

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

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

№ 2 (674)
Февраль 2015 г.

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

Редакционная коллегия:

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

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

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.02.15. Формат 70×108¹/16
Усл. печ. л. 10,50+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 7466

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Рахимов Р.З., Раҳимова Н.Р., Гайфуллин А.Р.

Влияние добавок в портландцемент прокаленной и молотой глины с содержанием 62 % каолинита на прочность цементного камня

5

Анваров Б.Р., Латыпов Т.В., Латыпов В.М., Крамар Л.Я. К вопросу о механизме повреждения железобетона при коррозии выщелачивания

12

Машкин А.Н., Бердов Г.И., Виноградов С.А., Хританков В.Ф. Диэлькометрический анализ процесса гидратационного твердения цементного камня

27

Ядыкина В.В., Тоболенко С.С., Траутвайн А.И. Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичного асфальтобетона на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности

31

Кара-сал Б.К., Серен Ш.В., Монгуш Д.С. Полевошпатоцеолитовая порода как сырье для изготовления керамических стеновых материалов

37

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Грузин В.В., Абраменков Д.Э., Есбергенов К.Б.

Богатырева Т.В. Технология подготовки оснований площадок открытого хранения материальных средств	44
Злодеев А.В., Титов М.М., Волков М.С. Расчет технологии зимнего бетонирования по методу «термос» с использованием критериев подобия	53
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Гарифин П.А., Ольховик Е.О., Шабанов С.В. Методология организации непрерывного мониторинга технического состояния ГТС водного транспорта	58
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Азаров В.Н., Кошкарев С.А. К модели улавливания пыли в сепарационных устройствах с фильтрующе-взвешенным слоем в стройиндустрии	73
Степанов В.С., Сухарева О.В., Баймачев Е.Э., Линкевич Д.С. Исследование энергоэффективности сплит-систем кондиционирования воздуха	80
Шиляев М.И., Хромова Е.М., Широкова С.Н. Оценка эффективности двухступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки дымовых газов котельных и ТЭС, работающих на угле	88
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Веселов В.В., Беляков В.А., Сальников В.Б. Решение нестационарной и нелинейной тепловой задачи промерзания — оттаивания грунта методом конечных элементов	95
Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С. Моделирование упругопластического сцепления арматуры с бетоном	103
Хархардин А.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Дискретная топология дисперсных материалов и простых веществ	110

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

N 2 (674)

February 2015

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

Editorial Board:

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

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008

 Phone number / fax +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Gaifullin A.R.** Influence of additives in portland cement calcined and milled clay content of 62 % of kaolinite on the strength cement stone 5
- Anvarov B.R., Latypova T.V., Latypov V.M., Kramar L.Ya.** To the question about the mechanism of damage of reinforced concrete with corrosion of the first kind 12
- Mashkin A.N., Berdov G.I., Vinogradov S.A., Khritankov V.F.** Dielkometric analysis of process hydration curing of the cement stone .. 27
- Yadykina V.V., Tobolenko S.S., Trautvain A.I.** Stabilizing additive for the stone mastic asphalt concrete using waste of the pulp and paper industry 31
- Cara-sal B.K., Seren Sh.V., Mongush D.S.** Zeolite feldspar rock as a raw material for the production of ceramic wall material 37

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION

AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Gruzin V.V., Abramkov D.E., Esbergenov K.B., Bogatyreva T.V.** Technological training grounds of sites open storage of material resources 44

Zlodeev A.V., Titov M.M., Volkov M.S. Calculation of technology winter concreting method «thermos» using similarity criteria	53
HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION	
Garibin P.A., Ol'khovik E.O., Shabanov S.V. The methodology of organization of continuous monitoring of technical state of hydraulic structures of water transport	58
SANITARY ENGINEERING	
Azarov V.N., Koshkarev S.A. Model of dust capturing in filtering-fluid bed' separating devices in construction industry	73
Stepanov V.S., Sukhareva O.V., Baymachev E.E., Linkevich D.S. Research of energy efficiency split systems of air conditioning	80
Shilyaev M.I., Khromova E.M., Shirokova S.N. Evaluating the effectiveness of a two-stage inertial-condensation-absorption dust and gas purification of flue gas from coal-fired boilers and thermal power plants	88
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Veselov V.V., Belyakov V.A., Salnikov V.B. The solution to the nonstationary and nonlinear problem of freezing/thawing of the soil in a 2d target setting, using software based on the finite-element method	95
Tikhomirov V.M., Astakhov Yu.V., Samoshkin A.S. The modeling of elastic-plastic interaction fiber reinforcement with concrete	103
Kharkhardin A.N., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Discrete topology dispersed materials and elementary substances	110

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.542.002.3

Р.З. РАХИМОВ, Н.Р. РАХИМОВА, А.Р. ГАЙФУЛЛИН

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК В ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ ПРОКАЛЕННОЙ И МОЛОТОЙ ГЛИНЫ С СОДЕРЖАНИЕМ 62 % КАОЛИНИТА НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Исследовано влияние добавок в портландцемент прокаленной при 400 и 600 °С и молотой до 250 и 500 м²/кг глины с содержанием каолинита 62 % и метакаолина ВМК на прочность при сжатии цементного камня.

Ключевые слова: добавка, глина, каолинит, содержание, прокаливание, удельная поверхность, портландцемент, цементный камень, прочность.

Введение. Портландцемент со времен освоения его производства с середины XIX в. до настоящего времени и обозримого будущего был и остается основным видом минерального вяжущего, применяемого при строительстве и производстве широкой номенклатуры строительных материалов и изделий. К настоящему времени его производство в мире достигает 3 млрд т. Однако оно связано с высоким потреблением природного минерального сырья и энергетических ресурсов и значительными объемами выбросов, засоряющих окружающую среду, побочных продуктов [1]. В связи с этим с целью решения проблем современной мировой стратегии «устойчивого развития» в части ресурсо- и энергосбережения и защиты от загрязнений окружающей среды в последние десятилетия возрос объем исследований, разработок и производства композиционных, малоклинкерных и бесклинкерных вяжущих, альтернативных ординарному портландцементу [2]. Одним из эффективных направлений повышения технико-экономической и экологической эффективности портландцемента является введение в его состав для снижения содержания клинкерной части тонкомолотых минеральных добавок. В настоящее время номенклатура минеральных добавок, которая вводится в состав вяжущих с целью повышения их физико-технических свойств и технико-экономической эффективности, включает широкий перечень материалов природного, искусственного и техногенного происхождения [3, 4]. Наибольшая эффективность при этом проявляется при введении активных минеральных добавок в известковые вяжущие и цементы, связывающие образующиеся при затворении их водой малопрочный и неводостойкий гидроксид кальция в водостойкие новообразования.

Из минеральных добавок с высокой пущоланической активностью в последние десятилетия достаточно эффективно применяются микрокремнезем и метакаолин.

Метакаолин представляет собой продукт термической обработки мономинеральных каолиновых глин $(\text{Al}_2\text{O}(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5])$ или $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

© Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р., 2015

в диапазоне температур 650–800 °C [5, 6]. Утверждается [1, 7], что наибольшей пущоланической активностью обладает продукт, получаемый обжигом каолиновых глин, содержащих не менее 90 % каолина. Вместе с тем с древних времен до настоящего времени в качестве пущоланов применяются обожженные глины различного состава в виде цемянки, глиниста, горелых пород, аглопорита, керамзита и керамзитовой пыли [3, 8]. Цемянка — продукт помола обожженных до спекания при температуре 960 °C и выше керамических материалов. Глинит получают измельчением обожженных глин при температурах 600–800 °C [3, 9]. Отдельными исследователями [10, 11] отмечается использование метакаолина, получаемого обжигом сырья с содержанием каолинита 30–50 %. Продукты обжига глин, содержащие менее 80–90 % метакаолина, целесообразно называть глинитом, так как их свойства определяются не только метакаолинитом, но и другими дегидратированными минералами, а у продуктов обжига глинистого сырья, не содержащего каолин, они определяют пущоланическую активность. Выявлено [12], что и другие дегидратированные глинистые минералы проявляют наряду с метакаолином пущоланическую активность.

В начале 40-х гг. XX в. Всесоюзным научно-исследовательским институтом были проведены исследования пущоланической активности подвергнутых обжигу при температурах 500–800 °C 207 разновидностей глин месторождений, расположенных на территории СССР [9]. Было установлено, что только 11 % из них оказались непригодными для получения продукта с достаточной пущоланической активностью, при этом из 12 прокаленных глин с наиболее высокой активностью лишь только 3 — высококаолиновые. Исходя из учета ограниченности месторождений и запасов чистых каолиновых глин, во многих странах в последние десятилетия расширились исследования, разработки и производство пущоланов из обычных повсеместно распространенных полиминеральных глин, в том числе и не содержащих каолин [13, 14]. Проведение подобных исследований является актуальным и для Российской Федерации, стран Таможенного союза и СНГ, что может позволить создать в них инновационные производства эффективных пущоланов на основе повсеместно распространенных местных глин.

Ниже приведены результаты исследований влияния добавок прокаленной и молотой нижнеувельской глины с содержанием 62 % каолинита на прочность при сжатии цементного камня.

Материалы и методы исследований

1. Материалы исследований:

1.1. Нижнеувельская глина.

Химический состав, %: SiO₂ — 66,79; Al₂O₃ — 20,71; Fe₂O₃ — 1,63; TiO₂ — 0,98; MgO — 0,41; CaO — 0,62; MnO — 0,04; K₂O — 0,65; P₂O₅ — 0,08; Na₂O < 0,3; SO₃/S — 0,13; п.п.п. — 7,7; H₂O — 0,66. Химический состав глины определяется по содержанию оксидов, %, на абсолютно сухую навеску с использованием ARL OPTYMK — спектрометра.

Минеральный состав, %: кварц — 33, каолинит — 62, слюда — 4, плагиоклаз — 1.

Гранулометрический состав глин — фракций, %: глинистая — 65; пылевидная — 18,5; песчаная — 16,5.

На рис. 1 приведена рентгенограмма нижнеувельской глины, полученной с использованием дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker.

Файл – 3-16-14.txt; Съемка – 27.01.2014 15:35:52; Cu (Alfa1)

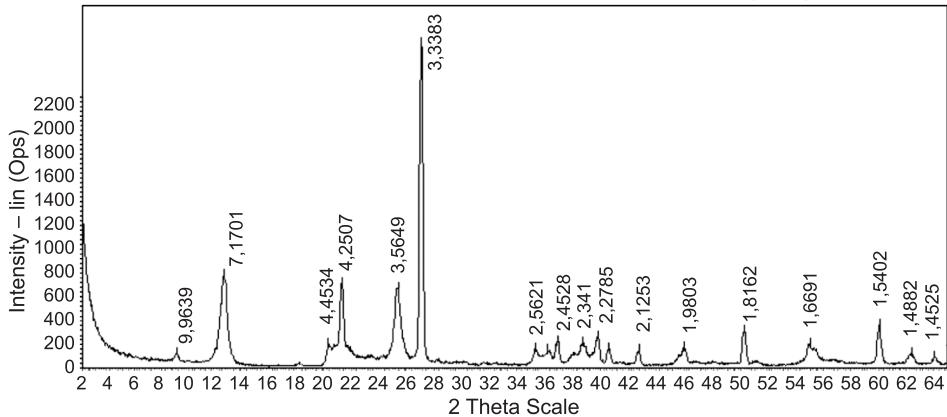


Рис. 1. Рентгенограмма нижнеувельской глины

На рис. 2 приведены данные результата дифференциального-термического анализа нижнеувельской глины, по которым установлены следующие показатели процесса ее дегидратации: первый эндоэффект — температурный интервал 30–250 °C, температурный пик — 127,5 °C, потеря массы — 1,45 %; второй эндоэффект — температурный интервал — 420–670 °C, температурный пик — 590 °C, потеря массы — 9,3 %; третий эндоэффект — температурный интервал — 910–960 °C, температурный пик — 940 °C, потеря массы — 0,6 %; общая потеря массы — 10,44 %.

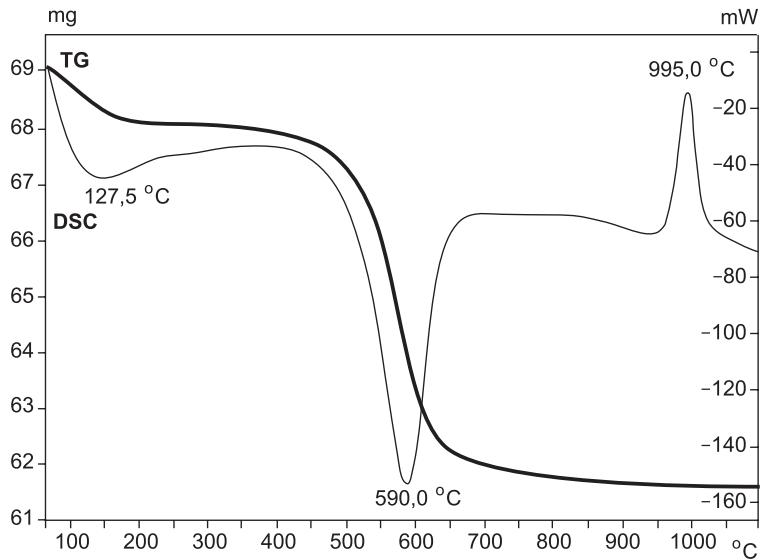


Рис. 2. Кривые дифференциального-термического анализа нижнеувельской глины

1.2. Метакаолин ВМК производства ООО «Синерго» (Магнитогорск) (ТУ572901-001-65767184-2010).

Химический состав метакаолина, %: SiO₂ — 51,4; Al₂O₃ > 42; Fe₂O₃ — 0,8; H₂O < 0,5; п.п.п. < 1.

Удельная поверхность 1200 м²/кг.

Пуццоланическая активность, мг Ca(OH)₂ > 1000/г.

1.3. Портландцемент. Для определения пущоланической активности глинистых термоактивированных наполнителей использовался портландцемент ПЦ500 Д-0-Н.

Химический состав цемента, мас. %: CaO — 63; SiO₂ — 20,5; Al₂O₃ — 4,5; Fe₂O₃ — 4,5; SO₃ — 3.

Минералогический состав цемента: C₃S — 67,0; C₂S — 11,0; C₃A — 4,0; C₃AF — 15,0.

Показатели портландцемента: удельная поверхность — 345 см²/г (по цементу), насыпная плотность — 1000 г/л, нормальная густота — 26 %, начало схватывания 2 ч 50 мин, конец схватывания 4 ч 10 мин.

2. Методы исследования:

2.1. Прокаливание глины производилось при 400, 600 и 800 °C со скоростью подогрева 1,7; 2,5 и 3,3 °C в минуту и изотермической выдержкой при этих температурах в течение 3 ч. Прокаленная глина подвергалась помолу в лабораторной мельнице МПЛ-1 до удельной поверхности 250 и 500 м²/кг.

2.2. Пущоланическая эффективность прокаленных и молотых навесок глины определялась по изменению свойств портландцементного камня от содержания их добавок в портландцемент. Цементный камень из теста нормальной густоты испытывался после термовлажной обработки по режиму 4 + 6 + 3 ч с изотермической выдержкой при 85 °C.

Результаты исследований. В таблице приведены результаты исследований изменения прочности при сжатии цементного камня на основе портландцемента в зависимости от содержания добавок прокаленной и молотой нижнеувельской глины.

Прочность при сжатии портландцементного камня с добавками прокаленной и молотой нижнеувельской глины, кг/см²

№ п/п	Содержание добавки	Температура прокаливания 400 °C		Температура прокаливания 600 °C	
		Удельная поверхность, м ² /кг		Удельная поверхность, м ² /кг	
		250	500	250	500
1	0	573	573	573	573
2	5	680	642	815	703
3	10	709	581	876	643
4	15	594	523	786	577
5	20	464	521	666	569

На рис. 3 приведены результаты исследований влияния добавок метакаолинита на прочность при сжатии цементного камня.

Анализ представленных в таблице и на рис. 3 результатов исследований позволяет сделать следующие выводы о влиянии добавок в портландцемент прокаленной и молотой нижнеувельской глины и метакаолина на прочность при сжатии цементного камня:

— 5–15 % добавок прокаленной при 400 °C и молотой до 250 м²/кг глины повышают прочность на 18,7–3,7 %;

— 5–10 % добавок прокаленной при 400 °C и молотой до 500 м²/кг глины повышают прочность на 12–1,4 %;

— 5–20 % добавок прокаленной при 600 °C и молотой до 250 м²/кг глины повышают прочность на 42,2–16,2 %;

— 5–15 % добавок прокаленной при 600 °С и молотой до 500 м²/кг глины повышают прочность на 23,2–0,7 %;

— 5–10 % добавок метакаолина повышают прочность на 29,1–9,8 %;

— наиболее высокие показатели повышения прочности достигаются при добавках 5 % метакаолина и 5–10 % прокаленной и молотой нижнеустьской глины;

— 5–10 % добавок прокаленной при 600 °С и молотой до 250 м²/кг нижнеустьской глины приводят к более высокому повышению прочности, чем аналогичные добавки метакаолина.

Выводы. Добавки 5–10% глинита на основе прокаленной при 600 °С и молотой до 250 м²/кг глины с содержанием 62 % каолинита в портландцемент приводят к более высокому повышению прочности при сжатии цементного камня, чем аналогичные добавки метакаолина ВМК с удельной поверхностью 1200 м²/кг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ферронская, А.В. Производство и применение бетона и железобетона как экологическая доминанта [Текст] / А.В. Ферронская, Л.А. Малинина, Ю.С. Волков // Бетон и железобетон — пути развития : Науч. тр. II Всерос. (Междунар.) конференции по бетону и железобетону. 5–9 сентября 2005. Москва. В 5 т. Т. 1. Пленарные доклады. — М. : Дипак, 2005. — С. 349–360.
2. Рахимов, Р.З. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего и будущего [Текст] / Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова // Строительные материалы. — 2013. — № 5. — С. 57–59.
3. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества, технология и свойства [Текст] : учебник / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. — 3-е изд. перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1979. — 480 с.
4. Рамачандран, В.С. Подробное Руководство Примесей — Имущество, Наука и Технология. — 2-е переизд. Уильям Андреев публ. изд. — Нью-Йорк, 1999. — 964 с.
5. Сиддиг, Р. Влияние метакаолина на свойства раствора и бетона [Текст] / Р. Сиддиг, И. Клаус // Прикладная наука. — 2009. — Т. 43, № 3–4. — С. 392–400.
6. Брыков, А.С. Метакаолин [Текст] / А.С. Брыков // Цемент и его применение. — 2012. — № 7–8. — С. 36–40.
7. Сабир, Б.Б. Метакаолин и кальциевые глины как пущоланы в бетоны: обзор [Текст] / Б.Б. Сабир, С. Вилд, Д. Бай // Цемент и бетонные композиции. — 2001. — № 23. — 44 с.
8. Рахимов, Р.З. Керамзитовая пыль как активная добавка в минеральные вяжущие — состав и пущолановые свойства [Текст] / Р.З. Рахимов, М.И. Халиуллин, А.Р. Гайфуллин, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — Т. 16, № 19. — С. 57–61.
9. Глинит-цемент [Текст] // Сборник статей ВНИЦ; под ред. В.И. Аксенова. — М.–Л. : Глав. ред. стр. лит., 1935. — Вып.11. — 171 с.
10. Бадогиамикс, С. Метакаолин в качестве дополнительного вяжущего материала [Текст] / С. Бадогиамикс, Г. Какали, С. Тсвилис // Термич. анализ. калорим. — 2005. — Т. 82, № 2. — С. 457–462.
11. Куковский, Е.Г. Особенности строения и физико-технические свойства глинистых минералов [Текст] / Е. Г. Куковский. — Киев: Наук. думка, 1966. — 132 с.

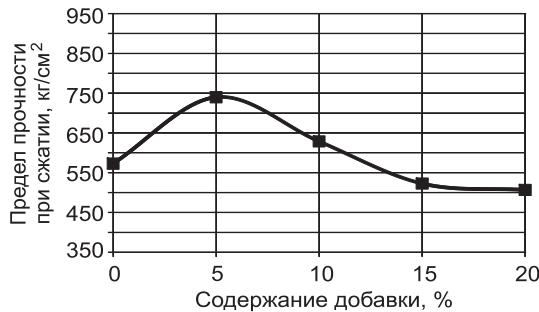


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии цементного камня с добавками метакаолина

12. Fernandes, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite [Текст] / R. Fernandes, F. Martirena, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Research. — 2001. — N 41(1). — P. 113–122.
13. Habert, G. Clay content of argillites influence on cement based mortars [Текст] / G. Habert, N. Choupay, G. Escadeillas, D. Guillame // Applied Clay Science. — 2009. — Vol. 43, N 3–4. — P. 322–330.
14. Castello, L.R. Evolution of calcined clay soils as supplementary cementitious materials [Текст] / L.R. Castello, H.J.F. Hernandes, K.L. Scrivener, M. Antonic // Proceedings of a XIII International Congress of the chemistry of cement. — Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo torroja», 2011. — P. 117.

*РАХИМОВ Равиль Зуфарович, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

РАХИМОВА Наиля Равилевна, д-р техн. наук, проф.

ГАЙФУЛЛИН Альберт Ринатович, канд. техн. наук

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 26.01.15

Rakhimov Ravil Zufarovich, doctor of technical sciences, professor, member-korrespondent RAABS; Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Rakhimova Nailya Ravilevna, doctor of technical sciences, professor; Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Gaifullin Albert Rinatovich, candidate of technical sciences; Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

INFLUENCE OF ADDITIVES IN PORTLAND CEMENT CALCINED AND MILLED CLAY CONTENT OF 62 % OF KAOLINITE ON THE STRENGTH CEMENT STONE

The effect of additives in Portland cement calcined at 400 and 600 °C and milled to 250 and 500 m²/kg clay content of 62 % kaolinite and metakaolin «VMC» on the compressive strength of hardened cement paste is studied.

Key words: additive, clay, kaolinite, content, calcination, the specific surface area, Portland cement, compressive strength, hardened cement paste.

REFERENCES

1. Ferronskaya, A.V. Production and use of concrete and reinforced concrete as a dominant ecological [Text] / A.V. Ferronskaya, L.A. Malinina, Yu.S. Volkov // Concrete and reinforced concrete — the way of development : Scientific works II Russian (International) Conference on concrete and reinforced concrete. September 5–9 2005. Moscow. In 5 vol. Vol. 1. Plenary lectures. — M. : Deepak, 2005. — P. 349–360.
2. Rakhimov, R.Z. Construction and mineral binders past, present and future [Text] / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova // Building materials. — 2013. — N 5. — P. 57–59.
3. Volzhenskiy, A.V. Mineral binders, technology and properties [Text] : textbook / A.V. Volzhenskiy, Yu.S. Burov, V.S. Kolokolnikov. — 3rd ed. revised. and add. — M. : Stroyizdat, 1979. — 480 p.
4. Ramachandran, V.S. (ed.) (1995). Concrete Admixtures Handbook — Properties, Science and Technology. — 2nd ed. William Andrew Publishing. — N.Y., 1999. — 964 p.
5. Siddigye, R. Influence of metakaolin on the propertie of mortar and concrete [Text] / R. Siddigye, I. Klaus // Applied Clay Science. — 2009. — Vol. 43, N 3–4. — P. 392–400.

