>3</sup>/г. Насыпная плотность ≤ 240 г/дм<sup>3</sup>. Размер гранул 0,5–1,0 мм. Объем микропор 0,22 см<sup>3</sup>/г, мезопор 0,10, макропор 1,22 см<sup>3</sup>/г (ГОСТ 6217–74).

– Уголь марки МАУ-2А – модифицированный азотсодержащий уголь, общая внутренняя поверхность по БЭТ 800 м<sup>2</sup>/г. Насыпная плотность 270 г/дм<sup>3</sup>. Размер гранул 1,0–2,8 мм. Объем микропор 0,40 см<sup>3</sup>/г, мезопор 0,08, макропор 0,30 см<sup>3</sup>/г [11].

Для сравнительной оценки было создано три разных вида КСЗ:

КСЗ-1 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ-2А, верхний слой – БАУ-А; с равным распределением объемов;

КСЗ-2 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ-2А, верхний слой – БАУ-А; с распределением объемов 62,5 % БАУ-А и 37,5 % МАУ-2А;

КСЗ-3 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ-2А, верхний слой – БАУ-А; с распределением объемов 70 % БАУ-А и 30 % МАУ-2А.

Создавать комбинированные загрузки с объемом угля БАУ-А меньше чем 50 % от общего ее объема признано нецелесообразным, учитывая, что в реальных природных и сточных водах содержание нефтепродуктов обычно превышает концентрацию фенолов.

На рис. 1 показано соотношение объемов микро-, мезо- и макропор в однородных и комбинированных сорбционных загрузках из АУ указанных марок.

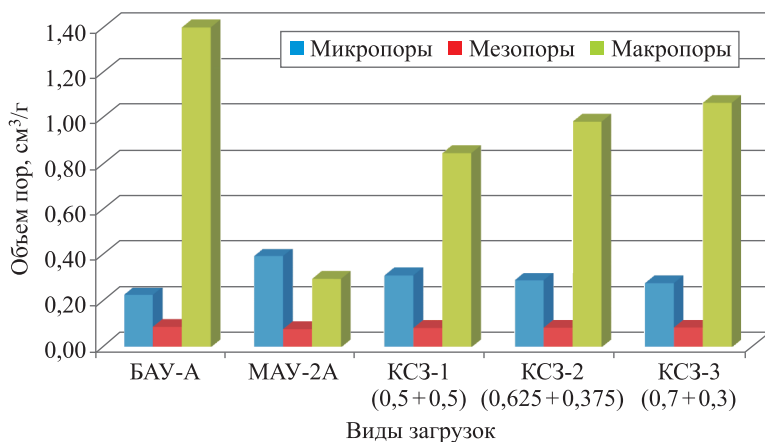


Рис. 1. Распределение пористости (по объему пор) разных видов сорбционных загрузок

Как видно из рис. 1, варьируя соотношением объемов исходных АУ, можно создать из этих углей комбинированные виды загрузки с различным распределением пористости. Для выбора оптимального состава комбинированной загрузки первоначально были проведены сравнительные исследования на лабораторных фильтрах с загрузками КСЗ-1, КСЗ-2 и КСЗ-3. В дальнейшем, на выбранном виде КСЗ проводились опыты по определению динамической и статической емкости сорбента на растворах нефтепродуктов и фенолов разной концентрации.

**Методика проведения исследований.** Исследования по выбору оптимального вида комбинированной загрузки и по определению ее динамической емкости проводились на лабораторных фильтрах с загрузками КСЗ-1, КСЗ-2 и КСЗ-3. Объем загрузок в фильтровальных колонках составлял 0,68 дм³, высота слоя загрузки – 0,50 м. На фильтры подавался модельный раствор на основе дистиллированной воды, в качестве нефтепродуктов использовали легкое моторное масло, в качестве фенола – гидрохинон. В водном растворе содержание нефтепродуктов принималось в пределах 0,20–10 мг/дм³, фенолов – 0,023–10 мг/дм³. Температура раствора при проведении экспериментов была постоянной – 20 °С. Скорости фильтрования варьировались в диапазоне 2,65–3,26 м/ч.

Исследования статической сорбционной емкости КСЗ проводились на контакте сорбента с раствором, в котором концентрация нефтепродуктов составляла от 10 до 148 мг/дм³, фенолов – от 10 до 948 мг/дм³. В опытах

навески сорбента, масса которых назначалась в зависимости от концентрации загрязнений воды (от 0,01 до 10,0 г), заливались 1 дм<sup>3</sup> раствора и при периодическом перемешивании выдерживались в течение 7 дней до установления равновесия. Рабочий раствор нефтепродуктов готовили, используя теплую (~50 °С) воду, в которую вливали дизельное топливо (при высокой концентрации нефтепродуктов его предварительно смешивали с растворителем уайт-спиритом) и затем перемешивали механической мешалкой в течение 2 ч. Водный раствор отстаивался 5 дней, а всплывшие на поверхность нефтепродукты удаляли с помощью фильтровальной бумаги [11, 12]. Анализы проб воды на содержание нефтепродуктов и фенолов проводились в соответствии со стандартными методиками (ПНД Ф 14.1:2:4.168–2000, РД 52.24.480–2006).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты сравнительных исследований комбинированных сорбционных загрузок КСЗ-1 и КСЗ-3 при очистке воды от нефтепродуктов и фенолов приведены на рис. 2. На них

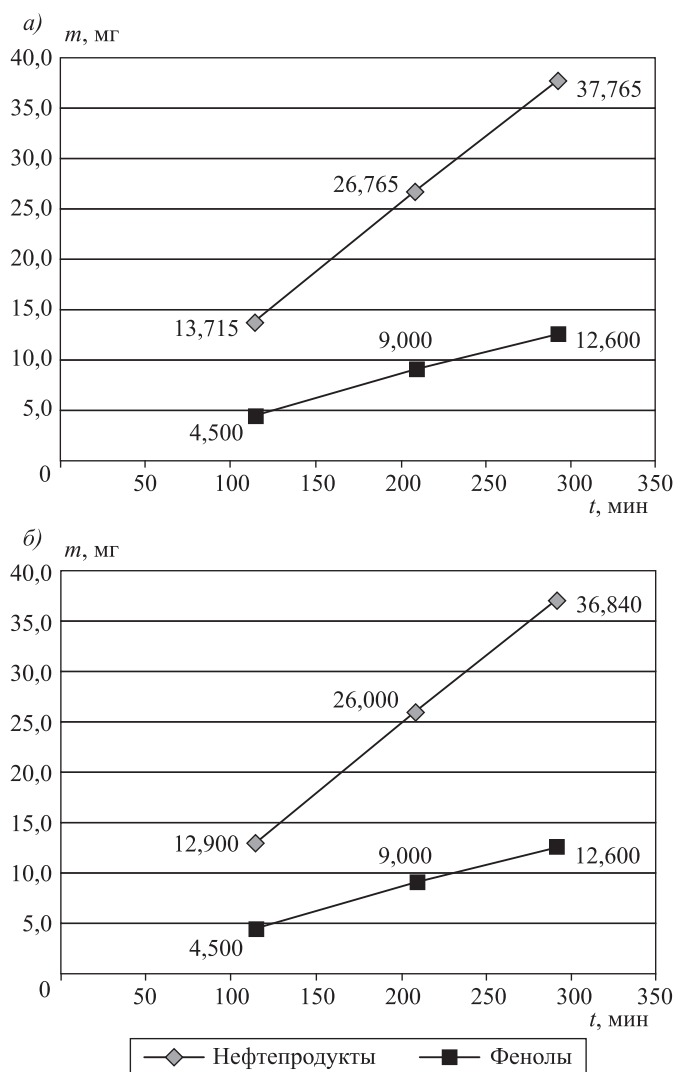


Рис. 2. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на загрузке КСЗ-1 (а) и КСЗ-3 (б)

показана динамика изменения количества поглощенных сорбционной загрузкой растворенных нефтепродуктов и фенолов в ходе работы фильтров с загрузкой КСЗ-1 и КСЗ-3 (при исходной концентрации нефтепродуктов в растворе  $2,80 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов  $0,90 \text{ мг/дм}^3$ ).

Анализ результатов исследований показал, что процесс сорбции нефтепродуктов на комбинированных загрузках КСЗ-1, КСЗ-2 и КСЗ-3 протекал с примерно одинаковыми скоростями, которые определялись, прежде всего, начальной концентрацией загрязнений. Соединения фенольной природы сорбировались всеми испытанными видами комбинированных загрузок практически одинаково. По техническим свойствам лучшей из испытанных загрузок оказалась загрузка КСЗ-1. Опыты по очистке водных растворов нефтепродуктов и фенолов разной концентрации показали, что процесс сорбции нефтепродуктов в динамических условиях на загрузке КСЗ-1 протекал более эффективно по сравнению с однородными загрузками из АУ марок БАУ-А и МАУ-2А [11, 12]. Дальнейшие исследования по определению сорбционной емкости комбинированной загрузки в динамических условиях проводились на лабораторном фильтре с загрузкой КСЗ-1. В этих опытах начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе составляла  $10 \text{ мг/дм}^3$ , фенола –  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Расход воды, подаваемой на фильтр, –  $3,0 \text{ л/ч}$ , скорость фильтрации –  $2,17 \text{ м/ч}$ ; масса загрузки –  $168 \text{ г}$ .

Результаты исследований динамики сорбции нефтепродуктов и фенолов на загрузке КСЗ-1 в виде выходных кривых поглощения нефтепродуктов и фенолов (при указанной исходной концентрации нефтепродуктов и фенолов) показаны на рис. 3. Как видно из представленных данных, полное насыщение сорбционной загрузки нефтепродуктами наступило после пропуска через фильтр  $765 \text{ л}$  исходного раствора (после  $255 \text{ ч}$  работы фильтра). Проскок нефтепродуктов в фильтрате был зафиксирован через  $100 \text{ ч}$  работы фильтра (через фильтр было пропущено  $300 \text{ л}$  исходного раствора). «Проскок» фенолов произошел через  $59 \text{ ч}$  (пропущено  $177 \text{ л}$  исходного раствора), а полное насыщение сорбционной загрузки фенолами наступило после  $99 \text{ ч}$  работы фильтра (пропущено  $297 \text{ л}$  исходного раствора).

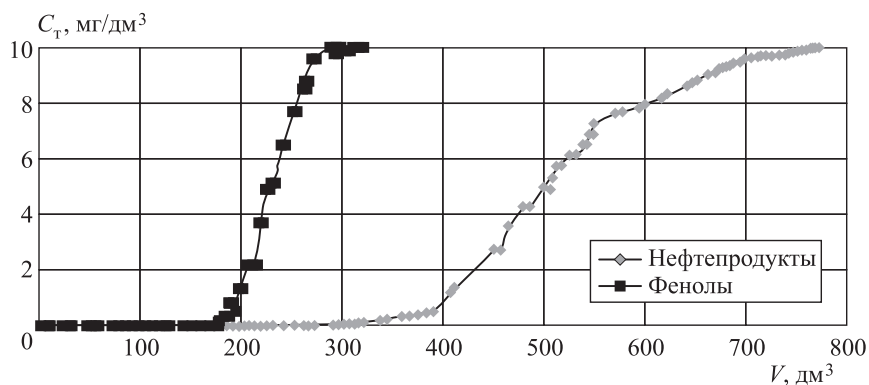


Рис. 3. Изменение концентрации нефтепродуктов и фенолов в очищенной жидкости  $C_T$  в ходе работы сорбционного фильтра с КСЗ-1

Динамическая сорбционная емкость загрузки фильтра определялась как [1–4, 11]

$$\text{ДУЕ} = \frac{(C_0 - C_T)W_{\text{ж}}}{m}, \quad (1)$$

где ДУЕ – динамическая удельная сорбционная емкость загрузки, мг/г;  
 $C_0, C_T$  – концентрация загрязнений соответственно в исходной и очищенной воде после  $T$ , ч работы фильтра, мг/дм<sup>3</sup>;

$q$  – расход воды, л/ч;

$m$  – масса сорбента, г;

$W_{\text{ж}} = qT$  – объем пропущенного через фильтр исходного раствора, л.

Изменение сорбционной удельной емкости загрузки КСЗ-1 по нефтепродуктам и фенолам в динамических условиях (ДУЕ) показано на рис. 4. Там же нанесены величины полной динамической удельной емкости загрузки (ПДУЕ) и динамической удельной емкости до проскока загрязнений (ДУЕ<sub>пр</sub>).

Результаты исследований по определению динамической емкости комбинированной сорбционной загрузки КСЗ-1 при работе на растворе нефтепродуктов и фенолов (с концентрацией 10 и 10 мг/дм<sup>3</sup>) сведены в таблицу.

Учитывая весьма низкие значения предельно допустимых концентраций загрязнений в очищенной воде, определяемых нормами (по нефтепродуктам

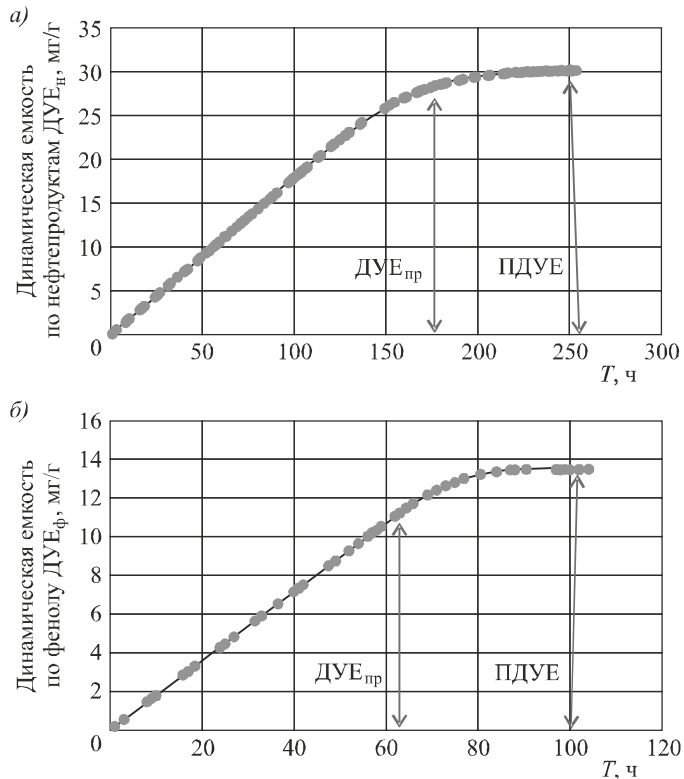


Рис. 4. Изменение динамической сорбционной емкости загрузки КСЗ-1 по нефтепродуктам (а) и фенолу (б) от времени работы сорбционного фильтра



**Динамическая емкость комбинированной сорбционной загрузки КСЗ-1**

Показатель	Вид загрязнений	
	нефтепродукты	фенолы
Исходная концентрация в растворе, мг/дм <sup>3</sup>	10,0	10,0
ПДУЕ загрузки, мг/г	30,1	13,47
ДУЕ загрузки до проскока загрязнений, мг/г	17,85	10,53

0,05–0,10 мг/дм<sup>3</sup> и по фенолам 0,001 мг/дм<sup>3</sup>), величину удельной динамической емкости сорбционной загрузки до «проскока» загрязнений можно считать рабочей сорбционной емкостью – ДУЕ<sub>пр</sub> = РДУЕ.

Приведенные данные показывают, что величина рабочей динамической сорбционной емкости (РДУЕ) загрузки КСЗ-1 составляет 59,3 и 78,2 % (соответственно по нефтепродуктам и фенолам) от величины ее полной динамической сорбционной емкости.

Исследования по определению статической емкости сорбента КСЗ-1 показали, что сорбционная способность загрузки в значительной степени зависела не только от вида загрязнений, но и от их концентрации. Обработкой экспериментальных данных была получена зависимость величины полной статической сорбционной емкости комбинированной загрузки КСЗ-1 по нефтепродуктам и фенольным соединениям от исходной концентрации этих загрязнений в виде

$$СУЕ = aC_0^\alpha, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $\alpha$  – эмпирические коэффициенты, для нефтепродуктов –  $a = 13,33$ ,  $\alpha = 0,646$ , для фенолов –  $a = 3,67$ ,  $\alpha = 0,76$ .

Экспериментально установлено, что для комбинированной загрузки КСЗ-1 величина полной динамической сорбционной емкости составляет 51,9 и 64,1 % соответственно по нефтепродуктам и фенолам от ее полной статической емкости (при начальной концентрации нефтепродуктов – 10 мг/дм<sup>3</sup> и фенолов – 10 мг/дм<sup>3</sup>).

Используя полученные соотношения между СУЕ, ПДУЕ и РДУЕ, а также уравнение (2), можно произвести расчет сорбционной емкости комбинированной сорбционной загрузки при различном исходном содержании растворенных нефтепродуктов и фенолов в воде.

**Выводы.** 1. При содержании в очищаемой воде различных видов растворенных органических веществ с разными размерами молекул необходимо применять адсорбенты с переходной пористостью от микро- до макропор. Создать такую сорбционную загрузку с развитой переходной поверхностью можно, используя совместно микро- и макропористые активированные угли разных марок. Варьируя соотношением объемов исходных углей можно сформировать из них комбинированную загрузку с различным распределением пористости.

2. В результате исследований по очистке воды от нефтепродуктов и фенолов на комбинированной сорбционной загрузке КСЗ-1 изучена динамика сорбции этих загрязнений на ней, получены данные о величинах удельной

статической и динамической емкости этой загрузки, а также рабочей сорбционной емкости (до момента проскока загрязнений на фильтре). Установлено, что для загрузки КСЗ-1 величина полной динамической сорбционной емкости составляет 51,9 и 64,1 % соответственно по нефтепродуктам и фенолам от ее полной статической емкости. Полученные зависимости позволяют производить расчет сорбционной емкости комбинированной сорбционной загрузки КСЗ-1 при различном исходном содержании растворенных нефтепродуктов и фенолов в воде.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.
2. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Рода И.Г. Адсорбция органических веществ из воды. Л.: Химия, 1990. 256 с.
3. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.
4. Парфит Г. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 488 с.
5. Артемов А.В., Пинкин А.В. Сорбционные технологии очистки воды от нефтяных загрязнений // Вода: химия и экология. 2008. № 1. С. 19–25.
6. Трусова В.В. Очистка оборотных и сточных вод предприятий от нефтепродуктов сорбентом на основе бурых углей: Дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2014. 132 с.
7. Технический справочник по обработке воды: в 2 т. СПб.: Новый журн., 2007. 1696 с.
8. Гарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. Киев: Наук. думка, 1981. 176 с.
9. Назаров В.Д. Очистка нефтесодержащих вод: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1996. 31 с.
10. Веприкова Е.В., Терещенко Е.А., Чесноков Н.В., Щипко М.Л., Кузнецов Б.Н. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия. 2010. № 3. С. 299, 301.
11. Ряховский М.С. Очистка природных вод с применением комплексной сорбционной загрузки: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 202 с.
12. Феофанов Ю.А., Ряховский М.С. Сравнительная оценка сорбционных емкостей однородных и комплексной загрузок при очистке воды // Вода: химия и экология. 2015. № 7. С. 82–87.

**Феофанов Юрий Александрович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: ufeofanov@rambler.ru

Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет

**Ряховский Михаил Сергеевич**, канд. техн. наук, рук. проекта ООО «ИСП», г. Санкт-Петербург

Получено 22.01.18

**Feofanov Yuriy Alexandrovich**, DSc, Professor; E-mail: ufeofanov@rambler.ru

Saint-Petersburg University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Ryakhovskiy Mikhail Sergeevich**, PhD, Project Director ООО «ICR», Saint-Petersburg, Russia

## **FUNCTIONAL SPECIFICATIONS OF THE COMBINED SORPTION MEDIA LOADING DURING WATER PURIFICATION FROM OIL PRODUCTS AND PHENOLS**

The article is dedicated to the possibility of forming the combined sorption media loadings with developed transitional surface, using different activated carbon brands with diverse structure, volume and pore size. Such loadings are indispensable during purification of natural and discharged water that contains dissolved organic impurities with different molecule granularity. There are given the research results of the selection of the most suitable sort of the combined sorption media loading and its functional definitions during the extraction of oil products and phenols from water solution.

**Key words:** water purification from dissolved organic impurities, adsorbing water treatment, combined loading, activated carbon, sorbents with developed porosity, dynamic and static sorbent capacity.

### REFERENCES

1. Smirnov A.D. Sorbtsionnaya ochistka vody [Sorptional clearing of water]. Leningrad, 1982. 168 p. (in Russian)
2. Koganovskiy A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M., Roda I.G. Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody [Adsorption of organic substances from water]. Leningrad, 1990. 256 p. (in Russian)
3. Gregg S.J. Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost' [Adsorption, Surface Area and Porosity]. Moscow, 1984. 306 p. (in Russian)
4. Parfitt G.D. Adsorbtsiya iz rastvorov na poverkhnosti tverdykh tel [Adsorption from solution at the solid liquid interface]. Moscow, 1986. 488 p. (in Russian)
5. Artemov A.V., Pinkin A.V. Sorbtsionnye tekhnologii ochistki vody ot neftyanykh zagryazneniy [Sorption technology of water purification from oil pollution]. Voda: khimiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]. 2008. No. 1. Pp. 19–25. (in Russian)
6. Trusova V.V. Ochistka oborotnykh i stochnykh vod predpriyatiy ot nefteproduktov sorbentom na osnove burykh ugley: diss. kand. tekhn. nauk [Purification of circulating and waste waters of enterprises from petroleum products by a sorbent on the basis of brown coals: Diss. PhD]. Irkutsk, 2014. 132 p. (in Russian)
7. Tekhnicheskii spravochnik po obrabotke vody [Water Treatment Handbook]. Saint-Petersburg, 2007. 1696 p. (in Russian)
8. Tarasevich Yu.I. Prirodnye sorbenty v protsessakh ochistki vody [Natural sorbents in process of water purification]. Kiev: Nauk. dumka, 1981. 176 p. (in Russian)
9. Nazarov V.D. Ochistka neftesoderzhashchikh vod: avtoref. doktora tekhnicheskikh nauk [Cleaning of oil-containing water: autoabstract diss. DSc]. 1996. 31 p. (in Russian)
10. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Chesnokov N.V., Shchipko M.L., Kuznetsov B.N. Osobennosti ochistki vody ot nefteproduktov s ispol'zovaniem neftyanykh sorbentov, fil'truyushchikh materialov i aktivnykh ugley [Peculiarity of water purification from oil products with the use of oil sorbents, filtering materials and active coals]. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya [Journal of Siberian Federal University. Chemistry]. 2010. No. 3. Pp. 299, 301. (in Russian)

11. Ryakhovskiy M.S. Ochistka prirodnykh vod s primeneniem kompleksnoy sorbtionnoy zagruzki: diss. kand. tekhn. nauk [Purification of natural water with the use of complex sorption loading: Diss. PhD]. St.-Petersburg, 2016. 202 p. (in Russian)
  12. Feofanov Yu.A., Ryakhovskiy M.S. Sravnitel'naya otsenka sorbtionnykh emkostey odnorodnykh i kompleksnoy zagruzok pri ochistke vody [The comparative evaluation of the sorptive capacities of the homogeneous and complex filters media]. Voda: khimiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology]. 2015. No. 7. Pp. 82–87. (in Russian)
-

## **ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**



УДК 532.592

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

### **ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

Приведены результаты экспериментального исследования динамического воздействия поверхностных гравитационных волн на торцевую стенку прямоугольного контейнера, частично заполненного водой и колеблющегося по гармоническому закону относительно горизонтальной оси, перпендикулярной боковым стенкам. Показано, что чем больше интенсивность набегающих волн на торцевую стенку контейнера, тем больше расхождение между фактическим давлением, действующим на торцевую стенку, и давлением, рассчитанным по высоте заплеска на основе гидростатического закона. Приведен пример заплеска на стенку, в котором максимальная высота подъема капель, образующихся при распаде струи, достигала 2,5 начальной глубины.

**Ключевые слова:** волны на воде, давление воды на стенку, колеблющийся контейнер, заплеск на стенку, кумулятивная струя.

Научное направление, посвященное анализу движения жидкости со свободной поверхностью в подвижном сосуде, находит применение при решении ряда крупных прикладных проблем. К их числу относятся вопросы безопасной транспортировки жидких грузов и предотвращения плескания жидкого топлива в баках ракетных двигателей. Исследованию подобных задач посвящены работы отечественных ученых [1–4]. За рубежом результаты изучения различных гидродинамических аспектов рассматриваемого явления описаны в статьях [5–7].

В нашей работе основное внимание уделяется случаю гармонических угловых колебаний прямоугольного контейнера в вертикальной продольной плоскости его симметрии относительно горизонтальной оси, расположенной в середине дна. Существенной особенностью является то, что здесь рассмотрены все частоты колебаний контейнера, при которых полезный сигнал еще различим на фоне помех. Кинематические характеристики рассматриваемых волн приведены в [8]. В данной работе описаны динамические характеристики волн. Теория волн при продольных колебаниях контейнера развита в [4, 9].