6. Brykov, A.S. Metakaolin [Text] / A.S. Brykov // Cement and its applications. — 2012. — N 7–8. — P. 36–40.
7. Sabir, B.B. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review [Text] / B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai // Cement and Concrete Composites. — 2001. — N 23. — 44 p.
8. Rakhimov, R.Z. Gravels dust as a supplement to the mineral binders — composition and pozzolanic properties [Text] / R.Z. Rakhimov, M.I. Khalilullin, A.R. Gaifullin, O.V. Stoyanov // Bulletin of Kazan Technological University. — 2013. — Vol. 16, N 19. — P. 57–61.
9. Clay-cement [Text] // Collection of articles VNIC; ed. by V.I. Aksenov. — M.-L. : The main editorial office building literature, 1935. — Issue 11. — 171 p.
10. Badogiamics, S. Metacaolin as supplementary cementitious material. Optimization of kaolin to metakaolin conversion [Text] / S. Badogiamics, G. Kakali, S. Tsivilis // J. Therm. Anal. Calorim. — 2005. — Vol. 81, N 2. — P. 457–462.
11. Kukovskiy, E.G. Features of the structure and the physical and technical properties of clay minerals [Text] / E.G. Kukovskiy. — Kiev : Naukova dumka, 1966. — 132 p.
12. Fernandes, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite [Text] / R. Fernandes, F. Martirena, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Research. — 2001. — N 41(1). — P. 113–122.
13. Habert, G. Clay content of argillites influence on cement based mortars [Text] / G. Habert, N. Choupay, G. Escadeillas, D. Guillame // Applied Clay Science. — 2009. — Vol. 43, N 3–4. — P. 322–330.
14. Castello, L.R. Evolution of calcined clay soils as supplementary cementitious materials [Text] / L.R. Castello, H.J.F. Hernandes, K.L. Scrivener, M. Antonic // Proceedings of a XIII International Congress of the chemistry of cement. — Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo torroja», 2011. — P. 117.

УДК 691.32:620.193

Б.Р. АНВАРОВ, Т.В. ЛАТЫПОВА, В.М. ЛАТЫПОВ, Л.Я. КРАМАР

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ КОРРОЗИИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Представлена оценка скорости и особенность процессов коррозии защитного слоя бетона, а также наличие и особенность протекания коррозионных процессов в арматуре в колоннах резервуара чистой воды после шестидесяти лет эксплуатации. На основании проведенных исследований установлено значительное изменение фазового состава и свойств бетона. Для замедления процессов коррозии в бетоне резервуаров для хранения чистой воды и обеспечения сохранности в нем арматуры может быть рекомендовано применение плотного бетона марки по водонепроницаемости W8 и выше, что, кроме того, повысит водонепроницаемость всего сооружения, а также необходимо контролировать и снижать содержание бикарбонатов в хранящейся воде.

Ключевые слова: резервуар чистой воды, коррозия выщелачивания, карбонизация бетона, продукты коррозии арматуры.

Еще в начале XX в. исследованиями А.А. Байкова, В.А. Кинда, В.Н. Юнга и других ученых — основоположников науки о коррозии бетона было доказано, что главные компоненты цементного камня в бетоне, такие как гидросиликаты, гидроалюминаты, гидроалюмоферриты и гидроксид кальция, могут существовать в твердой фазе в равновесии с жидкой только при условии ее насыщения или пересыщения относительно ионов Ca^{+2} . Следовательно, длительное хранение пресной воды в бетонных резервуарах обязательно приведет к выщелачиванию из цементного камня бетона ионов кальция и, как следствие, в какой-то мере к разрушению бетона. С практической точки зрения важно иметь представление о скорости коррозии бетона I вида (коррозии выщелачивания), чтобы прогнозировать долговечность конструкций. В свою очередь, данные о скорости коррозии (особенно если речь идет об экстраполяции результатов экспериментов, а не об их интерполяции) могут быть корректно интерпретированы лишь при условии, что имеются данные о механизме этого процесса. В принципе достаточно полное принципиальное описание механизма коррозии бетона первого вида дано в работах В.М. Москвина [1], Г.П. Вербецкого [2] и других российских и зарубежных ученых [3–7]. Настоящее исследование проведено для уточнения механизма коррозии выщелачивания цементного камня в бетонных емкостях питьевого водоснабжения, установления стадийности процессов его разложения и повышения точности прогноза долговечности таких сооружений. Одним из наиболее массовых сооружений и конструкций, которые подвергаются такому виду агрессивного воздействия среды, являются резервуары питьевой воды. В связи с этим основная часть натурных исследований проведена на данном типе объектов.

Авторами было обследовано в г. Уфе несколько десятков резервуаров питьевой («чистой») воды, изготовленных как по индивидуальным, так и по типовым проектам (резервуары типа РЧВ — «резервуары чистой воды»). Объем резервуаров составлял 500, 3000, 5000, 6000 и 10000 м³, а срок эксплуатации — от 30 до 70 лет. Резервуары «старой» постройки



Рис. 1. Внутренний вид резервуара чистой воды

были выполнены из монолитного железобетона, более поздней — сборно-монолитными [8, 9].

На рис. 1 представлен в качестве примера внутренний вид резервуара чистой воды объемом 500 м³ со сроком службы 60 лет. При обследовании таких резервуаров наиболее важно оценить состояние несущих колонн и сохранность в них арматуры, поскольку другие конструкции исходя из нашего опыта обследовательских работ, как правило, находятся в лучшем техническом состоянии либо являются менее естественными с точки зрения эксплуатационной надежности сооружения [10, 11].

Цель настоящего исследования — оценка состояния бетона и арматуры в колоннах резервуара чистой воды после 60 лет эксплуатации. Для этого необходимо было оценить:

- скорость и особенности процессов коррозии защитного слоя бетона;
- наличие и особенности протекания коррозионных процессов в арматуре.

Материалы и методы исследования. Для получения сведений о послойном изменении состава и структуры цементного камня в бетоне были проведены отбор проб бетона и оценка их физико-химических свойств.

Изучение фазового состава цементного камня в бетоне колонн и его влияние на коррозию арматуры проводили: на дериватографе системы «Паулик-Паулик-Эрдей», модифицированном цифровой приставкой; с помощью рентгеновского аппарата ДРОН-ЗМ, модернизированного приставкой PDWin (съемку вели при напряжении 30 кВт, силе тока 10 мА, ширине выходной щели 1 мм, в интервале углов 6–70°). Влияние выщелачивания на структуру и состав цементного камня в бетоне изучали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6460LA компании «Jeol Ltd».

Глубину коррозии арматуры определяли путем сопоставления диаметра арматуры в подводной части колонны, где коррозия имела место, с диаметром арматуры в надводной части, где коррозия отсутствовала.

Проведение исследований. При обследовании резервуаров из колонн внутри сооружений отбирали пробы бетона до обнажения арматуры (рис. 2). При этом было установлено, что в местах сколов бетона образцы

делятся на 2 вида: с характерным послойным визуально наблюдаемым изменением структуры бетона (образец № 1, отобранный на удалении от арматуры) и образцы с продуктами коррозии стали, «пронизывающими» практически всю толщу защитного слоя (образец № 2, отобранный вблизи арматуры).

Характеристика образца № 1.

На поверхности скола образца № 1 на глубине можно выделить четыре четко выраженных слоя (см. рис. 2). Первый (внешний) слой распространяется на глубину до 1 мм и представляет собой слабосвязанный материал, цвет которого изменяется от коричневого до красновато-серого. Второй слой представлен темно-серой полосой толщиной до 3 мм. Третий слой светло-серого цвета имеет достаточно высокую прочность и четко выраженный контур с переменной глубиной распространения (до 12 мм), что обусловлено, очевидно, локальными неоднородностями структуры защитного слоя. Третий слой, как и первые два, не окрашивается раствором фенолфталеина. Четвертый слой имеет темно-серый цвет и высокую прочность, окрашивается индикатором и на первый взгляд не затронут коррозией выщелачивания. Обращает на себя внимание тот факт, что на участке с включением зерна крупного заполнителя глубина третьего слоя почти в 2 раза больше, чем в среднем на относительно однородном нижнем участке образца. Этот факт хорошо согласуется с данными авторов работы [12] о том, что в контактной зоне на границе «цементный камень — заполнитель» диффузационная проницаемость бетона значительно выше, что и обуславливает большую глубину коррозии в зоне крупного и среднего заполнителя.

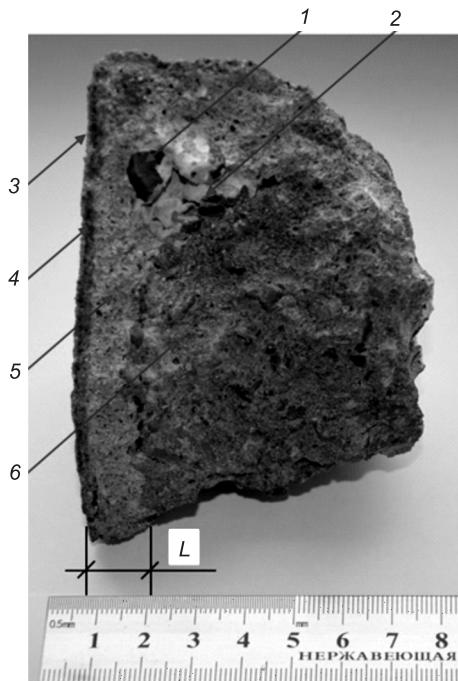


Рис. 2. Образец бетона колонны резервуара чистой воды со сроком эксплуатации 60 лет

Корродированные слои бетона: 1 — зерно крупного заполнителя; 2 — углубление фронта коррозии в зоне заполнителя из-за повышенной проницаемости контактной зоны «заполнитель — цементный камень»; 3 — первый, наружный, толщиной менее 1 мм; 4 — второй, толщиной менее 3 мм; 5 — третий, толщиной от 3 до 12 мм; 6 — неповрежденный бетон; L — глубина нейтрализации бетона

мание тот факт, что на участке с включением зерна крупного заполнителя глубина третьего слоя почти в 2 раза больше, чем в среднем на относительно однородном нижнем участке образца. Этот факт хорошо согласуется с данными авторов работы [12] о том, что в контактной зоне на границе «цементный камень — заполнитель» диффузационная проницаемость бетона значительно выше, что и обуславливает большую глубину коррозии в зоне крупного и среднего заполнителя.

Поскольку продукты коррозии стали могли повлиять на результаты фазового анализа цемента камня бетона, для исследования закономерностей «чистой» коррозии выщелачивания методами ДТА и РФА был взят образец № 1. Результаты дериватографического анализа исследуемых проб приведены на рис. 3 и в таблице.

При подготовке материала к исследованию было отмечено, что первая проба, взятая с поверхности образца, представляет собой рыхлый материал. По данным ДТА (см. рис. 3) эта проба содержит более 10 % кар-

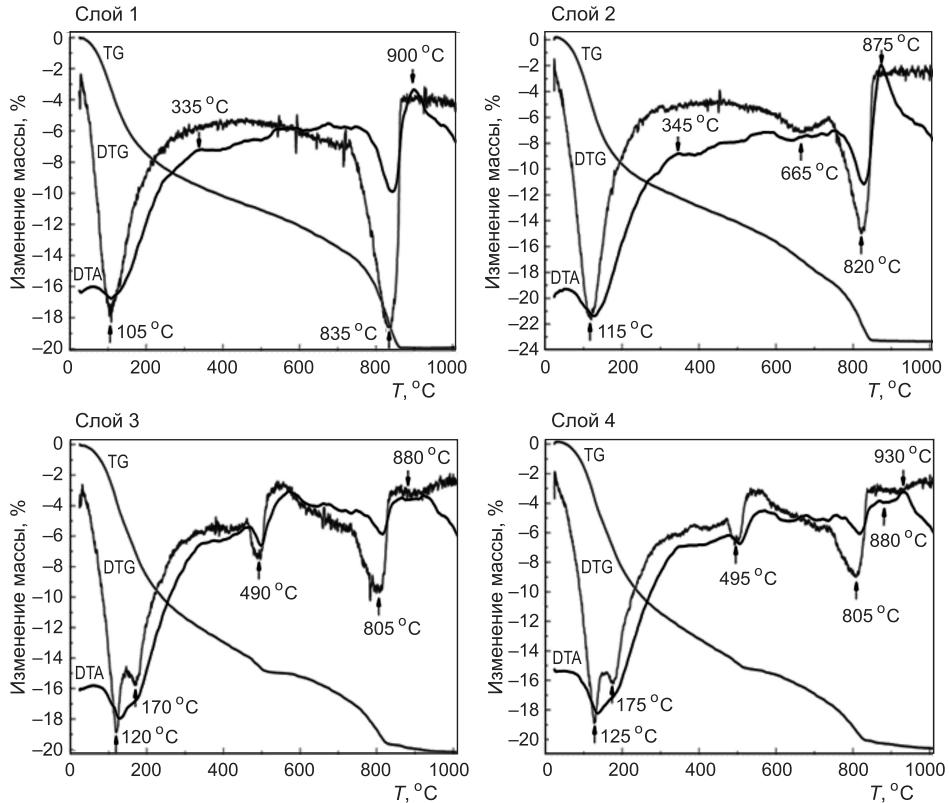


Рис. 3. Результаты исследования фазового состава цементного камня бетона, подвергнутого коррозии выщелачивания, по данным ДТА

Характеристика фазового состава цементного камня бетона, подвергнутого коррозии выщелачивания, по данным ДТА

№ слоя	W химической связи вода и CO ₂ , %	Адсорбционная и гидратная вода, %	Ca(OH) ₂ , % (490–500 °C)	CaCO ₃ , % (800–860 °C)	Экзоэффект при 340 °C	Экзоэффект в интервале от 800 до 900 °C
1	20	14,0	—	10,1	+	+
2	24	19,0	—	6,7	+	+
3	20	16,0	4,1	4,0	—	+
4	20	16,5	4,9	2,9	—	+

боната кальция, потери массы при 840 °C подтверждают это. Присутствие экзоэффекта при 340 °C указывает на разложение гидросиликатных фаз из-за значительного выщелачивания кальция, в результате чего высвобождается гель кремнезема. Содержание адсорбционной и химически связанный воды в этих образцах составляет около 14 %. Гидроксид кальция в данной пробе отсутствует. Экзоэффект при 900 °C, связанный с кристаллизацией геля, образовавшегося при разложении гидросиликатов в β-волластонит, указывает на присутствие в исследуемом камне низкоосновных гидросиликатов, вероятно, образовавшихся при разложении исходных ГСК при снижении pH бетона в процессе выщелачивания. В составе первого слоя также происходит накопление значительного количества гидроокислов железа, что подтверждают потери массы исследуемого образца при температурах 105, 120, 150 и 170 °C. Факт накопления же-

за на поверхности конструкции подтверждается косвенно цветом этой поверхности, изменяющимся от коричневого до красновато-серого. Вероятная причина появления гидроокислов железа в воде — длительное время медленно протекающая коррозия металлической запорной арматуры и лестниц, находящихся внутри резервуара и не имеющих защитных покрытий. Рентгенофазовый анализ (рис. 4) позволил выявить присутствие

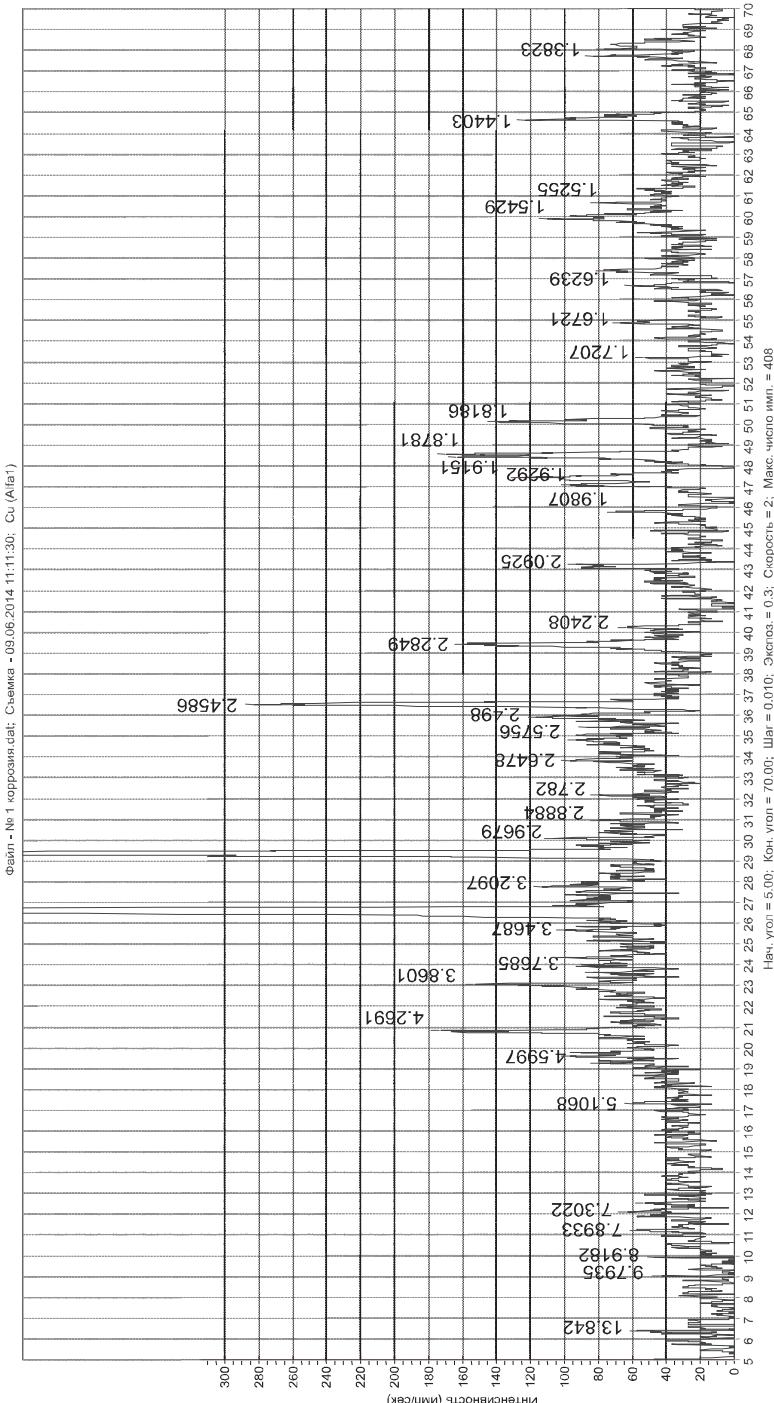


Рис. 4. Рентгенофазограмма цементного камня бетона, подвернутого коррозии выщелачивания (слой 1)

в пробах остатков кварца из бетона, кальцита и, согласно отражениям низкой интенсивности в области малых углов, — аморфизированных цементных гидратных фаз, однако гидроксид кальция в пробах не обнаружен. Следовательно, в первом слое цементная связка претерпела полное перерождение.

Бетон второго слоя имеет некоторую прочность, цементный камень подвергнут значительной карбонизации, содержание CaCO_3 в пробе превышает 6,7 %, потери при прокаливании составляют 24 %. Камень содержит также гель кремнезема — экзоэффект при 345 °C, метамиктные гидросиликаты кальция — эндоэффект при 665 °C, что указывает на разложение или перекристаллизацию исходных гидратных фаз и формирование низкоосновных ГСК (образовавшихся при выщелачивании высокоеосновных ГСК). Это подтверждает наличие на кривых ДТА экзоэффекта при 875 °C, вызываемого переходом продуктов разложения гидратных фаз в β -волластонит (рис. 5).

Третий слой представлен бетоном, претерпевшим под воздействием выщелачивания меньшие изменения. Потери при прокаливании цементного камня из этого бетона до 1000 °C по данным ДТА (см. рис. 3) составляют 20 %. Зафиксированные на дериватограмме эндоэффекты при 120 и 175 °C указывают на присутствие в цементном камне гидросиликатов кальция и гидроалюминатных фаз, эндоэффект при 495 °C указывает на присутствие гидроксида кальция, содержание которого составляет 4,1 %, карбонатная фаза уменьшается до 4,0 %. Адсорбционная и химически связанная вода в цементном камне бетона снижается до 16 %. На рентгенограмме (рис. 6) кроме кварца и кальцита отмечено присутствие отражений гидроксида кальция, гидроалюминатов и гидросиликатов кальция.

Четвертый слой расположен в бетоне на глубине 12 мм и более. На дериватограмме цементного камня из этого слоя отмечены потери массы при 125 и 170 °C, свидетельствующие о присутствии высокоеосновных ГСК и гидроалюминатов, содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ достигает 4,9 %, а CaCO_3 не превышает 1,5 %, следовательно, около 2 % гидроксида в цементном камне бетона подвергнуто карбонизации. Адсорбционная и гидратная вода в цементном камне составляет примерно 19 %, в составе гидросиликатов этого слоя также присутствуют низкоосновные ГСК, что подтверждает экзоэффект при 930 °C.

По данным рентгенофазового анализа (рис. 7) четвертый слой содержит кварц, небольшое количество кальцита, гидроксид кальция, гидросиликаты кальция разной основности, в том числе тоберморит и другие низкоосновные ГСК, гидроалюминаты и гидроалюмоферриты.

Исследования в электронном микроскопе поверхности первого слоя (рис. 8, а) показали, что остатки перерожденного в процессе эксплуатации бетона слабо связаны между собой, а образовавшееся между частицами пространство полностью свободно, т.е. растворимая часть продуктов коррозии первого вида вымывается в воду, заполняющую резервуар. Это подтверждает процесс выщелачивания компонентов цементного камня из бетона конструкций резервуара. Нерастворимые в воде минералы, предположительно гидроксиды железа, представлены тонкодисперсными пластинчатыми фрагментами.

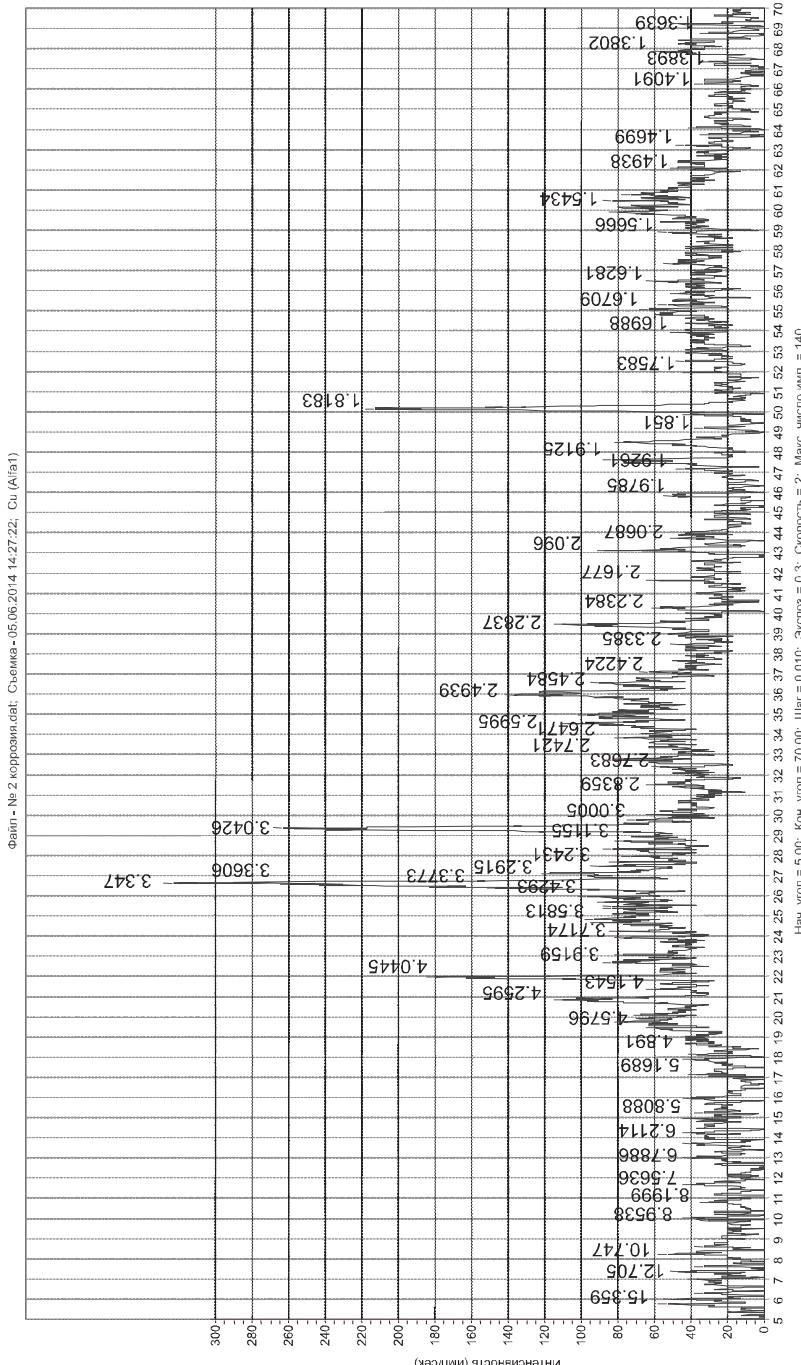


Рис. 5. Рентгенограмма цементного камня бетона, подвергнутого коррозии выщелачивания (слой 2)

Поверхность сколов второго слоя (рис. 8, б) состоит из гелевидных ГСК, в отдельных местах порового пространства видны выщелачиваемые составляющие цементного камня, как правило, это алюминатные и алюмоферритные образования.

Скол третьего слоя (рис. 8, в) имеет более закристаллизованную поверхность, на которой видны свободные поры, образовавшиеся в результате вымывания растворимых соединений цементного камня, таких как гидро-

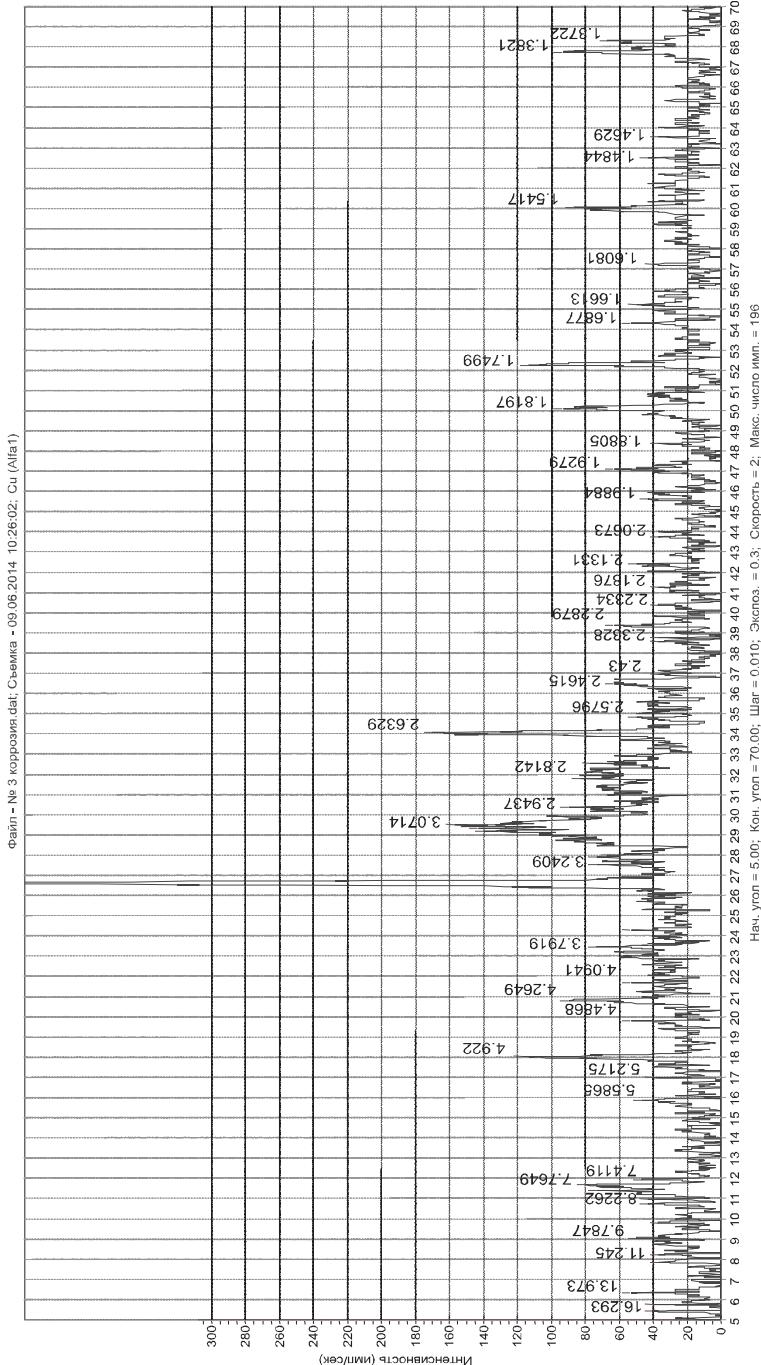


Рис. 6. Рентгенограмма цементного камня бетона, подвернутого коррозии выщелачивания (слой 3)

ксид кальция и продукты разложения алюминатов. В размытых местах ГСК претерпели разложение, а на их месте остался только кремнеземистый гель, который при высыхании растрескался. ГСК по большей части закристаллизованы, но в отдельных местах видны следы процессов перекристаллизации и образование сквозных пор в объеме за счет выщелачивания.

Четвертый слой представлен более плотной структурой камня (рис. 8, г), на сколах также видны следы выщелачивания, так как поры во

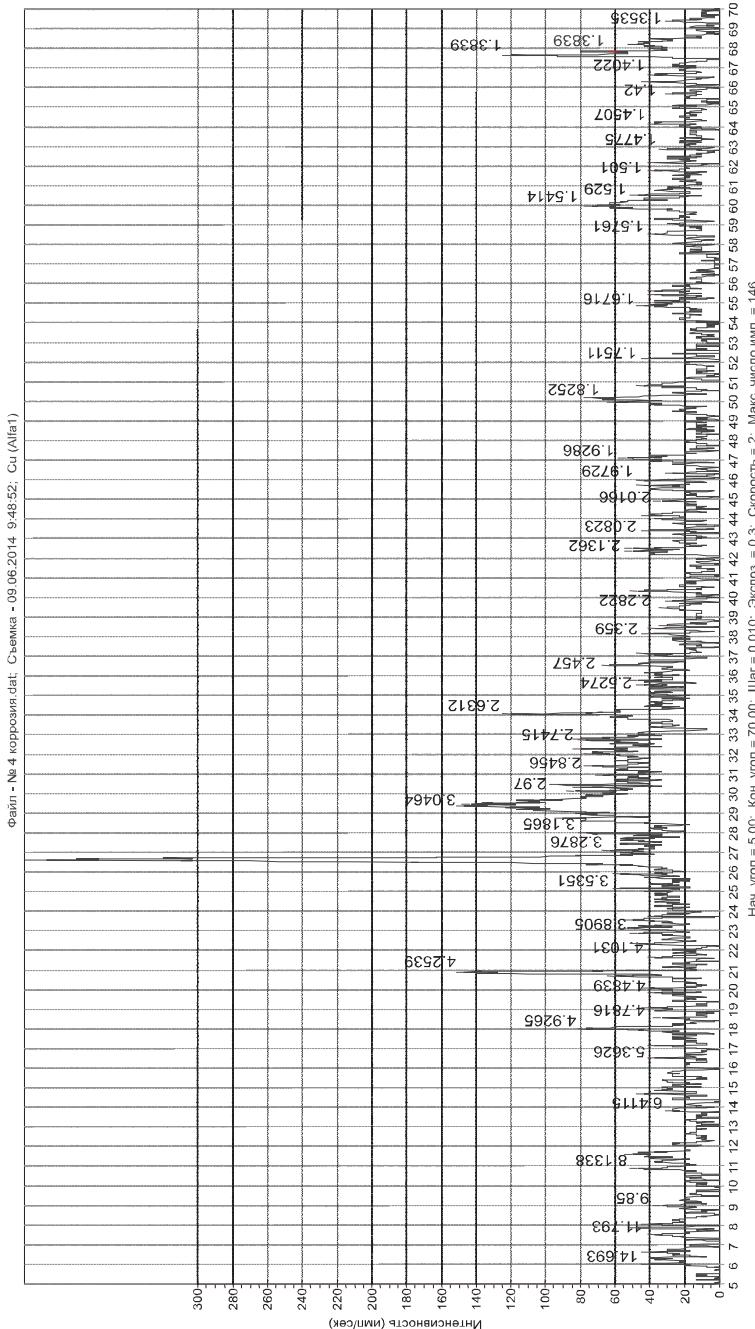


Рис. 7. РентгеноGRAMМА цементного камня бетона, подвергнутого коррозии выщелачивания (слой 4)

всех исследуемых образцах цементного камня бетона практически не содержат образований, возникших в результате разложения и перекристаллизации исходных фаз.

Характеристика образца № 2 (рис. 9). Защитный слой бетона примерно наполовину толщины со стороны арматурного стержня имел характерную для обычной («красной») ржавчины красновато-бурую (ржавую) окраску. Контуры этой окрашенной части защитного слоя бетона очень неровные. Вблизи арматурного стержня цвет бетона защитного слоя меняется до темно-бурого. Контуры распространения этой зоны окра-

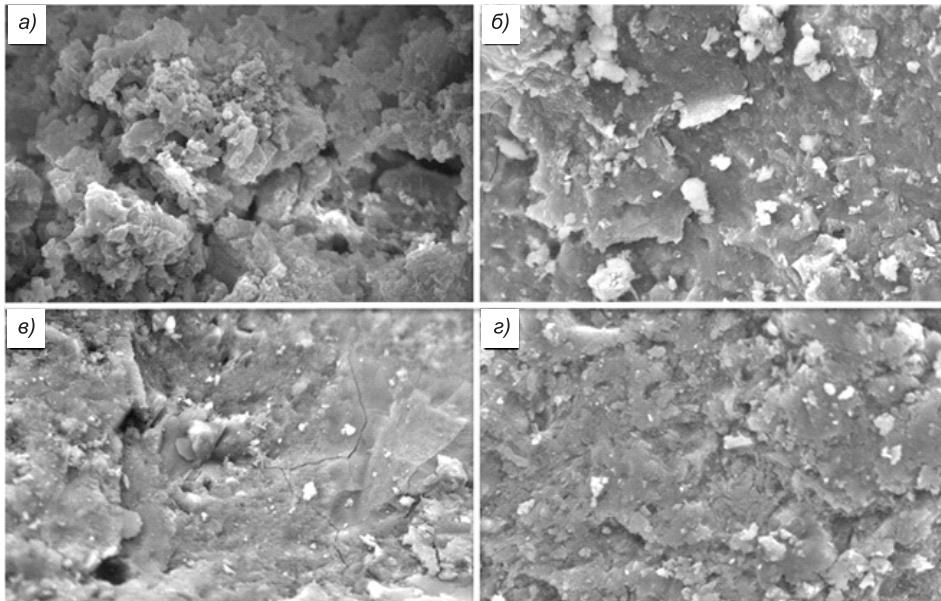


Рис. 8. Электронные снимки образов бетона ($\times 1000$)
а — слой 1, б — слой 2, в — слой 3, г — слой 4

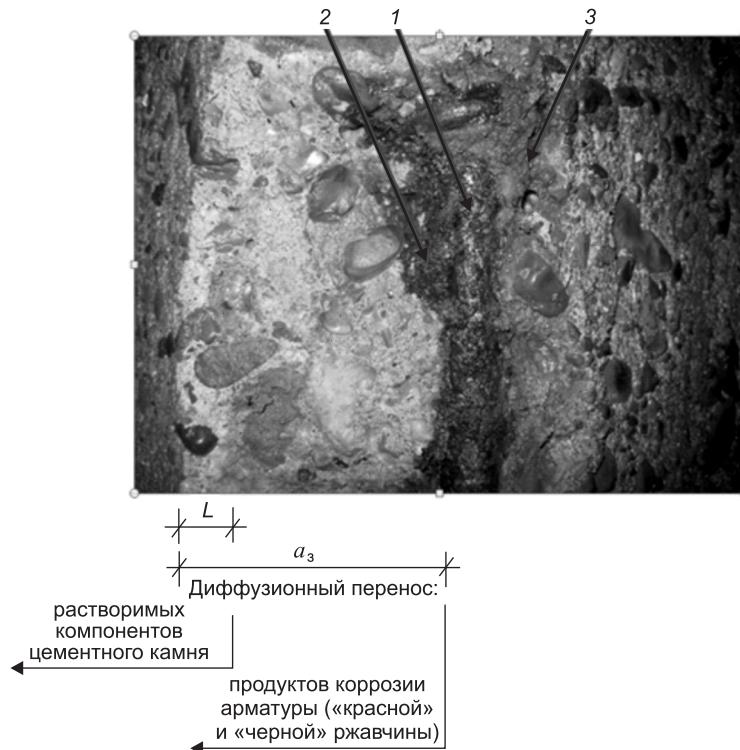


Рис. 9. Скол защитного слоя бетона колонны

1 — продукты коррозии («черная» ржавчина) на арматурном стержне; 2 — продукты коррозии арматуры («черная» ржавчина), продиффундировавшие от арматуры в направлении внешней поверхности колонны (темно-бурый цвет); 3 — продукты коррозии арматуры («красная» ржавчина), продиффундировавшие от арматуры в направлении внешней поверхности колонны (красновато-бурый цвет)

ски также неровный, но существенно более спокойный. Непосредственно на арматурном стержне имеется рыхлый слой продуктов коррозии стали черно-графитового цвета («черная ржавчина»), глубина коррозии арматуры равномерная и достигала 2 мм.

Исследования состава продуктов коррозии стали в подводных и надводных конструкциях показали их существенное отличие: если в надводной части преобладает оксигидроксид железа FeO(OH) — «красная ржавчина», то в подводной части наибольшая доля продуктов коррозии представлена гидроксидом железа Fe(OH)_3 — «черная ржавчина» (рис. 10).

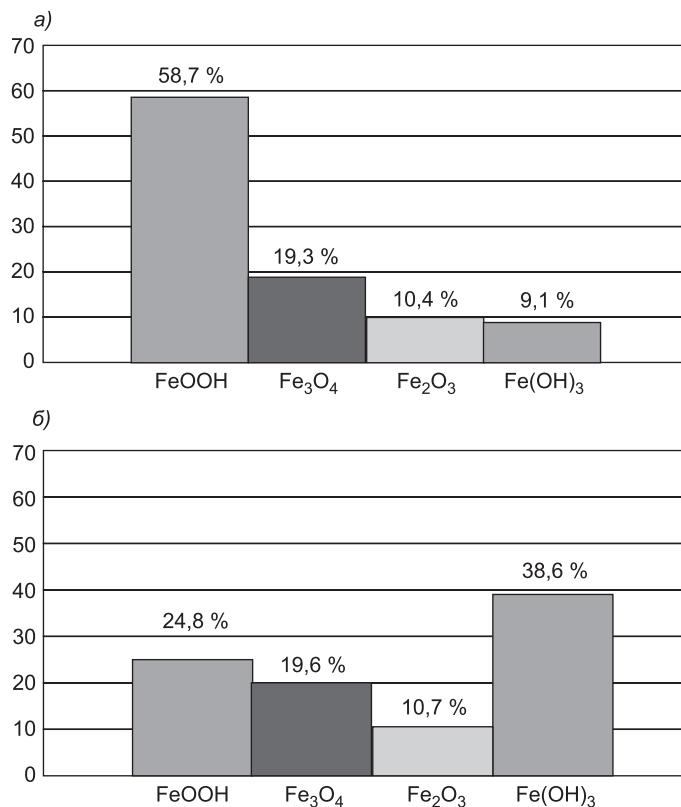


Рис. 10. Результаты рентгенофазового анализа продуктов коррозии арматуры в надводной (а) и подводной (б) части резервуаров

Этот факт, по-видимому, и определяет различия в цвете продуктов коррозии и возможности реализации распорного эффекта, сопровождающегося образованием трещин в защитном слое бетона надводных конструкций, тогда как в подводных конструкциях образование трещин не происходит даже при глубине коррозии арматуры в 1...2 мм. Отметим, что различия в фазовом составе продуктов коррозии вероятнее всего обусловлены ограничением доступа кислорода к подводным конструкциям.

Обсуждение полученных результатов. 1. Исследования цементного камня, извлеченного из бетона конструкций резервуаров питьевого водоснабжения, позволили установить, что в процессе эксплуатации в нем происходит значительное изменение фазового состава и, соответственно, свойств. Это подтверждается изменением содержания химически связанной воды в гидратных фазах, появлением геля кремнезема, низко-

основных гидросиликатов, железосодержащих фаз и т.д. Результаты проведенных исследований позволили уточнить существующие представления [1–3, 5, 6] о фазовых превращениях в цементном камне при его растворении в питьевой воде.

2. Цементный камень в бетоне резервуаров подвержен не только процессам выщелачивания, но и активной карбонизации. При этом карбонизацией затронут в разной степени весь защитный слой, от чего и наблюдается активизация коррозии арматуры в конструкции. Карбонизацию бетона, вероятно, вызывает повышенное содержание в воде бикарбонатов. Известно, что особенно активен в этом отношении бикарбонат натрия. Следовательно, чтобы замедлить процессы коррозии в бетоне резервуаров для хранения воды и обеспечить длительное время сохранность в нем арматуры, кроме повышения плотности бетона, необходимо контролировать и снижать содержание бикарбонатов в хранящейся воде.

3. Данные действующих норм^{1–3} достаточно объективно оценивают долговечность конструкций при коррозии бетона первого вида в отношении сохранности бетона с точки зрения механической прочности. Глубина ослабленного слоя, в пределах которого прочность бетона снижается в 1,5...2 раза по сравнению с прочностью бетона внутренней части конструкции, не превышает нескольких миллиметров за 50 лет эксплуатации для бетона марки по водонепроницаемости W4. Таким образом, выщелачивание для бетона с маркой по водонепроницаемости W4 и выше не опасно, однако из условий обеспечения герметичности резервуаров целесообразно принимать для этого типа сооружений бетон с маркой по водонепроницаемости не ниже W6, а желательно W8–W10, что хорошо согласуется с данными Н.К. Розенталя [13].

4. В действующих нормах^{1–3} недостаточно объективно оценивается сохранность арматуры из-за того, что защитный слой бетона нормативной толщины, например, марки по водонепроницаемости W4 за 50 лет эксплуатации перестает оказывать пассивирующее действие по отношению к арматуре. В связи с этим для обеспечения сохранности арматуры в емкостных сооружениях питьевого водоснабжения может быть рекомендовано применение плотного бетона марки по водонепроницаемости W8 и выше, что, кроме того, повысит водонепроницаемость всего сооружения.

5. Целью исследований являлось уточнение механизма, стадийности и глубины разложения цементного камня в питьевой воде. Данные по этому вопросу действительно приведены в работах В.М. Москвина [1], Г.П. Вербецкого [2], Н.К. Розенталя [13]. Однако в этих работах не в полной мере освещены вопросы о видах исходных минералов в цементном камне, последовательности их разложения, глубине (степени) разложения. Например, в работе В.М. Москвина («Коррозия бетона», 1952 г.) отмечается, что на разных этапах растворения цементного камня могут существовать вещества, такие как: C_3A , C_3S_2 , C_2S и т.д., однако по современным представлениям (база данных ICCD PDF2 рентгенофазового анализа) в цементном камне практически отсутствуют данные соединения.

¹ СНиП 2.03.11–85. Защита строительных конструкций от коррозии. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 46 с.

² СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. М., 2012. 99 с.

³ ГОСТ 31384–2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. М.: МНТКС, 2009. 69 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвин, В.М. Коррозия бетона [Текст] / В.М. Москвин. — М. : Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1952. — 342 с.
2. Вербецкий, Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде [Текст] / Г.П. Вербецкий. — М. : Стройиздат, 1976. — 128 с.
3. Трофимов, Б.Я. Коррозия бетона [Текст] / Б.Я. Трофимов, М.И. Муштаков. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. — 310 с.
4. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) [Текст] / Л.М. Пухонто. — М. : Изд-во АСВ, 2004. — 424 с.
5. Штарк, И. Долговечность бетона [Текст] / И. Штарк, Б. Вихт; пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. — К. : Оранта, 2004. — 295 с.
6. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах [Текст] / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисслер. — М. : Стройиздат, 1990. — 320 с.
7. Комохов, П.Г. Долговечность бетона и железобетона. Приложения методов математического моделирования с учетом ингибирующих свойств цементной матрицы [Текст] / П.Г. Комохов, В.М. Латыпов, Т.В. Латыпова, Р.Ф. Вагапов. — Уфа : Изд-во «Белая река», 1998. — 216 с.
8. Федоров, П.А. О математической зависимости, описывающей процесс нейтрализации бетона [Текст] / П.А. Федоров, Б.Р. Анваров, Т.В. Латыпова, А.Р. Анваров, В.М. Латыпов // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. — Челябинск, 2010. — С. 13–15.
9. Анваров, Б.Р. Долговечность железобетона в резервуарах чистой воды [Текст] / Б.Р. Анваров, В.М. Латыпов, Т.В. Латыпова, А.Р. Анваров // Изв. Казан. гос. архит.-строит. ун-та. — Казань, 2013. — № 1(23). — С. 174–181.
10. Anvarov, A.R. Carbonization of concrete: worried about durability? [Текст] / A.R. Anvarov, P.A. Fedorov, T.V. Latypova, E.V. Lutsyk, T.Z. Gilmutdinov, V.M. Latyrov // The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering (5ACEE), October 16–18, 2014, Taipei, Taiwan.
11. Анваров, А.Р. Кинетика карбонизации мелкозернистого бетона в нормальных температурно-влажностных условиях эксплуатации [Текст] / А.Р. Анваров, П.А. Федоров, В.М. Латыпов // Сборник трудов VIII Академических чтений РААСН / Междунар. науч.-техн. конф. «Механика разрушения строительных материалов и конструкций», 18–20 сентября 2014, Казань.
12. Толыпина, Н.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 18.11.14 / Н.М. Толыпина. — Белгород : Белгород. гос. технологич. ун-т, 2014.
13. Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости [Текст] / Н.К. Розенталь. — М. : ФГУП ЦПП, 2006. — 520 с.