**Методика эксперимента.** Схема эксперимента приведена на рис. 1.

© Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В., 2018

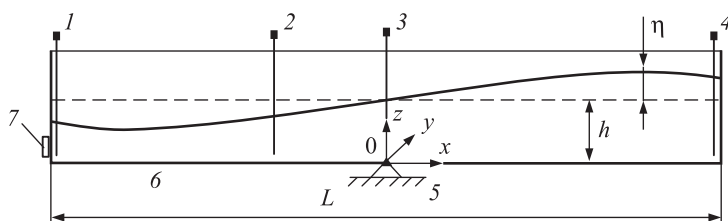


Рис. 1. Схема эксперимента

1–4 – волномеры; 5 – шарнирная опора; 6 – дно контейнера;  
7 – датчик давления

Опыты выполнялись в прямоугольном контейнере длиной 1,98 м, шириной 0,08 и высотой 0,2 м. Длина его рабочей части изменялась в различных сериях опытов с помощью дополнительной непроницаемой перегородки. Контейнер в горизонтальном положении заполнялся водопроводной водой до глубины  $h$ . В опытах контейнер совершал заданные угловые колебания по гармоническому закону относительно неподвижной горизонтальной оси, перпендикулярной боковым стенкам.

Далее используется связанная с контейнером подвижная прямоугольная система координат, показанная на рис. 1. Ее начало расположено в продольной плоскости симметрии контейнера в середине дна. В этой системе контейнер неподвижен, а вода движется. Система привода контейнера в движение включала электродвигатель постоянного тока и кривошипно-шатунный механизм. Большое отношение длины его шатуна (0,97 м) к длине кривошипа (0,0115 м) обеспечивало синусоидальный характер колебаний контейнера с погрешностью не более 1,2 %.

Рассмотрим динамическое воздействие волн на торцевую стенку контейнера. При нескольких значениях длины контейнера амплитуды его колебаний и начальной глубины воды определяли отклонение свободной поверхности воды от положения равновесия и давление воды на левую торцевую стенку контейнера.

В опытах измерялись колебания уровня свободной поверхности воды в поперечных сечениях контейнера 1–4 (см. рис. 1) на продольной оси его симметрии. Сечение 1 расположено на расстоянии 2 мм от левой торцевой стенки, 2 – на расстоянии  $1/3$  длины контейнера от его левой торцевой стенки, 3 – на середине длины контейнера, сечение 4 – на расстоянии 3 мм до правой торцевой стенки.

Колебания свободной поверхности отслеживались закрепленными на контейнере волномерами резистивного типа с двумя вертикальными электродами, расположенными в поперечной плоскости контейнера на расстоянии 5 мм друг от друга. Электроды изготовлены из нихромовой проволоки диаметром 0,3 мм. Разрешающая способность волномеров по амплитуде колебаний составляла 0,2 мм. Их собственная частота равнялась 30 Гц. Калибровочные характеристики были стабильными. В диапазоне колебаний уровня свободной поверхности в данных опытах калибровочные характеристики были линейными.

Давление измерялось датчиками с диаметром воспринимающего элемента 1 см и собственной частотой свыше 50 кГц. Реально, собственная частота соответствующих измерительных систем была намного ниже из-за демпфи-

рующего действия воды. Калибровочные характеристики датчика давления были линейными. Он располагался на левой торцевой стенке на высоте от дна  $z_d$ . Ось датчика совпадала со средней плоскостью контейнера.

Электрические сигналы волномеров и датчика давления регистрировались компьютером с частотой дискретизации 200 Гц. В ряде опытов осуществлялась видеосъемка с частотой 125 кадров в секунду. При видеосъемке вода подкрашивалась небольшим количеством чернил.

Статическая калибровка измерительных систем проводилась непосредственно на экспериментальной установке в ходе ее заполнения водой и опорожнения. Положение уровня свободной поверхности при калибровке определялось с помощью мерной иглы. Высота заплеска воды на торцевую стенку устанавливалась по результатам видеосъемки.

**Некоторые результаты опытов.** Результаты измерений отклонений свободной поверхности  $\eta$  от ее начального положения и давления на торцевой стенке контейнера  $p$  от их положений в состоянии покоя, а также закона движения контейнера  $a$  (вертикального перемещения угловой точки на дне контейнера у торцевой стенки) приведены на рис. 2.

Кривая 1 соответствует показаниям волномера у левой торцевой стенки, кривая 2 – показаниям волномера, расположенного на расстоянии  $1/3$  длины контейнера от левой торцевой стенки, кривая 3 – показаниям датчика давления на левой торцевой стенке на расстоянии 0,02 м от дна, кривая 4 – закон движения контейнера. Отклонение свободной поверхности нормировано на начальную глубину  $h$ , отклонение давления – на давление в покое  $p_0 = \rho gh$  ( $\rho$  – плотность воды). Перемещение угловой точки в законе движения нормировано на глубину  $h$ . По оси ординат отложено безразмерное время  $T^0$ , нормированное на период колебаний контейнера.

Данные для случая, когда частота колебания контейнера соответствовала частоте первой моды колебания жидкости, и имели место интенсивные колебания уровня свободной поверхности, приведены на рис. 2, а. Из рисунка видно, что максимум давления на стенке смещен относительно максимума отклонения свободной поверхности в момент заплеска. Отклонение от гидростатического закона распределения давления начинает существенно проявляться, когда скорость колебания уровня свободной поверхности на стенке,

определяемая как  $w = \frac{d\eta}{dt}$ , достигнет некоторого критического значения  $w_*$

как при поднятии, так и убывании уровня. При обработке экспериментальных данных было установлено, что критическое значение величины  $w_*$  в безразмерной форме, определяемое как  $w_*^0 = \frac{w_*}{\sqrt{gh}}$ , приближенно равно 0,31.

При значениях скорости колебания уровня по абсолютному значению меньше критической скорости, т.е.  $|w| < w_*$ , отклонения давления  $p$ , действующего на стенку, и уровня свободной поверхности на стенке  $\eta$  ведут себя синхронно.

В примере на рис. 2, б частота колебания контейнера соответствовала частоте четвертой моды колебания жидкости и на стенках имели место узлы. Незначительные колебания с частотой в 2 раза больше частоты колебания контейнера, зарегистрированные волномером на торцевой стенке (кривая 1),

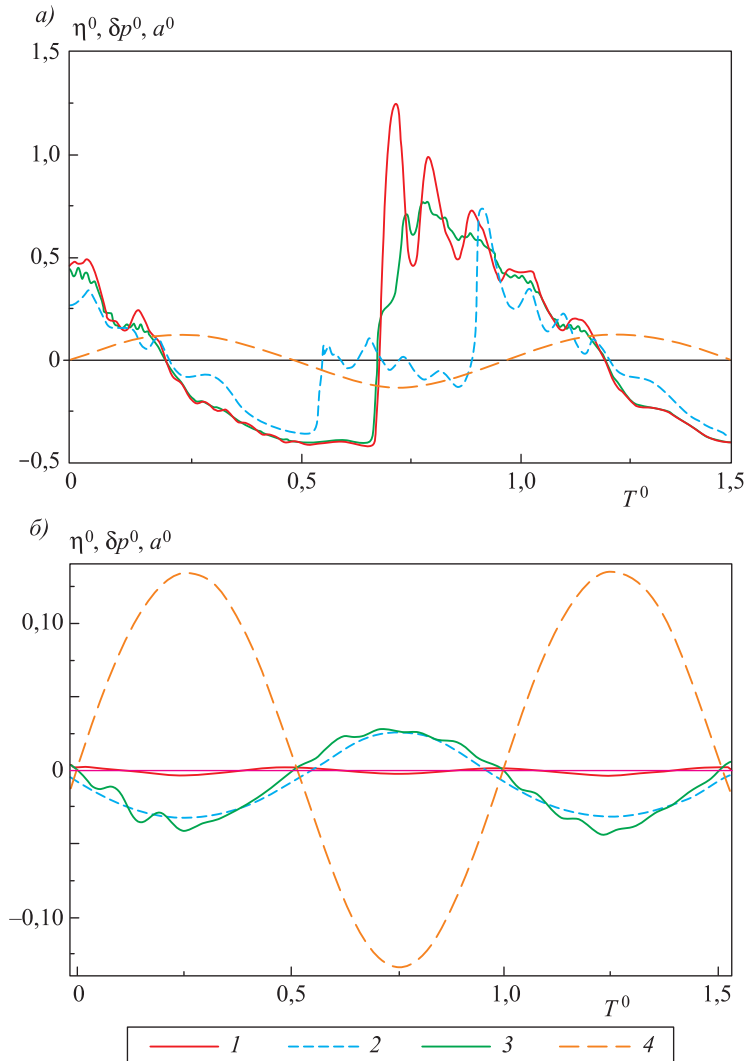


Рис. 2. Пример записи отклонений свободной поверхности  $\eta^0$ , давления на торцевой стенке  $\delta p^0$  и закона движения  $a^0$  при  $h = 0,072$  м,  $L = 1,79$   
 а – первая мода  $T = T_1 = 4,30$  с; б – четвертая мода  $T = T_4 = 1,115$  с

являются следствием неидеальности системы привода и системы в целом. Колебания давления на стенке при относительном покое жидкости обусловлены силой инерции, действующей на жидкость.

На рис. 3 приведен фотоснимок наиболее высокого (за период колебаний контейнера) заплеска на стенку и образующихся при этом брызг и капель воды, имеющих место при достаточно высокой интенсивности колебаний свободной поверхности. В данном примере такой заплеск происходил на частоте колебаний контейнера, равной частоте первой собственной моды колебаний воды. Убывающий по высоте с ростом номера моды максимум имел место на нечетных собственных частотах. Высокие всплески, сравнимые по высотам с высотами заплеска на стенке, наблюдались при наложении



встречных бегущих волн на частотах нечетных собственных мод. Пример такого всплеска в случае продольных гармонических колебаний контейнера приведен в [10].

**Закключение.** Результаты измерений локального давления на торцевую стенку прямоугольного контейнера при его гармонических колебаниях показали, что при превышении критического значения скорости колебания уровня на стенке проявляется существенное расхождение в меньшую сторону между фактическим давлением, действующим на стенку, и давлением, рассчитанным по высоте заплеска на основе закона гидростатического распределения. При сравнительно небольшой начальной энергии образуются кумулятивные струи, поднимающиеся на большую высоту.

В рассмотренном примере кумулятивная струя распадалась на капли, переносящие пренебрежимо малую массу, но движущиеся с большой скоростью.

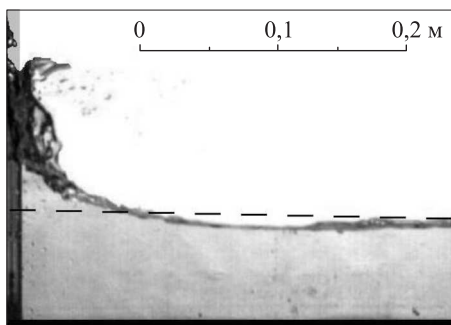


Рис. 3. Фотоснимок заплеска на торцевую стенку при  $h = 0,072$  м,  $L = 1,79$  м,  $T = T_1 = 4,30$  с (первая мода)  
Штриховая линия – уровень свободной поверхности в покое

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Гравитационные волны в продольно колеблющемся контейнере // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 6. С. 74–80.
2. Моисеев Н.Н. Движение твердого тела, имеющего полость, частично заполненную идеальной каплевой жидкостью // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85, № 4. С. 719–722.
3. Моисеев Н.Н., Румянцев В.В. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость. М.: Наука, 1965. 439 с.
4. Сретенский Л.Н. Колебания жидкости в подвижном сосуде // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. 1951. № 10. С. 1483–1494.
5. Akyildiz H., Unal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to liquid sloshing // Ocean Engineering. 2005. Vol. 32, Iss. 11–12. P. 1503–1516.
6. Bredmose H., Brocchini M., Peregrine D.H., Thais L. Experimental investigation and numerical modeling of steep forced water waves // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 409. P. 214–249.
7. Verhagen J.H.G., Vijngaarden L. Non-Linear oscillations of fluid in container // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 490. P. 737–751.
8. Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Поверхностные гравитационные волны при вертикальных угловых колебаниях контейнера // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 3. С. 77–82.
9. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. 816 с.
10. Букреев В.И. Волны на поверхности воды в горизонтально колеблющемся лотке // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 2. С. 46–52.

**Букреев Виктор Иванович**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

**Дегтярев Владимир Владимирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Чеботников Алексей Владимирович**, канд. техн. наук;

E-mail: avchebotnikov@gmail.com

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 16.01.18

**Bukreev Viktor Ivanovich**, DSc, Professor

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

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

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

**Chebotnikov Alexey Vladimirovich**, PhD; E-mail: avchebotnikov@gmail.com

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

## THE DYNAMIC IMPACT OF GRAVITY SURFACE WAVES

The results of an experimental study of the dynamic impact of surface gravity waves on an end wall of the rectangular container, partially filled with water and oscillating harmonically about a horizontal axis perpendicular to the side walls. It is shown that when the container moves up from the position of equilibrium is a high splash of water on the wall with the formation of a cumulative jet. An example in which the maximum lift height of droplets formed during the decay of the jet, the initial depth reached 2,5.

**Key words:** waves on the water, the water pressure on the wall, oscillating container, splash on the wall, cumulative jet.

## REFERENCES

1. Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V. Gravitatsionnye volny v prodol'no koleblyushchemsya konteynere [The gravitational waves in container at lateral excitation]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 6. Pp. 74–80. (in Russian)
2. Moiseev N.N. Dvizhenie tverdogo tela, imeyushchego polost', chastichno zapolnennuyu ideal'noy kapel'noy zhidkost'yu [The motion of a rigid body with cavities partially filled with an ideal liquid]. *Dokl. Akad. nauk. SSSR*. [Reports of Academy of Sciences of the USSR]. 1952. Vol. 85, No. 4. Pp. 719–722. (in Russian)
3. Moiseev N.N., Rumyantsev V.V. Dinamika tela s polostyami, sodержashchimi zhidkost' [Dynamics of body with cavities containing liquid]. Moscow, Nauka, 1965. 439 p. (in Russian)
4. Sretenskiy L.N. Kolebaniya zhidkosti v podvizhnom sosude [The oscillations of liquid in a moving container]. *Izv. Akad. nauk. SSSR. Otd. tekhn. nauk* [Bull. of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences]. 1951. No. 10. Pp. 1483–1494. (in Russian)
5. Akyildiz H., Unal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to liquid sloshing. *Ocean Engineering*. 2005. Vol. 32. Iss. 11–12. Pp. 1503–1516.
6. Bredmose H., Brocchini M., Peregrine D.H., Thais L. Experimental investigation and numerical modeling of steep forced water waves. *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 409. Pp. 214–249.

7. Verhagen J.H.G., Vijngaarden L. Non-Linear oscillations of fluid in container // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 490. Pp. 737–751.
  8. Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V. Poverkhnostnye gravitatsionnye volny pri vertikal'nykh uglovykh kolebaniyakh konteynera [The surface gravity waves at vertical angular oscillation of the container]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 3. Pp. 77–82. (in Russian)
  9. Sretenskiy L.N. Teoriya volnovykh dvizheniy zhidkosti [Theory of wave motions of fluid]. Moscow, Nauka, 1977. 816 p. (in Russian)
  10. Bukreev V.I. Volny na poverkhnosti vody v gorizontal'no koleblyushchemsya lotke [Water surface waves in a horizontally oscillating container]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2016. Vol. 57, No. 2. Pp. 231–236. (in Russian)
-

## **ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**



УДК 627.824:528.48

**Ю.В. СТОЛБОВ, С.Ю. СТОЛБОВА, Л.А. ПРОНИНА**

### **МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСКОВ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Приведены расчеты и обоснование допусков на строительные работы и геодезический контроль с использованием методов равного и ничтожного влияния погрешностей на окончательное положение конструкций и метода с учетом точности технологических процессов при возведении линейных сооружений. Проанализированы методы расчета допусков на строительные работы и геодезический контроль высотного положения конструктивных элементов при возведении линейных сооружений с доверительной вероятностью их обеспечения  $P = 0,95$ . Установлено, что наиболее обоснованные допуски на строительные работы и геодезический контроль получены с помощью метода расчета с учетом точности технологических процессов при возведении линейных сооружений.

**Ключевые слова:** допуски, строительные работы, геодезический контроль, точность технологических процессов, возведение линейных сооружений.

Точность геометрических параметров конструкций зданий и сооружений является одним из показателей качества современного строительства. Поэтому при проектировании зданий и сооружений и их отдельных элементов, разработке технологии изготовления элементов и возведении зданий и сооружений следует предусматривать, а в производстве применять необходимые средства и правила технологического обеспечения точности, согласно ГОСТ 21778–81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. В настоящей статье рассмотрим методы расчета и обоснования допусков на строительные работы и геодезический контроль при возведении линейных сооружений на примере устройства оснований и покрытий взлетно-посадочных полос (ВПП) аэродромов.

Нормы точности на геометрические параметры конструкций зданий и сооружений регламентируются в стандартах (ГОСТах), СНиП, СП и проектно-конструкторской документации. С 1.01.1997 г. основным нормативным документом при строительстве ВПП аэродромов был СНиП 32-03–96. Аэродромы, а с 1.01.2013 г. введена в действие актуализированная редакция

© Столбов Ю.В., Столбова С.Ю., Пронина Л.А., 2018

этого СНиП – свод правил СП 121.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 32-03–96. Аэродромы. До 1.07.2015 г. действующими были оба документа по регламентации точности строительства взлетно-посадочных полос аэродромов. Каким нормативным документом руководствоваться в этот период определял заказчик. С 1.07.2015 г. СНиПы были отменены. Таким образом, в настоящее время основным нормативным документом при новом строительстве взлетно-посадочных полос аэродромов является СП 121.13330.2012, а СНиП 32-03–96 остается в качестве действующего при реконструкции ранее построенных ВПП аэродромов.

При строительстве ВПП аэродромов требования к точности высотного положения оснований и покрытий, приведенные в нормативных документах СП 121.13330.2012, СНиП 32-03–96, значительно выше, чем требования к точности их планового положения. Это определяется назначением сооружения и процессами, происходящими на поверхности покрытий ВПП аэродромов. Практика эксплуатации ВПП аэродромов показывает возрастающую роль рельефа поверхности покрытий в оценке их состояния. В работах [1–8] рассматриваются вопросы обеспечения контроля неровностей поверхностей покрытий ВПП аэродромов при их эксплуатации.

Если обеспечение точности планового положения отдельных конструктивных элементов ВПП аэродромов особых затруднений не вызывает, то для обеспечения точности их высотного положения необходимо рассмотрение обоснования допусков на строительные работы и геодезический контроль в процессе устройства оснований и покрытий ВПП аэродромов.

**Методы и материалы.** В СП 121.13330.2012 и СНиП 32-03–96 приведены допускаемые отклонения от регламентируемых значений на законченные строительством конструктивные слои оснований и покрытий ВПП аэродромов, а норм точности отдельно на строительные работы и геодезический контроль в них нет. В нормативных документах, регламентирующих точность геодезических работ в строительстве, СНиП 3.03.01–84. Геодезические работы в строительстве и СП 126.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03–84. Геодезические работы в строительстве, также нет норм точности при устройстве ВПП аэродромов.

В работе [9] отмечено, что регламентация для 5 % допускаемых отклонений высотного положения поверхностей оснований и покрытий ВПП аэродромов в СНиП 32-03–96 и СП 121.13330.2012 не соответствует основным положениям теории вероятностей и математической статистики [10], а также теории математической обработки геодезических измерений [11].

Обоснование норм точности на строительные работы и геодезический контроль при устройстве оснований и покрытий ВПП аэродромов зависит и от применяемых методов их расчета. Согласно СП 121.13330.2012, для всех слоев искусственных оснований и покрытий высотные отметки по оси каждого ряда не более 5 % результатов определений могут иметь отклонение от проектных значений до  $\pm 15$  мм, а остальные – до  $\pm 5$  мм. Поперечные уклоны каждого ряда не более 5 % могут иметь отклонения от проектных до  $\pm 0,005$ , а остальные – до  $\pm 0,002$  (но не выше предельно допустимых уклонов). Алгебраические разности амплитуд высотных отметок покрытия по оси ряда (точек, отстоящих друг от друга на расстоянии 5, 10 и 20 м) не более 5 %

результатов определений могут иметь значения до 10, 16 и 24 мм, а остальные до 5, 8, 16 мм.

В СНиП 32-03-96 значения характеристик точности высотного положения оснований и покрытий ВПП аэродромов регламентировались для двух групп их категорий по нормативным нагрузкам (первой группы – в/к, I, II, III категорий; второй группы – IV, V, VI категорий). В СП 121.13330.2012 значения характеристик точности высотного положения оснований и покрытий для всех категорий ВПП аэродромов аналогичны СНиП 32-03-96 только как для первой группы категорий.

Для обоснования допусков на строительные работы и геодезический контроль при устройстве оснований и покрытий ВПП аэродромов как линейных плоскостных (площадных) сооружений возможно применение следующих методов их расчета:

- 1) с использованием принципа равного влияния отдельных источников погрешностей на их окончательное положение;
- 2) с использованием принципа ничтожного влияния отдельных источников погрешностей на их окончательное положение;
- 3) с учетом точности технологических процессов при их устройстве.

Рассмотрим возможности применения этих методов для обоснования точности строительных работ и геодезического контроля при устройстве оснований и покрытий ВПП аэродромов.

При устройстве оснований и покрытий ВПП аэродромов общую среднеквадратическую погрешность их высотного положения можно представить в виде

$$m^2 = m_c^2 + m_r^2, \quad (1)$$

где  $m_c$ ,  $m_r$  – соответственно величины среднеквадратических погрешностей (СКП) строительных работ и геодезического контроля.

При расчете точности работ возникает необходимость перехода от допускаемых отклонений к СКП и обратно от СКП к предельным по выражению

$$m_n = \delta_n / t, \quad (2)$$

где  $\delta_n$  – допускаемое отклонение (предельная погрешность) высотного положения оснований и покрытий ВПП аэродромов, согласно нормативным документам;

$t$  – величина, принимаемая при переходе от предельных погрешностей к среднеквадратическим (делитель), и обратно от СКП к предельным (множитель), при доверительной вероятности  $P = 0,95$  –  $t = 2,0$ .

Приведем примеры расчета СКП строительных работ ( $m_c$ ) и геодезического контроля ( $m_r$ ) разными методами.

За основу расчета примем допускаемые значения амплитуд  $\delta_n$  высотных отметок ряда точек, отстоящих друг от друга на расстояниях 5, 10 и 20 м, т.е. шагов нивелирования, соответственно 5, 8 и 16 мм.

Например, при шаге нивелирования через 10 м, согласно СП 121.13330.2012, допускаемое отклонение амплитуд  $\delta_n = 8$  мм (при доверительной вероятности их обеспечения  $P = 0,95$ ), тогда значение СКП будет  $m_n = 8/2,0 = 4,00$  мм.

При расчете *методом равного влияния* СКП строительных работ и геодезического контроля принимаются равными  $m_r = m_c$ , а их значение определим по выражению

$$m_r = m_c = m_n / \sqrt{2}. \quad (3)$$

Они будут равны  $m_r = m_c = 4,00 / \sqrt{2} = 2,83$  мм, допускаемые отклонения (предельные погрешности), при доверительной вероятности их обеспечения  $P = 0,95$ , будут иметь значения  $\delta_r = \delta_c = 2,83 \cdot 2,0 = 5,66$  мм.

При расчете *методом ничтожного влияния* значение СКП геодезического контроля  $m_r$  вычислим по выражению

$$m_r = m_c / Z, \quad (4)$$

где  $1/Z$  – коэффициент ничтожного влияния погрешности геодезического контроля на погрешность высотного положения ВПП аэродромов.

С учетом ничтожного влияния погрешности  $m_r$  потребуем, чтобы разность  $m - m_c$  не превышала величину СКП суммарной погрешности  $m_m$ , т.е. [12, 13]

$$m - m_c \leq m_m. \quad (5)$$

Величина погрешности  $m_r$  определяется соотношением  $m_m/m$ , которое может быть принято равным 10 и 20 %. Если соотношение  $m_m/m$  принимаем равным 10 %, то  $Z = 2,2$ , а  $m_r = 0,45m_n$ , при принятии  $m_m/m$ , равным 20 %,  $Z = 1,6$ , а  $m_r = 0,62m_n$ .

При доверительной вероятности  $P = 0,95$  значение нормированного среднеквадратического отклонения амплитуд при шаге нивелирования через 10 м будет равно  $m_n = 8/2,0 = 4,00$  мм. Тогда величины  $m_r$  при  $Z = 2,2$  равны  $m_r = 0,45 \cdot 4,00 = 1,80$  мм, а при  $Z = 1,6$   $m_r = 0,62 \cdot 4,00 = 2,48$  мм. Предельные погрешности на геодезический контроль соответственно будут 3,60 и 4,96 мм.

Значения СКП строительных работ вычислим по выражению (1).

Они будут равны при  $Z = 2,2$   $m_c = 3,57$  мм, при  $Z = 1,6$   $m_c = 3,14$  мм, допускаемые отклонения соответственно  $\delta_c = 7,14$  мм и  $\delta_c = 6,28$  мм.

Расчеты допусков на строительные работы и геодезический контроль *методом с учетом точности технологических процессов* при возведении конструкций зданий и сооружений приведены в работе [14, 15], которые можно с успехом использовать при устройстве ВПП аэродромов.