АНВАРОВ Булат Рамилевич, асп.; E-mail: anvarov@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет

ЛАТЫПОВА Татьяна Владимировна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: stexpert@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет

ЛАТЫПОВ Валерий Марказович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: stexpert@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет

КРАМАР Людмила Яковлевна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kramar-l@mail.ru
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Получено после доработки 12.01.15

Anvarov Bulat Ramilevich, post-graduate student; E-mail: anvarov@mail.ru, Ufa State Petroleum Technological University, Russia

Latypova Tatiana Vladimirovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: stexpert@mail.ru, Ufa State Petroleum Technological University, Russia

Latypov Valeriy Markazovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: stexpert@mail.ru, Ufa State Petroleum Technological University, Russia

Kramar Lyudmila Yakovlevna, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kramar-l@mail.ru, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

TO THE QUESTION ABOUT THE MECHANISM OF DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE WITH CORROSION OF THE FIRST KIND

The assessment of speed and feature of processes of corrosion of a protective layer of concrete, and also existence and feature of course of corrosion processes in fittings in columns of the pure tank after sixty years of operation is presented in article. On the basis of the conducted researches considerable change of phase structure and properties of concrete is established. For delay of processes of corrosion in concrete of tanks for pure storage and ensuring safety of fittings in its use of dense concrete of brand on water tightness of W8 can be recommended above that, besides, will increase water tightness of all construction, and also it is necessary to control and reduce the content of bicarbonates in the stored water.

Key words: pure tank, leaching corrosion, concrete carbonization, products of corrosion of fittings.

REFERENCES

1. Moskvin, V.M. Concrete corrosion [Text] / V.M. Moskvin. — M. : State publishing house liters on construction and architecture, 1952. — 342 p.
2. Verbetskiy, G.P. Strength and durability of concrete in the water environment [Text] / G.P. Verbetskiy. — M. : Stroyizdat, 1976. — 128 p.
3. Trofimov, B.Ya. Concrete corrosion [Text] / B.Ya. Trofimov, M.I. Mushtakov. — Chelyabinsk : Publishing house of SUSU, 2008. — 310 p.
4. Pukhonto, L.M. Durability of reinforced concrete designs of engineering constructions (silos, bunkers, tanks, water towers, retaining walls) [Text] / L.M. Pukhonto. — M. : Publishing house of DIA, 2004. — 424 p.
5. Stark, I. Durability of concrete [Text] / I. Stark, B. Vikht; transl. from germ. A. Tulaganova; under the edit. of P. Krivenko. — K. : Oranta, 2004. — 295 p.
6. Alekseev, S.N. Durability of reinforced concrete in aggressive environments [Text] / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, C. Modry, P. Shissl. — M. : Stroyizdat, 1990. — 320 p.
7. Komokhov, P.G. Durability of concrete and reinforced concrete. Appendices of methods of mathematical modeling taking into account the inhibiting properties of a cement matrix [Text] / P.G. Komokhov, V.M. Latypov, T.V. Latypova, R.F. Vagapov. — Ufa : Publishing house «White river», 1998. — 216 p.
8. Fedorov, P.A. About the mathematical dependence describing neutralization process the concrete [Text] / P.A. Fedorov, B.R. Anvarov, T.V. Latypova, A.R. Anvarov, V.M. Latypov // Bulletin of the South Ural State University. — Chelyabinsk, 2010. — P. 13–15.
9. Anvarov, B.R. Durability of reinforced concrete in tanks of clear water [Text] / B.R. Anvarov, V.M. Latypov, T.V. Latypova, A.R. Anvarov // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. — Kazan, 2013. — N 1(23). — P. 174–181.
10. Anvarov, A.R. Carbonization of concrete: worried about durability? [Text] / A.R. Anvarov, P.A. Fedorov, T.V. Latypova, E.V. Lutsyk, T.Z. Gilmutdinov, V.M. Latypov // The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering (5ACEE), October 16–18, 2014, Taipei, Taiwan.

11. Anvarov, A.R. Kinetik of carbonization of fine-grained concrete in normal temperature and moist service conditions [Text] / A.R. Anvarov, P.A. Fedorov, V.M. Latypov // Collection of works VIII of the Academic readings RAACS / International scientific and technical conference «Mechanics of destruction of construction materials and designs», September 18–20, 2014, Kazan.
 12. Tolypina, N.M. Increase of corrosion resistance of concrete by the rational choice knitting and fillers [Text] : the abstract of the thesis on competition of degree of the Doctor of Engineering: 18.11.14 / N.M. Tolypina. — Belgorod : Belgorod State Technological University, 2014.
 13. Rosental, N.K. Corrosion resistance of cement concrete of low and especially low permeability [Text] / N.K. Rosental. — M. : Federal State Unitary Enterprise «The center of design production on construction», 2006. — 520 p.
-

УДК 691.542:666.97.015

А.Н. МАШКИН, Г.И. БЕРДОВ, С.А. ВИНОГРАДОВ, В.Ф. ХРИТАНКОВ

ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГИДРАТАЦИОННОГО ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Определено изменение диэлектрических свойств цементного камня (диэлектрической проницаемости, диэлектрических потерь, добротности) на частоте 1,5 МГц в процессе твердения в нормальных условиях и после термической обработки. Установлена связь этих свойств со значениями прочности цементного камня.

Ключевые слова: портландцемент, гидратационное твердение, диэлектрическая проницаемость, диэлькометрия.

Диэлькометрия (или диэлектрометрия) — метод исследования структуры и свойств веществ путем определения их диэлектрических свойств — диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. Диэлектрическая проницаемость характеризует поляризацию диэлектрика под действием электрического поля, $\operatorname{tg}\delta$ — потери в нем энергии поля. При высокочастотном диэлькометрическом анализе используются емкостные измерительные ячейки и измерители добротности. При этом экспериментально обычно определяют электрическую емкость и добротность измерительного контура. Добротность Q характеризует потери энергии, она тем больше, чем меньше диэлектрические потери в исследуемом материале [1, 2].

В данной работе диэлькометрию использовали для исследования процесса гидратационного твердения цемента. Диэлектрические свойства воды изучены подробно [3]. У цементных материалов диэлектрические свойства, как правило, не относят к числу эксплуатационных. Они мало исследованы для портландцемента как в исходном, так и в гидратированном состоянии. Об их уровне можно судить по аналогии с другими силикатами и гидросиликатами, такими как волластонит, форстерит, слюда, тальк.

При взаимодействии с портландцементом вода переходит в связанное состояние в составе гидросиликатов и гидроалюминатов. По уровню диэлектрических свойств можно исследовать изменение состояния воды при гидратации цемента и формировании структуры искусственного камня.

В работе исследован портландцемент производства ОАО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ500 Д20. Его минералогический состав, мас. %: C_3S — 60–65; C_2S — 16–20; C_3A — 8–13; C_4AF — 10–13. Удельная поверхность 4100 см²/г. Химический состав цемента, мас. %: SiO_2 — 19,1; Al_2O_3 — 6,3; Fe_2O_3 — 4,4; CaO — 68,2; MgO — 1,2; SO_3 — 0,4; п.п. — 0,5.

Образцы цементного камня имели размеры 20×20×20 мм. Их твердение происходило как в нормальных условиях, так и после тепловлажностной обработки по режиму: подъем температуры до 80 °C — 3 ч, изотермическая выдержка — 7 ч, охлаждение — 2 ч.

Определение диэлектрических свойств проведено на измерителе добротности Tesla BM-560 на частоте 1,5 МГц при температуре 20 °С. Такая частота является наиболее информативной при исследовании твердения веществ, содержащих полярные молекулы воды [4].

Испытаны образцы, твердевшие в различных условиях в течение 3, 7, 14 и 28 сут. В возрасте 3 сут эти образцы, в том числе твердевшие в нормальных условиях, обладают достаточно высокой прочностью для проведения измерений. На торцевые поверхности образца наносились графитовые электроды, подключение к измерителю добротности осуществлялось посредством стальных пластин, плотно контактирующих с графитовыми электродами. Каждый образец испытан не менее 4 раз, в каждой серии испытывалось не менее 3 образцов. После диэлектрических измерений те же образцы испытывались на прочность при сжатии. Это позволяет корректно сопоставлять значения прочности и диэлектрических свойств цементного камня, которые определяются в данном случае, как и у других кристаллогидратов, полярными молекулами воды, прочностью их связи в структуре материала, а также степенью упорядоченности этой структуры [4].

В табл. 1, 2 приведены средние значения исследованных свойств для каждой серии испытаний.

Таблица 1. Диэлектрические свойства и предел прочности при сжатии образцов цементного камня, твердевших в нормальных условиях

Свойства	Время твердения, сут			
	3	7	14	28
Прочность при сжатии, МПа	24,9	46,5	54,2	62,6
Диэлектрическая проницаемость ϵ	34,3	34,8	28,2	24,5
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$	0,746	0,721	0,731	0,665
Добротность Q	26	27	31	38

Таблица 2. Изменение прочности диэлектрических свойств образцов цементного камня при твердении после тепловлажностной обработки (80 °С, 10 ч)

Свойства	Время твердения, сут			
	3	7	14	28
Прочность при сжатии, МПа	54,3	57,1	58,3	60,1
Диэлектрическая проницаемость ϵ	29,2	26,8	25,9	25,4
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$	0,735	0,746	0,731	0,719
Добротность Q	29,2	31,4	32,9	34

У образцов, твердевших в нормальных условиях, значительное увеличение прочности (с 24,9 до 46,5 МПа) происходит в интервале от 3 до 7 сут твердения. Вместе с тем диэлектрические свойства цементного камня изменяются намного меньше (см. табл. 1). То есть энергетическое состояние молекул воды, их способность к ориентации в высокочастотном поле остается практически неизменной. По-видимому, протекают физические процессы, такие как сращивание кристаллов, перекристаллизации новообразований и приводящие к повышению его прочности.

От 7 до 14 сут твердения происходит увеличение прочности образцов с 34,9 до 48,3 МПа. При этом одновременно существенно уменьшается диэлектрическая проницаемость и увеличивается добротность образцов, что является следствием снижения диэлектрических потерь. То есть процесс упрочнения образца сопровождается усилением энергетической связи воды в структуре цементного камня.

От 14 до 28 сут происходит дальнейшее повышение прочности. При этом диэлектрическая проницаемость снижается, а добротность повышается, хотя значительно меньше, чем в интервале от 7 до 14 сут твердения.

Следует отметить, что полученные значения диэлектрической проницаемости для цементного камня в возрасте 28 сут (24,2) характерны для кристаллических веществ, содержащих полярные молекулы воды. Так, в работе [4] для кристаллического гипса указано значение ϵ при частоте 1,5 МГц равное 26, для кристаллического талька — 18. Диэлектрические потери таких материалов повышенены, при определенных частотах и температурах они имеют максимумы.

У образцов, прошедших тепловлажностную обработку при температуре 80 °С изотермической выдержкой в течение 7 ч, при дальнейшем твердении в нормальных условиях прочность и добротность увеличиваются, а диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери снижаются (см. табл. 2).

После 3 сут твердения образцов, подвергнутых термообработке по указанному режиму, прочность их при сжатии такая же, как после 14 сут твердения в нормальных условиях. Вместе с тем диэлектрическая проницаемость у образцов, прошедших термообработку, больше, а добротность меньше, чем у твердевших в течение 14 сут в нормальных условиях. То есть при одинаковой механической прочности у образцов, прошедших термообработку, связь полярных молекул воды в структуре менее прочная. Такие молекулы активно участвуют в процессе поляризации материала в высокочастотном поле.

При дальнейшем твердении образцов, прошедших термообработку, их прочность увеличивается, возрастает добротность, уменьшаются диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость. То есть происходит дальнейшее усиление энергетических связей воды в структуре цементного камня. Однако к 28 сут твердения рассматриваемые величины не достигают значений, соответствующих 28 сут твердения в нормальных условиях.

Таким образом, при гидратационном твердении цементного камня наряду с повышением их механической прочности происходит изменение диэлектрических свойств диэлектрической проницаемости, добротности, диэлектрических потерь, определяемых упорядоченностью структуры и степенью энергетической связи в ней полярных молекул воды. Корреляционная связь этих показателей с прочностью может являться основой ее неразрушающей оценки. У образцов, прошедших тепловлажностную обработку, при равных значениях прочности с образцами, твердевшими в нормальных условиях, упорядочность структуры и связь в ней полярных молекул воды меньше, что фиксируется по значениям диэлектрических свойств. На основе диэлькометрического анализа может быть определен оптимальный режим термообработки цементных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заринский, В.А. Диэлькометрия [Текст] / В.А. Заринский // Химическая энциклопедия. Т. 2. — М. : Сов. энцикл., 1990. — 210 с.
2. Заринский, В.А. Высокочастотный химический анализ [Текст] / В.А. Заринский, В.И. Ермаков. — М. : Наука, 1970. — 200 с.
3. Хиппель, А.Р. Диэлектрики и их применение [Текст] / А.Р. Хиппель; пер. с англ. — М. — Л. : Госэнергоиздат, 1959. — 336 с.
4. Водопьянов, К.А. Температурно-частотная зависимость для диэлектрических потерь в кристаллах с полярными молекулами [Текст] / К.А. Водопьянов // Доклады АН СССР. — 1952. — Т. 94, № 5. — С. 919–921.

МАШКИН Алексей Николаевич, канд. техн. наук

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ВИНОГРАДОВ Семен Алексеевич, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ХРИТАНКОВ Владимир Федорович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный аграрный университет

Получено 12.01.15

Mashkin Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Berdov Gennadiy Ilyich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Vinogradov Semen Alexeevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Khritanov Vladimir Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Agricultural University, Russia

DIELKOMETRIC ANALYSIS OF PROCESS HYDRATION CURING OF THE CEMENT STONE

Change of dielectric properties of a cement stone (dielectric permeability, dielectric losses, good quality) at a frequency of 1,5 MHz in process of curing in normal conditions and after heat treatment is defined. Connection of these properties with values of durability of a cement stone is established.

Key words: portland cement, hydration curing, dielectric permeability, dielkometric.

REFERENCES

1. Zarinskiy, V.A. Dielcometric [Text] / V.A. Zarinskiy // Khimicheskaya enciklopedia. Vol. 2. — M. : Soviet encycl., 1990. — 210 p.
2. Zarinskiy, V.A. High frequency chemical analysis [Text] / V.A. Zarinskiy, V.I. Ermakov. — M. : Nauka, 1970. — 200 p.
3. Khippel, A.R. Dielectrics and their application [Text] / A.R. Khippel; transl. from engl. — M.- L. : Gosenergoizdat, 1959. — 336 p.
4. Vodopyanov, K.A. Temperature-frequency dependence for dielektrical losses in crystals with polar molecules [Text] / K.A. Vodopyanov // Reports Academy of sciences USSR. — 1952. — Vol. 94, N 5. — P. 919–921.

УДК 691.31:666.964.3

В.В. ЯДЫКИНА, С.С. ТОБОЛЕНКО, А.И. ТРАУТВАИН

СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ДОБАВКА ДЛЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ*

Изложены результаты исследований свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона на основе разработанных составов стабилизирующих добавок из отходов целлюлозно-бумажной промышленности.

Ключевые слова: стабилизирующие добавки, щебеночно-мастичный асфальтобетон, целлюлозно-бумажные отходы.

Термин «стабилизирующая добавка» применительно к щебеночно-мастичному асфальту (ЩМА) в первую очередь означает вещество, удерживающее вяжущий материал для обеспечения однородности смеси во время транспортировки и укладки [1].

Среди многих стабилизирующих добавок наиболее часто используемыми являются искусственные добавки, чаще всего целлюлозные, а также некоторые синтетические волокна [2, 3].

Первоначально в качестве стабилизатора использовались так называемые свободные целлюлозные волокна, нарезанные и «распущенные» специальным образом. Однако после перехода от единичного производства ЩМА к массовому все чаще и чаще стали проявляться определенные дефекты смеси. Это — сегрегация смеси и появление битумных пятен различной величины (иногда обширной площади) на вновь уложенной дорожной поверхности непосредственно в процессе уплотнения. После дополнительных исследований было обнаружено, что несмотря на прекрасный стабилизирующий эффект, свободные волокна обладают серьезными недостатками:

— повышенная гигроскопичность; подобно вате, целлюлозные волокна прекрасно впитывают влагу из окружающего пространства, что делает невозможным их дальнейшее использование;

— затрудняют распределение в смесителе;

— склонность к комкованию, что затрудняет дозирование и дальнейшее распределение в смесителе;

— высокая вероятность обгорания, когда свободные волокна попадают в смеситель на перегретый инертный материал (190–200 °C), то в первую очередь происходит обгорание интермолекулярных OH-мостиков, которыми молекула целлюлозы связывается с молекулами вяжущего и каменного материала [4].

Дальнейшим эволюционным развитием семейства стабилизаторов стало появление гранулированных добавок. Гранулированные волокна имеют ряд преимуществ с точки зрения их меньшей гидроскопичности по сравнению со свободными волокнами, они не комкуются и лучше распределяются в смесителе.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ № 1950, а также проекта стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова № 2011-ПР-146.

В большинстве составов в качестве стабилизирующих добавок для удержания дополнительного количества вяжущего в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях (ЩМАС) используют гранулированные волокна (целлюлозные, полимерные или иные). К их числу относятся импортные волокнистые добавки, например «TOPCEL» (фирмы CFF GmdH, Германия), а также «VIATOP-66» (фирма JRS GmbH + CO.KG, Германия), состоящие из гранулированных волокон целлюлозы и связующего в виде органического материала (добавки стабилизирующие «TEXNOCEL» и «TOPCEL») для смесей щебеночно-мастичных асфальтовых. Недостатком этих добавок является высокая стоимость.

Цель проведения исследования — создание конкурентоспособной стабилизирующей добавки на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности для производства щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси, обладающей высокими физико-механическими характеристиками.

В состав разрабатываемой стабилизирующей добавки для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси входили следующие компоненты: органическое вяжущее, структурообразователь и вода. При этом в качестве органического вяжущего использовали парафин, структурообразователя — целлюлозно-бумажные отходы и дополнительно вводили известняковый минеральный порошок.

Известняковый минеральный порошок за счет структурирующего влияния на парафин и образования микропористой структуры снижает показатель стекания вяжущего. Таким образом, парафин, находясь в тонких прослойках и мелких порах, попадает в область влияния молекул поверхностного слоя минеральной части, в результате чего снижается липкость гранул добавки. Это приводит к возможности равномерного распределения стабилизирующей добавки в ЩМА в процессе его приготовления.

Снижение коэффициента стекания вяжущего повышает способность стабилизирующей добавки сорбировать вяжущее в ЩМА и приводит к уменьшению количества открытых пор, заполненных водой, снижая водонасыщение асфальтобетона. Также существенно снижается водонасыщение за счет гидрофобизации целлюлозного волокна парафином. Одновременное снижение водонасыщения и показателя стекания вяжущего приводит к повышению физико-механических характеристик асфальтобетона: предела прочности при сжатии, трещиностойкости, коэффициента внутреннего трения и показателя сцепления при сдвиге.

Более того, применение в качестве структурообразователя целлюлозно-бумажных отходов, занимающих большие площади во всех областях страны, значительно снижает стоимость стабилизирующей добавки, производство которой будет способствовать улучшению экологической обстановки в стране, что является целесообразным в большинстве регионов.

В качестве сырья для получения стабилизирующей добавки использовали: целлюлозно-бумажные отходы (ЦБО), состоящие из отходов

бумаги, картона; известняковый минеральный порошок марки МП-1 по ГОСТ Р 52129–2003, гранулометрический состав которого представлен в табл. 1; парафин марки Т-3 по ГОСТ 23683–89 и воду.

Составы разработанных стабилизирующих добавок имели условные обозначения: № 1–7.

Таблица 1. Гранулометрический состав известнякового минерального порошка марки МП-1

Фракции зернового состава, мм	Значения в %, по массе
Мельче 1,25	Не менее 100
Мельче 0,315	Не менее 90
Мельче 0,071	От 70 до 80

С целью изучения влияния состава стабилизирующей добавки на физико-механические характеристики щебеночно-мастичного асфальтобетона были произведены испытания образцов, приготовленных с использованием гранитного щебня, который соответствовал требованиям ГОСТ 8267–93 и ГОСТ 3344–83, а также песка из отсева дробления гранита, отвечающего требованиям ГОСТ 8736–93. В качестве минерального порошка применялся известняковый минеральный порошок МП-1, соответствующий требованиям ГОСТ 52129–2003. В качестве вяжущего применяли битум вязкий нефтяной дорожный марки БНД 60/90, соответствующий ГОСТ 22245–90.

Проектирование гранулометрического состава щебеночно-мастичных смесей с учетом особенностей можно осуществлять по методике, принятой для обычных асфальтобетонов согласно ГОСТ 9128–2013.

Расход материалов для приготовления ЩМА принят в соответствии с данными, приведенными в табл. 2. При этом было приготовлено 7 смесей ЩМА, отличающихся составом вводимой стабилизирующей добавки.

Изготовление образцов щебеночно-мастичного асфальтобетона осуществлялось следующим образом:

- подготовка минеральных материалов (подача и предварительное дозирование, сушка и нагрев до требуемой температуры (общепринятая температура нагрева компонентов ЩМА примерно на 10 °С выше регламентируемой для плотных смесей на основе окисленных битумов согласно ГОСТ 12801–98), пофракционное дозирование);

- подача холодных минерального порошка и стабилизирующей добавки, дозирование их перед подачей в смеситель;

- подготовка битума (разогрев, выпаривание содержащейся в нем влаги и нагрев до рабочей температуры, в необходимых случаях введение поверхностно-активных веществ и других улучшающих добавок, дозирование перед подачей в смеситель);

- «сухое» перемешивание горячих минеральных материалов с холодным минеральным порошком и стабилизирующей добавкой;

- перемешивание минеральных материалов с битумом;

- приготовление образцов асфальтобетона согласно ГОСТ 9128–2013.