Исходными для определения допусков на геодезический контроль являются коэффициенты точности устройства оснований и покрытий ВПП аэродромов  $T_n$ , а также значения вероятной величины  $C$  выхода погрешности измерений за границу поля допуска  $\Delta_n$ .

Для определения допусков на контрольные измерения необходимо установить значение коэффициентов точности геодезического контроля  $T_k$ .

В строительных нормах стран СЭВ, которые действовали в СССР и некоторые из них действуют в нашей стране и других государствах и по настоящее время, погрешность измерений установлена в пределах 10 % от допуска  $\Delta_n$  [15]. В работах [15, 16] приведены графики и таблица с характеристиками точности технологических процессов возведения конструкций сооружений, используя которые можно рассчитать количество ошибочной

приемки  $K_{\Pi}$  и ошибочной отбраковки  $K_{\Pi}$  элементов конструкций или работ и вероятную величину  $C$  выхода их погрешности за границу поля допуска.

Точность технологических процессов по устройству ВПП аэродромов  $T_{\Pi}$  и их геодезического контроля  $T_{\Gamma}$  можно определить по выражениям:

$$T_{\Pi} = \delta_{\Pi} / m_{\Phi}; \quad (6)$$

$$T_{\Gamma} = \delta_{\Gamma} / \Delta_{\Pi}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\Pi}$  – нормативное допускаемое отклонение, согласно нормативным документам;

$\delta_{\Gamma}$  – предельная погрешность геодезического контроля;

$\Delta_{\Pi}$  – нормативный строительный допуск, равный  $2\delta_{\Pi}$ ;

$m_{\Phi}$  – фактическая СКП технологического процесса при устройстве оснований и покрытий.

Согласно этим графикам и таблице, вероятная величина  $C$  выхода погрешности за границу поля допуска у ошибочно принятых конструкций будет равна или меньше 10 % от допуска  $\Delta_{\Pi}$  при следующих коэффициентах точности геодезического контроля:

$$T_{\Pi} = 1,0; \quad T_{\kappa} = 0,225 \text{ или } 22,5 \%; \quad (8)$$

$$T_{\Pi} = 1,5; \quad T_{\kappa} = 0,27 \text{ или } 27,5 \%; \quad (9)$$

$$T_{\Pi} = 1,64; \quad T_{\kappa} = 0,305 \text{ или } 30,5 \%; \quad (10)$$

$$T_{\Pi} = 2,0; \quad T_{\kappa} = 0,45 \text{ или } 45 \%; \quad (11)$$

$$T_{\Pi} = 2,5-3,0; \quad T_{\kappa} = 0,50 \text{ или } 50 \%. \quad (12)$$

По коэффициенту точности  $T_{\kappa}$  можно рассчитать предельную погрешность контроля  $\delta_{\kappa}$ , согласно (7), по формуле

$$\delta_{\kappa} = T_{\kappa} \cdot \Delta_{\Pi} = T_{\kappa} \cdot 2\delta_{\Pi}. \quad (13)$$

Для амплитуд высотных отметок  $\delta_{\Pi} = 8$  мм погрешности на геодезический контроль при  $P = 0,95$  будут иметь значения:

$$T_{\Pi} = 1,0; \quad \delta_{\Gamma} = 0,45 \cdot \delta_{\Pi} = 0,45 \cdot 8,00 = 3,60 \text{ мм}; \quad m_{\Gamma} = 1,80 \text{ мм};$$

$$T_{\Pi} = 1,5; \quad \delta_{\Gamma} = 0,55 \cdot \delta_{\Pi} = 0,55 \cdot 8,00 = 4,40 \text{ мм}; \quad m_{\Gamma} = 2,20 \text{ мм};$$

$$T_{\Pi} = 1,64; \quad \delta_{\Gamma} = 0,61 \cdot \delta_{\Pi} = 0,61 \cdot 8,00 = 4,88 \text{ мм}; \quad m_{\Gamma} = 2,44 \text{ мм};$$

$$T_{\Pi} = 2,0; \quad \delta_{\Gamma} = 0,90 \cdot \delta_{\Pi} = 0,90 \cdot 8,00 = 7,20 \text{ мм}; \quad m_{\Gamma} = 3,60 \text{ мм};$$

$$T_{\Pi} = 2,5-3,0; \quad \delta_{\Gamma} = 1,00 \cdot \delta_{\Pi} = 1,00 \cdot 8,00 = 8,00 \text{ мм}; \quad m_{\Gamma} = 4,00 \text{ мм}.$$

Величины СКП строительных работ вычислим, как ранее было выполнено, по выражению (1). Подобным образом произведены расчеты точности строительных работ и геодезического контроля для значений амплитуд 5 и 16 мм (соответственно при шагах нивелирования через 5 и 20 м).

**Результаты.** Рассчитанные значения допусков на строительные работы и геодезический контроль для обеспечения значений амплитуд высотных отметок  $\delta_{\Pi} = 5,8$  и 16 мм при устройстве оснований и покрытий ВПП аэродромов разными методами приведены в таблице.



**Значения допускаемых отклонений (предельных погрешностей)  $\delta$  и СКП  $m$  на строительные работы и геодезический контроль, рассчитанные разными методами**

Методы расчета допусков с учетом	Коэффициенты		Шаг нивелирования, м	Нормированное значение амплитуд отметок, мм		Допуски, мм			
						на строительные работы		на геодезический контроль	
	повышения точности $Z$	технологического процесса $T_n$		$\delta_n$	$m_n$	$\delta_c$	$m_c$	$\delta_T$	$m_T$
Принципа равного влияния погрешностей	–	–	5	5	2,5	3,54	1,77	3,54	1,77
			10	8	4,0	5,66	2,83	5,66	2,83
			20	16	8,0	11,32	5,66	11,32	5,66
Принципа ничтожного влияния погрешностей	1,6	–	5	5	2,5	3,93	1,96	3,10	1,55
			10	8	4,0	6,28	3,14	4,96	2,48
			20	16	8,0	12,56	6,28	9,92	4,96
	2,2	–	5	5	2,5	4,46	2,23	2,25	1,12
			10	8	4,0	7,14	3,57	3,60	1,80
			20	16	8,0	14,28	7,14	7,20	3,60
Точности технологического процесса устройства оснований и покрытий	–	1	5	5	2,5	4,46	2,23	2,25	1,12
			10	8	4,0	7,14	3,57	3,60	1,80
			20	16	8,0	14,28	7,14	7,20	3,60
	–	1,5	5	5	2,5	4,18	2,09	2,75	1,38
			10	8	4,0	6,68	3,34	4,40	2,20
			20	16	8,0	13,36	6,68	8,80	4,40
	–	1,64	5	5	2,5	3,99	1,99	3,01	1,51
			10	8	4,0	6,39	3,20	4,82	2,41
			20	16	8,0	12,78	6,39	9,64	4,82
	–	2,0	5	5	2,5	2,18	1,09	4,50	2,25
10			8	4,0	3,48	1,74	7,20	3,60	
20			16	8,0	6,96	3,48	14,40	7,20	
–	2,5	5	5	2,5	–	–	5,00	2,50	
		10	8	4,0	–	–	8,00	4,00	
		20	16	8,0	–	–	16,00	8,00	

Примечание. Значения среднеквадратических погрешностей приведены с двумя значащими цифрами после запятой для исключения ошибок при округлении результатов вычислений.

**Обсуждение.** Анализируя приведенные в таблице значения погрешностей на строительные работы и геодезический контроль, рассчитанные выше-рассматриваемыми методами, можно констатировать:

1) при расчете допусков с применением метода, основанного на принципе равного влияния, получены равные значения норм точности на строительные работы и геодезический контроль, что не соответствует практике устройства ВПП аэродромов; полученные значения допусков на геодезические работы завышены, а на строительные – занижены по сравнению с другими рассматриваемыми методами их расчета;

2) при сравнении результатов расчетов погрешностей методами ничтожного влияния и с учетом точности технологических процессов установлено, что с использованием коэффициента понижения точности геодезического

контроля с  $Z = 2,2$  величины погрешностей соответствуют значениям при коэффициенте точности технологического процесса  $T_{\text{п}} = 1$ , а при  $Z = 1,6 - T_{\text{п}} = 1,64$ .

3) при использовании метода с учетом точности технологических процессов получены обоснованные допуски, учитывающие уровень технологии устройства оснований и покрытий ВПП аэродромов.

**Выводы.** Анализ методов расчета допусков на строительные работы и геодезический контроль при устройстве ВПП аэродромов показал, что наиболее обоснованные нормы получены при применении метода *с учетом точности технологических процессов* устройства их оснований и покрытий. При этом необходимо выполнять налаживание точности технологических процессов устройства оснований и покрытий ВПП аэродромов не по допускаемым отклонениям (предельным погрешностям), а по СКП с доверительной вероятностью  $P = 0,95$ .

Использование метода расчета допусков *с учетом точности технологических процессов* позволит назначать научно обоснованные нормы на строительные работы и геодезический контроль, что приведет к снижению затрат на производство работ с обеспечением требуемого качества устройства оснований и покрытий ВПП аэродромов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика оценки соответствия нормам годности к эксплуатации аэродромов гражданской авиации (МОС НГЭА–92). М.: Воздушный транспорт, 1992.
2. Стародубцев В.И., Жуков С.В., Грошев В.В. и др. Инженерно-геодезическое обеспечение жестких аэродромных покрытий взлетно-посадочных полос // Геодезия и картография. 1994. № 8. С. 15–20.
3. Роев Ю.Д. Геодезическая оценка неровностей аэродромных покрытий // Геодезия и картография. 1995. № 12. С. 16–17.
4. Роев Ю.Д. Спектральный анализ рельефа аэродромных покрытий и оценка ровности по индексу R // Аэропорт-Сервис. 1996. № 4. С. 31–33.
5. Татаринов В.В. Определение параметров неровности аэродромного покрытия // Расчет и исследование несущей способности сооружений аэропортов: сб. науч. тр. М.: МАДИ (ТУ), 2000. С. 40–48.
6. Роев Ю.Д., Кузовихин Н.Е. Оценка неровностей поверхности аэродромных покрытий способом среднеквадратических отклонений (ССКО) // Аэропорты. Прогрессивные технологии. 2004. № 1. С. 10–15.
7. Кузнецов Н.Н., Лобазов В.Я., Мещеряков А.М. Геодезические работы в международном аэропорту «Шереметьево» // Геопрофи. 2004. № 3. С. 6–8.
8. Роев Ю.Д. Оценка геометрических параметров в широком линейном диапазоне // Геодезия и картография. 2006. № 2. С. 10–16.
9. Столбов Ю.В., Столбова С.Ю., Зотов Р.В., Побережный А.А. О регламентации точности высотного положения взлетно-посадочных полос аэродромов в нормативных документах // Вестн. СибАДИ. 2015. № 6. С. 81–85.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1977. 479 с.
11. Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1977. 479 с.

12. Левчук Г.П. Курс инженерной геодезии. Основные виды инженерно-геодезических работ. Геодезические работы при изыскании и строительстве транспортных и промышленных сооружений: учеб. для вузов. М.: Недра, 1970. 408 с.
13. Столбов Ю.В., Столбова С.Ю., Нагаев Д.О. Обеспечение точности высотного положения оснований и покрытий автомобильных дорог: моногр. Омск: СибАДИ, 2013. 144 с.
14. Столбов Ю.В., Столбов В.В. О нормировании точности контрольных измерений при монтаже строительных конструкций // Пром. стр-во. 1978. № 4. С. 29–31.
15. Столбов Ю.В. Статистические методы контроля качества строительного-монтажных работ. М.: Стройиздат, 1982. 87 с.
16. Марков Н.Н., Кайнер Г.В., Сацердотов П.А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М.: Машиностроение, 1967. 392 с.

**Столбов Юрий Викторович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: ssu0810@mail.ru  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), г. Омск  
**Столбова Светлана Юрьевна**, канд. техн. наук, доц.  
Омский государственный технический университет  
**Пронина Лилия Анатольевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: pronina\_lilia@mail.ru  
Омский государственный аграрный университет

Получено 22.01.18

**Stolbov Yuriy Viktorovich**, DSc, Professor; E-mail: ssu0810@mail.ru  
Siberian Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia  
**Stolbova Svetlana Yurevna**, PhD, Ass. Professor  
Omsk State Technical University, Russia  
**Pronina Liliya Anatolyevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: pronina\_lilia@mail.ru  
Omsk State Agrarian University, Russia

## **METHODS OF CALCULATION AND JUSTIFICATION OF TOLERANCES FOR THE CONSTRUCTION WORKS AND GEODESIC CONTROL IN THE ESTABLISHMENT OF LINEAR FACILITIES**

Calculations and substantiation of tolerances for construction works and geodetic control using methods of equal and insignificant influence of errors on the final position of structures and method are made with allowance for the accuracy of technological processes in the construction of linear structures. The analysis of methods for calculating the tolerances for construction work and geodetic control of the high-altitude position of structural elements in the construction of linear structures with a confidence probability of their provision  $P = 0,95$  is considered. It is established that the most reasonable tolerances for construction work and geodetic control were obtained using the calculation method taking into account the accuracy of technological processes in the construction of linear structures.

**Key words:** permissions, construction works, geodetic control, accuracy of technological processes, erection of linear structures.

### **REFERENCES**

1. Metodika otsenki sootvetstviya normam godnosti k ekspluatatsii aerodromov grazhdanskoy aviatsii (MOS NGEA–92) [Methodology for assessing compliance with the standards for the validity of the operation of airfields for civil aviation (MoE NGAA–92)]. Moscow, 1992. (in Russian)

2. Starodubtsev V.I., Zhukov S.V., Groshev V.V., etc. Inzhenerno-geodezicheskoe obespechenie zhestkikh aerodromnykh pokrytiy vzletno-posadochnykh polos [Engineering and geodetic support of hard aerodrome coverings of runways]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]. 1994. No. 8. Pp. 15–20. (in Russian)
3. Roev Yu.D. Geodezicheskaya otsenka nerovnostey aerodromnykh pokrytiy [Geodesic estimation of unevenness of airfield coverings]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]. 1995. No. 12. Pp. 16–17. (in Russian)
4. Roev Yu.D. Spektral'nyy analiz rel'efa aerodromnykh pokrytiy i otsenka rovnosti po indeksu R [Spectral analysis of the relief of airfield coverages and the estimation of the flatness by the index R]. Aeroport-Servis [Airport-Service]. 1996. No. 4. Pp. 31–33. (in Russian)
5. Tatarinov V.V. Opredelenie parametrov nerovnosti aerodromnogo pokrytiya [Determination of the parameters of the unevenness of the airfield cover]. Raschet i issledovanie nesushchey sposobnosti sooruzheniy aeroportov [Calculation and investigation of load-bearing capacity of airport facilities]. Moscow, 2000. Pp. 40–48. (in Russian)
6. Roev Yu.D., Kuzovikhin N.E. Otsenka nerovnostey poverkhnosti aerodromnykh pokrytiy sposobom srednekvadraticsikh otkloneniy (SSKO) [Estimation of unevenness of the surface of aerodrome coverings by means of mean square deviations (SSCO)]. Aeroporty. Progressivnye tekhnologii [Airports. Progressive technologies]. 2004. No. 1. Pp. 10–15. (in Russian)
7. Kuznetsov N.N., Lobazov V.Ya., Meshcheryakov A.M. Geodezicheskie raboty v mezhdunarodnom aeroportu “Sheremet'evo” [Geodesic work at the Sheremetyevo International Airport]. Geoprofi [GeoProfi]. 2004. No. 3. Pp. 6–8. (in Russian)
8. Roev Yu.D. Otsenka geometricheskikh parametrov v shirokom lineynom diapazone [Estimation of geometric parameters in a wide linear range]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]. 2006. No. 2. Pp. 10–16. (in Russian)
9. Stolbov Yu.V., Stolbova S.Yu., Zotov R.V., Poberezhnyy A.A. O reglamentatsii tochnosti vysotnogo polozheniya vzletno-posadochnykh polos aerodromov v normativnykh dokumentakh [On the regulation of the accuracy of the altitude position of the runways of airfields in regulatory documents]. Vestnik SibADI [Herald of SibADI]. 2015. No. 6. Pp. 81–85. (in Russian)
10. Gurm'an V.E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics: A Textbook]. Moscow, 1977. 479 p. (in Russian)
11. Bolshakov V.D., Gaydaev P.A. Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy [Theory of mathematical processing of geodetic measurements: a textbook for high schools]. Moscow, 1977. 479 p. (in Russian)
12. Levchuk G.P. Kurs inzhenernoy geodezii. Osnovnye vidy inzhenerno-geodezicheskikh rabot. Geodezicheskie raboty pri izyskanii i stroitel'stve transportnykh i promyshlennykh sooruzheniy [The course of engineering geodesy. The main types of engineering and geodetic works. Geodetic work in the exploration and construction of transport and industrial facilities: a textbook for universities]. Moscow, Nedra, 1970. 408 p. (in Russian)
13. Stolbov Yu.V., Stolbova S.Yu., Nagaev D.O. Obespechenie tochnosti vysotnogo polozheniya osnovaniy i pokrytiy avtomobil'nykh dorog: Monografiya [Ensuring the accuracy of the high-altitude position of bases and road surfaces: monograph]. Omsk: SibADI, 2013. 144 p. (in Russian)
14. Stolbov Yu.V., Stolbov V.V. O normirovanii tochnosti kontrol'nykh izmereniy pri montazhe stroitel'nykh konstruksiy [On the standardization of the accuracy

- of control measurements in the installation of building structures]. Promyshlennoe stroitel'stvo [Industrial Construction]. 1978. No. 4. Pp. 29–31. (in Russian)
15. S t o l b o v Yu.V. Statisticheskie metody kontrolya kachestva stroitel'no-montazhnykh rabot [Statistical methods of quality control of construction and installation works]. Moscow, Stroyizdat, 1982. 87 p. (in Russian)
16. M a r k o v N.N., K a i n e r G.V., S a t s e r d o t o v P.A. Pogreshnost' i vybor sredstv pri lineynykh izmereniyakh [Error and choice of means for linear measurements]. Moscow, 1967. 392 p. (in Russian)
-

УДК 536.42 : 666.97

Ю.А. ЧИРКУНОВ

## НЕЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА В НЕОДНОРОДНОМ СТЕРЖНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ\*

Методами группового анализа дифференциальных уравнений получено 13 точных решений нелинейного дифференциального уравнения, определяющего нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла. Указан физический смысл полученных точных решений и их возможное применение при исследовании процесса зимнего бетонирования. В частности, среди них содержатся два решения, описывающие процесс нагревания бетонной смеси, при котором вдоль каждого луча, проведенного в этой смеси, температура: для первого решения – в двух неподвижных точках, для второго решения – в одной неподвижной точке и в одной эволюционирующей точке – значительно превышает температуру в других точках луча. Таким образом, внутри бетонной смеси при данном нагревании образуются наиболее сильно нагреваемые зоны, в которых происходит ее более быстрое затвердевание. Также получены решения, описывающие процесс нагрева бетонной смеси, при котором внутри бетонной смеси образуются зоны с нулевой температурой. Полученные решения зависят от 15 произвольных постоянных, что позволяет использовать их для описания других процессов распространения тепла, кроме рассмотренных в настоящей статье.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** нелинейный процесс распространения тепла, неоднородный стержень, нестационарный источник тепла, точные решения.

В настоящей работе изучается модель, описывающая нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла.

Модель, описывающая нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла, определяется уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( x^\alpha T^\beta \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \gamma(t)T, \quad (1)$$

где  $T = T(t, x)$  – температура стержня в точке  $x \in (-\infty, \infty)$  в момент времени  $t$ ;

$\alpha$  – параметр, характеризующий неоднородность стержня;

$\beta$  – параметр, определяющий нелинейность процесса;

$\gamma(t) > 0$  – нестационарный коэффициент поступления тепла;

$\alpha$  и  $\beta$  – произвольные вещественные постоянные.

\* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета и РФФИ в рамках научного проекта № 16-01-00446 а.

Предполагается далее, что выполняется условие

$$\alpha\beta\gamma'(t) \neq 0. \tag{2}$$

Это условие означает, что процесс является нелинейным, стержень – неоднородный и есть источник тепла.

Пусть

$$\gamma(t) = \frac{1}{\beta} (\ln(\varepsilon'(t)))', \quad \varepsilon'(t) > 0, \quad (\ln(\varepsilon'(t)))'' \neq 0. \tag{3}$$

Функция  $\varepsilon(t)$  выражается через функцию  $\gamma(t)$  по формуле

$$\varepsilon(t) = k_1 \int \exp(\beta \int \gamma(t) dt) dt + k_2,$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – произвольные вещественные постоянные.

Методами группового анализа дифференциальных уравнений [1] получены точные решения нелинейного дифференциального уравнения (1) при условиях (2) и (3). Чтобы не загромождать статью математическими преобразованиями, для удобства читателя алгоритм получения этих решений в статье не приводится. Тот факт, что указанные решения действительно являются решениями исходного уравнения, легко проверяется непосредственной подстановкой этих решений в уравнение. Указан физический смысл полученных точных решений и их возможное применение при исследовании процесса зимнего бетонирования [2], о чем более подробно будет изложено ниже. Во всех последующих формулах, определяющих указанные решения, величины  $c_m (m = 1, 2, \dots, 15)$  – произвольные вещественные постоянные.

1. Для  $\alpha$  и  $\beta \neq -1$  уравнение (1) имеет решение

$$T = c_1 x^{\frac{1-\alpha}{\beta+1}} (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}}. \tag{4}$$

При  $\alpha = 1$  это решение описывает нелинейный процесс распространения тепла, для которого температура в стержне в каждый момент времени одинакова во всех точках и не зависит от его неоднородности. Это означает, что при  $\alpha = 1$  решение (4) описывает процесс нагревания бетонной смеси, при котором температура вдоль каждого луча, проведенного в этой смеси, в каждый момент времени постоянна.

2. При  $(\alpha - 2)(2 - \alpha + \beta) \neq 0$  уравнение (1) имеет решение

$$T = \left( \frac{\beta}{(\alpha - 2)(2 - \alpha + \beta)} \right)^{\frac{1}{\beta}} x^{\frac{2-\alpha}{\beta}} ((\ln \varepsilon(t))')^{\frac{1}{\beta}}, \tag{5}$$

которое зависит от неоднородности стержня. В каждый момент времени температура в разных его точках различна. Пусть  $\left( \frac{\beta}{(\alpha - 2)(2 - \alpha + \beta)} \right)^{\frac{1}{\beta}} > 0$ .

Если  $\frac{2-\alpha}{\beta} < 0$ , то решение (5) описывает нелинейный процесс распространения тепла, для которого температура  $T \rightarrow \infty$  при  $x \rightarrow 0$  и  $T \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \infty$ .

Данное решение описывает процесс интенсивного нагревания имеющей достаточно большой линейный размер по вертикали бетонной смеси, при котором вдоль каждого вертикального луча тепло распространяется сверху вниз, т.е. мощный источник нагрева находится в верхней части бетонной смеси. Если  $\frac{2-\alpha}{\beta} > 0$ , то решение (5) описывает нелинейный процесс рас-

пространения тепла, для которого температура  $T(t,0)=0$  и  $T \rightarrow \infty$  при  $x \rightarrow \infty$ . Это решение описывает процесс интенсивного нагревания имеющей достаточно большой линейный размер по вертикали бетонной смеси, при котором вдоль каждого вертикального луча тепло распространяется снизу вверх, т.е. мощный источник нагрева находится в нижней части бетонной смеси.

3. При  $\alpha = \beta + 2$  уравнение (1) имеет решение

$$T = c_2 x^{-1} (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}}. \quad (6)$$

Его свойства аналогичны свойствам решения (5).

4. При  $\alpha = 1, \beta = -1$  уравнение (1) имеет решение

$$T = \frac{2\varepsilon(t)}{x(\ln x - 2)^2 \varepsilon'(t)}. \quad (7)$$

Пусть  $\varepsilon(t) > 0$ . Это уравнение описывает нелинейный процесс распределения тепла, в котором температура бесконечно увеличивается, когда  $x \rightarrow +0$  или  $x \rightarrow \exp 2$ . В точках  $x = 0$  и  $x = \exp 2$  температура резко возрастает. Это означает, что решение (7) описывает процесс нагревания бетонной смеси, при котором вдоль каждого луча, проведенного в этой смеси, температура в двух точках значительно превышает температуру в других точках луча. Таким образом, внутри бетонной смеси при данном нагревании образуются наиболее сильно нагреваемые зоны, в которых происходит ее более быстрое затвердевание.

5. При  $\alpha = 1, \beta = -1$  уравнение (1) имеет решение

$$T = \frac{c_3}{\varepsilon'(t)} x^{c_4}. \quad (8)$$

Это решение является обобщением решения (6) с другим характером зависимости от неоднородности стержня. Решение (8) обладает свойствами, аналогичными свойствам решения (5).