Результаты испытаний полученных образцов щебеночно-мастичного асфальтобетона с применением стабилизирующей добавки приведены в табл. 3.

Результаты испытаний показали, что щебеночно-мастичный асфальтобетон с использованием разработанной стабилизирующей добавки соответствует требованиям ГОСТ 31015–2002.

Из табл. 3 видно, что использование стабилизирующих добавок (составы № 3–5) позволяет получить щебеночно-мастичный асфальтобетон на их основе с оптимальным сочетанием физико-механических

Таблица 2. Расход материалов для приготовления щебеночно-мастичного асфальтобетона

Материал	Расход материала для ЩМА-15, % по массе
Щебень фракции, мм:	
5–10	18,7
10–15	46,8
15–20	—
Песок из отсевов дробления	18,0
Минеральный порошок	10,0
Битум или ПВБ (сверх 100 %)	6,1
Стабилизирующая добавка	0,4

Таблица 3. Физико-механические характеристики ЩМА-15

Характеристики	Требования ГОСТ 31015-2002	Стабилизирующая добавка						
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Показатель стекания вяжущего, % по массе	Не более 0,20	0,22	0,20	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10
Водонасыщение, % по объему образцов, отформованных из смесей	От 1,0 до 4,0	0,8	1,0	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее: при температуре 20 °C при температуре 50 °C	2,2 0,65	3,96 0,7	4,2 0,9	3,8 0,9	3,82 1,2	3,65 1,4	2,2 1,1	2,0 0,85
Трещиностойкость — предел прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °C, МПа	От 2,5 до 6	5,9	5,6	5,8	5,6	5,3	3,5	3,0
Коэффициент внутреннего трения асфальтобетона, $\text{tg}\phi$, не менее	0,93	0,87	0,91	0,94	0,96	0,96	0,81	0,80
Показатель сцепления при сдвиге (C_d), МПа, не менее	0,18	0,15	0,18	0,20	0,23	0,22	0,18	0,11

свойств, одновременно снизить водонасыщение, показатель стекания вяжущего при технологических температурах в процессе хранения и транспортировки смеси и как следствие липкость. Невысокая липкость добавки привела к быстрому и равномерному ее распределению в смеси щебено-мастичного асфальтобетона, что отразилось на стабильности полученных результатов.

В результате одновременное снижение показателя стекания вяжущего и водонасыщения щебено-мастичного асфальтобетона отразилось на повышении предела прочности при сжатии при 50 °C, при 20 °C, показателя сцепления при сдвиге и коэффициента внутреннего трения. Все это свидетельствует о высоких эксплуатационных и сдвигоустойчивых качествах щебено-мастичного асфальтобетона при средних температурах, в которых работает асфальтобетонное покрытие большую часть времени (60 %) в центральном регионе России.

Если стабилизирующая добавка в своем составе будет содержать целлюлозно-бумажных отходов менее 70 %, известнякового минерального порошка более 14 % и парафина более 12 %, то щебено-мастичный асфальтобетон, полученный с использованием данной стабилизирующей добавки, не будет удовлетворять требованиям ГОСТ 31015–2002 по следующим физико-механическим характеристикам: коэффициенту внутреннего трения и показателю сцепления при сдвиге (состав № 2); коэффициенту внутреннего трения, водонасыщению, показателю сцепления при сдвиге и показателю стекания вяжущего (состав № 1). Это связано с тем, что увеличение количества минерального порошка в составе стабилизирующей добавки более 14 % приводит к повышению вязкости парафина, его пленка в пограничных слоях поверхности минерального порошка становится очень тонкой. Вследствие этого увеличивается плотность получаемой стабилизирующей добавки, показатель стекания вяжущего увеличивается, а водонасыщение ЩМА падает, что способствует ухудшению его физико-механических характеристик. Более того, увеличение содержания парафина в составе разрабатываемой добавки более 12 % повышает

шает хрупкость ЦМА, снижается прочность образцов ЦМА при напряжениях сдвига и сжатия.

Если стабилизирующая добавка в своем составе будет содержать целлюлозно-бумажных отходов более 80 %, известнякового минерального порошка менее 8 % и парафина менее 8 %, то щебеночно-мастичный асфальтобетон, полученный с использованием данной стабилизирующей добавки, не будет удовлетворять требованиям ГОСТ 31015–2002 по следующим физико-механическим характеристикам: коэффициенту внутреннего трения (состав № 6); водонасыщению, пределу прочности при сжатии при температуре 20 °С, коэффициенту внутреннего трения и показателю сцепления при сдвиге (состав № 7). Снижение количества известнякового минерального порошка менее 8 % в составе стабилизирующей добавки не приводит к уменьшению толщины битумных слоев на поверхности минеральных частиц до необходимой величины, а следовательно, не оказывает структурирующего влияния на парафин, что приводит к получению гранул стабилизирующей добавки с повышенной липкостью. При этом распределение стабилизирующей добавки в смеси ЦМА происходит неравномерно, что отражается на стабильности получаемых результатов. Поэтому снижение показателя водонасыщения образцов ЦМА не способствует снижению показателя стекания вяжущего. В свою очередь, уменьшение содержания парафина менее 8 % не приводит к гидрофобизации целлюлозного волокна, а следовательно, увеличивает водонасыщение, снижает прочностные характеристики образцов ЦМА с использованием стабилизирующей добавки составов № 6 и 7.

Более того, щебеночно-мастичный асфальтобетон на основе стабилизирующей добавки состава № 5 по водонасыщению, пределу прочности при сжатии при температуре 20 °С и показателю сцепления при сдвиге имеет минимально возможные значения по требованиям ГОСТ 31015–2002.

Таким образом, разработанный состав стабилизирующей добавки позволит получить покрытие из щебеночно-мастичного асфальтобетона, обладающего низким показателем стекания вяжущего и низким водонасыщением, используя при этом в качестве исходного сырья общедоступные и недорогие материалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В е р е н ь к о, В.А. Щебеночно-мастичный асфальтобетон — эффективный материал дорожных покрытий [Текст] / В.А. Веренько, В.В. Занкович // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. — Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2002. — Вып. 19. — С. 130–131.
2. М у х а м е т х а н о в, А.М. Способ получения стабилизирующей добавки для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси [Текст] / А.М. Мухаметханов, О.К. Нугманов, В.И. Гаврилов // Вестник Казан. технологич. ун-та. — 2010. — № 6. — С. 204–210.
3. Н у г м а н о в, О.К. Целлюлоза. Начало нашей эры [Текст] / О.К. Нугманов, Н.А. Лебедев // Химический журнал. — 2009. — № 12.— С. 30–33.
4. Э ф а, А.К. Щебеночно-мастичный асфальтобетон. Теоретические основы, практика применения [Текст] / А.К. Эфа, А.В. Жураускас, А.П. Акулов // Строительные материалы. — 2003. — № 1. — 22 с.

ЯДЫКИНА Валентина Васильевна, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ТОБОЛЕНКО Сергей Сергеевич, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*ТРАУТВАИН Анна Ивановна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: trautvain @bk.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 26.01.15

Yadykina Valentina Vasil'yevna, doctor of technical sciences, professor; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Tobolenko Sergey Sergeevich, post-graduate student; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Trautvain Anna Ivanovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: trautvain @bk.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

STABILIZING ADDITIVE FOR THE STONE MASTIC ASPHALT CONCRETE USING WASTE OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY

The paper presents the results of studies of the properties stone mastic asphalt concrete based on the developed formulations stabilizing additives from waste paper and pulp industry.

Key words: stabilizing additives, stone mastic asphalt, pulp and waste paper.

REFERENCES

1. Verenko, V.A. Stone mastic asphalt — effective material pavements [Text] / V.A. Verenko, V.V. Zankovich // Journal of Kharkov National Automobile and Highway University: collection of Scientific Papers. — Kharkov : Publishing Kharkov National Automobile and Highway University, 2002. — Issue 19. — P. 130–131.
2. Mukhametkhanov, A.M. A method for producing a stabilizing additive for stone mastic asphalt mix [Text] / A.M. Mukhametkhanov, O.K. Nugmanov, V.I. Gavrilov // Bulletin of Kazan Technological University. — 2010. — N 6. — P. 204–210.
3. Nugmanov, O.K. Cellulose. The beginning of our era [Text] / O.K. Nugmanov, N.A. Lebedev // Chemical Journal. — 2009. — N 12.— P. 30–33.
4. Ef'a, A.K. Stone mastic asphalt. Theoretical bases, the practice of application [Text] / A.K. Ef'a, A.V. Zhurauskas, A.P. Akulov // Building materials. — 2003. — N 1. — 22 p.

УДК 691.42:666.31

Б.К. КАРА-САЛ, Ш.В. СЕРЕН, Д.С. МОНГУШ

ПОЛЕВОШПАТОЦЕОЛИТОВАЯ ПОРОДА КАК СЫРЬЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Особенности химико-минералогических составов и структуры породообразующих минералов полевошпатоцеолитовой породы при соответствующей переработке и выборе технологических параметров позволяют получить на ее основе керамические стеновые материалы пористого и плотного черепка.

Ключевые слова: полевошпатоцеолитовая порода, сырье, измельчение, формование, сушка, обжиг, свойства.

В настоящее время для производства керамических стеновых материалов все чаще применяют нетрадиционные сырьевые материалы природной и техногенной основы, которые по химико-минералогическим основам и структурным особенностям пригодны для изготовления обожженных алюмосиликатных изделий. Это связано с низким качеством местных глинистых пород и отсутствием месторождений качественных добавочных материалов, а также высокими тарифами на перевозку сырья из других регионов.

Поиск и применение местных полиминеральных сырьевых материалов, в том числе нетрадиционного сырья для изготовления керамических стеновых изделий, является актуальной проблемой, решение которой позволяет снизить себестоимость продукции и сэкономить привозное сырье при получении материалов с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Цель данной работы — исследование возможности получения керамических стеновых материалов из полевошпатоцеолитовых пород и изучение эксплуатационных свойств полученных изделий.

Принятая в качестве основного сырья полевошпатоцеолитовая порода ранее не использовалась для производства керамических изделий и представляет собой отсев камнедробления размерами частиц не более 5 мм, полученный при изготовлении щебня для дорожного строительства. Средняя насыпная масса отсева полевошпатоцеолитовой породы 1520–1540 кг/м³.

Использование полевошпатоцеолитовой породы связано не только химико-минералогическим составом сырья, но и особенностями строения структурных единиц породообразующих минералов. Как известно, цеолитовые минералы обладают каркасной структурой и отличаются ионно-обменными способностями [1], что дает возможность многофункционально действовать на различных этапах технологии производства керамических изделий. Кроме того, значительное содержание полевых шпатов в исходном сырье регулирует чувствительность массы к сушке и способствует спеканию изделий при обжиге [2].

Для регулирования усадочных деформаций при сушке и обжиге в состав шихты ввели другое нетрадиционное сырье — глиежи (горелые

породы), которые являются вскрышной породой при добыче каменного угля открытым способом на угольном разрезе «Чаданский» (Республика Тыва). После дробления песчаная фракция горелых пород имеет объемную насыпную массу 1610–1630 кг/м³.

Анализ химического состава сырьевых материалов, представленный в табл. 1, показывает, что в полевошпатоцеолитовой породе, наряду с высоким содержанием железистых соединений, в значительном количестве присутствуют щелочноземельные (CaO и MgO более 7 %) и щелочные оксиды (K₂O и Na₂O более 5 %), что очень важно для спекания массы. Кроме того, необходимо отметить значительную потерю массы породы при прокаливании (более 10 %), что свидетельствует о наличии химически связанный воды и карбонатов.

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов

Сырье	Массовое содержание, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	П.п.п.
Полевошпатоцеолитовая порода	57,43	9,17	1,04	9,16	5,45	2,05	4,06	1,47	10,17
Глижи	73,47	10,55	1,52	8,91	1,19	0,94	2,09	0,19	1,14

Химический состав горелых пород (глижи) отличается повышенным содержанием оксидов кремния и железа при незначительной доле щелочноземельных и щелочных элементов.

Минеральный состав полевошпатоцеолитовой породы по данным рентгенофазового анализа представлен полевыми шпатами, клиноптилитом (распространенный цеолитовый минерал), кварцем, железистым соединением, монтмориллонитом и вулканическим стеклом. При этом содержание основных компонентов породы составляет: альбит 38–44 %, клиноптилит 16–18 %, кварц 22–26 %, гидроксид железа 8–9 %, монтмориллонит 6–8 %, вулканическое стекло 4–5 %. По результатам микроскопического исследования выявлено прочное воссоединение клиноптилитовых частиц с вулканическим составляющим породы. В работе [3] отмечено, что цеолитизация связана с гидротермальным синтезом с участием вулканических пород. Следует отметить, что от чистых цеолитов, где содержание главных породообразующих минералов более 50 %, рассматриваемая порода отличается низким содержанием клиноптилита и наличием глинистого минерала, а также вулканического стекла. По минеральному составу цеолитсодержащая порода более близка к пегматитам с низким содержанием полевых шпатов и с присутствием глинистых и железистых минералов.

В фазовом составе горелой породы присутствуют кварц, ортоклаз, железистые соединения и остатки обезвоженных глинистых минералов.

При выполнении работы полевошпатоцеолитовая порода в виде отсева максимальным размером частиц до 3 мм измельчалась в шаровой мельнице сухим способом до остатка на сите 0063 не более 3 %. Из пластичной массы формовались опытные образцы — цилиндрики диаметром и высотой 30 мм, которые сначала сушились на воздухе, затем в сушильном шкафу при температуре 100–105 °C. Обжиг проводился в лабораторной электропечи в интервале 800–1100 °C с изотермической выдержкой 1 ч. Отощающая добавка из глиежей вводилась в состав массы в количестве 15 %.

При выполнении работы технологические свойства массы и физико-механические характеристики обожженных изделий определены согласно требованиям ГОСТ 21216.1–93, 1960-20-89 и 21216.9–93.

По результатам исследования установлено, что масса из чистой полевошпатоцеолитовой породы после тонкого измельчения и увлажнения приобретает пластическое состояние. Как показано в табл. 2, формовочные свойства масс на основе полевошпатоцеолитовой породы зависят от продолжительности механообработки. Выявлено, что в результате помола в течение 4, 6, 7 и 8 ч число пластичности массы повышается с 5,4 до 9,2, 10,7 и 11,6 соответственно. Приобретение пластичного состояния полевошпатоцеолитовой породы после помола и увлажнения связано с разрушением первичной структуры и разбуханием минералов клиноптилолита и монтмориллонита, суммарное содержание которых достигает 24 %. Определенная роль в повышении пластичности массы обеспечивается с увеличением микрокристалличности цеолитовых кристаллов и их аморфизацией при механической обработке [3].

Таблица 2. Технологические свойства масс и сырца

Продолжительность помола, ч	Число пластичности	Формовочная влажность, %	Воздушная усадка, %	Предел прочности при сжатии, МПа
4	5,4	17,0	1,3	1,6
6	9,2	19,0	2,2	2,3
7	10,7	20,0	2,9	2,8
8	11,6	20,5	3,2	3,0

С увеличением продолжительности помола с 4 до 6 и 7 ч повышается тонкость помола, соответственно увеличивается формовочная влажность керамической массы с 17 до 19,0 и 20,5 %. При этом значительно улучшается формуемость массы, не наблюдается разрыв граней и трещин, что свидетельствует о повышении пластичности массы за счет цеолитовых и глинистых частиц.

Методом В.Г. Рутковского установлено, что содержание частиц размерами менее 0,005 мм (относящихся к глинистым) в порошке после измельчения в течение 6, 7 и 8 ч составляет 10,2; 12,4 и 13,7 % соответственно.

Повышение тонкости помола исходной полевошпатоцеолитовой породы положительно влияет на связность массы, о чем свидетельствует предел прочности при сжатии высушенных образцов-сырцов. Выявлено, что в результате 6 и 7 ч измельчения предел прочности сырцов при сжатии увеличивается с 1,6 (4 ч помола) до 2,3 и 2,8 МПа. Увеличение продолжительности помола до 8 ч не вызывает существенного повышения прочности при сжатии образцов-сырцов (3,0 МПа).

В результате сравнения формовочных свойств измельченных масс установлено, что оптимальная продолжительность измельчения полевошпатоцеолитовой породы 6–7 ч.

Наряду с изучением формуемости керамической массы на основе нетрадиционной полевошпатоцеолитовой породы исследованы ее спекаемость при термической обработке и строительно-технические свойства получаемых изделий. При этом поведение масс при обжиге изучалось дифрактометрическим исследованием и изменением фазового состава и физико-механических характеристик обожженных образцов.

Выявлено, что при спекании керамической массы на основе природной полевошпатоцеолитовой породы протекают те же термические реакции, как в случае глинистых пород, отличаются только температурным интервалом и интенсивностью. Как показано на рис. 1, первоначально, начиная с 240 до 700 °C, наблюдается удлинение и объемное расширение образцов, что связано с разрыхлением и увеличением структуры черепка

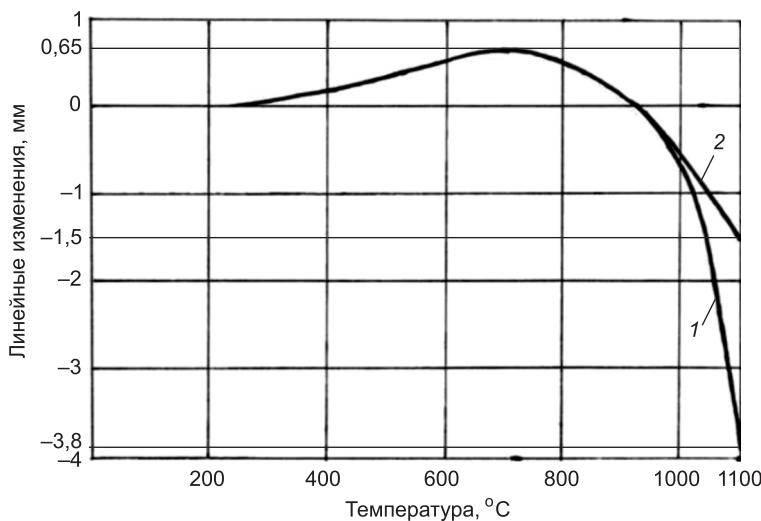


Рис. 1. Изменение линейных размеров образцов при обжиге
1 — чистая полевошпатоцеолитовая порода (ПЦП); 2 — 85% ПЦП + 15 % глижи

вследствие выгорания органики, дегидратации гидроксидов железа, цеолитовых и глинистых минералов, а также модификационным превращением кварцевых частиц. Кроме того, как отмечается в работе [4], при термической обработке клиноптилолита происходит его переход в морденит с увеличением каркасной структуры.

Характер дилатометрических кривых свидетельствует об образовании жидкой фазы после 800 °C. Установлено, что интенсивное образование и накопление жидкого расплава происходит после 1000 °C. В результате образцы при 1100 °C имеют усадку до 3,8 мм (первоначальная длина 50 мм).

Значительную усадку и повышение доли жидкого расплава в фазовом составе образцов из чистой полевошпатоцеолитовой породы при обжиге 1100 °C следует связать с химическим составом сырья, где содержание щелочных элементов, железа и кальция, которые обусловливают при относительно невысоких температурах образование низкотемпературных эвтектик в системах $R_2O - CaO - SiO_2$; $Fe_2O_3 - CaO - SiO_2$.

Результаты исследований показывают, что формирование структуры и физико-механические свойства керамического материала на основе чистой полевошпатоцеолитовой породы зависят от температуры обжига. В результате анализа физико-механических характеристик образцов, представленных в табл. 3, выявлено, что с увеличением температуры обжига и образованием жидкого расплава постепенно происходит уплотнение материала с увеличением средней плотности и прочности материала за счет заполнения пор стеклофазой.

Таблица 3. Свойство образцов после обжига

Состав	Температура обжига, °C	Средняя плотность, г/см ³	Огневая усадка, %	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа
Чистая полевошпатоцеолитовая порода	800	1,74	0,7	21,2	16,8
	900	1,76	1,5	18,6	22,4
	1000	1,79	2,8	16,2	31,5
	1050	1,88	6,2	9,3	48,3
	1100	2,00	23,7	0,7	87,1
85 % полевошпатоцеолитовая порода + 15 % глиежи	800	1,75	0,4	23,2	14,5
	900	1,77	0,8	19,9	20,0
	1000	1,80	2,1	17,8	27,4
	1050	1,86	4,2	10,7	40,3
	1100	1,96	8,9	3,2	71,8

Установлено, что для получения керамических обыкновенных стеновых материалов с водопоглощением не менее 10 % и прочностью более 10 МПа на основе чистых полевошпатоцеолитовых пород температура обжига должна быть более 900 °C (с учетом пустотности и размеров изделий). Как видно из табл. 3, изделия, обожженные при 900 и 1000 °C, имеют водопоглощение 18,6 и 16,2 %, а предел прочности при сжатии 22,4 и 31,5 МПа соответственно, что вполне удовлетворяет требованиям ГОСТ 530–2012.

При дальнейшем повышении температуры выше 1050 °C наблюдается резкое уплотнение черепка за счет бурного выделения жидкого расплава, о чем свидетельствует характер дилатометрической кривой 1 (см. рис. 1) и большая усадка образцов (23,7 %), а также уменьшение водопоглощения изделий до 0,7 %, обожженных при 1100 °C. Интенсивное спекание керамической массы из полевошпатоцеолитовой массы при 1100 °C связано с удачным сочетанием щелочных, щелочноzemельных и тугоплавких оксидов в химическом составе сырья, что способствует образованию жидких расплавов с пониженной вязкостью при низких температурах. Изучение фазового состава образцов плотного черепка, обожженных при 1100 °C рентгенофазовым методом, показало, что кристаллические составляющие представлены разложившимися остатками цеолитовых и глинистых минералов, кварцем, альбитом и вновь образующимися фазами — гематитом (d/h 0,264; 0,251; 0,184 нм), кристобалитом (d/h 0,404; 0,247; 0,202 нм) и аортитом (d/h 0,417; 0,321; 0,294; 0,271 нм).

По данным электронно-микроскопического исследования в структуре керамического черепка, обожженного при 1100 °C (рис. 2, в), присутствуют значительно крупные и уплотненные частицы, образованные и соединенные жидким расплавом. При этом из-за расплавления и соединения стеклофазой в структуре материала морфологически трудно различить кристаллы кварца, альбита, кристобалита, гематита и морденита. Структурные остатки аморфизированных и распадавшихся цеолитовых и глинистых веществ прочно соединены в единое целое стекловидной фазой, содержание которой достигает 44–47 %.