6. При  $\alpha = 1, \beta = -1$  удалось найти еще одно точное решение уравнения (1)

$$T = -\frac{1}{x(\ln x - 2 + \varepsilon(t))\varepsilon'(t)}. \quad (9)$$

Оно описывает нелинейный процесс распределения тепла, при котором температура бесконечно возрастает, когда  $x \rightarrow +0$ . Вблизи траектории  $x = \exp(2 - \varepsilon(t))$  температура также бесконечно возрастает. Эта траектория описывает эволюцию вдоль стержня второй точки, в которой температура резко возрастает. Это означает, что решение (9) описывает процесс нагревания бетонной смеси, при котором вдоль каждого луча, проведенного в этой смеси, температура в двух точках: одной неподвижной, а другой движу-



щейся, – значительно превышает температуру в других точках луча. Таким образом, внутри бетонной смеси при данном нагревании образуются наиболее сильно нагреваемые зоны, в которых происходит ее более быстрое затвердевание. Наличие движущейся второй точки способствует более быстрому, чем в случае (7), затвердеванию бетона.

7. При  $\alpha = \frac{3\beta+4}{2\beta+3}$ ,  $\beta(\beta+1)\left(\beta+\frac{3}{2}\right)\left(\beta+\frac{4}{3}\right) \neq 0$  уравнение (1) имеет решение

$$T = c_5 x^{-\frac{1}{2\beta+3}} (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}}. \quad (10)$$

Это уравнение является обобщением решения (6) с другим характером зависимости от неоднородности стержня. Решение (10) обладает свойствами, аналогичными свойствам уравнения (5).

8. При  $\alpha = \frac{3\beta+4}{2\beta+3}$ ,  $\beta(\beta+1)\left(\beta+\frac{3}{2}\right)\left(\beta+\frac{4}{3}\right) \neq 0$  уравнение (1) имеет решение

$$T = x^{-\frac{1}{2\beta+3}} \left( -\frac{\beta^2(2\beta+3)^2}{(\beta+1)^3} \left( x^{\frac{\beta+1}{2\beta+3}} - \frac{\beta+1}{\beta} \varepsilon(t) \right) \varepsilon'(t) \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (11)$$

Оно описывает нелинейный процесс распространения тепла с температурой

$$T(t, x) \equiv 0 \text{ в точке, движущейся вдоль стержня по закону } \varepsilon(t) = \frac{\beta}{\beta+1} x^{\frac{\beta+1}{2\beta+3}}.$$

Это означает, что решение (11) описывает процесс нагревания бетонной смеси, при котором вдоль каждого луча, проведенного в этой смеси, температура в точке, движущейся вдоль стержня по траектории  $\varepsilon(t) = \frac{\beta}{\beta+1} x^{\frac{\beta+1}{2\beta+3}}$ ,

остается равной нулю. Следовательно, внутри бетонной смеси при данном нагревании образуются зоны с нулевой температурой.

9. При  $\alpha = \frac{3\beta+4}{2\beta+3}$ ,  $\beta(\beta+1)\left(\beta+\frac{3}{2}\right)\left(\beta+\frac{4}{3}\right) \neq 0$  обобщением решения (11)

является решение

$$T = x^{-\frac{1}{2\beta+3}} (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}} V(\xi), \quad \xi = x^{\frac{\beta+1}{2\beta+3}} - \frac{\beta+1}{\beta} \varepsilon(t), \quad (12)$$

где функция  $V(\xi)$  неявно определяется квадратурой

$$\beta \int \frac{dV}{\sqrt{c_6 - (2\beta+3)^2 V^{\frac{1}{\beta+1}}}} = \xi + c_7. \quad (13)$$

Для некоторых значений параметра  $\beta$  интеграл в левой части формулы (13) выражается через элементарные функции. Это решение описывает нелинейный процесс распространения тепла, для которого величина

$x^{\frac{1}{2\beta+3}}(\varepsilon'(t))^{\frac{-1}{\beta}}T(t,x)$  сохраняет постоянное значение вдоль каждой траектории  $x = \left(\frac{\beta+1}{\beta}\varepsilon(t)+c\right)^{\frac{2\beta+3}{\beta+1}}$  ( $c = \text{const}$ ). Свойства соответствующего процесса нагревания бетонной смеси определяются квадратурой (13).

10. При  $(\alpha - 1)(\beta + 1) \neq 0$  уравнение (1) имеет решение

$$T = (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}}(c_8x + c_9)^{\frac{1}{\beta+1}}. \quad (14)$$

Оно является обобщением решения (8). Если  $\beta > -1$ , то в каждый момент времени температура в точке стержня  $x = -\frac{c_9}{c_8}$  равна нулю. Это означает, что решение (14) описывает процесс нагревания бетонной смеси, при котором вдоль каждого вертикального луча, проведенного в этой смеси, температура в точке стержня  $x = -\frac{c_9}{c_8}$  равна нулю. Следовательно, это решение описывает процесс нагревания бетонной смеси, внутри которой образуется плоскость с нулевой температурой.

11. При  $\alpha = 1, \beta \neq -1$  уравнение (1) имеет решение

$$T = (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}}(c_{10}\ln x + c_{11})^{\frac{1}{\beta+1}}, \quad (15)$$

описывающее нелинейный процесс распределения тепла, в котором температура зависит от неоднородности стержня по логарифмическому закону. Если  $\beta < -1$ , то в каждый момент времени температура  $T \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow +0$  и при  $x \rightarrow +\infty$ . Это означает, что решение (15) описывает процесс интенсивного нагревания имеющей достаточно большой линейный размер по вертикали бетонной смеси, при котором температура на верхней и нижней плоскостях бетонной смеси близка к нулю.

12. При  $\alpha \neq 1, \beta = -1$  уравнение (1) имеет решение

$$T = \frac{c_{12}}{\varepsilon'(t)} \exp(c_{13}x^{1-\alpha}), \quad (16)$$

которое описывает очень неравномерный нагрев стержня, обусловленный его неоднородностью. Температура зависит от неоднородности стержня по экспоненциальному закону. Соответствующий нагрев бетонной смеси тоже является очень неравномерным.

13. Уравнения (14)–(16) – частные случаи решения

$$T = \left(\frac{\varepsilon'(t)}{c_{14} - c_{15}\beta\varepsilon(t)}\right)^{\frac{1}{\beta}}\theta(x), \quad (17)$$

где функция  $\theta(x)$  является решением следующих уравнений: при  $\beta \neq -1$

$$\theta = w^{\frac{1}{\beta+1}}, \quad xw'' + \alpha w' = c_{15}(\beta+1)x^{1-\alpha}w^{\frac{1}{\beta+1}}; \quad (18)$$

при  $\beta = -1$

$$\theta = \exp w, \quad x w'' + \alpha w' = c_{15} x^{1-\alpha} \exp w. \quad (19)$$

Уравнение (18) является модифицированным уравнением Эмдена–Фаулера. Его частные решения и частные решения уравнения (19) для некоторых значений параметров приведены в [3–5]. Процесс распространения тепла в стержне существенно зависит от вида решения уравнений (18) и (19). То же самое относится и к соответствующему процессу нагревания бетонной смеси.

**Заключение.** Методами группового анализа дифференциальных уравнений получено 13 точных решений нелинейного дифференциального уравнения, определяющего нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла. Указан физический смысл полученных точных решений и их возможное применение при исследовании процесса зимнего бетонирования.

Найденные решения зависят от 15 произвольных постоянных, что позволяет использовать эти решения для описания других процессов распространения тепла, кроме рассмотренных в настоящей статье. Механическая значимость полученных решений заключается в следующем:

1) эти решения описывают нелинейные процессы распространения тепла в неоднородной среде, в том числе при зимнем бетонировании, с нестационарным внешним источником;

2) эти решения могут быть использованы в качестве тестов в численных расчетах, выполняемых при исследованиях нелинейного процесса распространения тепла в неоднородной среде, в том числе при зимнем бетонировании, с нестационарным внешним источником;

3) эти решения позволяют оценить степень адекватности математической модели, описывающей нелинейный процесс распространения тепла в неоднородной среде с нестационарным источником, реальным физическим процессам, после проведения экспериментов, соответствующих этим решениям, и оценки возникающих отклонений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чиркунов Ю.А., Хабиров С.В. Элементы симметричного анализа дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Новосибирск: НГТУ, 2012. 659 с.
2. Молодин В.В., Лунев Ю.В. Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. 300 с.
3. Bellman R. Stability theory of differential equations. New York; Toronto; London, 1953. 400 p.
4. Sansone G. Equazioni differenziali nel campo reale. Parte Seconda. Seconda edizione. Bologna, 1949. 216 p.
5. Заичев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физ.-мат. лит., 2001. 576 с.

**Чиркунов Юрий Александрович**, д-р физ.-мат. наук, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 26.01.18

**Chirkunov Yuriy Alexandrovich**, DSc, Ass. Professor  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**NONLINEAR DISSEMINATION OF HEAT  
IN THE INHOMOGENEOUS ROD UNDER THE INFLUENCE  
OF A NON-STATIONARY SOURCE OF HEAT WITH APPLICATION  
TO THE PROBLEMS OF WINTER CONCRETING**

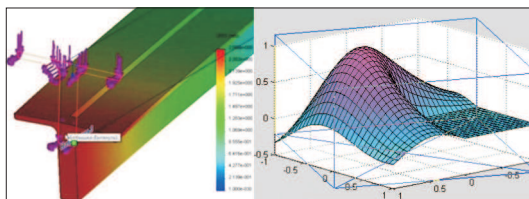
By methods of group analysis of differential equations, 13 exact solutions of the nonlinear differential equation that determines the nonlinear process of heat propagation in an inhomogeneous rod in the presence of nonstationary heat source are obtained. The physical meaning of the exact solutions and their possible application in studying the process of winter concreting are indicated. In particular, among these solutions there are two solutions describing the process of heating a concrete mixture, in which along each ray in this mixture, the temperature: for the first solution, – at two fixed points; for the second solution, — at one fixed point and in one evolving point, considerably exceeds the temperature at other points of the ray. Thus, within the concrete mix with the given heating, the most strongly heated zones are formed, in which its more rapid solidification takes place. Also, solutions are obtained that describe the process of heating the concrete mixture in which zones with zero temperature are formed inside the concrete mixture. The obtained solutions depend on 15 arbitrary constants, that makes it possible to use these solutions to describe other processes of heat propagation, other than those were considered in this paper.

**Key words:** nonlinear process of heat propagation, inhomogeneous rod, non-stationary heat source, exact solutions.

REFERENCES

1. Chirkunov Yu.A., Khabirov S.V. Elementy simmetriynogo analiza differentsial'nykh uravneniy mekhaniki sploshnoy sredy [The Elements of Symmetry Analysis of Differential Equations of Continuous Medium Mechanics]. Novosibirsk, NSTU, 2012. 659 p. (in Russian)
2. Molodin V.V., Lunev Yu.V. Betonirovanie monolitnykh stroitel'nykh konstruktsiy v zimnikh usloviyakh [The concreting of monolithic building constructions in winter conditions]. Novosibirsk: NSUACE (Sibstrin), 2006. 300 p. (in Russian)
3. Bellman R. Stability theory of differential equations. New York. Toronto. London, 1953. 400 p.
4. Sansone G. Equazioni differenziali nel campo reale. Parte Seconda. Seconda edizione. Bologna, 1949. 216 p.
5. Zaitsev V.F., Polyanin A.D. Spravochnik po obyknovennym differentsial'nyim uravneniyam [Handbook of ordinary differential equations]. Moscow, 2001. 576 p. (in Russian)

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 697.442.8.001.24

А.Г. БАГОУТДИНОВА, Я.Д. ЗОЛОТОНОСОВ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДИАМЕТРА ТРУБНОГО И МЕЖТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА В АППАРАТЕ С ВИНТОВЫМ ТЕПЛОБМЕННЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Результаты экспериментов по определению гидравлического сопротивления и количества переданного через теплообменную поверхность тепла, как известно, обобщаются критериальными уравнениями, в которых в качестве характерного размера используется эквивалентный диаметр. В работе описывается методика вычисления эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате типа «труба в трубе» с винтовым теплообменным элементом. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и расчетах нового теплообменного оборудования.

Ключевые слова: эквивалентный диаметр, теплообменный аппарат, винтовая труба, винтовая спираль, объем, поверхность.

**Введение.** Впервые понятие эквивалентного диаметра было введено при выводе уравнения Дарси–Вейсбаха для определения гидравлического сопротивления трубопроводов. В настоящее время этот параметр используется для расчета широкого класса аппаратов теплообмена, включая кожухотрубные теплообменники, теплообменники с оребренными трубами, компактные пластинчато-ребристые, пластинчато-змеевиковые теплообменники, а также для определения гидравлического радиуса элементов и насадок массообменной аппаратуры [1].

Под гидравлическим радиусом понимают отношение площади свободного сечения канала, через которое протекает жидкость, к смоченному периметру [2]

$$r = \frac{S}{P},$$

где  $S$  – площадь сечения потока жидкости;

$P$  – смоченный периметр.

Для круглой трубы с внутренним диаметром  $d$  и значит площадью свободного сечения  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  при сплошном заполнении его жидкостью  $P = \pi d$ , откуда гидравлический радиус

$$r = \frac{S}{P} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4}.$$

Диаметр, выраженный через гидравлический радиус, представляет собой эквивалентный диаметр:  $d = d_{eqv} = 4r$ .

Следовательно,

$$d_{eqv} = \frac{4S}{P}. \quad (1)$$

Таким образом, эквивалентный диаметр равен диаметру гипотетической трубы круглого сечения, для которого отношение площади  $S$  к смоченному периметру  $P$  то же, что и для данной трубы некруглого сечения [2].

Умножив числитель и знаменатель на длину трубы, формулу (1) можно записать в виде

$$d_{eqv} = \frac{4V}{F}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем трубного пространства;

$F$  – площадь смоченной поверхности.

В настоящее время одним из наиболее распространенных типов теплообменного оборудования являются теплообменники трубчатого типа. Для повышения эффективности таких аппаратов авторами предлагается использовать в качестве теплообменных элементов винтовые трубы [3].

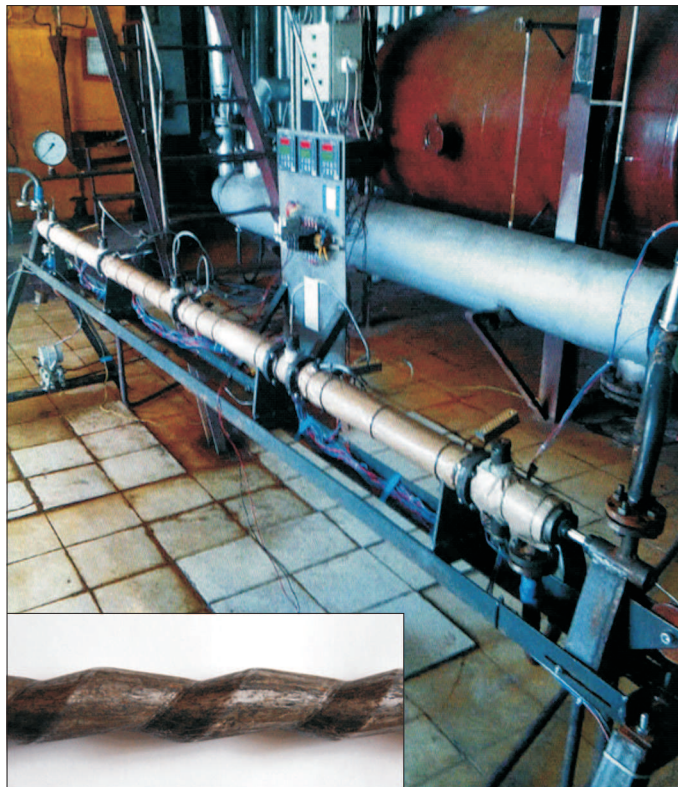


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

В работе [4] проведена оценка степени развития поверхности  $\psi$  предлагаемых теплообменных элементов по сравнению с поверхностью гладкой трубы. Показано, что этот параметр при определенных геометрических соотношениях принимает значения от 1,4 до 2. Так как при  $\psi > 1,15$  поверхность считается эффективной, то винтовые трубы могут быть успешно использованы в качестве теплообменных элементов трубчатых теплообменников [5].

В работе [6] описана технология производства винтовых труб методом ротационной ковки. Для определения коэффициентов теплоотдачи в винтовых теплообменных элементах в котельной г. Елабуга (Республика Татарстан) смонтирована специальная экспериментальная установка (рис. 1).

Основным узлом установки является теплообменник типа «труба в трубе», теплообменный элемент которого выполнен в виде винтовой трубы.

Разработана методика экспериментальных исследований, а результаты эксперимента, как известно, обобщаются критериальными уравнениями, в которых в качестве определяющего геометрического размера используется эквивалентный диаметр. В связи с этим возникла необходимость разработки алгоритма определения эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате типа «труба в трубе» с винтовым теплообменным элементом.

**1. Эквивалентный диаметр трубного пространства.** Поверхность винтовой трубы (рис. 2), образованной движением треугольника (рис. 3) вдоль винтовой линии, расположенной на круговом цилиндре радиуса  $r_0$ , записывается в виде [7]:

$$\vec{r} = (r_0 + \alpha s + h) \cos t \vec{i} + (r_0 + \alpha s + h) \sin t \vec{j} + (bt + s) \vec{k}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n, \quad -l_d \leq s \leq l_k,$$

где  $n$  – число витков винтовой линии;

$l = l_d + l_k$  – длина одного модуля трубы;

$b = l/(2\pi)$  – параметр винтовой линии;

$f(s) = \alpha s + h$  – образующая линия;

$$\alpha = \begin{cases} \frac{h}{l_d}, & -l_d \leq s \leq 0, \\ -\frac{h}{l_k}, & 0 \leq s \leq l_k. \end{cases}$$

Вычислим геометрические характеристики одного модуля винтовой трубы.

Запишем параметрические уравнения модуля винтовой трубы в виде:

$$\begin{cases} x = r \cos t \\ y = r \sin t, & 0 \leq r \leq r_0 + \alpha s + h, \quad 0 \leq t \leq 2\pi, \quad -l_d \leq s \leq l_k. \\ z = bt + s \end{cases}$$

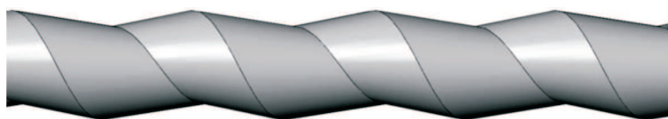


Рис. 2. Винтовая труба

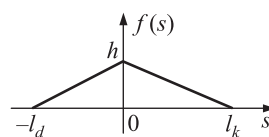


Рис. 3. Образующая линия

Для определения объема тела воспользуемся формулой [8]

$$V = \iiint_V dx dy dz.$$

Вычислим якобиан преобразования декартовых координат  $x, y, z$  в криволинейные  $r, t, s$

$$J(r, s, t) = \begin{vmatrix} \cos t & 0 & -r \sin t \\ \sin t & 0 & r \cos t \\ 0 & 1 & b \end{vmatrix} = -r.$$

Тогда

$$\begin{aligned} V &= \iiint_V |J(r, s, t)| dr ds dt = \int_0^{2\pi} dt \int_{-l_d}^{l_k} ds \int_0^{r_0 + \alpha s + h} r dr = \int_0^{2\pi} dt \int_{-l_d}^0 \frac{(r_0 + \alpha s + h)^2}{2} ds + \\ &+ \int_0^{2\pi} dt \int_0^{l_k} \frac{(r_0 + \alpha s + h)^2}{2} ds = \frac{\pi}{3} (l_d + l_k) (3r_0^2 + 3r_0 h + h^2) = \frac{\pi l}{3} (3r_0^2 + 3r_0 h + h^2). \end{aligned} \quad (3)$$

Формулу (3) можно записать в виде

$$V = \frac{\pi l}{3} (r_0^2 + (r_0 + h)^2 + r_0(r_0 + h)).$$

Это означает, что объем одного модуля винтовой трубы равен объемам усеченных конусов, формирующих прямой конфузорно-диффузорный элемент.

Для вычисления площади поверхности, заданной параметрическими уравнениями  $x = x(s, t)$ ,  $y = y(s, t)$ ,  $z = z(s, t)$ , используем формулу [8]

$$S = \iint_D \sqrt{EF - G^2} ds dt,$$

где

$$\begin{aligned} E &= \left( \frac{\partial x}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial s} \right)^2, & F &= \left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial t} \right)^2, \\ G &= \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t}. \end{aligned}$$

Так как поверхность винтовой трубы описывается уравнениями

$$x = (r_0 + \alpha s + h) \cos t, \quad y = (r_0 + \alpha s + h) \sin t, \quad z = bt + s,$$

то

$$E = \alpha^2 + 1, \quad F = (r_0 + \alpha s + h)^2 + b^2, \quad G = b.$$

Тогда

$$\begin{aligned} S &= \iint_D \sqrt{(\alpha^2 + 1)((r_0 + \alpha s + h)^2 + b^2) - b^2} ds dt = \\ &= \int_0^{2\pi} dt \int_{-l_d}^{l_k} \sqrt{(\alpha^2 + 1)((r_0 + \alpha s + h)^2 + b^2) - b^2} ds = \\ &= \frac{2\pi \sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha} \int_{-l_d}^{l_k} \sqrt{(r_0 + \alpha s + h)^2 + \frac{\alpha^2 b^2}{\alpha^2 + 1}} d(r_0 + \alpha s + h). \end{aligned}$$



Воспользуемся формулой

$$\int \sqrt{x^2 + a^2} dx = \frac{1}{2} \left( x\sqrt{x^2 + a^2} + a^2 \ln \left| x + \sqrt{x^2 + a^2} \right| \right) + C.$$

Тогда

$$\begin{aligned} S = & \frac{\pi\sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha} \left( (r_0 + \alpha s + h) \sqrt{(r_0 + \alpha s + h)^2 + \frac{\alpha^2 b^2}{\alpha^2 + 1}} \right) \Big|_{-l_d}^0 + \\ & + \frac{\pi\alpha b^2}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \ln \left| r_0 + \alpha s + h + \sqrt{(r_0 + \alpha s + h)^2 + \frac{\alpha^2 b^2}{\alpha^2 + 1}} \right| \Big|_{-l_d}^0 + \\ & + \frac{\pi\sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha} \left( (r_0 + \alpha s + h) \sqrt{(r_0 + \alpha s + h)^2 + \frac{\alpha^2 b^2}{\alpha^2 + 1}} \right) \Big|_0^{l_k} + \\ & + \frac{\pi\alpha b^2}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \ln \left| r_0 + \alpha s + h + \sqrt{(r_0 + \alpha s + h)^2 + \frac{\alpha^2 b^2}{\alpha^2 + 1}} \right| \Big|_0^{l_k}. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\alpha = \frac{h}{l_d}$  при  $-l_d \leq s \leq 0$  и  $\alpha = -\frac{h}{l_k}$  при  $0 \leq s \leq l_k$ , получим

$$\begin{aligned} S = & \frac{\pi\sqrt{h^2 + l_d^2}}{h} \left( (r_0 + h) \sqrt{(r_0 + h)^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_d^2}} - r_0 \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_d^2}} \right) + \\ & + \frac{\pi\sqrt{h^2 + l_k^2}}{h} \left( (r_0 + h) \sqrt{(r_0 + h)^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_k^2}} - r_0 \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_k^2}} \right) + \quad (4) \\ & + \frac{\pi h b^2}{\sqrt{h^2 + l_k^2}} \ln \left| \frac{r_0 + h + \sqrt{(r_0 + h)^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_k^2}}}{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_k^2}}} \right| + \\ & + \frac{\pi h b^2}{\sqrt{h^2 + l_d^2}} \ln \left| \frac{r_0 + h + \sqrt{(r_0 + h)^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_d^2}}}{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2 b^2}{h^2 + l_d^2}}} \right|. \end{aligned}$$

При  $b = 0$  формула (4) преобразуется к виду

$$S = \pi(2r_0 + h) \left( \sqrt{h^2 + l_d^2} + \sqrt{h^2 + l_k^2} \right),$$

что совпадает с известной формулой площади поверхности прямого конфузно-диффузорного элемента.

Введем обозначения:  $R_0 = r_0 + h$ ,  $L_d = \sqrt{h^2 + l_d^2}$ ,  $L_k = \sqrt{h^2 + l_k^2}$ .

Тогда формулы (3), (4) можно записать в виде:

$$V = \frac{\pi l}{3}(r_0^2 + r_0 R_0 + R_0^2); \quad (5)$$

$$S = \frac{\pi}{h} \left( R_0 \sqrt{R_0^2 L_d^2 + h^2 b^2} - r_0 \sqrt{r_0^2 L_d^2 + h^2 b^2} + R_0 \sqrt{R_0^2 L_k^2 + h^2 b^2} - r_0 \sqrt{r_0^2 L_k^2 + h^2 b^2} \right) + \frac{\pi h b^2}{L_k} \ln \left| \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 + \frac{h^2 b^2}{L_k^2}}}{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2 b^2}{L_k^2}}} \right| + \frac{\pi h b^2}{L_d} \ln \left| \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 + \frac{h^2 b^2}{L_d^2}}}{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2 b^2}{L_d^2}}} \right|. \quad (6)$$

Эквивалентный диаметр трубного пространства

$$d_{eqv} = \frac{4V}{S},$$

где  $V$ ,  $S$  вычисляются по формулам (5), (6).

**2. Эквивалентный диаметр межтрубного пространства.** Площадь смоченной поверхности с учетом толщины стенки  $\delta$  определяется по формуле

$$S_0 = 2\pi R l + S_1, \quad (7)$$

где  $S_1$  вычисляется по формуле (6) при  $r_0 = r_1$ ,  $R_0 = R_1$ , здесь  $r_1 = r_0 + \delta$ ,  $R_1 = R_0 + \delta$ .