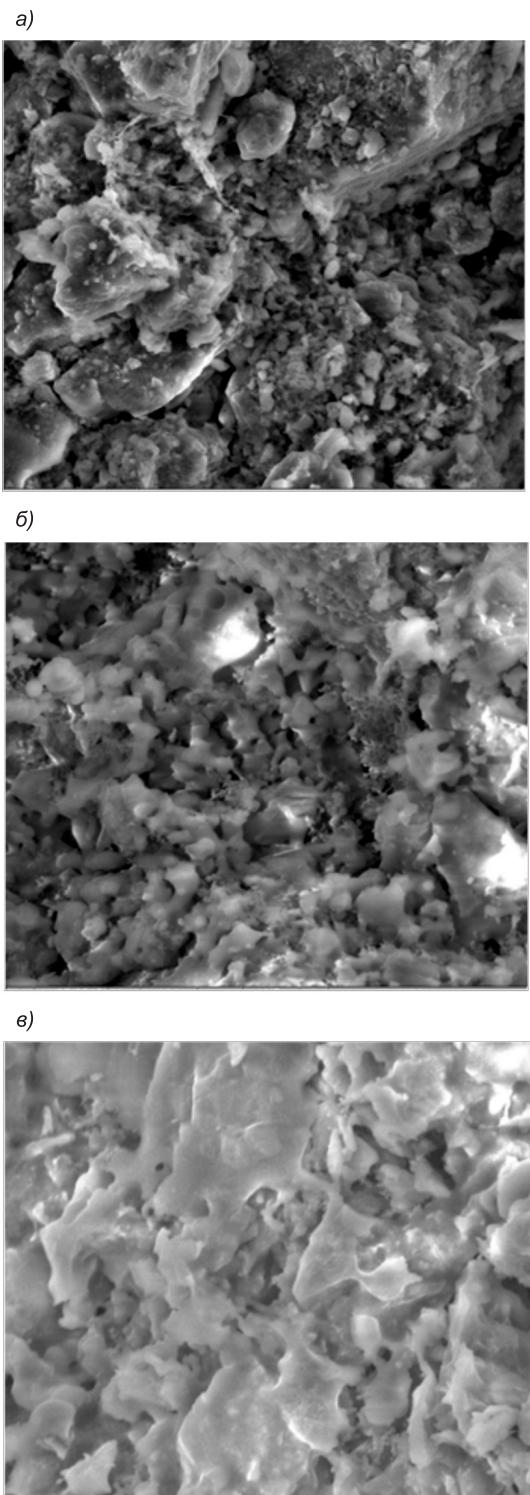


Рис. 2. Микроструктура образцов, обожженных при температурах ($\times 3000$) 1000 °C (а), 1050 °C (б), 1100 °C (в)

В структуре образцов, обожженных при 1000 и 1050 °C, частицы расплавлены не полностью и недостаточно связаны между собой стеклофазой, между ними существуют крупные сквозные поры и пустоты (см. рис. 2, а, б).

В результате обжига изделий из чистой полевошпатоцеолитовой породы при 1100 °C образуется черепок с водопоглощением менее 1 %, что позволяет получить керамические облицовочные материалы плотной структуры.

Однако керамическая масса на основе исходной породы отличается узким интервалом спекания и характеризуется большой усадкой изделий после обжига 1100 °C. Для регулирования огневой усадки образцов в состав шихты ввели 15 % глиежей, что снижает величину усадки изделий с 23,7 до 8,9 % и подтверждается результатом дилатометрического исследования (см. кривая 2 на рис. 1). При этом полученный керамический материал имеет достаточно высокую прочность (71,8 МПа) и малое водопоглощение (3,2 %).

Таким образом, результаты проведенных исследований показали возможность применения полевошпатоцеолитовой породы для производства керамических стеновых материалов пористого и плотного черепка, что способствует расширению сырьевой базы отрасли с привлечением ранее неиспользуемого минерального сырья.

Промышленные испытания, проведенные на базе ООО «Стройгруппа» (подготовка масс и формование кир-

пичей-сырцов) и на кирпичном заводе ООО «Адарон» (обжиг в кольцевой печи при температуре 900–940 °C), подтвердили результаты лабораторных исследований. Керамические кирпичи пластического формования имели водопоглощение 15–17 %, прочность при сжатии 12,7–14,1 МПа, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 530–2012.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко, Г.И. Цеолиты в строительных материалах [Текст] / Г.И. Овчаренко, В.Л. Свиридов, Л.К. Казанцева. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. — 320 с.
2. Августиник, А.И. Керамика [Текст] / А.И. Августиник. — Л. : Стройиздат, 1975. — 592 с.
3. Цицишвили, Г.В. Природные цеолиты [Текст] / Г.В. Цицишвили, Т.Г. Андроникашвили. — М. : Химия, 1985. — 224 с.
4. Ашмарин, А.Г. Керамические стеновые материалы на основе цеолитсодержащего глинистого сырья [Текст] / А.Г. Ашмарин, Н.И. Наумкина, А.М. Губайдулина // Строительные материалы. — 2010. — № 4. — С. 44–46.

КАРА-САЛ Борис Комбуй-оолович, д-р техн. наук, доц.

Тувинский государственный университет, г. Кызыл

СЕРЕН Шораан Владимирович, ст. препод.

Тувинский государственный университет, г. Кызыл

МОНГУШ Долаана Сергеевна, инж.

Тувинский государственный университет, г. Кызыл

Получено 15.01.15

Cara-sal Boris Kombuy-oolovich, doctor of technical sciences, assistant professor, Tuva State University, Kyzyl, Russia

Seren Shoraan Vladimirovich, senior lecturer, Tuva State University, Kyzyl, Russia

Mongush Dolaana Sergeevna, engineer, Tuva State University, Kyzyl, Russia

ZEOLITE FELD-SPAR ROCK AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF CERAMIC WALL MATERIAL

Specific features of the chemical and mineralogical composition and structure of the rock-forming minerals of zeolite feld-spar rock allow to obtain ceramic wall materials of porous and dense crock on their basis with appropriate processing and selection of technological parameters.

Key words: zeolite feld-spar rock, raw material, grinding, forming, drying, burning, properties.

REFERENCES

1. Ovcharenko, G.I. Tseolits in building materials [Text] / G.I. Ovcharenko, V.L. Sviridov, L.K. Kasantseva. — Barnaul : Publishing house Altai STU, 2000. — 320 p.
2. Avgustinik, A.I. Ceramics [Text] / A.I. Avgustinik. — L. : Stroyizdat, 1975. — 592 p.
3. Tsitsishvili, G.V. Natural zeolites [Text] / G.V. Tsitsishvili, T.G. Andronikashvili. — M. : Chemistry, 1985. — 224 p.
4. Ashmarin, A.G. Ceramic wall materials on the basis of zeolite containing raw material [Text] / A.G. Ashmarin, N.I. Naumkina, A.M. Gubaidulina // Construction materials. — 2010. — N 4. — P. 44–46.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 624.13

В.В. ГРУЗИН, Д.Э. АБРАМЕНКОВ, К.Б. ЕСБЕРГЕНОВ,
Т.В. БОГАТЫРЕВА

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ОСНОВАНИЙ ПЛОЩАДОК ОТКРЫТОГО ХРАНЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрены технологические операции и комплект механизированных средств, обеспечивающих уплотнение грунта для подготовки оснований площадок открытого хранения материальных средств на железобетонных подкладках.

Ключевые слова: технология, основание, грунт, уплотнение, площадка, оборудование, железобетонная подкладка.

Земляные работы являются неотъемлемой частью единого технико-технологического комплекса работ, выполняемых при сооружении площадок открытого типа для хранения материальных средств на специализированных объектах в течение длительного срока и в различных природно-климатических условиях [1].

Современные требования по подготовке грунтовых оснований площадок открытого хранения обусловливают необходимость применения специальных технических и технологических решений проблемы повышения надежности и долговечности для эксплуатации указанных объектов, расположенных в разных климатических зонах и на различных типах грунтов [2–4]. Для этих целей предлагается комплект средств механизации со специализированным навесным оборудованием, обеспечивающим уплотнение грунта, с последующей установкой железобетонных подкладок (ЖБП) под контейнеры с материальными средствами [4–6].

До начала основных работ на участке строительства, отведенного для площадок открытого хранения (ПОХ) материальных средств (МС), должны быть выполнены подготовительные внеплощадочные и внутриплощадочные работы. В состав подготовительных работ входят: проведение инженерно-геологических изысканий; расчистка участка строительства; подготовка и усиление подъездных автомобильных дорог, намечаемых к использованию на период строительства и при потреблении МС; организация стоянок строительных машин; организация сетевого графика строительных работ.

К внеплощадочным работам относятся в основном работы по подготовке к строительству сооружений: производственной базы, временных подъездных автомобильных дорог для снабжения строительными материалами, энергоресурсами и других коммуникаций. Внутриплощадочные

© Грузин В.В., Абраменков Д.Э., Есбергенов К.Б., Богатырева Т.В., 2015

работы заключаются в подготовке участка непосредственно в пределах полосы отвода для сооружения ПОХ МС.

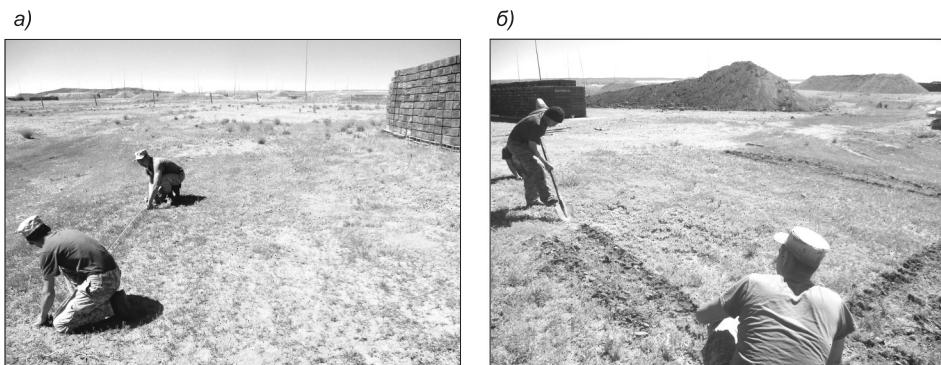
Размеры ПОХ определяются в зависимости от максимальной емкости по хранению и с учетом рационального размещения на ней штабелей с МС.

В соответствии с вышеуказанными положениями ПОХ МС должны выдерживать требуемую нагрузку штабелей, обеспечивать их устойчивость и прочность, исключить скопление грунтовой, дождевой и талой воды в течение всего срока их эксплуатации [1].

Разработанная прогрессивная технология подготовки основания площадки для хранения МС предусматривает использование естественного послойно уплотненного грунта с щебеночным (гравийным) покрытием [4].

Выбор места расположения площадки на технической территории и ориентировка ее на местности определяется в каждом конкретном случае с учетом имеющихся инженерных сооружений и коммуникаций; разветвленной сети дорог или возможности организации подъездных путей; природно-климатических условий и рельефом местности (роза ветров, возможные осадки в течение года, уровень грунтовых вод и т.д.).

Площадки должны по возможности размещаться на сухой и возвышенной местности (рис. 1, а, б).



*Рис. 1. Выбор места площадки открытого хранения материальных средств
а — разметка территории площадки; б — формирование контура площадки*

Предварительно на выбранном участке местности производится расчистка строительной площадки от кустарников, порубочных остатков, крупных камней, строительного мусора и т.д.

Съем плодородного слоя почвы осуществляется бульдозерным оборудованием или автогрейдером и ее временное складирование для последующей рекультивации земляных валов вокруг площадки открытого хранения (рис. 2).

До начала возведения насыпи поверхность основания должна быть выровнена бульдозером (рис. 2, а). Наличие в недренирующих грунтах ям, траншей, котлованов и других понижений, в которых может застagnяться вода, не допускается. Местные понижения заполняют послойно грунтом с уплотнением его до требуемой для грунтового основания плотности (рис. 2, б). Затем осуществляют послойную отсыпку грунта в котлован (рис. 2, в), его разравнивание (рис. 2, г) и послойное уплотнение (рис. 2, д) грунтового массива до формирования равномерно уплотненно-



Рис. 2. Предварительная подготовка грунтового основания

а — съем плодородного слоя почвы; б — укатка грунтового котлована; в — заполнение котлована грунтом; г — разравнивание грунта; д — уплотнение выемки

го земляного основания ПОХ МС. Для уплотнения могут применяться катки статического действия с гладкими вальцами.

При наличии большей влажности грунта или ее просадочности осуществляется его замена или осушение водоотводом или прокладкой дренажей вокруг площадки или возведение иных типов искусственных оснований под насыпями, а при необходимости и устройство гидроизоляционных слоев.

После уплотнения грунта в выемке осуществляют выгрузку грунта для образования насыпи (рис. 3, а).



Рис. 3. Формирование грунтовой насыпи
 а — отсыпка грунта на уплотненное грунтовое основание; б — послойное формирование профиля площадки разравниванием; в — послойное уплотнение грунта

Каждый слой грунта укладывается в насыпь таким образом, чтобы впоследствии его можно было спланировать бульдозером или автогрейдером для придания ему поперечного профиля, обеспечивающего водоотвод (рис. 3, б), с последующим уплотнением до требуемой плотности (рис. 3, в). После выполнения указанных технологических операций может быть начата укладка в насыпь очередного слоя грунта. Высота насыпи зависит от местности и природно-климатических районов и находится в пределах от 0,4 до 0,5 м. Каждый слой грунта разравнивают с учетом продольного уклона поверхности насыпи. В поперечном сечении поверхность слоя планируется в виде односкатного или двускатного профиля с уклоном к бровке, не превышающим 3–5°.

Поверхность слоя должна быть выровнена так, чтобы после уплотнения на ней не было углублений или возвышений более 0,05 м, что исключит скапливание влаги. Ровность поверхности слоев проверяют визирками или нивелированием. Особое внимание следует уделять увлажнению отсыпаемого грунта перед его уплотнением, что позволит достичь расчетной прочности, устойчивости и стабильности формируемой конструкции ПОХ МС.

Наибольшая плотность грунта может быть достигнута при применении машин, обеспечивающих максимальное, допустимое по условиям прочности данного грунта контактное давление на поверхности рабочего органа. Контактные давления на протяжении всего процесса уплотнения не должны превышать предел прочности уплотняемого грунта. В целях

обеспечения плотности откосов допускается отсыпать слои на 0,3–0,5 м шире проектного профиля со срезкой излишнего грунта после окончания возведения насыпи. Избыточный грунт при этом должен быть использован при рекультивации резервов или для отсыпки в другом месте насыпи [1, 2].

После достижения требуемой высоты насыпи приступают к формированию выемок под ЖБП. Этот процесс включает в себя подготовку оборудования (рис. 4, а) [5] к формированию уплотненных выемок за счет монтажа на гладкие вальцы 1 катка полукульцевых бандажей 5 со специальной геометрией поперечного сечения. Количество бандажей зависит от геометрических параметров контейнеров для хранения МС и необходимости подкладочных материалов на одну стопку в штабеле.

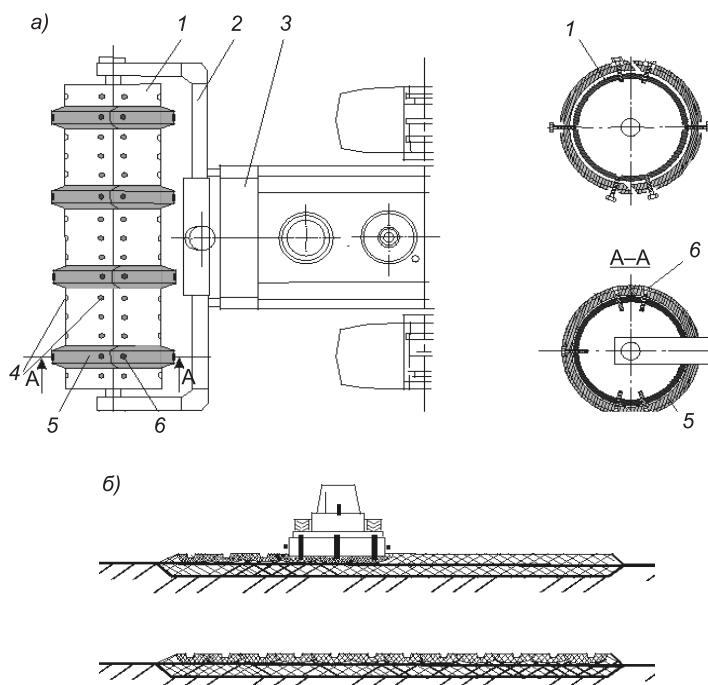


Рис. 4. Монтаж бандажа на каток и формирование выемки под железобетонные подкладки

а — навесное оборудование для формования выемок под подкладки: 1 — гладкий валец; 2 — рама вальца; 3 — базовая машина-носитель; 4 — болты заглушкы на валце; 5 — полукульцевые бандажи; 6 — болты крепления; б — технологический процесс формования выемок

Во время движения катка по уплотненной насыпи бандажи за счет массы катка и относительно малой их площади соприкосновения с грунтом врезаются в грунт полностью, осуществляя таким образом разметку под ЖБП.

При погружении бандажей в грунты частицы грунта под ними дополнительно уплотняются сообразно их формам. Тем самым плотность грунта увеличивается именно в тех местах, где в последующем будут действовать статические силы давления от контейнеров. Выпору грунтов на дневную поверхность по бокам бандажей препятствует корпус гладких

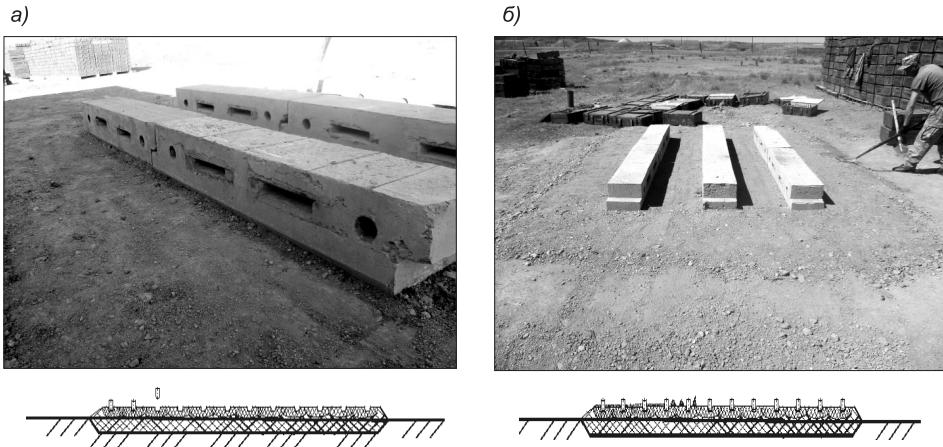


Рис. 5. Установка железобетонных подкладок

а — монтаж железобетонных подкладок в отформованные выемки; б — засыпка и планировка щебнем поверхности ПОХ

вальцов. При такой конструкции рабочего органа формы выемок соответствуют заданным параметрам.

В подготовленные выемки на уплотненной насыпи осуществляют вертикальную относительно продольной оси установку ЖБП встык друг к другу (рис. 5, а, б) [6].

ЖБП представляет собой конструкцию (рис. 6), включающую сплошной корпус из бетона с равномерным армированием в поперечном сечении в виде многоугольника, у которого основание и боковые грани образуют между собой угол наклона в соответствии с выражением

$$\alpha \geq \phi,$$

где α — угол, образованный между основанием железобетонной подкладки и боковой ее гранью;

ϕ — угол внутреннего трения грунта основания ПОХ.

При этом в поперечной плоскости корпуса 1 ЖБП выполнена прямоугольная прорезь для обеспечения ограничений, в поперечном сечении

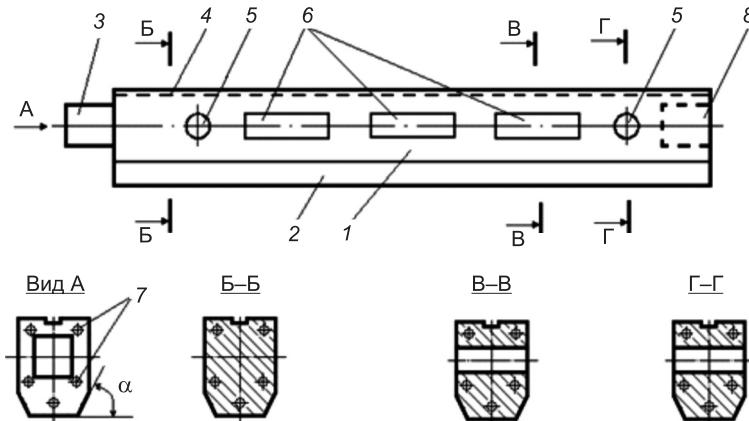


Рис. 6. Железобетонная подкладка

1 — корпус; 2 — боковая грань; 3 — прилив; 4 — прямоугольная прорезь;
5 — сквозные круглые отверстия; 6 — сквозные прямоугольные отверстия;
7 — арматурные стержни; 8 — углубление

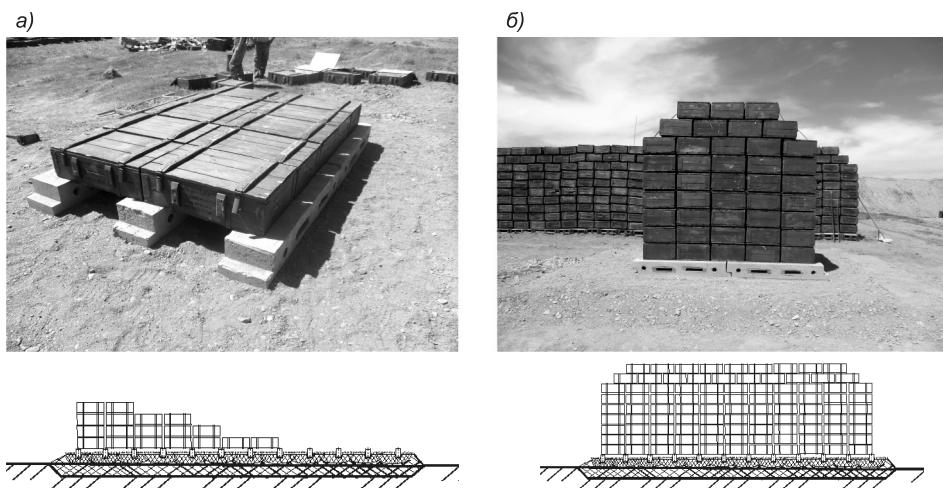
корпуса выполнены монтажные 5 и вентиляционные сквозные отверстия 6, а для соосного и устойчивого соединения железобетонных подкладок между собой в противоположных торцевых ее плоскостях выполнены в форме выемки и выступа.

Применение ЖБП данной конструкции позволяет увеличить эксплуатационную надежность подкладочного приспособления при хранении контейнеров по сравнению с соответствующими стандартными деревянными подкладками.

Следующей операцией является засыпка щебнем (песчаным гравием) уплотненной грунтовой насыпи с бетонными подкладками площадки и ее планировка ручным способом (см. рис. 5, б). Щебень способствует сохранению состояния грунта, предотвращая смыв частиц при атмосферных осадках, а также равномерному впитыванию влаги и скорейшему высыханию, кроме того, ограничивается появление растительного покрова, что способствует обеспечению требований противопожарной безопасности с отсутствием сухостоя трав [1].