Объем межтрубного пространства с учетом толщины стенки  $\delta$

$$V_0 = \pi R^2 l - \frac{\pi l}{3} (3(r_0 + \delta)^2 + 3(r_0 + \delta)h + h^2). \quad (8)$$

Тогда эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$D_{eqv} = \frac{4V_0}{S_0},$$

где  $S_0$  и  $V_0$  вычисляются по формулам (7), (8).

**3. Расчет эквивалентных диаметров в аппарате типа «труба в трубе» с винтовым теплообменным элементом.** Геометрические размеры (мм) указаны на рис. 4.

Имеем:

$$R = 0,032 \text{ м}; r_0 = 0,0065 \text{ м}; h = 0,003 \text{ м}; \delta = 0,0015 \text{ м}; l_d = 0,015 \text{ м}; l_k = 0,03 \text{ м}.$$

Вычислим

$$l = l_d + l_k = 0,045 \text{ м}; \quad R_0 = r_0 + h = 0,0095 \text{ м};$$

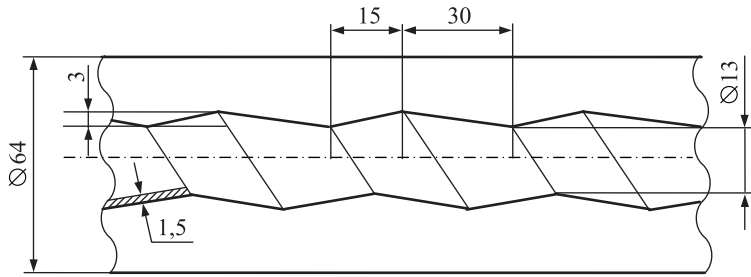


Рис. 4. Аппарат типа «труба в трубе» с винтовым теплообменным элементом

$$L_d = \sqrt{h^2 + l_d^2} = 0,0153 \text{ м}; \quad L_k = \sqrt{h^2 + l_k^2} = 0,0301 \text{ м}; \quad b = \frac{0,045}{2\pi} \approx 0,007166 \text{ м};$$

$$V = \frac{\pi l}{3} (r_0^2 + r_0 R_0 + R_0^2) = 9,1538 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3; \quad S = 0,0023 \text{ м}^2;$$

$$V_0 = \pi R^2 l - \frac{\pi l}{3} (3(r_0 + \delta)^2 + 3(r_0 + \delta)h + h^2) = 1,319 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$S_1 = 0,0027 \text{ м}^2; \quad S_0 = 2\pi R l + S_1 = 0,0118 \text{ м}^2.$$

Тогда эквивалентный диаметр трубного пространства

$$d_{eqv} = \frac{4V}{S} = 0,016 \text{ м}.$$

Эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$D_{eqv} = \frac{4V_0}{S_0} = 0,045 \text{ м}.$$

**Выводы.** Предложены формулы для вычисления эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате типа «труба в трубе» с винтовым теплообменным элементом. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и расчетах нового теплообменного оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фраас А., Оцисик М. Расчет и конструирование теплообменников. М.: Атомиздат, 1971.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. М.: Альянс, 2014. 752 с.
3. Пат. 119452 Российская Федерация. Теплообменный элемент / А.Я. Золотонос, Я.Д. Золотонос, А.Г. Багоутдинова, И.И. Осыка, № 2012109355/06; заявл. 12.03.12; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
4. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д., Посохин В.Н. Математическое моделирование винтовых теплообменных элементов // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 8. С. 41–46.
5. Письменный Е.Н., Баранюк М.М., Вознюк М.М. Равноразвитые поверхности теплообмена и методика численных исследований их теплогидравлических характеристик // Пром. теплотехника. 2012. Т. 34, № 1. С. 45–54.

6. Пат. 2542865 Российская Федерация. Способ изготовления витых труб типа «конфузор-диффузор» / А.Я. Золотонос, Я.Д. Золотонос, Н.М. Шарипов, Д.З. Миннигареев, А.А. Матюшко, А.Г. Багоутдинова, М.Н. Яхнев. № 2013116659/02; заявл. 04.11.13; опубл. 20.10.14, Бюл. № 6.
7. Багоутдинова А.Г., Вачагина Е.К., Золотонос Я.Д. Математическое моделирование труб с винтовой поверхностью теплообмена // Изв. КГАСУ. 2017. № 4. С. 237–244.
8. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. 8-е изд. М.: Физматлит, 2003. 864 с.

**Багоутдинова Альфия Гиззетдиновна**, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет

**Золотонос Яков Давидович**, д-р техн. наук, проф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 16.01.18

**Bagoutdinova Alfiya Gizzetdinovna**, PhD, Ass. Professor;

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Kazan (Volga region) Federal University (KFU), Russia

**Zolotonosov Yakov Davidovich**, DSc, Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Russia

## **THE DEFINITION OF THE EQUIVALENT DIAMETER OF PIPE AND ANNULUS IN THE APPARATUS WITH A SPIRAL HEAT-EXCHANGING ELEMENT**

The results of experiments to determine the hydraulic resistance and the amount of heat transmitted through the heat exchange surface are known to be generalized by criterion equations in which the equivalent diameter is used as the characteristic size. The paper describes the method of calculating the equivalent diameter of the tube and tube space in the apparatus of the «pipe in a pipe» with a screw heat exchanger element. The results of this work can be used in the design and calculation of innovative intensified heat exchange equipment.

**Key words:** equivalent diameter, heat exchanger, screw pipe, screw spiral, volume, surface.

### **REFERENCES**

1. Fraas A., Otsisik M. Raschet i konstruirovaniye teploobmennikov [Calculation and design of heat exchangers]. Moscow, Atomizdat, 1971. (in Russian)
2. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: uchebnik dlya vuzov [Basic processes and devices of chemical technology: Textbook for universities]. Moscow, Al'yans, 2014. 752 p. (in Russian)
3. Pat. 119452 Russian Federation. Teploobmennyy element [The heat exchange element]. A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, A.G. Bagoutdinova, I.I. Osyka No. 2012109355/06; appl. 12.03.12; publ. 20.08.2012, Bull. No. 23. (in Russian)
4. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Posokhin V.N. Matematicheskoe modelirovaniye vintovykh teploobmennykh elementov [Mathematical modeling of helical heat exchange elements]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 8. Pp. 41–46. (in Russian)

5. Pis'mennyy E.N., Baranyuk M.M., Voznyuk M.M. Ravnorazvitye poverkhnosti teploobmena i metodika chislennykh issledovaniy ikh teplogidravlicheskikh kharakteristik [Equalized heat transfer surfaces and the technique of numerical studies of their thermo hydraulic characteristics]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heat Engineering]. 2012. Vol. 34. No. 1. Pp. 45–54. (in Russian)
  6. Pat. 2542865 Russian Federation. Sposob izgotovleniya vitykh trub tipa «konfuzor-diffuzor» [Method of production of twisted pipes of the confuser-diffuser type]. A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, N.M. Sharipov, D.Z. Minnigareev, A.A. Matyushko, A.G. Bagoutdinova, M.N. Yakhnev. No. 2013116659/02; appl. 04.11.13; publ. 20.10.14, Bull. No. 6. (in Russian)
  7. Bagoutdinova A.G., Vachagina E.K., Zolotonosov Ya.D. Matematicheskoe modelirovanie trub s vintovoy poverkhnost'yu teploobmena [Mathematical modeling of pipes with a helical heat exchange surface] Izvestiya KGASU. [News of the KSUAE]. 2017. No. 4. Pp. 237–244. (in Russian)
  8. Fikhtenhol'z G.M. Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya [A course of differential and integral calculus]. Moscow, Fizmatlit, 2003. 864 p. (in Russian)
-

УДК 624.011.1:691.11:624.042

В.А. ЖИЛКИН

**ОЦЕНКА ПРАВОМОЧНОСТИ МЕТОДИК И ФОРМ ОБРАЗЦОВ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ДРЕВЕСИНЫ**

Методом конечных элементов в программном продукте MSC Patran-Nastran исследовано деформированное состояние неоднородных ортотропных образцов, моделирующих древесину, при сжатии и сдвиге. Предложены аналитические зависимости изменения модулей упругости в радиальном направлении при переходе от ранней к поздней древесине. Выполнена оценка относительной погрешности определения модулей упругости весенних и летних слоев методом фотоупругих покрытий. Относительная ошибка в определении величин модулей может достигать 20 %. Анализ напряженного состояния внешних поверхностей наиболее распространенных образцов на скалывание из древесины сосны методом конечных элементов показал, что в окрестности плоскости скалывания для всех исследованных образцов однородное напряженное состояние не наступает. В плоскости скалывания образца, рекомендованного стандартом ASTM (D 5379–93), напряженное состояние приближается к однородному; для стандартного образца, рекомендованного ГОСТом, напряженное состояние в начале и в конце плоскости скалывания отличается от однородного; в образце, предложенном в патенте на изобретение № 2295717, напряженное состояние неоднородно.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, MSC Patran-Nastran, анизотропия, модули упругости раннего и позднего слоев древесины, скалывание, фотоупругое покрытие.

**Введение.** В середине XX столетия информацию о напряженном состоянии образцов из анизотропных материалов получали на моделях из изотропных, по своим механическим свойствам, пьезооптических материалов [1, 2]. Недостатки такого моделирования пытались исключить с помощью метода фотоупругих покрытий, однако и в этом случае жесткость покрытия искажала величины измеряемых параметров [3–6].

Характеристики прочности и жесткости анизотропных материалов обычно изучают при простых видах нагружения стандартных образцов: растяжении, сжатии, изгибе, скалывании. При разработке экспериментальных методов стремятся создать условия, при которых в опасном сечении образца реализовалось бы однородное напряженное состояние. Однако из-за естественной изменчивости древесины, ее неоднородности и анизотропии корректное экспериментальное определение механических свойств древесины в ряде случаев остается открытым вопросом.

Существуют более 30 способов испытания древесины на скалывание вдоль волокон [7, 8]. Предел прочности при скалывании вдоль волокон различными ГОСТами рекомендуется определять на образцах в приспособлении, схема которого изображена на рис. 1.

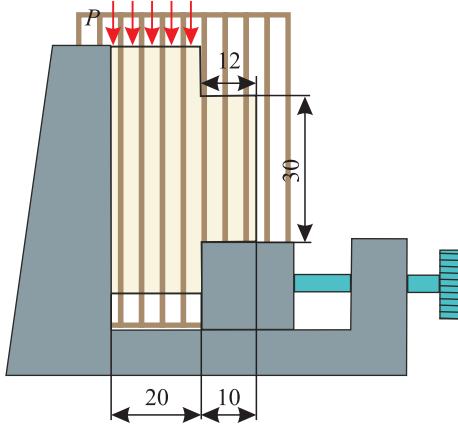


Рис. 1. Приспособление для определения предела прочности при скалывании

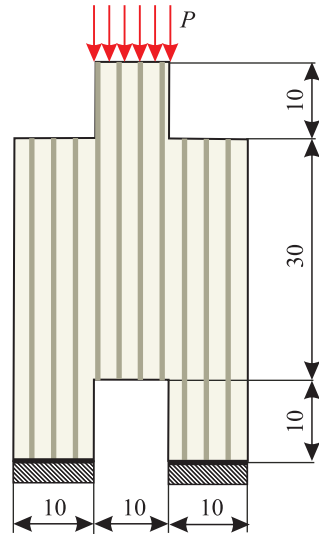


Рис. 2. Образец, предложенный А.Л. Токмаковым

С целью повышения точности измерения усилия скалывания, за счет устранения перекоса испытываемого образца и отсутствия сил трения качения и скольжения на боковых гранях стандартного приспособления на скалывание, А.Л. Токмаковым была разработана форма образца [9], представленная на рис. 2<sup>1</sup>.

В 1967 г. N. Iosipescu [10] предложил метод испытания на срез изотропных материалов (металлов), который теоретически должен был обеспечить однородное напряженное состояние в опасном сечении образца (рис. 3). В этом случае по оси симметрии образца изгибающий момент равен нулю, а перерезывающая сила нулю не равна. Следовательно,  $\sigma_x = 0$ ,  $\tau_{xy} \neq 0$ . При изгибе балок с прямоугольным поперечным сечением касательные напряжения по его высоте меняются по параболическому закону. Для того чтобы заставить образец разрушиться в нужном сечении, а закон изменения касательных напряжений по его высоте приблизить к равномерному, исследователь предлагал это сечение ослабить двумя концентраторами (рис. 4).

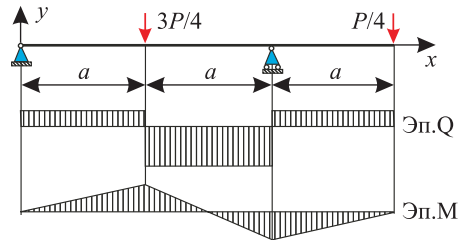


Рис. 3. Схема, предложенная N. Iosipescu

Испытание на сдвиг, предложенное N. Iosipescu, интенсивно изучалось в течение последних 35 лет, начиная с работ D. Adams и D. Walrath [11], выполненных в начале 1980-х гг. Зажимное приспособление [12]<sup>2</sup>, известное

<sup>1</sup> Так как в патенте не указаны размеры образца, то автор счел возможным установить их, исходя из здравого смысла и пропорций образца, приведенных в патенте.

<sup>2</sup> ASTM D 5379-93. Test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1993.

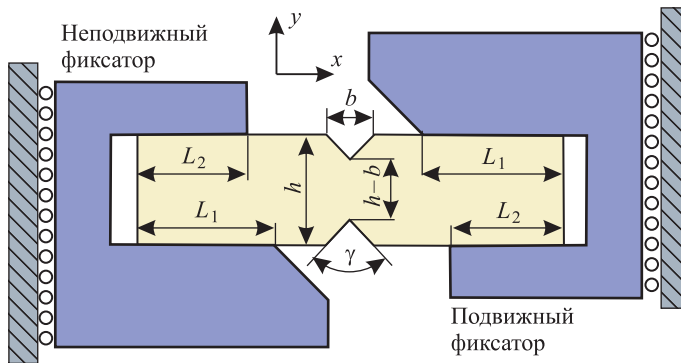


Рис. 4. Зажимное приспособление

как измененное Wyoming приспособление (см. рис. 4), было включено в стандарт ASTM (D 5379–93) и широко используется в научно-исследовательских лабораториях. Оно несколько раз совершенствовалось для устранения паразитных перемещений в плоскости и из плоскости образца.

В последующие годы продолжались работы по поиску оптимальной геометрической формы образца и его размеров для конкретного материала по определению сдвиговых модулей упругости древесины [13]. Ориентировочные размеры образцов и зажимных устройств для композиционных материалов приведены в работе [14]:  $h = 20$  мм; длина образца  $L = 76–78$  мм;  $b = 8$  мм;  $L_1 = 30,9$  мм;  $L_2 = 24,5$  мм (см. рис. 4). Было проведено большое количество исследований с целью оценки применимости метода Iosipescu для древесных и композиционных материалов [15, 16]. Однако однородного напряженного состояния в рабочей части образца для анизотропных материалов достичь не удалось.

В данной работе численный анализ напряженных состояний образцов из древесины выполнен в программном продукте MSC Patran-Nastran [17, 18].

**Определение модулей упругости ранней и поздней древесины в радиальном направлении методом фотоупругих покрытий.** Теоретически метод фотоупругих покрытий позволяет сравнительно легко определить изменение модулей упругости древесины в направлении поперек волокон. Для этого на поверхность детали наклеивается пластинка из изотропного пьезооптического материала. В процессе нагружения детали пластинка становится оптически анизотропной, что приводит к разности фаз световых волн, распространяющихся вдоль главных направлений в покрытии. Приводя направления колебаний световых векторов к одной плоскости (с помощью поляроида), наблюдают интерференционную картину, отображающую распределение максимальных деформаций сдвига ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ ) в пластинке. Если измерить разность хода световых лучей  $m$  и параметр оптической изоклины  $\theta$  в точке покрытия, то можно определить:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x - \varepsilon_y &= \frac{\varepsilon_0^{1,0} m}{2t_{\Pi}} \cos 2\theta; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\varepsilon_0^{1,0} m}{2t_{\Pi}} \sin 2\theta \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$



где  $\varepsilon_0^{1,0}$  – коэффициент, характеризующий пьезооптические свойства материала покрытия, определяемый в процессе его тарировки;

$t_{\text{п}}$  – толщина покрытия;

$\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – продольные деформации в направлении осей  $x$  и  $y$ ;

$\gamma_{xy}$  – деформация сдвига в плоскости  $xoy$ .

Пусть ось  $y$  направлена поперек, а ось  $x$  – вдоль волокон древесины.

Зависимости (1) содержат два уравнения с тремя неизвестными  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\gamma_{xy}$ , для определения которых необходимо к этим двум уравнениям добавить третье, например, одно из дифференциальных уравнений равновесия, численно интегрируя которое устанавливают  $\sigma_x$  или  $\sigma_y$ .

При сжатии образца напряжениями  $\sigma_y = \text{const}$  расшифровку интерференционной картины можно упростить, разрезав фотоупругое покрытие вдоль продольной оси симметрии образца. Тогда по краю покрытия, ориентированного вдоль направления действия силы,  $\varepsilon_x = -\mu_{\text{п}} \varepsilon_y$  ( $\mu_{\text{п}}$  – коэффициент Пуассона материала покрытия),

$$\varepsilon_y = \frac{\varepsilon_0^{1,0} m}{2t_{\text{п}}(1 + \mu_{\text{п}})}. \quad (2)$$

С другой стороны,

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y(y)}. \quad (3)$$

Объединяя зависимости (2) и (3), получим

$$E_y(y) = \frac{2t_{\text{п}}\sigma_y(1 + \mu_{\text{п}})}{\varepsilon_0^{1,0} m}. \quad (4)$$

Оценим возможную погрешность определения модуля упругости древесины в направлении поперек волокон при использовании покрытия из эпоксидной смолы ЭД6 ( $E_{\text{п}} = 3200$  МПа,  $\mu_{\text{п}} = 0,35$ ). Относительная погрешность измерения разности хода световых лучей компенсатором Бабине–Солейля не превышает 5 %, если порядок полосы больше  $m_{\text{min}} = 1,0$ . Условный предел прочности древесины сосны в направлении поперек волокон 5,1 МПа. Если принять модуль упругости древесины в радиальном направлении  $E_r = 620$  МПа, то предельная деформация смятия составит  $\varepsilon_{rb} = 3,4/620 = 8,226 \cdot 10^{-3}$ .

Пусть допустимая величина деформаций  $[\varepsilon_r] = 3,3 \cdot 10^{-3}$ , тогда из уравнений (1) следует  $m = 0,341t_{\text{п}}$ , т.е.  $m > m_{\text{min}}$  при  $t_{\text{п}} \geq 3$  мм. Однако такая толщина покрытия будет существенно влиять на жесткость системы образец–покрытие. Если принять  $t_{\text{п}} = 0,5$  мм, то ошибка измерения разности хода световых лучей компенсатором Бабине–Солейля будет превышать 5 %.

На рис. 5 приведена картина интерференционных полос в фотоупругом покрытии, наклеенном на образец из сосны с размерами  $80 \times 15 \times 30$  мм<sup>3</sup>, сжимаемый силой  $P = 900$  Н. Ширина поздней древесины составляла порядка 20 % ширины годового слоя. Фотоупругое покрытие толщиной 0,5 мм было наклеено на поверхность образца  $30 \times 80$  мм<sup>2</sup>.



Рис. 5. Картина интерференционных полос в фотоупругом покрытии

По экспериментальным данным, используя формулу (4), были вычислены модули упругости  $E_r$ . Графическая зависимость модуля упругости древесины сосны  $E(x) = E_r$  представлена на рис. 6.

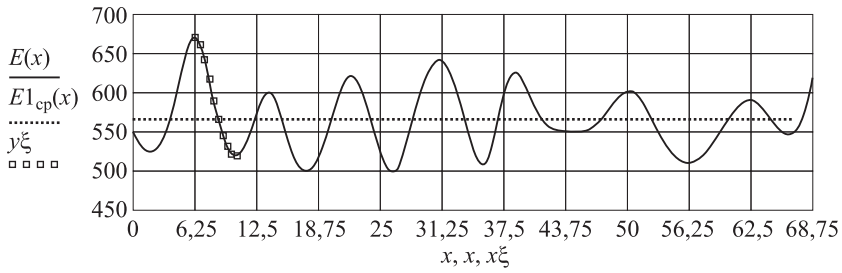


Рис. 6. Зависимость модуля упругости древесины сосны

Для установления аналитической зависимости изменения модуля упругости  $E_r$  в пределах одного годового кольца от середины поздней древесины до середины ранней древесины на кривой  $E(x)$  было выбрано 10 точек (на рис. 6 – квадратики) с шагом  $h = 1,5$  мм и созданы два 10-компонентных вектора  $\vec{x}\xi$  и  $\vec{y}\xi$ , на основе которых методом наименьших квадратов получены аппроксимирующие кривые

$$M(z) = \sum_{r=0}^m (a_r \cdot z^r),$$

где  $a$  – коэффициенты полинома;  
 $m$  – степень полинома (рис. 7).

Учитывая изменчивость показателей упругости древесины в зависимости от климатических условий, районов произрастания, экологии, продол-

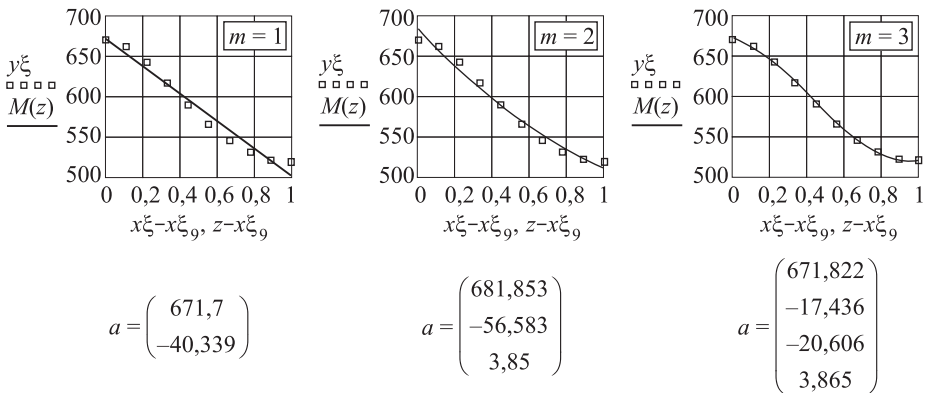


Рис. 7. Зависимость изменения модуля упругости

жительности зимнего и летнего периодов, в первом приближении можно принять линейную зависимость модулей упругости от координаты при переходе от ранней древесины к поздней.

При близких по ширине годовых кольцах упругие характеристики древесины сосны можно моделировать тригонометрическими функциями

$$E(x) = E_{\text{cp}} + \text{Amp} \cos\left(\frac{\pi x}{k} + \varphi\right), \quad (5)$$

где  $E_{\text{cp}}$  – табличное значение модуля упругости;

$\text{Amp}$  – амплитудное значение функции  $E(x)$ ;

$k$  – ширина годовых колец;

$\varphi$  – начальная фаза.

Для рассматриваемого нами случая

$$E_{\text{cp}} = \frac{1}{L} \int_0^L E(x) dx = 565,5 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\text{Amp} = 63,385 \text{ Н/мм}^2;$$

$$R1(x) = E_{\text{cp}} - \text{Amp} \cos\left(\frac{\pi x}{4,435} - \frac{\pi}{4}\right).$$

Рис. 8 иллюстрирует поведение функций  $R1(x)$  и  $E(x)$ , из которого следует, что действительно при малом отличии размеров ширины годовых колец древесины упругие характеристики в радиальном направлении можно моделировать тригонометрическими функциями. Упругие характеристики в радиальном направлении всегда можно моделировать рядом Фурье при любых размерах годовых колец.

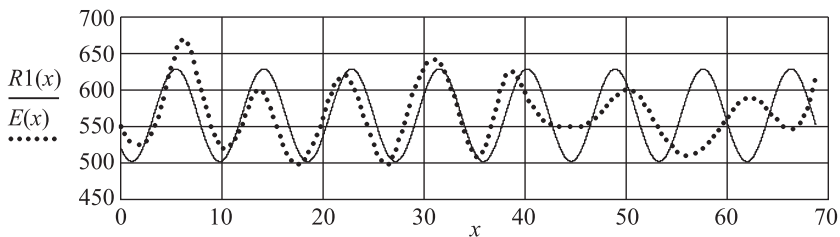


Рис. 8. Поведение функций  $R1(x)$  и  $E(x)$

**Оценка относительной погрешности, возникающей при определении модулей упругости раннего и позднего слоев древесины методом фотоупругих покрытий [18].** В качестве модели древесины для численных расчетов примем неоднородный образец, состоящий из чередующихся ортотропных слоев ранней и поздней древесины сосны. В соответствии с экспериментальными данными изменение модуля упругости  $E_r$  древесины по толщине годового кольца толщиной  $d = 4,22$  мм будем моделировать кусочно-постоянной функцией, предполагая, что толщина ранней древесины составляет 80 % от толщины годового кольца  $d$ , а толщина поздней древесины –  $0,2d$ .

$$E_{\text{МКЭ}}(x) = \begin{cases} E1 = \frac{1}{0,2d} \int_{6,25}^{6,25+0,2d} E(x)dx = 661,6 \text{ МПа, поздняя древесина} \\ E2 = \frac{1}{0,8d} \int_{6,25+0,2d}^{6,25+d} E(x)dx = 566,6 \text{ МПа, ранняя древесина,} \end{cases}$$

откуда

$$E_{\text{ср}} = \frac{E1 + E2}{2} = 614,1 \text{ МПа.}$$

Остальные упругие характеристики взяты из книги Л.М. Перельгина [19]:  $E_t = 500 \text{ МПа}$ ,  $E_a = 11700 \text{ МПа}$ ,  $G_{at} = 710 \text{ МПа}$ ,  $G_{ar} = 1140 \text{ МПа}$ ,  $G_{rt} = 670 \text{ МПа}$ ,  $\mu_{ta} = 0,037$ ,  $\mu_{ra} = 0,03$ ,  $\mu_{rt} = 0,79$ .

Оставшиеся три коэффициента поперечной деформации найдем из условий симметрии матрицы упругих коэффициентов для модели ортотропного материала [20]:

$$\mu_{at} = \frac{\mu_{ta} E_a}{E_t} = 0,866; \quad \mu_{ar} = \frac{\mu_{ra} E_a}{E_r} = 0,566; \quad \mu_{tr} = \frac{\mu_{rt} E_t}{E_r} = 0,637.$$

Из рис. 6 следует, что на отрезке  $[0,30]$  мм располагается пять годовых слоев. Будем численно исследовать на сжатие в радиальном направлении сосновый образец с геометрическими размерами  $6 \times 10 \times 30 \text{ мм}^3$ , у которого ширина годового слоя составляет 6 мм, весеннего слоя – 4 мм, ширина летнего слоя – 2 мм. На поверхность образца  $10 \times 30 \text{ мм}^2$  наклеено фотоупругое покрытие, изготовленное из материала ЭД6 толщиной 0,5 мм, с размерами в плане  $10 \times 30 \text{ мм}^2$ . Радиальное направление древесины совпадает с осью  $z$ , тангенциальное – с осью  $y$ . Волокна древесины направлены вдоль оси  $x$ .

Результаты расчета методом конечных элементов (МКЭ) приведены на рис. 9, где 1 – эпюра деформации  $\epsilon_z$  левой кромки поверхности с нормалью  $x$ ; 2 – деформации  $\epsilon_z$  правой кромки; на рис. 9, б показаны изополя деформаций  $\epsilon_z$  на внешней поверхности КЭ модели.

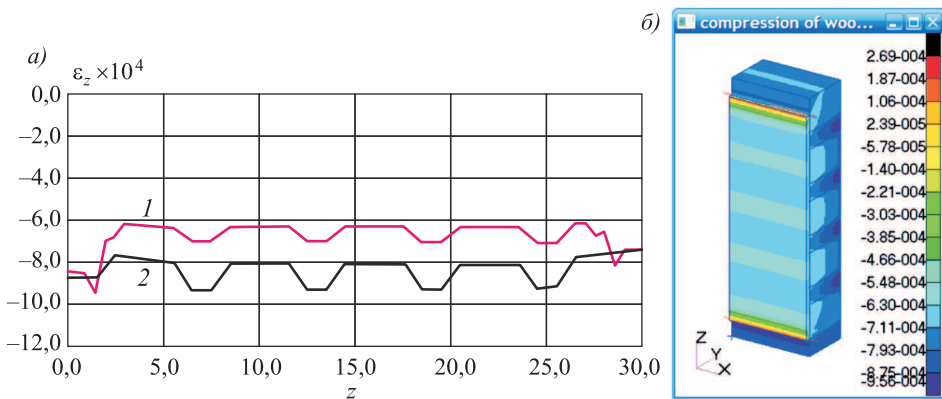


Рис. 9. Результаты расчета МКЭ

Из рис. 9 следует, что даже такое тонкое фотоупругое покрытие существенно влияет на деформированное состояние образца:

- деформации  $\varepsilon_z$  правой кромки торцевой поверхности  $6 \times 30$  мм<sup>2</sup> значительно превышают аналогичные деформации левой кромки;
- область влияния поздней древесины на деформации  $\varepsilon_z$  в покрытии приблизительно в 2 раза больше ширины этой зоны в образце.

Относительная погрешность определения деформаций  $\varepsilon_z$  с помощью фотоупругого покрытия составила  $\approx 19$  %.

**Исследование напряженного состояния образцов на скалывание.**  
*Стандартный образец.* Материал образца – сосна. К верхнему торцу образца прикладывалась равномерно распределенная нагрузка интенсивностью  $q = 10$  Н/мм (см. рис. 1). Решалась плоская упругая контактная задача МКЭ.

Картины полос напряжений  $\sigma_x$  и  $\tau_{xy}$  приведены на рис. 10, а эпюры нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений в опасном сечении на рис. 11, из которых следует, что в предполагаемых плоскостях скалывания однородное напряженное состояние не реализуется. Начало координатной оси  $y$  совмещено с основанием приспособления для скалывания образца.

В пределах средних участков величины касательных  $\tau_{xy}$  и нормальных  $\sigma_x$  напряжений близки к постоянным величинам. В начале и в конце плоскостей скалывания ( $y$  подвижной опоры) наблюдается концентрация как касательных, так и нормальных напряжений, приводящих к появлению трещины вдоль волокон древесины.

Итак, в процессе численного расчета МКЭ стандартных образцов на скалывание, рекомендованных ГОСТом, установлено, что напряженное состояние чистого сдвига по плоскости скалывания не возникает. Для такого типа образцов состояния чистого сдвига в принципе достичь невозможно, ибо в конце плоскости скалывания касательные напряжения должны быть равны

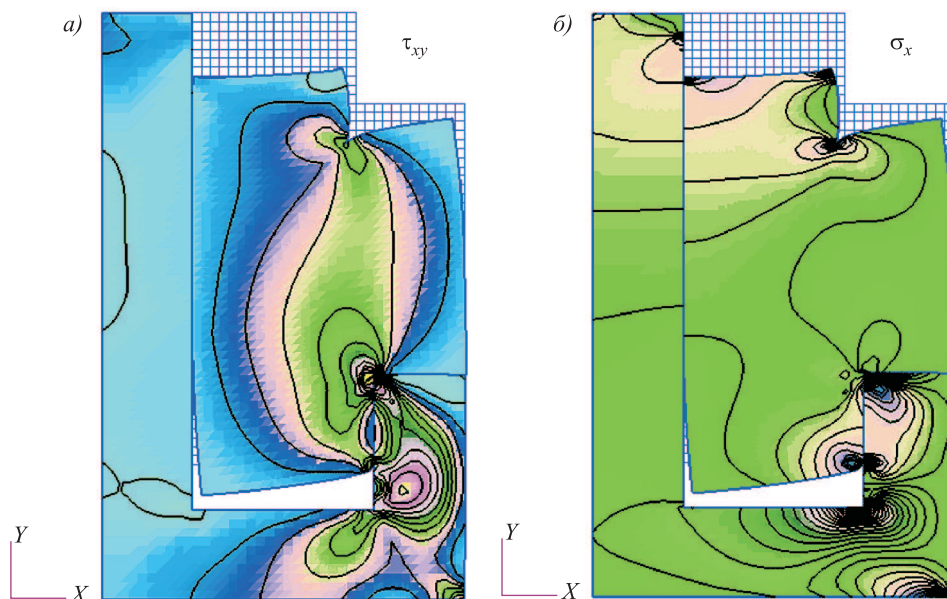


Рис. 10. Картины полос напряжений  $\tau_{xy}$  (а) и  $\sigma_x$  (б)

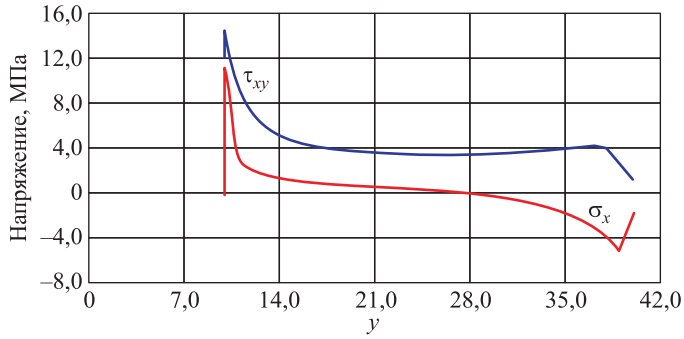


Рис. 11. Эпюры нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений в опасном сечении

нулю, а в начале плоскости скалывания для данного вида образца и опорных устройств не удастся избежать концентрации напряжений. Поэтому испытание стандартного образца на скалывание можно рассматривать только как технологическую пробу, но не как физический метод определения предельной величины касательных напряжений.

*Напряженное состояние образца Токмакова на скалывание.* К верхнему торцу образца прикладывалась равномерно распределенная нагрузка интенсивностью  $q = 10$  Н/мм.

Картинки изополюс нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений приведены на рис. 12, а эпюры этих напряжений на рис. 13. Из этих рисунков следует, что однородное напряженное состояние чистого сдвига в плоскости скалывания не реализуется, а значительные сжимающие напряжения  $\sigma_x$  в конце плоскости скалывания будут увеличивать предел прочности на скалывание.

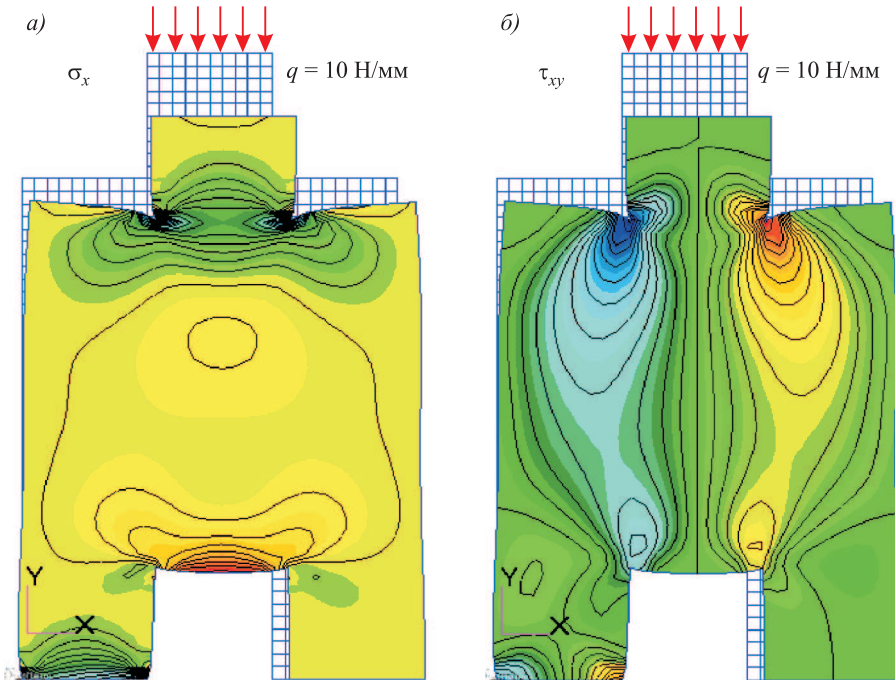


Рис. 12. Картинки изополюс нормальных  $\sigma_x$  (а) и касательных  $\tau_{xy}$  (б) напряжений

Сопоставляя графики напряжений, приведенных на рис. 11 и 13, можно констатировать, что при испытаниях на скалывание образцов из древесины целесообразно использовать стандартные образцы. Начало координатной оси  $y$  на рис. 12, 13 совмещено с основанием образца.

*Напряженное состояние образца Iosipescu на скалывание.* Внешний вид образца Iosipescu приведен на рис. 4, где  $a = 25$  мм;  $b = 8$  мм;  $h - b = 12$  мм;  $h = 20$  мм;  $\gamma = 90^\circ$ .

Моделированию подвергалась балка из древесины сосны, волокна которой направлены вертикально к упругой линии балки. Для узлов левой нижней и правой верхней поверхностей образца на участках длиной 25 мм, отсчитываемых от торцов образца, и для узлов левой верхней и правой нижней поверхностей на участках длиной 20 мм, отсчитываемых от торцов образца, были созданы жесткие защемления. Защемленным участкам правой части образца задавалось перемещение поверхностей в направлении обратном положительному направлению оси  $y$  на величину 2 мм.

Картинки изополюс нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений приведены на рис. 14, а эпюры напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  в опасном сечении на рис. 15, анализ которых показывает, что для такой схемы нагружения образца напряженное состояние в опасном сечении близко к однородному.

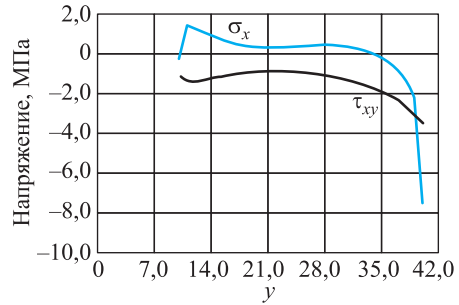


Рис. 13. Эпюры нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений

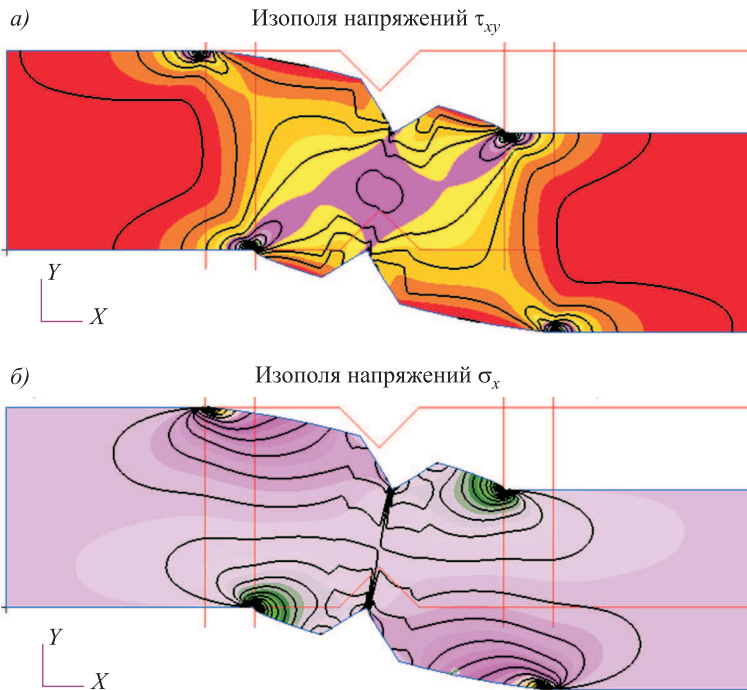


Рис. 14. Картинки изополюс касательных  $\tau_{xy}$  (а) и нормальных  $\sigma_x$  (б) напряжений

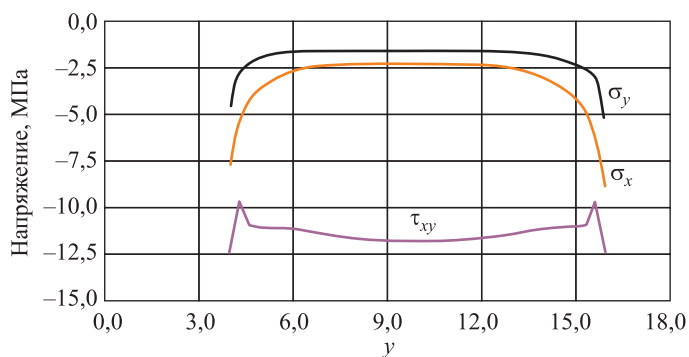


Рис. 15. Эпюры напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  в опасном сечении

**Выводы.** Исследование деформированного состояния изделий из древесины методом фотоупругих покрытий позволяет получить только качественную картину распределения деформаций. Количественные характеристики деформаций могут быть определены с погрешностью не ниже 20 %.

1. В плоскости скалывания образца Iosipescu напряженное состояние приближается к однородному, а потому это наиболее оптимальный образец на скалывание.

2. В плоскости скалывания стандартного образца напряженное состояние несколько отличается от однородного в начале и в конце плоскости скалывания, эта схема испытаний отличается простотой по сравнению со схемой Iosipescu.

3. В плоскости скалывания образца Токмакова напряженное состояние неоднородно и его нецелесообразно использовать для определения прочностных характеристик древесины на скалывание.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kollmann F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin, 1951. Bd. 1, 2. 1048 S.
2. Sasaki H., Маки Т. Stress Analysis of Wood, Second Trial with a Photoelastic Method // Wood Science and Technology. 1968. Vol. 3.
3. Дмитриев П.А., Жилкин В.А., Стрижаков Ю.Д. Исследование смятия древесины в отверстии с помощью оптически чувствительных покрытий // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1971. № 2. С. 18–24.
4. Жилкин В.А., Коротков А.В. Исследование методом фотоупругих покрытий деформированного состояния стандартных образцов на скалывание // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1971. № 4. С. 176–179.
5. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.
6. Албаут Г.Н., Пуртов В.В., Павлик А.В., Табанюхова М.В., Михеева О.А. Исследование соединений деревянных элементов на металлических пластинах и дюбелях с зубчатыми шайбами поляризационно-оптическим методом при действии кратковременных нагрузок // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 7. С. 116–121.
7. Белянкин Ф.П. Прочность древесины при скалывании вдоль волокон. Киев: Знание, 1955. 256 с.



8. Арленинов Д.К., Буслаев Ю.Н., Игнатъев В.П., Романов П.Г., Чахов Д.К. Конструкции из дерева и пластмасс. М.: Изд-во АСВ, 2002. 280 с.
9. Пат. № 2295717. Способ испытания деревянных строительных конструкций на скалывание вдоль волокон / А.Л. Токмаков; опубл. 20.03.2007.
10. Iosipescu N. New accurate procedure for single shear testing of metals // *Materials*. 1967. Vol. 2, No. 3, sept. P. 537–566.
11. Adams D.F., Walrath D.E. Further developments of the Iosipescu shear test method // *Exp. Mech*. 1987. Vol. 27, No. 2. P. 113–9.
12. Adams D.F., Walrath D.E. Iosipescu shear properties of SMC composite materials // *Composite materials: testing and design (Sixth Conference) (ASTMSTP 787)*. Philadelphia: ASTM, 1982. P. 19–33.
13. Xaviera J.C., Garrido N.M., Oliveirab M., Moraisa J.L., Camanho P.P., Pierrond F. A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait. *Composites: Part A: applied science and manufacturing*. 2004. No. 35. P. 827–840.
14. Melin N. The modified Iosipescu shear test for orthotropic materials. Doctoral thesis No. 72. Department of Solid Mechanics Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2008. 37 p.
15. Janowiak J.J., Pellerin R.F. Iosipescu shear test apparatus applied to wood composites // *Wood and Fiber Science*. 1991. Vol. 23, No. 3. P. 410–418.
16. Suna Y.T., Shia D.Q., Yanga X.G., Mia C.H., Fengb J., Jiangb Y.G. Stress state analysis of Iosipescu shear specimens for aerogel composite with different properties in tension and compression // *Procedia Engineering*. 2013. No. 67. P. 517–524.
17. Жилкин В.А. Азбука инженерных расчетов в MSC Patran-Nastran-Marc. СПб.: Проспект Науки, 2013. 574 с.
18. Жилкин В.А. Оценка точности исследования напряженного состояния элементов деревянных конструкций методом фотоупругих покрытий // *Вестн. ЧГАА*. 2012. Т. 61. С. 63–70.
19. Перелыгин Л.М. Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 320 с.
20. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.

**Жилкин Виталий Афанасьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: zhilkin\_vitalii@mail.ru  
Южно-Уральский аграрный университет, г. Троицк

Получено после доработки 23.01.18

**Zhilkin Vitaliy Afanasievich**, DSc, Professor; E-mail: zhilkin\_vitalii@mail.ru  
South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

## **EVALUATION OF THE PRACTICALITY OF METHODS AND FORMS OF SAMPLES FOR THE DETERMINATION OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD**

The deformed state of heterogeneous orthotropic samples modeling wood under compression and shear, one surface of which is supported by a plate of isotropic material, was investigated by the finite element method in the software product MSC Patran-Nastran. It is shown that the application of the method of photoelastic coatings to determine the elastic moduli of the spring and summer layers in investigating the crushing of wood in the direction across the fibers can lead to significant errors. Assessment of a relative error of definition of modules of elasticity of spring and summer layers is executed by method

of photo elastic coatings. The relative mistake in determination of sizes of modules can reach 20 %. The analysis of tension of external surfaces of the most widespread samples on shearing from pine wood a finite element method has shown that in the neighborhood of the shearing plane for all studied samples uniform tension doesn't come. In the plane of shearing of the sample recommended by the standard of ASTM (D 5379–93), tension approaches uniform; for the standard sample recommended to State standart specification tension at the beginning and at the end of the plane of shearing differs from uniform; in the sample offered in the patent for an invention No. 2295717, tension it is non-uniform.

**Key words:** MCE, MSC Patran-Nastran, anisotropy, elastic moduli of the early and late layers of wood, shearing, photo elastic coating.

#### REFERENCES

1. Kollmann F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin, 1951. Bd. 1, 2. 1048 S.
2. Sasaki N., Maki T. Stress Analysis of Wood, Second Trial with a Photoelastic Method. Wood Science and Technology. 1968. Vol. 3.
3. Dmitriev P.A., Zhilkin V.A., Strizhakov Yu.D. Issledovanie smyatiya drevesiny v otverstii s pomoshch'yu opticheski chuvstvitel'nykh pokrytiy [A study of the crushing of wood in a hole by means of optically sensitive coatings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1971. No. 2. Pp. 18–24. (in Russian)
4. Zhilkin V.A., Korotkov A.V. Issledovanie metodom fotouprugikh pokrytiy deformirovannogo sostoyaniya standartnykh obraztsov na skalyvanie [Investigation of the deformed state of standard samples for shearing by the method of photoelastic coatings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture] 1971. No. 4. Pp. 176–179. (in Russian)
5. Alexandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. Polyarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruемого tela [Polarization-optical methods of mechanics of a deformed body]. Moscow: Nauka, 1973. 576 p. (in Russian)
6. Albaut G.N., Purto V.V., Pavlik A.V., Tabanyukhova M.V., Mikhееva O.A. Issledovanie soedineniy derevyannykh elementov na metallicheskiikh plastinakh i dyubelyakh s zubchatymi shaybami polyarizatsionno-opticheskim metodom pri deystvii kratkovremennykh nagruzok [Investigation of wooden elements joints on metal plates and expansion bolts with racky and washers by the polarization – optical method in case of transitory load action]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2007. No. 7. Pp. 116–121. (in Russian)
7. Belyankin F.P. Prochnost' drevesiny pri skalyvanii vdol' volokon [Strength of wood when splitting along fibers]. Kiev, 1955. 256 p. (in Russian)
8. Arleninov D.K., Buslaev Yu.N., Ignatiev V.P., Romanov P.G., Chakhov D.K. Konstruktsii iz dereva i plastmass [Construction of wood and plastics]. Moscow, 2002. 280 p. (in Russian)
9. Pat. No. 2295717. Sposob ispytaniya derevyannykh stroitel'nykh konstruktsiy na skalyvanie vdol' volokon [Method for testing wooden building structures for chipping along fibers]; A.L. Tokmakov; publ. 20.03.2007.
10. Iosipescu N. New accurate procedure for single shear testing of metals. Materials. 1967. Vol. 2, No. 3, Sept. Pp. 537–566.
11. Adams D.F., Walrath D.E. Further developments of the Iosipescu shear test method. Exp Mech 1987. Vol. 27, No. 2. Pp. 113–9.

12. Adams D.F., Walrath D.E. Iosipescu shear properties of SMC composite materials. Composite materials: testing and design (Sixth Conference) (ASTMSTP 787). Philadelphia: ASTM, 1982. Pp. 19–33.
  13. Xaviera J.C., Garridob N.M., Oliveirab M., Moraisa J.L., Camanhoc P.P., Pierrond F. A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait. Composites: Part A: applied science and manufacturing. 2004. No. 35. Pp. 827–840.
  14. Melin N. The modified Iosipescu shear test for orthotropic materials. Doctoral thesis No. 72. Department of Solid Mechanics Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2008. 37 p.
  15. Janowiak J.J., Pellerin R.F. Iosipescu shear test apparatus applied to wood composites. Wood and Fiber Science. 1991. Vol. 23, No. 3. Pp. 410–418.
  16. Suna Y.T., Shia D.Q., Yanga X.G., Mia C.H., Fengb J., Jiangb Y.G. Stress state analysis of iosipescu shear specimens for aerogel composite with different properties in tension and compression. Procedia Engineering. 2013. No. 67. Pp. 517–524.
  17. Zhilkin V.A. Azbuka inzhenernykh raschetov v MSC Patran-Nastran-Mars [ABC of engineering calculations in MSC Patran-Nastran-Marc]. Saint-Petersburg, 2013. 574 p. (in Russian)
  18. Zhilkin V.A. Otsenka tochnosti issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya elementov derevyannykh konstruktsiy metodom fotouprugikh pokrytiy [Estimating the accuracy of the study of the stress state of elements of wood structures by the method of photoelastic coverings]. Vestnik ChGAA. 2012. T. 61. Pp. 63–70. (in Russian)
  19. Perelygin L.M. Drevesinovedenie [Hardcore studies]. Moscow: Forest Industry, 1969. 320 p. (in Russian)
  20. Lehnitskiy S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela [Theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow, Nauka, 1977. 416 p. (in Russian)
-

УДК 625.73.1

А.В. СМИРНОВ, А.И. БЕЛОВА

**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ  
В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Рассмотрен способ определения прочности дорожных одежд автомобильных дорог установками динамического нагружения. В результате экспериментальных исследований установлены корреляционные связи между параметрами чаши прогибов, возникающих под действием подвижных нагрузок на поверхности дорожной конструкции, с ее общим динамическим модулем упругости, а также ряд коэффициентов адаптации подвижной колесной нагрузки к ударной. Прочность дорожной одежды характеризуется модулем упругости и возникающим при нагружении динамическим прогибом поверхности. Динамический прогиб конструкции дорожной одежды от воздействия подвижной нагрузки определен из точного решения, которое включает две волновые функции Бесселя. В значения динамического прогиба дополнительно, с целью получения достоверных данных, включены коэффициент учета класса нагрузок и реальных скоростей движения, а также коэффициент, снижающий первоначальную прочность дорожной одежды на момент проведения диагностики за счет многократного приложения подвижных нагрузок.