После выполнения указанных технологических операций получается готовая ПОХ МС на уплотненном грунтовом основании с щебеночным (гравийным) покрытием и с установленным в отформованные выемки ЖБП материалом.

МС на ПОХ укладываются на ЖБП таким образом, чтобы в наружных рядах маркировка контейнеров располагалась вовнутрь штабеля (за исключением одного-двух верхних рядов), с целью предохранения нанесенной информации о МС от воздействия атмосферных осадков и солнечной радиации (рис. 7, а, б).



*Рис. 7. Формирование штабеля из контейнеров с материальными средствами
а — последовательность укладки контейнеров; б — готовый штабель из контейнеров*

Выполнение указанной последовательности технологии подготовки уплотненного грунтового основания с щебеночным покрытием на ЖБП позволяет повысить надежность ПОХ и обеспечить устойчивость штабеля с контейнерами МС в течение длительного периода их хранения. В соответствии с выполненными натурными экспериментальными исследованиями по отработке способа подготовки уплотненного основания была заложена экспериментальная площадка с параметрами: длина 4,2 м;

ширина 3,3 м; высота 0,4 м; расстояние между ЖБП 0,6 м; количество ЖБП 6 шт.; количество контейнеров с гравием (вместо МС), установленных на экспериментальной площадке, 84 шт.; масса одного контейнера с гравием 80 кг; общая масса хранимого имущества составляет 6720 кг.

В настоящее время опытная кладка из МС на подготовленной ПОХ проходит испытания на прочность и надежность ЖБП в соответствии с природно-климатическими условиями региона Республики Казахстан.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грузин, В.В. Обзор и анализ состояния проблемы подготовки оснований мест хранения боеприпасов [Текст] / В.В. Грузин, К.Б. Есбергенов // Вестник Национального университета обороны. № 2. — Щучинск : НУО, 2012. — С. 82–86.
2. Абраменков, Д.Э. Средства механизации и технологии строительного производства [Текст]: монография / Д.Э. Абраменков, А.В. Грузин, В.В. Грузин; под общ. ред. д.т.н., проф. Э.А. Абраменкова. — Saarbruken, Germany: Palmarium modernic publishing, 2012. — 327 с.
3. Грузин, В.В. Постановка задач исследования по совершенствованию технологии и механизации работ устройства грунтовых оснований фортификационных сооружений [Текст] / В.В. Грузин, К.Б. Есбергенов, А.В. Грузин // Актуальные проблемы современности. Серия Технические науки. № 12 (62). — Караганды : Болашак-Баспа, 2010. — С. 76–78.
4. Инновац. патент № 27504. Способ подготовки основания места для хранения материальных средств [Текст] / В.В. Грузин, К.Б. Есбергенов, А.Б. Катчибаев. — Астана, Комитет по правам интеллектуальной собственности МЮ РК; опубл. 15.10.2013; Бюл. № 10.
5. Инновац. патент № 28354. Грунтоуплотняющее оборудование [Текст] / В.В. Грузин, К.Б. Есбергенов, А.К. Тогусов. — Астана, Комитет по правам интеллектуальной собственности МЮ РК; опубл. 15.04.2014; Бюл. № 4.
6. Инновац. патент № 29425. Железобетонная подкладка [Текст] / В.В. Грузин, К.Б. Есбергенов, Б.Б. Джаксиликов. — Астана, Комитет по правам интеллектуальной собственности МЮ РК; опубл. 25.12.2014; Бюл. № 12.

*ГРУЗИН Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф., акад.
Академия военных наук Республики Казахстан, Национальный университет обороны имени Первого Президента Республики Казахстан—Лидера Нации, г. Астана
АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
ЕСБЕРГЕНОВ Кайсарбек Балтабаевич, канд. техн. наук
Национальный университет обороны имени Первого Президента Республики Казахстан—Лидера Нации, г. Астана
БОГАТЫРЕВА Татьяна Валентиновна, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 16.01.15

Gruzin Vladimir Vasilevich, doctor of technical sciences, professor, academician, Academy of Military Sciences of Kazakhstan, National Defense University named after the First President of the Republic of Kazakhstan—the Leader of the Nation, Astana

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

Esbergenov Kajsarbek Baltabaevich, candidate of technical sciences, National Defense University named after the First President of the Republic of Kazakhstan—the Leader of the Nation, Astana

Bogatyreva Tatyana Valentinovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

TECHNOLOGY TRAINING GROUNDS OF SITES OPEN STORAGE OF MATERIAL RESOURCES

Considered manufacturing operations and a set of mechanical devices to ensure compaction for ground areas open storage material means on reinforced concrete pads.

Key words: technology, base, ground, compaction, site, equipment, reinforced concrete pad.

REFERENCES

1. Gruzin, V.V. Review and analysis of the problem of training grounds ammunition storage sites [Text] / V.V. Gruzin, K.B. Esbergenov // Bulletin of the National Defense University. N 2. — Shchuchinsk : NDU, 2012. — P. 82–86.
2. Abramenchikov, D.E. Means of mechanization and construction technologies [Text]: monograph / D.E. Abramenchikov, A.V. Gruzin, V.V. Gruzin; under obsch. red. prof. E.A. Abramenchikov. — Saabruken, Germany : Palmarium modernic publishing, 2012. — 327 p.
3. Gruzin, V.V. Setting targets research to improve the technology and mechanization devices soil bases fortifications [Text] / V.V. Gruzin, K.B. Esbergenov, A.V. Gruzin // Actual problems of our time. Series Engineering. N 12 (62). — Karaganda : Bolashak-Baspa, 2010. — P. 76–78.
4. Innovative patent № 27504. A method of preparing the base of storage material resources [Text] / V.V. Gruzin, K.B. Esbergenov, A.B. Katchibaev. — Astana, the Committee on Intellectual Property Rights MJ RK; publ. 15.10.2013, Bull. N 10.
5. Innovative patent № 28354. Compactor equipment [Text] / V.V. Gruzin, K.B. Esbergenov, A.K. Togusov. — Astana, the Committee on Intellectual Property Rights MJ RK; publ. 04.15.2014, Bull. N 4.
6. Innovative patent № 29425. Reinforced concrete lining [Text] / V.V. Gruzin, K.B. Esbergenov, B.B. Dzhaksilikov. — Astana, the Committee on Intellectual Property Rights MJ RK; publ. 12.25.2014, Bull. N 12.

УДК 693.547.34.001.24

А.В. ЗЛОДЕЕВ, М.М. ТИТОВ, М.С. ВОЛКОВ

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИИ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ ПО МЕТОДУ «ТЕРМОС» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

Представлены данные теоретических исследований по повышению эффективности расчета процесса технологии зимнего бетонирования по методу «термос» в стадии остывания бетонного массива.

Ключевые слова: критерии подобия, анализ размерностей, остывание, матрица размерностей уравнения.

Использование метода термоса в зимнем бетонировании известно с середины 30-х гг. прошлого века. Но точность расчетов по уравнению баланса зависит от многих исходных параметров и поэтому невелика. В технических науках известен метод расчета любых процессов с использованием безразмерных критериев подобия физических и модельных процессов. Он представляет серьезный интерес для применения в производственных процессах, так как различие геометрии узлов и конструкций бетонируемых зданий по виду и размерам невелико и позволяет просто и быстро решить производственные задачи, зная небольшой набор исходных величин.

Для определения критериев с помощью теоремы необходимо:

- 1) выявление m параметров $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m$, которые характеризуют изучаемый процесс;
- 2) составление матрицы размерностей m параметров;
- 3) установление числа k независимых между собой переменных;
- 4) представление описания изучаемого явления в критериальной форме;
- 5) составление выражений $m - k$ критериев подобия во всех формах записи.

Рассмотрим подробнее перечисленные операции, иллюстрируя их ранее приведенным примером нахождения критериев подобия механических колебаний.

Участвующих величин будет шесть ($m = 6$):

$$P_1 = c; \quad P_2 = m; \quad P_3 = F;$$

$$P_4 = K_T; \quad P_5 = t; \quad P_6 = \tau.$$

Здесь c — удельная теплоемкость материала;

m — масса бетонного массива;

F — модуль поверхности;

K_T — коэффициент теплоемкости;

t — температура;

τ — время.

Функциональная зависимость, подлежащая исследованию, имеет вид

$$\varphi(c, m, F, K_T, t, \tau) = 0.$$

Выберем четыре ($k = 4$) независимых единицы применительно к системе измерений $LMTQ$. Пусть $P_1 = c; P_2 = m; P_3 = F; P_6 = \tau$. Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned}[c] &= [M]^0 [L]^3 [T]^{-2} [Q]^{-1}; \\ [m] &= [M]^1 [L]^0 [T]^0 [Q]^0; \\ [F] &= [M]^0 [L]^2 [T]^0 [Q]^0; \\ [\tau] &= [M]^0 [L]^0 [T]^1 [Q]^0. \end{aligned}$$

Остальные два ($m = 6$) уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}[Km] &= [M]^1 [L]^0 [T]^{-3} [Q]^{-1}; \\ [t] &= [M]^0 [L]^0 [T]^0 [Q]^1. \end{aligned}$$

Проверим правильность сделанного выбора числа независимых параметров ($k = 4$), составив матрицу размерностей уравнений:

$$D_{1-4} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2,$$

т.е. $D_{1-4} \neq 0$. Следовательно, значение $k = 4$ выбрано правильно и величины c, m, F, τ действительно независимы.

Нахождение критериев подобия заключается в определении формы записи их согласно уравнению и далее в отыскании значений показателей степени $a_s, \dots, b_s, \dots, c_s$.

Применительно к данному примеру:

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \frac{K_T}{c^{a_{K_T}} \times m^{b_{K_T}} \times F^{c_{K_T}} \times \tau^{d_{K_T}}}, \\ \pi_2 &= \frac{t}{c^{a_t} \times m^{b_t} \times F^{c_t} \times \tau^{d_t}}.\end{aligned}$$

Найдем значения $a_s, \dots, b_s, \dots, c_s$. Необходимо составить определитель D порядка k из размерностей параметров, участвующих в процессе, найти D_{js} , а затем определить:

$$a_s = D_{ls} / D_{...}; \quad c_s = D_{ks} / D_{...}$$

Определим $a^{Km}, b^{Km}, c^{Km}, d^{Km}$. Для этого составим и найдем определители для четырех матриц:

$$D_{1Km}, D_{2Km}, D_{3Km}, D_{4Km}:$$

$$1) D_{1Km} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -3 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2; \quad 2) D_{2Km} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & -3 & -1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2;$$

$$3) D_{3Km} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -3; \quad 4) D_{4Km} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & -1 \end{vmatrix} = -2.$$

Таким образом можно вычислить:

$$a^{Km} = D_{1Km}/D = 2/2 = 1;$$

$$b^{Km} = D_{2Km}/D = 2/2 = 1;$$

$$c^{Km} = D_{3Km}/D = (-3)/2 = (-1,5);$$

$$d^{Km} = D_{4Km}/D = (-2)/2 = (-1).$$

Определим a^t , b^t , c^t , d^t . Для этого составим и найдем определители для четырех матриц:

D_{1t} , D_{2t} , D_{3t} , D_{4t} :

$$1) D_{1t} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -2; \quad 2) D_{2t} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0;$$

$$3) D_{3t} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 3; \quad 4) D_{4t} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -4.$$

Таким образом можно вычислить:

$$a^t = D_{1t}/D = (-2)/2 = (-1);$$

$$b^t = D_{2t}/D = 0;$$

$$c^t = D_{3t}/D = 3/2 = 1,5;$$

$$d^t = D_{4t}/D = (-4)/2 = (-2).$$

Подставив полученные значения в изначальные уравнения, получим два критерия подобия:

$$\pi_1 = \frac{K_T}{c^1 \times m^1 \times F^{(-1,5)} \times \tau^{(-1)}};$$

$$\pi_2 = \frac{t}{c^{(-1)} \times m^0 \times F^{1,5} \times \tau^{(-2)}}.$$

Проверим правильность критериев по размерностям:

$$\pi_1 = \frac{K_T \times F^{2/3} \times \tau}{c \times m} = \frac{\theta^1 \times M^1 \times L^3 \times T^3}{M^1 \times L^3 \times T^3 \times \theta^1} = 1;$$
$$\pi_2 = \frac{t \times c \times \tau^2}{F^{2/3}} = \frac{\theta^1 \times L^3 \times T^2 \times T^{-2} \times \theta^{-1}}{L^3} = 1.$$

Следовательно, полученные критерии безразмерны.
Таким образом, найденные критерии запишем так:

$$\pi_1 = K_T \times \frac{F^{2/3} \times \tau}{c \times m}; \quad \pi_2 = t \times \frac{c \times \tau^2}{F^{2/3}}.$$

Безразмерные критерии π_1 и π_2 позволяют для любых геометрически подобных конструкций определить технологические параметры процесса остывания и набора прочности K_T , τ , t по графику зависимости $\pi_1 = f(\pi_2)$, найденной экспериментально один раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования [Текст]: Учеб. пособие для вузов / В.А. Веников. — 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Высш. шк., 1976. — 479 с.
2. Бермант, А.Ф. Краткий курс математического анализа [Текст] / А.Ф. Бермант. — 11-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2005. — 736 с.
3. Гухман, А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.А. Гухман. — М. : Высш. шк., 1973. — 295 с.
4. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк; пер. с англ. — М. : Мир, 1972. — 384 с.

*ЗЛОДЕЕВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: m_zlodeev@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

*ТИТОВ Михаил Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: agd_tmm48@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ВОЛКОВ Максим Сергеевич, магистр; E-mail: don_1990@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 15.01.15

Zlodeev Alexander Vasilevich, candidate of technical sciences, assistant professor;
E-mail: m_zlodeev@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Titov Mikhail Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail:
agd_tmm48@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Volkov Maxim Sergeevich, magistr; E-mail: don_1990@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CALCULATION OF TECHNOLOGY WINTER CONCRETING METHOD «THERMOS» USING SIMILARITY CRITERIA

The data of the theoretical research on improving the efficiency of the calculation process technology winter concreting method «thermos» in the cooling phase of the array of concrete.

Key words: similarity criteria, dimensional analysis, the cooling, the matrix dimensions of the equation.

REFERENCES

1. Venikov, V.A. Theory of similarity and modeling [Text]: textbook for high schools / V.A. Venikov. — 2 ed., ext. and rev. — M. : Higher school, 1976. — 479 p.
 2. Bermant, A.F. Short course of mathematical analysis [Text] / A.F. Bermant. — 11th ed., sr. — SPb. : Lan, 2005. — 736 p.
 3. Gukhman, A.A. Application of similarity theory to the study of the processes of heat and mass transfer [Text]: proc. manual for schools / A.A. Gukhman. — M. : Higher school, 1973. — 295 p.
 4. Schenk, H. Theory of Engineering Experiment [Text]/ H. Schenk; transl. from engl. — M. : Mir, 1972. — 384 p.
-

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 626/627.03.042.019.3

П.А. ГАРИБИН, Е.О. ОЛЬХОВИК, С.В. ШАБАНОВ

МЕТОДОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТС ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрены возможности нового подхода для оценки технического состояния гидротехнических сооружений (ГТС) на основе средств автоматизированных измерительных систем, информационных технологий, в том числе микроконтроллеров и измерительных датчиков, построенных на современных микроэлектромеханических (МЭМС) технологиях. Предложена методология для организации системы непрерывного автоматизированного мониторинга эксплуатации гидротехнических сооружений водного транспорта, взаимодействующих с окружающей средой. Предложена новая стратегия мониторинга технического состояния, ряд разработанных структурных схем для автоматизации измерений. Раскрыта сущность предлагаемой детерминированной модели оценки технического состояния в виде: «автоматизированный мониторинг технического состояния» — «комплексная модель оценки технического состояния» — «прогнозная модель». Разработанная модель позволяет обеспечить безопасность эксплуатации ГТС уже на принципиально новом практическом уровне и дать качественный прогноз на заданный временной период, т.е. в полном объеме реализовать концепцию анализа жизненного цикла. Предложены методы по совместному инклинометрическому и динамическому инструментальному наблюдению, что в комплексе реализует новый интегральный подход для мониторинга ГТС и дает возможность в будущем получать надежную и обоснованную информацию о техническом состоянии.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, техническое состояние, непрерывный мониторинг, инклинометрические наблюдения, динамическое воздействие.

Проблемная ситуация. До недавнего времени усилия многих стран были направлены преимущественно на ликвидацию последствий катастроф, однако всевозрастающий рост числа чрезвычайных событий делает эти усилия все менее эффективными и выдвигает в качестве приоритетной новую задачу: прогнозирование и предупреждение катастроф.

По мнению ведущих российских специалистов, система сбора и анализа информации, существующая в нашей стране, неадекватна задачам управления стратегическими рисками, прогноза и предупреждения кризисных ситуаций.

Изменение сложившегося положения в лучшую сторону возможно при ином уровне мониторинга и механизмов управления рисками. Необходимо анализировать и прогнозировать возможные аварийные ситуации на объектах природно-технических систем в более широком системном контексте на основе современных междисциплинарных знаний, научно обоснованных и экспериментально подтвержденных технологических решений.

© Гарин П.А., Ольховик Е.О., Шабанов С.В., 2015

Актуальность задачи исследования. На настоящий момент в России сложилось три системных уровня обеспечения техногенной безопасности.

Ростехнадзор, уполномоченный государством обеспечивать конституционные гарантии безопасности, реализует законодательные цели через федеральную систему экспертных организаций.

Технический надзор заказчика, проводимый профессиональными организациями с привлечением эффективного методического и программно-аппаратного обеспечения. Это позволяет избежать отклонений от проекта в процессе производства.

Непрерывная эксплуатационная экспертиза средствами технической диагностики на основе методов неразрушающего контроля и анализа с целью оценки степени опасности — физического износа и остаточного ресурса.

В случае объективной диагностики определяются места проведения, физические объемы и минимально обоснованные ресурсы, необходимые для поддержания нормативного уровня безопасности.

Все три системных уровня безопасности могут быть эффективны только при условии достоверной оценки эксплуатационных прочностных параметров объектов мониторинга.

Несмотря на системную стройность технического надзора, регулярные аварии и техногенные катастрофы свидетельствуют о том, что на практике отсутствуют эффективные инструменты эксплуатационного мониторинга и прогнозирования.

Для решения проблемы необходимо в обязательном порядке каждый строительный объект, обладающий высокой степенью ответственности, оснащать высокотехнологичными измерительно-аналитическими информационными средствами *непрерывного мониторинга*.

Для этого необходимо выделить определяющие критериальные переменные. Для оценки технического состояния не обязательно стремиться выбрать максимальное количество переменных, чтобы обеспечить наибольшую точность. Как показала практика, приближенные модели нелинейной динамики (С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий) с ограниченным числом используемых параметров в целом ряде случаев оказываются эффективнее сложных моделей.

Использование моделей позволяет включать их непосредственно в контур мониторинга. Тогда результаты реальных измерений будут сопоставляться с результатами расчета по модели, которая заранее должна быть верифицирована для данного объекта мониторинга. Рассогласование между результатами измерений и расчетов является сигналом выхода параметров за пределы допустимых значений и инициирует более тщательный анализ состояния ГТС.

Согласно ГОСТ 27.002 выделены следующие категории технического состояния ГТС: исправное (нормативное), работоспособное, ограничено-работоспособное, неработоспособное, предельное, что соответствует результатам сравнительного анализа всех имеющихся дефектов и оценки их влияния на техническое состояние элемента. Для каждой из категорий технического состояния далее определяют мероприятия по обеспечению дальнейшей работоспособности и режиму эксплуатации.

Однако для решения задачи поддержания установленного режима эксплуатации ГТС или его коррекции необходима постоянная оценка тех-

нического состояния в реальных непрерывно изменяющихся условиях, т.е. постоянный сбор фактических (технических) параметров и их анализ на основании специально разработанной прогнозной модели работоспособности ГТС.

Прогнозная модель может автоматически оценить структурную целостность ГТС, определить наличие и расположение любого повреждения, заметно удлинить срок службы, а также улучшить общую техническую безопасность.

Современное состояние вопроса исследования. В данном исследовании рассматриваются перспективные направления организации непрерывного мониторинга технического состояния портовых гидротехнических сооружений — строительных конструкций, обладающих высокой степенью ответственности.

В работе [1] приведен факторный анализ причин деструкции морских гидротехнических сооружений во время землетрясения в Кобе (Япония, 1995 г.), при котором были полностью разрушены 120 из 150 причалов, обладающих на то время самой высокой степенью инженерной защиты от сейсмических воздействий.

Авторы одними из первых научно обосновали обязательное применение автоматизированных систем непрерывного мониторинга технического состояния ответственных гидротехнических объектов, предложили основные критерии и показатели для оценки возможности возникновения аварийной ситуации.

В работе [2] рассмотрено использование волоконно-оптических датчиков (датчик Брэгга) для мониторинга инженерных сооружений. Эти датчики идеально подходят для долгосрочного мониторинга напряжений в грунтовых анкерах причальной стенки. Натурные измерения предварительного напряжения анкерных тяг были проведены на оснащенной большим количеством датчиков причальной стенке в Эвергем (Бельгия). Полученные более чем за год наблюдений результаты показали, что натяжение анкерных тяг надежно контролировалось на регулярной основе. Недостатком схемы является невозможность определения зависимости натяжения анкерных тяг от изменения температуры окружающей среды.

В работе [3] приведены результаты натурных испытаний причального сооружения на действие смоделированных динамических нагрузок. Основной целью исследований являлось изучение механизмов повреждения причальных стенок, связанных с сейсмическими воздействиями и изменением плотности обратной засыпки причальной стенки. По результатам исследований предложены методы рационального конструирования элементов гидротехнических сооружений и мониторинга динамических процессов.

Непрерывный мониторинг технического состояния является перспективной областью современных исследований систем, которые могут автоматично и правильно оценивать структурную целостность мостов, зданий и гидротехнических сооружений.

В работе [4] приведен обзор последних технологических достижений, которые позволяют обеспечить возможность оснащения ответственных строительных структур беспроводными датчиками для непрерывного мониторинга технического состояния строительной части, с существенным снижением затрат на его организацию. В статье раскрыты основные до-

тоинства организации такой системы мониторинга — высокая скорость передачи данных, контроль точности и соблюдение требований по общей синхронизации данных. Приводится описание ряда осуществленных систем для контроля технического состояния реальных строительных сооружений.

В работе [5] приведены результаты экспериментальных исследований поведения системы свай под действием сейсмической нагрузки, которая вызывает изменение плотности грунтов обратной засыпки и его последующее вымывание через причальная стенку. В ходе экспериментов контролировались: история ускорений, перемещения, избыточное давление воды, осевые и изгибные напряжения, давление на грунт по 38 каналам, обеспечивающим значительную количественную информацию и качественное представление о поведении всей системы «грунт — свайное основание — надстройка».