**Ключевые слова:** подвижная и ударная нагрузки, прочность, чаша прогибов, амплитудно-частотная характеристика, динамический прогиб.

**Введение.** Действующие нормативные требования<sup>1</sup> предусматривают оценку прочности дорожной одежды через коэффициент прочности как отношения измеренного (фактического) модуля упругости к требуемому. В настоящее время в РФ появилось значительное количество установок динамического нагружения (УДН) собственного и зарубежного производства (УДН-НК МАДИ, ДИНА-3М, FWD 8000, DINATEST и др.), которые при повышенной производительности способны имитировать удар по поверхности покрытия и получать «функцию отклика» – динамический прогиб и форму чаши его прогиба. В связи с чем требуется разработка методики преобразования измеренных величин в показатель прочности проезжей части дороги – динамический модуль упругости [1, 2].

**Постановка задач.** Для решения поставленного вопроса должны быть выполнены следующие задачи:

- определение корреляционных связей между динамическим прогибом и модулем упругого полупространства;
- установление корреляционных связей между полуразмером чаши прогиба и модулем упругости полупространства;
- определение адекватности воздействия колесной нагрузки транспортного средства ударному УДН на покрытия дорог.

<sup>1</sup> ОДМ 218.2.024–2012. Методические рекомендации по оценке прочности жестких дорожных одежд. М., 2013. 28 с.

Параметрами динамического воздействия подвижных нагрузок, влияющими на прогибы в центре чаши прогибов, обычно являются значения вертикальных нагрузок, их импульсов (или контактных напряжений), упругости поверхности дорожной конструкции (общий динамический модуль упругости), скорость горизонтального движения нагрузки. Дополнительное влияние на конфигурацию прогиба оказывает вязкость материалов конструкции, замедляющая развитие прогиба перед подвижной нагрузкой и обеспечивающая его восстановление после нагружения [3–6].

При ударном нагружении неподвижной нагрузкой, что свойственно всем современным УДН, вокруг жесткого штампа формируется волновое поле, в котором лишь частично присутствует чаша прогибов, поскольку за ее пределами прогибы (вертикальные перемещения) многократно меняют знак до полного затухания колебаний [7].

Рассмотрим физико-механические модели загрузки упругого полупространства слоистых дорожных конструкций с учетом вязкости при действии подвижной и ударных нагрузок с целью определения параметров динамических чаш прогибов покрытий дорог.

Впервые задачу о воздействии горизонтально движущейся вертикальной нагрузки, распределенной равномерно с интенсивностью  $p_3$  по кругу радиуса  $a$  решили в Колумбийском университете (США, Нью-Йорк) S.K. Sing и I.T. Куо. Конкретное применение и развитие этой задачи выполнено в СибАДИ в 1975 г.

В явном виде перемещения (прогиб)  $U$  поверхности упругого полупространства определяются формулой

$$U = \frac{p_3 a}{\mu} \left[ K_1 I_{1,1} + \frac{K_2}{4} \beta_T^2 (3I_{1,1} - I_{1,3}) \right]. \quad (1)$$

Здесь  $K_1 = \frac{\chi}{2(1+\chi)}$ ;  $K_2 = \frac{\chi^2 + 1}{8(1-\chi)^2}$ ;  $\chi = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu}$ ;  $\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}$ ;  $\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$ ;

$$\beta^2 = \frac{V^2}{C_T^2};$$

$\sigma$  – коэффициент Пуассона;

$V$  – скорость движения нагрузки;

$C_T$  – скорость продольных волн в полупространстве;

$I_{1,1}, I_{1,3}$  – табулированные функции Бесселя;

$E$  – модуль упругости.

Общий вид вертикальных прогибов поверхности показан на рис. 1.

Многочисленные расчеты по формуле (1) дают возможность установить параметр чаши прогибов: прогиб в центре нагрузки  $U$  и радиус его кругового распространения по поверхности  $L$ , а также степень симметричности кривой прогибов (табл. 1).

Общий характер корреляционных связей между прогибом, размером чаши прогибов и модулем упругости  $E$  приведен на рис. 2 и может быть представлен следующими выражениями:

$$U = 1,25 e^{-0,003305E}; \quad (2)$$

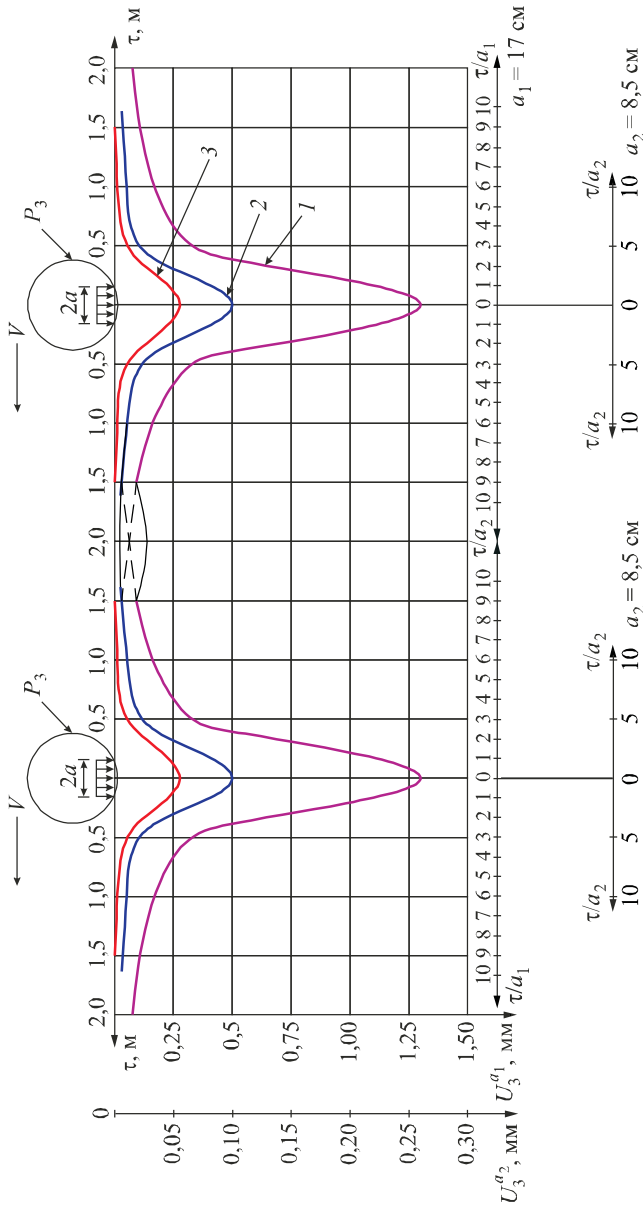


Рис. 1. Кривые вертикальных упругих деформаций поверхности упругого полуэллиптического при движении двухосного грузового ( $U_3^{a_1}$ ) и легкового ( $U_3^{a_2}$ ) автомобилей со скоростью 40 км/ч. Кривые 1, 2, 3 – для модулей упругости в 100, 300 и 500 МПа. Горизонтальные перемещения равны соответственно  $0,3(U_3^{a_1})$  и  $0,3(U_3^{a_2})$

$$L = 3,30 - 0,0041E. \tag{3}$$

Структура и анализ формулы (1) указывают на зависимость прогиба и размера чаши прогибов от скорости горизонтального движения нагрузки  $V$

Таблица 1. Размеры чаши прогибов

Модуль упругости, МПа	Прогиб в центре чаши $U$ , мм	Полуразмер чаши прогибов $L$ , м	Диаметр чаши прогибов, м	$\frac{U}{L}$
100	1,25	2,975	5,95	$4,200 \cdot 10^{-4}$
300	0,50	2,100	4,20	$2,380 \cdot 10^{-4}$
500	0,25	1,220	2,44	$0,204 \cdot 10^{-4}$

Примечание. Чаша прогибов симметрична; удельная нагрузка 0,55 МПа; диаметр следа колеса 34 см; скорость подвижной нагрузки 40 км/ч.

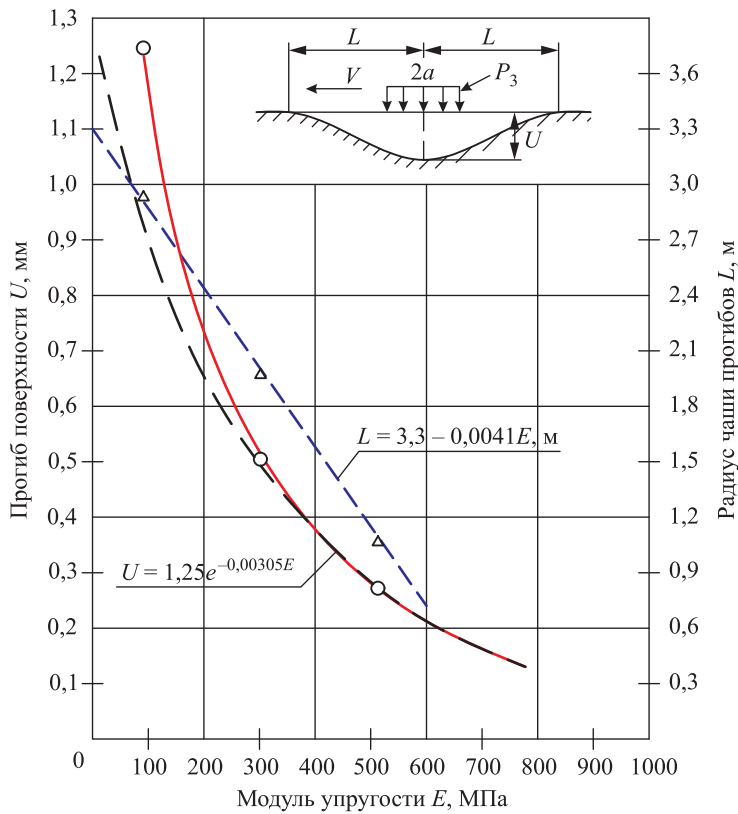


Рис. 2. Корреляционные связи глубины и радиуса чаши прогиба с модулем упругости ( $p_3 = 0,55$  МПа,  $a = 17$  см)

и величины нагрузки. Эта зависимость выражается в коэффициентах  $K_{pu}$  и  $K_V$  (табл. 2), которые вводятся в качестве корректировки в выражения (2) и (3):

$$U = 1,25 e^{-0,00305E} K_{pu} K_V; \quad (4)$$

$$L = 3,30 K_{pu} K_V - 0,0041E, \quad (5)$$

обратным преобразованием получим:

$$E = \frac{\ln 1,25 - \ln U}{0,00305 K_{pu} K_V}. \quad (6)$$

Таблица 2. Коэффициенты учета класса нагрузок и их скорости движения

Вид (класс) нагрузок	Давление, $P_3$	Нагрузка на колесо, кН	Диаметр кругового следа, $2a$ , см	$p_3 \cdot 2a$ , МПа · см	Коэффициент учета класса нагрузок на прогиб, $K_{pu}$	Коэффициент учета скорости движения нагрузки $K_V$ при $V$ , км/ч			
						0	40	60	80
Грузовой автомобиль	0,55	49,9	34	18,7	1,00	–	–	–	–
АК-100	0,60	50,0	39	23,4	1,25	–	–	–	–
АК-115	0,60	57,5	39	23,4	1,25	0,96	1,00	1,04	1,08
АК-130	0,60	65,0	42	25,2	1,34	–	–	–	–

Примечание. По ГОСТ 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения.

В связи с тем, что с увеличением скорости движения нагрузки происходят последовательные изменения очертания чаши прогибов от симметричной в несимметричную, и в дальнейшем, когда радиус кривой прогибов перед движущимся колесом меньше чем за колесом, переходит в волнообразную, целесообразно доказать близость форм колебаний поверхности при воздействии подвижной и ударной нагрузок. Для этого вычислим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) упругого полупространства от воздействия подвижной расчетной нагрузки  $AЧX_{p,n}$  и  $AЧX_{yдн}$  по формулам:

$$AЧX_{p,n} = \frac{U_{дин}}{v_{p,n}}; \quad AЧX_{yдн} = \frac{U_{дин}}{v_{yдн}}, \quad (7)$$

где  $v_{p,n}$ ,  $v_{yдн}$  – частоты колебаний от подвижной нагрузки и при ударе.

Частота  $v_{p,n}$  определена из работ [7, 8], а частота  $v_{yдн}$  – по работе [9]. Из частоты [10] следует, что длительность удара о поверхность полупространства составляет  $T = 0,13 \cdot 10^{-3}$  с. Сравнение АЧХ при ударе с АЧХ при проезде подвижной нагрузки по поверхности полупространства с модулем упругости от 100 до 1000 МПа приведено в табл. 3. Из нее следует, что в диапазоне скоростей движения транспортной нагрузки от 40 до 100 км/ч возникают волновые поля такие же, как и при ударной нагрузке (отличие составляет только 1,8 %) [11].

При определении прочности дорог в любое время с вычислением общего модуля упругости следует учитывать накопленную усталость и деструкции в конструкциях за счет предшествующих нагружений их колесными нагрузками от транспортных средств. Это возможно, если в формуле

Таблица 3. Сравнение амплитудно-частотных характеристик при ударе и при подвижной нагрузке

Модуль упругости полупространства $E$ , МПа	Скорость подвижной нагрузки $V$ , км/ч	$U$ , мм	$AЧX_{p,n}$ , мм	$AЧX_{yдн}$ , мм	$K_{yдн} = \frac{AЧX_{yдн}}{AЧX_{p,n}}$	Отклонения, %	Среднее отклонение, %
1000	40	1,00	$15,0 \cdot 10^{-5}$	$13,0 \cdot 10^{-5}$	0,86	-14	1,8
	60	0,50	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	0,68	-32	
	80	0,40	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	0,80	-20	
Среднее						-22	
400	60	1,75	$21,0 \cdot 10^{-5}$	$22,0 \cdot 10^{-5}$	1,04	4	
	80	1,20	$12,0 \cdot 10^{-5}$	$15,6 \cdot 10^{-5}$	1,30	30	
	100	0,60	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	1,30	30	
Среднее						21,3	
100	80	1,70	$24,0 \cdot 10^{-5}$	$22,0 \cdot 10^{-5}$	0,91	-9	
	100	1,10	$12,5 \cdot 10^{-5}$	$14,3 \cdot 10^{-5}$	1,14	14	
Среднее						2,5	

Примечание. Время удара  $T = 0,13 \cdot 10^{-3}$  с; подвижная и ударная нагрузка 50 кН.



Таблица 4. Влияние длительности эксплуатации на снижение прочности дорожных конструкций

Показатель		Месячная интенсивность движения автомобилей с нагрузкой АК-100 (ед./мес) на полосу движения в III ДКЗ				Минимальный модуль упругости дорожной одежды $E_{\min}$ , МПа	Коэффициент снижения прочности $K_{\text{пр.т}}$
		I	II	III	IV		
Категория дороги						I	I
Расчетный период диагностики прочности	1 месяц	12 600	10 800	3600	360	300,88	1,0
	2 месяц	25 200	21 600	7200	720	297	0,98
	3 месяц	37 800	32 400	10 800	1080	295	0,98
	4 месяц	50 400	43 200	14 400	1440	293	0,97
	5 месяц	63 000	54 000	18 000	1800	291	0,96
	1 год	15 120	129 600	36 000	3600	272	0,90
	2 года	302 400	259 200	72 000	7200	268	0,89
	3 года	756 000	64 800	180 000	18 000	250	0,83
10 лет	1512 000	1296 000	360 000	36 000	230	0,76	

$E_{\min} = 98,65 [\lg(\Sigma N_p) - 3,55]$  МПа<sup>2</sup> из суммы числа нагружений ( $\Sigma N_p$ ) вычитать предшествующее число нагружений, принятое по [8]. Полученный результат в формуле уменьшения модуля упругости с течением времени эксплуатации дорог и времени проведения диагностики приведен в табл. 4. Здесь же изменение модуля упругости представлено коэффициентом прочности  $K_{\text{пр.т}}$ , убывающим во времени  $T$  от 1,0 до 0,76 на 10-й год эксплуатации дороги [12, 13].

Таким образом, в формулы (4)–(6) следует вводить три коэффициента  $K_{\text{ри}}$ ,  $K_v$ ,  $K_{\text{пр.т}}$ , учитывающие, собственно, величину колесной нагрузки, ее скорость и усталость дорожных конструкций.

Например, фактический прогиб на дороге I технической категории составляет 0,5 мм после двухлетней эксплуатации дороги. Тогда из формулы (6) следует:

$$E = \frac{\ln 1,25 - \ln 0,5}{0,0035 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,89} = 249 \text{ МПа.}$$

Размер чаши прогибов составит из формулы (5):

$$L = 3,30 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,89 - 0,0041 \cdot 249 = 2,49 \text{ м.}$$

**Выводы.** 1. Параметры динамического воздействия подвижной колесной нагрузки на упругие дорожные конструкции – прогиб и размер чаши прогиба зависят от модуля упругости соответственно экспоненциально и обратно пропорционально (формулы (4) и (5)).

2. Прогиб и размер чаши прогибов дорожной конструкции прямо пропорциональны нагрузкам на колесо и скорости его движения.

<sup>2</sup> ОДН 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд. М., 2001. 145 с.

3. Формы динамических чаш прогибов симметричны, а их размеры выходят за пределы 2,4 м, что требует усовершенствования конструкции УДН.

4. Применение формул (4) и (5) позволяет определять прогиб и размер чаши прогибов по значениям фактического модуля упругости ( $E^{\Phi} = E$ ), получаемого при испытаниях дорог УДН и, наоборот, по замеренным на дорогах прогибах и чаш прогибов вычисляют фактический модуль упругости дорожной конструкции.

5. Волнообразные формы чаш прогибов одинаковы от подвижной и ударной нагрузки.

6. При определении прочности дорог с преобладающей скоростью движения более 40 км/ч целесообразно определять динамический прогиб  $U$  от установок динамического нагружения и частоту его колебания  $\nu$ , с вычислением амплитудно-частотной характеристики дорожной конструкции:

$AЧХ = \frac{U}{\nu}$ , мм · с. Эта характеристика может служить мерой прочности, так

как отражает реальную физическую картину динамического нагружения дороги подвижными нагрузками.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходько В.В. Проблемы дорожного строительства (история и современность). Омск: СибАДИ, 2010. 84 с.
2. Сычев В.В. К расчету слоистых аэродромных покрытий на подвижные нагрузки // Совершенствование технологий строительства и ремонта дорог для условий Сибири: сб. науч. тр. Омск: СибАДИ, 2010. С. 226–233.
3. Смирнов А.В., Иллиополов С.К., Александров А.С. Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций. Омск: СибАДИ, 2003. 188 с.
4. Соколов Ю.В., Шестаков В.Н. Битумные эмульсии в дорожном строительстве. Омск: Ом. дом печати, 2000. 256 с.
5. Галдина В.Д. Модифицированные битумы. Омск: СибАДИ, 2009. 228 с.
6. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. Алматы: «Білім» баспасы, 2013. 152 с.
7. Смирнов А.В., Баженова А.Ю. Волновые поля: как воздействуют подвижные вертикальные нагрузки на поверхность автомагистрали // Автомобильные дороги. 2011. № 11. С. 68–69. № 12. С. 62–63.
8. Андреева Е.В., Смирнов А.В. Современные методы проектирования дорожных конструкций автомагистралей на воздействия транспортных потоков. Омск: СибАДИ, 2014. 135 с.
9. Смирнов А.В., Александров А.С. Механика дорожных конструкций. Омск: СибАДИ, 2009. 212 с.
10. Александров А.С. Нелинейное пластическое деформирование материалов при воздействии повторных нагрузок // Строительство. 2008. № 10. С. 74–84.
11. Сибирякова Ю.М. Экспериментальное исследование некоторых асфальтобетонов под многократной нагрузкой // Транспортное строительство. 2007. № 4. С. 22–24.
12. Александров А.С. Определение продолжительности напряженного состояния в элементах дорожной конструкции при воздействии подвижных нагрузок // Транспортное строительство. 2008. № 2. С. 24–28.

13. М а т у а В.П., П а н а с ю к Л.Н. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. Ростов н/Д: РГСУ, 2001. 372 с.

**Смирнов Александр Владимирович**, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск

**Белова Алена Игоревна**, инж., соискатель; E-mail: belova.alena1004@gmail.com

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск

Получено после доработки 17.01.18

**Smirnov Aleksandr Vladimirovich**, DSc, Professor

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

**Belova Alena Igorevna**, Engineer, Applicant; E-mail: belova.alena1004@gmail.com

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

## **TO DETERMINE THE STRENGTH OF ROADS IN RUSSIAN FEDERATION**

The article describes the method of determining the strength of road pavements of roads installations of the dynamic loading. In the result of experimental studies of the correlation between the parameters of bowl of deflections occur under the action of moving loads on the surface of the road structure with its overall dynamic modulus of elasticity, and a range of ratios adapting the mobile wheel load to the shock. The strength of the pavement is characterized by a modulus of elasticity that occurs when loading dynamic deflection of the surface. Dynamic deflection of pavement structures from the effects of a moving load is determined from the exact solution, which includes two wave functions Bessel. The obtained values of the dynamic deflection additionally, with the aim of obtaining reliable data, included the factor of class loads and the actual speed as well as the factor that reduces the initial strength of the pavement at the time of diagnosis due to the repeated application of moving loads.

**Key words:** moving and impact loads, strength, bowl deflection, amplitude-frequency characteristic, dynamic deflection.

### REFERENCES

1. Prikhod'ko V.V. Problemy dorozhnogo stroitel'stva (istoriya i sovremennost') [Problems of road construction (history and modernity)]. Omsk: SibADI, 2010. 84 p. (in Russian)
2. Sychev V.V. K raschetu sloistykh aerodromnykh pokrytiy na podvizhnye nagruzki [Calculation of layered airfield pavements to moving loads]. Sovershenstvovanie tekhnologiy stroitel'stva i remonta dorog dlya usloviy Sibiri [Improvement of technologies for the construction and repair of roads to Siberia]. Omsk: SibADI, 2010. Pp. 226–233. (in Russian)
3. Smirnov A.V., Illiopolov S.K., Aleksandrov A.S. Dinamicheskaya ustoychivost' i raschet dorozhnykh konstruksiy [Dynamic stability and calculation of road constructions]. Omsk: SibADI, 2003. 188 p. (in Russian)
4. Sokolov Yu.V., Shestakov V.N. Bitumnye emul'sii v dorozhnom stroitel'stve [Bitumen emulsion in road construction]. Omsk, 2000. 256 p. (in Russian)
5. Galdina V.D. Modifitsirovannyye bitумы [Modified bitumen]. Omsk: SibADI, 2009. 228 p. (in Russian)

6. Radovskiy B.S., Teltaev B.B. Vyazkouprugie kharakteristiki bituma i ikh otsenka po standartnym pokazatelyam [The viscoelastic characteristics of the bitumen and their evaluation on standard indicators]. Almaty, 2013. 152 p. (in Russian)
7. Smirnov A.V., Bazhenova A.Yu. Volnovye polya: kak vozdeystvuyut podvizhnye vertikal'nye nagruzki na poverkhnost' avtomagistrali [The wave field: as affected by the moving vertical load on the surface of the highway]. Avtomobil'nye dorogi [Road]. 2011. No. 11. Pp. 68–69. No. 12. Pp. 62–63. (in Russian)
8. Andreeva E.V., Smirnov A.V. Sovremennyye metody proektirovaniya dorozhnykh konstruksiy avtomagistralei na vozdeystviya transportnykh potokov [Modern methods of design of road structures on highways the impact of traffic flows]. Omsk: SibADI, 2014. 135 p. (in Russian)
9. Smirnov A.V., Aleksandrov A.S. Mekhanika dorozhnykh konstruksiy [Mechanics of structures]. Omsk: SibADI, 2009. 212 p. (in Russian)
10. Aleksandrov A.S. Nelineynoe plasticheskoe deformirovanie materialov pri vozdeystvii povtornykh nagruzok [Nonlinear plastic deformation of materials under repeated impact loads]. Stroitel'stvo [Construction]. 2008. No. 10. Pp. 74–84. (in Russian)
11. Sibiryakova Yu.M. Eksperimental'noe issledovanie nekotorykh asfal'tobetonov pod mnogokratnoy nagruzkoj [Experimental study of some asphalt concrete under repeated load]. Transportnoe stroitel'stvo [Transport construction]. 2007. No. 4. Pp. 22–24. (in Russian)
12. Aleksandrov A.S. Opredelenie prodolzhitel'nosti napryazhennogo sostoyaniya v elementakh dorozhnoy konstruksii pri vozdeystvii podvizhnykh nagruzok [The duration of the stress state in the elements of road construction when exposed to moving loads]. Transportnoe stroitel'stvo [Transport construction]. 2008. No. 2. Pp. 24–28. (in Russian)
13. Matua V.P., Panasyuk L.N. Prognozirovaniye i uchet nakopleniya ostatochnykh deformatsiy v dorozhnykh konstruksiyakh [Forecasting and accounting of accumulation of residual deformations in road constructions]. Rostov-on-don: RGSU, 2001. 372 p. (in Russian)

УДК 691.544 : 666.951

**В.Д. ЧЕРКАСОВ, В.И. БУЗУЛУКОВ, А.И. ЕМЕЛЬЯНОВ, Д.Н. ПРОНИН****РАЗРАБОТКА ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
УПРОЧНЯЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ**

Разработка эффективных тонкодисперсных упрочняющих добавок, отличающихся относительно низкой стоимостью, экологической безопасностью, простой технологией их получения и введения в цементные системы, является актуальной задачей экономии цементных вяжущих. В предлагаемой статье проведен анализ полученных авторами результатов исследований по разработке и применению относительно небольших количеств тонкодисперсных веществ, таких как модифицированный различными способами природный диатомит, а также угли различной модификации, в качестве упрочняющих добавок для цементных систем. Высказано предположение о роли тонкодисперсных добавок в процессах структурообразования в цементных системах, приводящих к повышению прочности конечного продукта.

**Ключевые слова:** цементные системы, тонкодисперсные добавки, диатомит, уголь, модифицирование, прочность.

Одним из методов регулирования свойств затворенной цементной массы и бетона является применение тонкодисперсных добавок (ТДД) различной природы. Среди них есть добавки, упрочняющий эффект которых проявляется при использовании в количестве, не превышающем 2 % массы цемента, причем дальнейшее увеличение их количества приводит к понижению прочностных свойств бетона. В зависимости от химической природы поверхности частиц ТДД могут проявлять химическую или физическую активность по отношению к продуктам гидратации цемента.

Химическая активность обычно сопровождается изменением химической природы и структуры поверхности частиц ТДД. Физическая активность, обусловленная, главным образом, адсорбцией ионов, образующихся при диссоциации продуктов гидратации цемента, может привести к появлению или изменению знака заряда на поверхности частиц ТДД. И в том, и другом случае будет происходить активация частиц тонкодисперсных добавок, которые станут дополнительными центрами кристаллизации продуктов гидратации цемента из пересыщенного раствора в затворенном цементе. В результате первичные процессы кристаллизации, а в дальнейшем – структурообразования в объеме цементной системы будут происходить в большей степени и более равномерно, что приведет к улучшению структуры получаемого бетона и как следствие – его прочностных свойств.

Можно предположить, что ТДД положительно повлияют на кинетику набора прочности портландцемента. Указанные добавки можно отнести к затравкам процессов кристаллизации [1–3] или назвать их инициаторами процессов кристаллизации и структурообразования в цементных системах. Выгода от применения малых количеств ТДД, получаемых из дешевых при-

родных минералов, в производстве бетона очевидна. В связи с этим дальнейшие исследования по получению экологически безопасных и эффективных ТДД, по нашему мнению, являются актуальными.

В настоящей работе приведены некоторые результаты по разработке новых ТДД и изучению их влияния на свойства цементных композитов. Исходной химически активной по отношению к продуктам гидратации цемента тонкодисперсной добавкой был химически модифицированный природный диатомит, а физически активной добавкой – уголь различной модификации.

Химическое модифицирование диатомита проводилось путем обработки его частиц раствором соляной кислоты или раствором гидроксида кальция. Было предположено, что в случае модифицирования частиц диатомита соляной кислотой будет происходить образование на их поверхности дополнительных силанольных групп, а также частично силоксановых, которые в дальнейшем будут химически взаимодействовать с продуктами гидратации цемента,

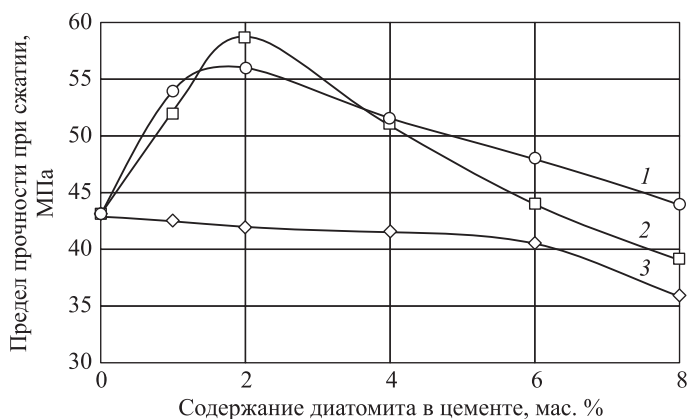


Рис. 1. Влияние химически модифицированного диатомита на прочность цемента при сжатии

1 – диатомит немодифицированный; 2 – диатомит, модифицированный соляной кислотой; 3 – диатомит, модифицированный известью

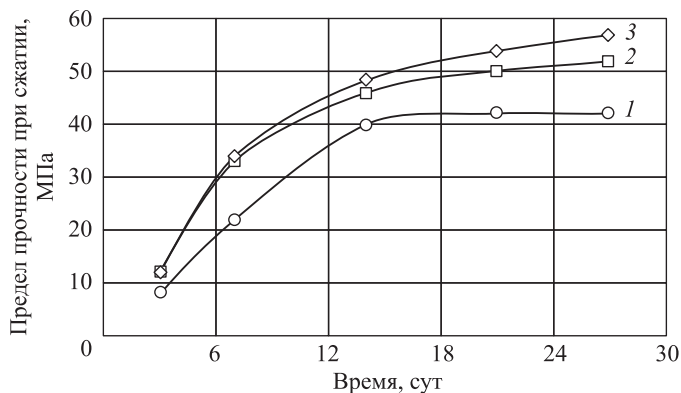


Рис. 2. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего  
1 – портландцемент; 2 – портландцемент с добавкой диатомита, модифицированного гидроксидом кальция; 3 – портландцемент с добавкой диатомита, модифицированного соляной кислотой

в основном с гидроксидом кальция, с образованием гидросиликата кальция. Образовавшиеся группы гидросиликата кальция на поверхности частицы модифицированного диатомита в затворенной цементной системе и будут играть роль дополнительных центров направленной кристаллизации.

Если же поверхность частиц диатомита модифицировать гидроксидом кальция, то в результате взаимодействия последнего с силанольными и силосановыми группами поверхности кремнеземсоставляющей диатомита образуется гидросиликат кальция, связанный химически с матрицей кремнезема. Модифицированные таким путем частицы диатомита могут инициировать кристаллизационные процессы продуктов гидратации в затворенных цементных системах.

Изучение влияния модифицированного диатомита на равномерность изменения объема цемента показало, что в присутствии указанных добавок объем цемента изменялся равномерно. Так, лепешки из цемента в присутствии добавок не имели трещин, в то время как у лепешки из цементного теста без добавок были единичные трещины.

Эффективность модифицирования оценивалась по влиянию диатомита на прочностные свойства затвердевшего цемента различного состава. Уста-

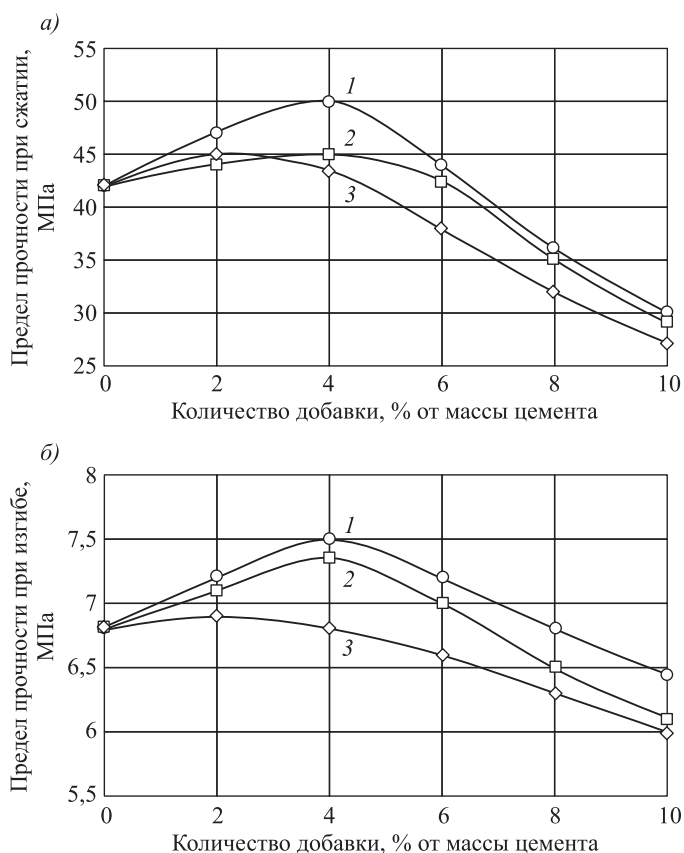


Рис. 3. Зависимость прочности цементного камня при сжатии (а) и предела прочности при изгибе (б) от размера частиц добавки и ее количества

1 – фр. 0–14 мкм; 2 – фр. 14–31,5 мкм; 3 – фр. 31,5–125 мкм

новлено, что наибольшее повышение прочности цементного камня на сжатие достигнуто при введении в цементные системы примерно одинакового количества диатомита, независимо от способа его модифицирования, т.е. в количестве около 2 % от массы цемента (рис. 1).

Изучение влияния диатомита на кинетику набора прочности цемента в течение 28 сут показало (рис. 2), что с добавками модифицированного диатомита происходит более быстрый набор прочности цемента по сравнению с бездобавочным, свидетельствующий о более интенсивном протекании процессов структурообразования в затворенном цементе.

Выявлены следующие оптимальные условия модифицирования диатомита: а) соляной кислотой – 6–8%-й раствор соляной кислоты; соотношение массы раствора кислоты и диатомита 3 : 1; температура среды – 93–95 °С; продолжительность модифицирования 4 ч [4]; б) гидроксидом кальция – модуль  $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 0,2:1,0$ ; температура среды 93–95 °С; продолжительность модифицирования не менее 2 ч [5].

В качестве тонкодисперсных добавок, частицы которых, по нашему мнению, проявляют адсорбционную активность по отношению к ионам диссоциировавших продуктов гидратации цемента, могут служить различные

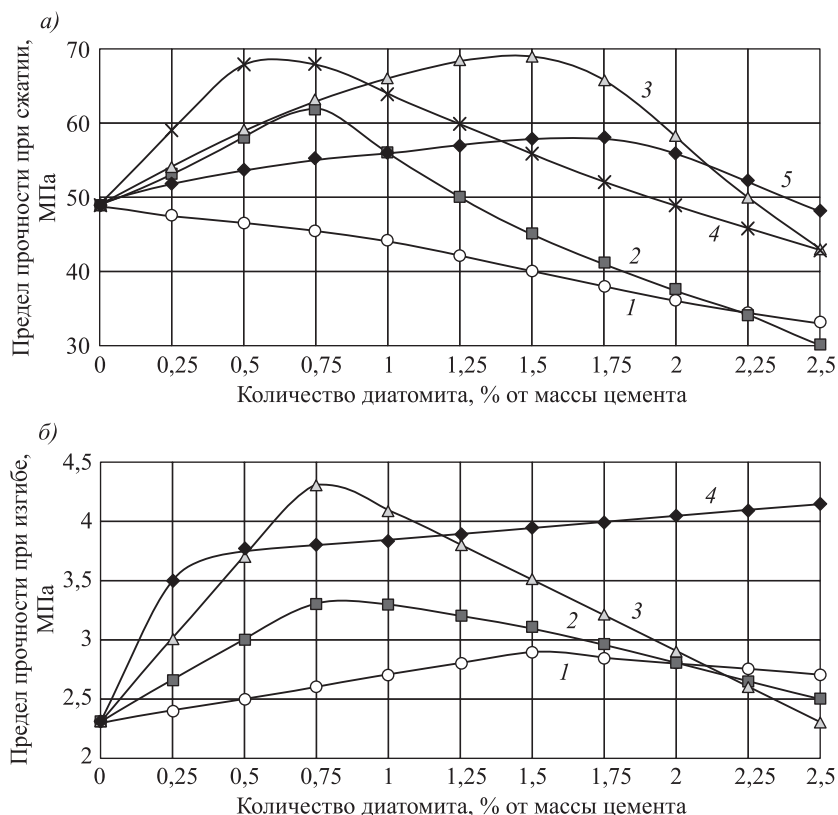


Рис. 4. Влияние содержания диатомита, модифицированного микрочастицами углерода, на прочность цементного камня

а — при сжатии (1 – диатомит немодифицированный; 2–5 – диатомит, предварительно модифицированный (2 – крахмалом; 3 – КМЦ; 4 – ПВС; 5 – ПЭГ-20 000))

б – при изгибе (1 – диатомит, модифицированный крахмалом; 2–4 – диатомит, предварительно модифицированный (2 – крахмалом; 3 – КМЦ; 4 – ПВС))



угли, отличающиеся пористостью и различным содержанием аморфной части массы угля. В результате исследований было выяснено, что кокс и древесный уголь в высокодисперсном состоянии проявляют упрочняющий эффект при их использовании в качестве ТДД в цементные системы [6], причем данный эффект возрастает с повышением дисперсности добавки (рис. 3).

С целью уменьшения количества вводимого в цемент тонкодисперсного кокса и улучшения технологии приготовления цементной массы, была разработана методика нанесения углеродных частиц на поверхность высокодисперсных частиц диатомита. Она заключалась в термическом разложении органических соединений различного класса, предварительно адсорбированных поверхностью диатомита. На кремнеземистой составляющей поверхности частиц диатомита образуются уплотнения, состоящие на 90 % из углерода и по своему строению близкие с коксом [7–9]. Как оказалось, степень закоксованности поверхности частиц зависит от количества адсорбированного органического соединения и от его природы. Обычно степень закоксованности не превышает 7 % поверхности. Следует отметить, что минимальный размер таких частиц углерода достигает 40 нм [8].

Результаты исследования влияния модифицированного углеродными микрочастицами диатомита на прочность цементного камня представлены на рис. 4. Оптимальное содержание такой добавки составляет 0,5–0,75 % от массы цемента, прочность цементного камня при сжатии увеличивается

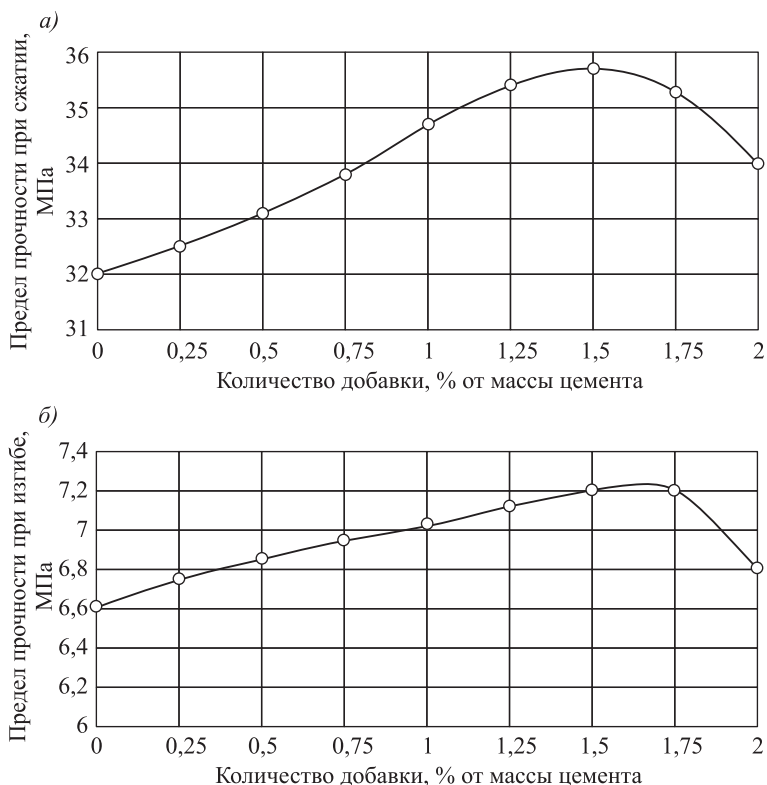


Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии (а) и при изгибе (б) цементного камня от количества вводимой добавки немодифицированного углеродного порошка от 0,25 до 2%

на 42 %, а прочность при изгибе на 88 % [10]. Как показали дальнейшие исследования, аналогичное тонкодисперсному коксу влияние на прочность цемента оказала и ТДД из древесного угля (рис. 5). При этом максимальный положительный эффект был получен при содержании добавки не более 2 % от массы вяжущего.

На основании вышеизложенного материала можно заключить, что в качестве активной ТДД, способной инициировать процессы направленной кристаллизации, в затворенной водой цементной системе могут быть тонкодисперсные частицы минералов, поверхности которых проявляют физическое или химическое сродство к продуктам гидратации цемента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строкова В.В., Соловьева Л.Н. Оценка влияния кристаллических затравок на структурообразование цементного камня // Строит. материалы. 2009. № 3. С. 97–98.
2. Макридин Н.И., Вернигорова В.Н., Максимова И.Н. О микроструктуре и синтезе прочности цементного камня с добавками ГСК // Изв. вузов. Строительство. 2003. № 8. С. 37–42.
3. Дворкин Л.И., Дворкин Л.О. Основы бетоноведения. СПб.: ИнфоОл, 2006. 690 с.
4. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Изд-во АСВ, 2006. 368 с.
5. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В., Черкасов Д.В. Активная минеральная добавка на основе химически модифицированного диатомита // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 12. С. 50–55.
6. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Пронин Д.Н. Модификация цементного камня комплексной добавкой на основе супер- и гиперпластификатора и углеродного порошка // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 4. С. 40–49.
7. Шишмаков А.Б., Микушина Ю.В., Селезнев А.С., Корякова О.В., Валова М.С., Петров Л.А. Композиционный углерод-кремнеземный материал на основе порошковой целлюлозы: синтез и свойства // Журн. прикл. химии. 2008. Т. 81, № 12. С. 2070–2072.
8. Гашимов Ф.А. Продукты уплотнения в процессе превращения этилена на высококремнеземном цеолитном катализаторе // Журн. прикл. химии. 2009. Т. 82, № 5. С. 850–855.
9. Буянов Р.А. Закоксование катализаторов. Новосибирск: Наука, 1983. 120 с.
10. Черкасов Д.В. Портландцементы с добавкой модифицированных диатомитов и композиты на их основе: Дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2014. 177 с.

**Черкасов Василий Дмитриевич**, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.;  
E-mail: [cherkasov-vd@yandex.ru](mailto:cherkasov-vd@yandex.ru)

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

**Бузулуков Виктор Иванович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: [buzulukov-v@mail.ru](mailto:buzulukov-v@mail.ru)

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

**Емельянов Алексей Иванович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: [emeljanovai@list.ru](mailto:emeljanovai@list.ru)

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

**Пронин Дмитрий Николаевич**, асп.; E-mail: pronin-sds@mail.ru  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 26.01.18

**Cherkasov Vasilii Dmitriyevich**, Member of RAASN, DSc, Professor;

E-mail: cherkasov-vd@yandex.ru

N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Buzulukov Victor Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: buzulukov-v@mail.ru

N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Emelyanov Aleksey Ivanovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: emeljanovai@list.ru

N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Pronin Dmitriy Nikolaevich**, Post-graduate Student; E-mail: pronin-sds@mail.ru

N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

## **THE DEVELOPMENT OF FINE REINFORCING ADDITIVES FOR CEMENT SYSTEMS**

Development of effective fine strengthening additives, characterized by relatively low cost, environmental safety, simple technology of their production and introduction into cement systems, is an urgent task of saving cement binders. In the offered work the analysis of the results of researches on development and application of rather small quantities of fine-dispersed substances, such as the natural diatomite modified by various methods, and also coals of various modification as strengthening additives for cement systems is carried out. It is suggested the role of fine additives in the processes of structure formation in cement systems, leading to increased strength of the final product.

**Key words:** cement systems, finely dispersed additives, diatomite, coal, modification, strength.

## REFERENCES

1. Strokova V.V., Solov'eva L.N. Otsenka vliyaniya kristallicheskikh zatravok na strukturoobrazovanie tsementnogo kamnya [Evaluation of the influence of crystalline primers on the structure formation of cement stone]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2009. No. 3. Pp. 97–98. (in Russian)
2. Makridin N.I., Vernigorova V.N., Maksimova I.N. O mikrostrukture i sinteze prochnosti tsementnogo kamnya s dobavkami GSK [On microstructure and synthesis of strength of cement with additives GSK] // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2003. No. 8. Pp. 37–42. (in Russian)
3. Dvorkin L.I., Dvorkin L.O. Osnovy betonovedeniya [Concrete science]. St. Petersburg, 2006. 690 p. (in Russian)
4. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony [Modified high quality concrete]. Moscow, 2006. 368 p. (in Russian)
5. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emel'yanov A.I., Kiselev E.V., Cherkasov D.V. Aktivnaya mineral'naya dobavka na osnove khimicheski modifitsirovannogo diatomita [Active mineral addition based on chemically modified diatomite]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 12. Pp. 50–55. (in Russian)

6. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Pronin D.N. Modifikatsiya tsementnogo kamnya kompleksnoy dobavkoy na osnove super- i giperplastifikatora i uglerodnogo poroshka [Modification of cement stone by a complex additive on the basis of super- and Hyper plasticizers and carbon powder]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. [Regional architecture and engineering]. 2016. No. 4. Pp. 40–49. (in Russian)
  7. Shishmakov A.B., Mikushina Yu.V., Seleznev A.S., Koryakova O.V., Valova M.S., Petrov L.A. Kompozitsionnyy uglerod-kremnezemnyy material na osnove poroshkovoy tsellyulozy: sintez i svoystva [Composite carbon-silica material based on powder cellulose: synthesis and properties]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry]. 2008. T. 81, No. 12. Pp. 2070–2072. (in Russian)
  8. Gashimov F.A. Produkty uplotneniya v protsesse prevrashcheniya etilena na vysokokremnezemnom tseolitnom katalizatore [Compaction products in the process of ethylene transformation on a high-silica zeolite catalyst]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry]. 2009. T. 82, No. 5. Pp. 850–855. (in Russian)
  9. Buyanov R.A. Zakoksovanie katalizatorov [Coking of catalysts]. Novosibirsk: Nauka, 1983. 120 p. (in Russian)
  10. Cherkasov D.V. Portlandsementy s dobavkoy modifitsirovannykh diatomitov i kompozity na ikh osnove [Portland cement with the addition of modified diatomites and composites based on them]. Saransk, 2014. 177 p. (in Russian)
-

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издается с марта 1958 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, вступивший в силу с 1 декабря 2015 г.; входит в международную базу данных CA(pt) (Chemical Abstracts).

В журнале публикуются статьи, содержащие новые результаты научных исследований теоретического и прикладного характера, обзорные статьи по состоянию, научным проблемам и перспективам развития теории архитектуры, строительных наук и строительной отрасли, рецензии на книги, научно-техническая информация. Авторы и читатели журнала – научно-педагогические работники, аспиранты, студенты старших курсов строительных вузов, сотрудники научно-исследовательских и проектных институтов, строительных организаций и предприятий.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Теория сооружений
- Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания и фундаменты
- Строительные материалы и изделия
- Инженерные системы жизнеобеспечения населенных мест, зданий и сооружений. Экологическая безопасность строительства
- Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология
- Технология и организация строительства
- Научные проблемы архитектуры, градостроительства и экологии
- Научно-методический раздел
- В лабораториях вузов
- Достижения науки – производству
- Научно-техническая информация

Принимается подписка  
на 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2018 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4200 р.  
Цена отдельного номера – 700 р.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus на сайте нашего журнала <http://izvuz.str.sibstrin.ru> размещены

«ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ».

### В н и м а н и е!

1. Объем аннотации – не менее 800 знаков (75 слов и более), максимум 1200 знаков.
2. Библиографический список должен включать не менее десяти источников.
3. Составление библиографического списка на английском языке (REFERENCES):
  - для ссылок на зарубежные источники 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; название статьи; затем в квадратных скобках – название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, – , //, и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pp., в конце – (in Russian).

Примеры оформления текста статей и REFERENCES – в рубрике «полнотекстовые версии статей».

Редакция имеет право на редакционную обработку статьи. Для контакта с редактором просим сообщать номер мобильного телефона одного из авторов (не для опубликования).

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Обязательны сведения о разработчиках: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация, место работы.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание  
**Известия вузов**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**  
**№ 2 (710) 2018**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 26.02.18. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$   
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1737

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