В работе [6] на основании мониторинга состояния глубокого котлована инклинометрами выполнен анализ горизонтальных перемещений забивных свай. Результаты мониторинга, подтвержденные геодезическим контролем, показали, что горизонтальные смещения развиваются с течением времени по параболическому закону.

В работе [7] описан подход, который был разработан для мониторинга технического состояния бетонных плотин ГЭС, основанный на анализе изменений в динамических характеристиках плотин, полученных с помощью автоматизированной системы мониторинга регистрации землетрясений, по данным микросейсмических колебаний конструкций. Представлены конфигурация системы, а также результаты сейсмометрического мониторинга бетонной плотины Красноярской ГЭС. Для изучения поведения плотины при нормальных и экстремальных нагрузках было предложено разработать прогнозную модель плотины с использованием метода конечных элементов.

В работе [8] рассматриваются случаи ухудшения технического состояния портовых сооружений. Предложен метод мониторинга состояния обратной засыпки шпунтовых свай причальной стенки — основного конструктивного компонента сооружения. Установлено, что в результате коррозии замковых соединений происходит нарушение сплошности ряда шпунтовых свай и, как следствие, вымываются мелкие частицы обратной засыпки, что является серьезной проблемой, которую необходимо рассматривать для поддержания безопасности причальной стенки. По результатам численного моделирования с применением МКЭ в работе был проведен динамический анализ с имитацией изменения действующих на причал волн. Произведено сравнение результатов анализа с результатами прямых измерений в натурных условиях.

В цикле работ [9–13] приведено описание перспективных методов мониторинга ГТС на основе информационных технологий, в том числе микроконтроллеров, интернет-технологий и измерительных датчиков, построенных на MEMS-технологиях.

Цели и задачи непрерывного мониторинга технического состояния ГТС. Цель непрерывного мониторинга — обеспечение безопасности ГТС за счет использования различных инструментальных измерений для фиксации внешних воздействий, эксплуатационных нагрузок на сооружение, выявления местоположения повреждений и определения их значительности на основе полученных данных. Тогда объектом изучения

является система «сооружение — среда» [9–11]. В этой системе объединяются несколько основных подсистем: «сооружение» (собственно причал или строительная часть ГТС), «грунтовое основание» и «внешняя среда».

Первоочередная задача мониторинга технического состояния ГТС — разработка сети чувствительных элементов, которые непрерывно контролируют состояние строительной части в автоматическом режиме — обеспечение контролепригодности системы. Организованная система расстановки контрольно-измерительной аппаратуры не только инструмент для проведения частных измерений, ее функционал предполагает постоянную работу, результат которой — данные, достаточные для построения пространственно-временной модели индуцированных (наведенных) нагрузок и ответных реакций на них.

Вторая важная задача — разработка комплексной модели оценки технического состояния ГТС, основными исходными данными для расчетов и моделирования тогда будут являться данные мониторинга и предыдущих инструментальных осмотров.

Решение этих задач основывается на использовании аппарата математической статистики. Решение поставленных задач позволит создать интеллектуальный продукт в виде комплекса «автоматизированный мониторинг технического состояния» — «комплексная модель оценки технического состояния» — «прогнозная модель», позволяющий обеспечить безопасность эксплуатации ГТС уже на принципиально новом практическом уровне и дать качественный прогноз на заданный временной период, т.е. в полном объеме реализовать концепцию анализа жизненного цикла (CALS-технология).

В качестве «ядра» комплексной модели оценки технического состояния нами предлагается использование точной трехмерной компьютерной модели ГТС (рис. 1), в дальнейшем данная модель будет использоваться как для информационного сопровождения, так и для прямых расчетов с применением метода конечных элементов. В качестве граничных и силовых условий для таких расчетов будут использоваться данные, полученные непосредственно при непрерывном автоматизированном

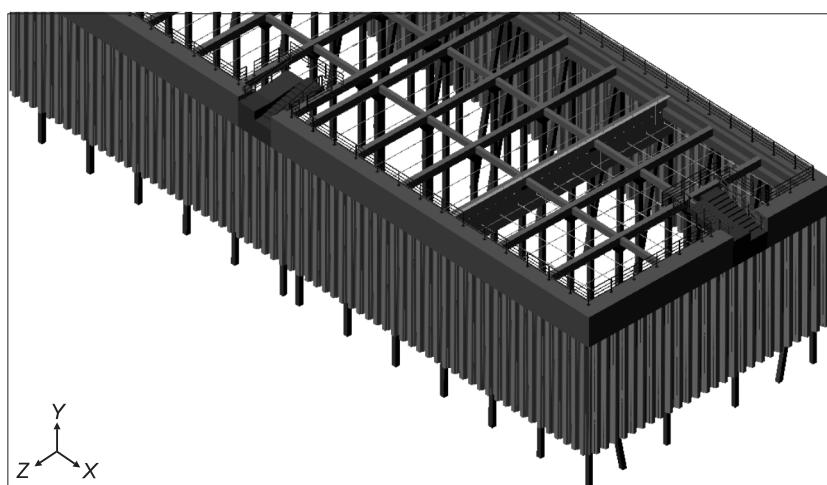


Рис. 1. Разработанная 3Д модель причального комплекса (пассажирский пирс ГМЗ Петергоф)

мониторинге технического состояния ГТС, т.е. от сети чувствительных датчиков.

Прогнозная модель уже отвечает за оценку конструктивного технического ресурса ГТС и использует не только периодические расчеты, а весь объем информации об условиях эксплуатации ГТС за жизненный цикл. Результаты работы прогнозной модели — это прогноз технического состояния ГТС и рекомендации по ремонту или реконструкции.

Теоретические предпосылки. Непрерывные наблюдения при мониторинге ГТС должны обеспечивать распознавание и фиксацию повреждений конструкции на ранней стадии. За счет непрерывных наблюдений появляется возможность аккумулировать данные о техническом состоянии в репрезентативном объеме, предотвратить возможные отказы и сформулировать четкое понимание того, какая часть конструкции нуждается в ремонте или реконструкции. Существует достаточное количество технических методов мониторинга, их возможный функционал описан в работах [7, 12, 14–17].

В данной работе основное внимание направлено на исследование механизмов деформации ГТС за счет действия гравитационных сил, в том числе вибрации. В отличие от большинства методов неразрушающего контроля, измерение вибраций рассматривается как глобальный метод, поскольку он включает комплекс кинетических характеристик материальных свойств конструкции (масса, амортизация, граничные условия и жесткость). Устойчивость конструкции определяет ее общая жесткость, постепенное накопление повреждений, развитие усталостных трещин или развитие дефектов соединений сопровождается снижением жесткости и изменением свойств вибрации, в том числе демпфирования.

Известен ряд алгоритмов [9, 13, 15] для обнаружения повреждений, все они могут быть категорированы по кинетическому признаку внешнего воздействия, частотной области нагружения и их производных. Методы расчета используют данные истории кинетики нагружения, главным образом массу нагрузки, ее ускорение и силы инерции, возникающие как ответная реакция ГТС. В общем виде уравнение состояния может быть сформулировано в известном виде как динамическая система с одной степенью свободы:

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = F(t), \quad (1)$$

где m — характеристика массы ГТС;

k — жесткость;

$F(t)$ — зависимость внешней нагрузки от времени;

$v(t)$ — перемещение;

$\dot{v}(t)$ — скорость;

$m\ddot{v}(t)$ — ускорение;

c — коэффициент демпфирования.

В рамках статического анализа скорости и ускорения являются очень малыми величинами, но их измерение возможно с помощью современных технических средств — трехмерных акселерометров, выполненных по MEMS-технологии с возможностью измерения ускорений с точностью до $\pm 0,1g$. Тогда появляется возможность расчета внешних динамических усилий по результатам записи акселерограммы непосредственно на объекте ГТС. Поскольку измерение ускорений ведется по

трем осям декартового пространства, уравнение (1) можно преобразовать в матричную форму:

$$[M]\{\ddot{v}(t)\} + [C]\{\dot{v}(t)\} + [K]\{v(t)\} = f(t), \quad (2)$$

где $[M]$ — матрица масс, $[K]$ — матрица жесткости, $[C]$ — матрица демпфирования, остальные значения перемещения, скорости и ускорения преобразуются в векторную форму.

В таком виде (2) учитывает направление внешнего динамического воздействия, а по упругому отклику конструкции ее реакцию.

Для реализации поставленных задач особый интерес представляет формирование сети чувствительных датчиков на ГТС. С одной стороны, количество датчиков должно стремиться к минимально необходимому значению, а с другой — данная сеть должна в необходимом объеме покрывать объект для получения адекватных и полных данных. Проблемным вопросом является разработка крупномасштабных сенсорных сетей, осуществляющих непрерывный мониторинг. Теоретические основы таких проектов только начинают развиваться. Стратегически данный вопрос пока не получил четкого научного обоснования. В работах [14, 15] приводится анализ по определению оптимального размещения инклинометров для оценки деформаций эксплуатируемого моста, рассмотрены результаты модельных испытаний, но окончательные выводы об оптимальной структуре сети датчиков не могут быть перенесены на произвольную конструкцию, включая ГТС.

Сеть чувствительных датчиков, размещенная по определенной стратегии на ГТС совместно с программным обеспечением, реализующим расчеты на основании комплексной модели, позволит определить развитие структурных деформаций, а постоянный контроль внешнего воздействия даст объективное текущее состояние ГТС.

В данной постановке по результатам изучения ГТС известными являются множество переменных, по которым оценивается состояние объекта (детерминированная модель), границы допустимых значений переменных, желаемые значения этих переменных. Критериальные переменные имеют допустимые границы изменения и некоторую область желаемых (оптимальных) значений. Оценочная функция выбирается таким образом, чтобы в области допустимых значений переменной ее значения принадлежали бы интервалу $[0,1]$, были безразмерными, определялись однозначно и функция была бы линейной или кусочно-линейной [10, 11].

Такой подход дает важное преимущество, поскольку позволяет снизить дорогостоящие расходы на осмотры и обследования и во многих случаях может служить обоснованием для ремонта сооружения без вывода из эксплуатации. Кроме того, использование системы непрерывного мониторинга улучшит расследование случаев стихийного бедствия или масштабных аварий, поскольку появляется объективная информация о безопасной эксплуатации и достаточно полная информация о процессах во время нарушения режима эксплуатации (например, навал судна или превышение эксплуатационной нагрузки).

Стратегия мониторинга технического состояния ГТС. Общая стратегия мониторинга технического состояния ГТС, по нашему мнению, должна составлять следующие связанные действия:

— предварительная профессиональная оценка технического состояния ГТС (сбор исходных данных);

- сбор и структурирование информации по результатам контрольно-инспекторского обследования;
- аналитический анализ технического состояния, постановка комплекса задач мониторинга;
- разработка структурной схемы автоматизированной системы мониторинга;
- построение сети чувствительных элементов (датчиков) для сбора информации, необходимой для оценки технического состояния;
- разработка программного обеспечения для геоинформационной системы мониторинга;
- опытная эксплуатация системы, калибровка в натурных условиях, доработка программного обеспечения;
- разработка предложений по комплексу мероприятий для обеспечения безопасной эксплуатации ГТС;
- сдача системы мониторинга ГТС заказчику.

Общий срок выполнения работ, включая опытную эксплуатацию системы, должен составлять не менее одного года, с учетом зимнего периода эксплуатации.

Аппаратура и методы мониторинга технического состояния ГТС. Наиболее совершенными методами контроля геометрической структуры (планового положения) строительных конструкций являются методы инклинометрического (рис. 2) наблюдения [18, 19]. Они хорошо зарекомендовали себя для мониторинга особо опасных объектов, таких как атомные электростанции, крупные мосты на транспортных коммуникациях. Нами в работах [12, 13] были предложены собственные структурные решения по оборудованию автоматизированной системы для непрерывного контроля технического состояния гидротехнических сооружений, включая разработку чувствительных датчиков и общей инфраструктуры системы мониторинга. Работы по наладке оборудования и опытной эксплуатации проводятся и в настоящее время.

Основной физический принцип инклинометрического наблюдения продемонстрирован на рис. 2, здесь для контроля наклона причальной (шпунтовой) стенки в ее оголовке расположена чувствительный акселерометр, измеряющий пространственный геометрический угол и динамические внешние (внутренние) силовые воздействия, которые фиксируются как ускорение от перемещений.

Использование структуры инклинометрических датчиков обеспечивает достаточную выборку данных для анализа причин нарушения целостности ГТС. Использование инклинометров позволяет высокоточно в непрерывном режиме фиксировать все деформации элементов и конструкции в целом. Первостепенное значение для обеспечения эксплуатационной надежности причальных ГТС имеют два направления проведения непрерывных измерений. Первое — длительный сбор данных об измене-

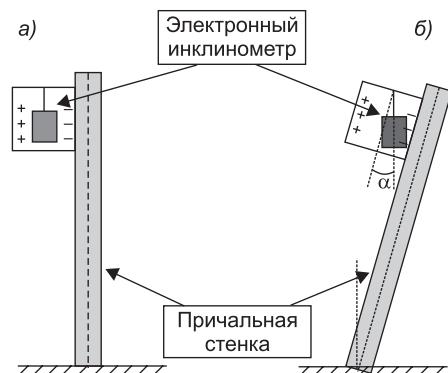


Рис. 2. Принципиальная схема измерения наклона (деформации) причальной стенки ГТС

а — нормальное состояние; б — деформированное состояние

ния угла наклона вертикальной установленной причальной стенки (рис. 2, б). Второе — это постоянный контроль силовых динамических воздействий (рис. 3), таких как волновые воздействия, швартовка судна, изменение эксплуатационной нагрузки на причал. При этом второй вариант может рассматриваться как циклическое силовое нагружение ГТС. На рис. 3 приведена схема возможной установки чувствительного датчика на причальной стенке (в оголовке) ГТС для фиксации интенсивности динамических процессов силового внешнего воздействия.

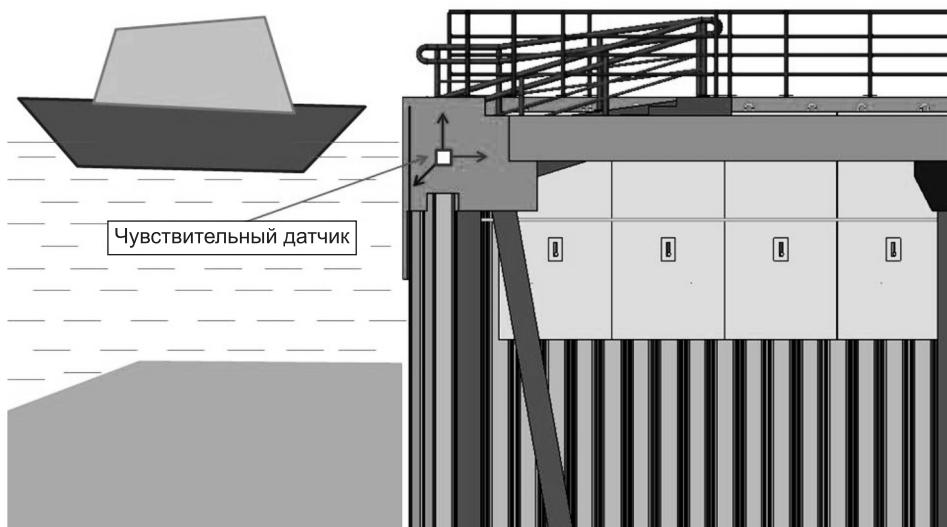


Рис. 3. Схема установки чувствительного датчика в причальной стенке

Методы анализа данных мониторинга технического состояния ГТС. Предлагаемые в данной работе схемы установки чувствительных датчиков (см. рис. 2, 3) позволяют обеспечить качественный анализ всех получаемых данных о внешних силовых воздействиях как в аспекте длительного временного интервала (медленно изменяющийся процесс), так и в аспекте быстропротекающих (динамических) процессов. На рис. 4 представлены результаты записи динамических процессов (акселерограмма) на Благовещенском мосту (г. Санкт-Петербург) при интенсивном прохождении автотранспорта. Анализ (или расшифровка) таких данных может быть выполнен различными методами.

1. Сигнальная система, фиксирующая превышение максимально допустимого уровня динамического воздействия. В случае определения максимального абсолютного значения акселерограммы такая информация будет объективной характеристикой интенсивности местного динамического воздействия на ГТС. Также за счет использования сети чувствительных датчиков будет выявлена локальная область ГТС, где произошло ударное воздействие.
2. Сравнительный анализ акселерограмм, полученных при однотипных (равных) условиях силового динамического нагружения конструкции. Данный подход позволяет производить временное сравнение и анализ процессов силового воздействия на ГТС, таких как перемещение груза, швартовка или навал судна. В случае изменения периодических акселерограмм можно будет сделать вывод о снижении локальной жесткости конструкции ГТС.

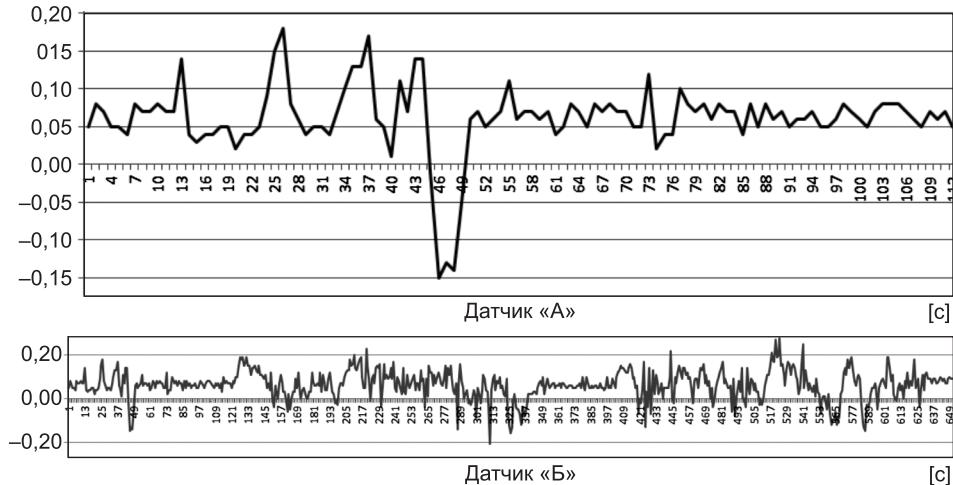


Рис. 4. Акселерограммы, снятые непосредственно на мостовой конструкции (Благовещенский мост через р. Неву в г. Санкт-Петербурге)

датчик «А» — за период 120 с, датчик «Б» — за период 650 с

3. Анализ фактических откликов конструкции на внешнее силовое воздействие. Данный метод анализа акселерограмм и инклинометрических измерений ближе всего к методам анализа сейсмостойкости строительных конструкций и основан на выявлении ответных реакций ГТС — широкого спектра отклика. Постоянные длительные наблюдения позволяют выявить демпфирующие характеристики конструкции, а в случае их резких изменений внести корректиры в условия эксплуатации ГТС.
4. Постоянное комплексное наблюдение за уровнем и структурой динамического воздействия и инклинометрическими измерениями. Данная методика анализа является наиболее сложной и предполагает совмещенный анализ разнородных измерений. Ее преимуществом является возможность взаимного подтверждения данных, полученных от измерительных устройств различных типов, однако для масштабного практического применения отсутствуют адекватные физические модели происходящих процессов.

Обсуждение результатов. В настоящее время существует большая потребность эксплуатирующих организаций в оснащении ГТС автоматизированными системами мониторинга, что нашло свое отражение в обязательных требованиях СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» и СП 58.1330.2012 (Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003) «Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования» для сооружений повышенной ответственности I и II класса.

Однако отсутствие федеральных стандартов, регламентирующих использование автоматизированных систем непрерывного мониторинга, и отсутствие сертифицированного программного обеспечения сдерживают широкое внедрение этих эффективных технологий. Росстандартом в качестве допускаемого средства измерения зарегистрирован только один цифровой инклинометр (№ 54559-13 в Госреестре средств измерений).

Требует дальнейших исследований вопрос определения фактических динамических нагрузок из уравнений (1, 2) по данным акселерограммы, так как в большинстве случаев массогабаритные показатели и свойства

жесткости даже локальных участков ГТС не могут быть определены с достаточной точностью.

Накопление технического опыта при мониторинге и экспериментальных данных позволит расширить область контроля. Например, при наличии достаточного количества данных (за продолжительный период времени) о перемещении отдельных структурных элементов ГТС появляется возможность обоснованно судить [20, 21] о состоянии массива грунтов основания ГТС, поскольку при изменении их свойств произойдет аналогичное изменение амплитуд и характера ответных реакций, в том числе по акселерограмме мониторинга.

Основными преимуществами метода инклинометрических измерений и записи фактической акселерограммы ГТС являются простота использования, компактность оборудования, минимальные требования для установки датчиков и возможность объединения их в единую измерительную сеть. Все полученные в результате мониторинга измерения могут быть использованы для прямого расчета деформаций, например, по методике, предложенной в работе [22], которая позволяет навести зафиксированное динамическое воздействие на компьютерную модель строительной части ГТС.

Расширение возможностей аппаратного наблюдения за техническим состоянием ГТС возможно за счет дополнительного оснащения различными закладными измерительными устройствами, такими как скважинный инклинометр, закладной струнный датчик перемещений (деформаций), анкерный датчик усилий, датчик давления в грунте, пьезометр и многие другие. Перечисленные средства инструментальных измерений могут существенно расширить область контроля технического состояния, однако их установка представляет собой сложную сборку готовых компонентов на этапе строительства непосредственно в конструкцию ГТС и требует разработки еще на этапе проектирования схем установки и информационных коммуникаций. Для существующих (эксплуатируемых) объектов ГТС такое оснащение является весьма затруднительным, так как потребует разборки строительной части и демонтажа элементов для обеспечения прямого доступа к силовым элементам, с последующей установкой измерительного оборудования.

Также при внедрении системы мониторинга необходима разработка специальных методик, определяющих нормы для инклинометрического наблюдения и фиксации акселерограмм, с учетом их абсолютных и относительных значений, спектра, длительности и прочих факторов.

Выходы. Выполненный анализ существующих аппаратных средств и методов мониторинга технического состояния ГТС показал, что для обеспечения безопасности ГТС в настоящее время наиболее эффективным является оснащение сооружений водного транспорта автоматизированными диагностическими системами непрерывного мониторинга.

На основании разработанной методологии представлена научно обоснованная перспективная технологическая цепочка в составе «автоматизированный мониторинг технического состояния» — «комплексная модель оценки технического состояния» — «прогнозная модель», позволяющая осуществить комплекс связанных мероприятий для обеспечения безопасной эксплуатации ГТС.

Предложенные методы по совместному инклинометрическому и динамическому наблюдению в комплексе реализуют новый интегральный подход для мониторинга состояния ГТС и дают возможность в будущем получать надежные и обоснованные результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Iai, S. Seismic Performance of Quay Walls—Kobe Earthquake [Текст] / S. Iai et al. // Earthquake Criteria Workshop. — Yokohama, Japan. — 1997.
2. Moerman, W. Measuring ground anchor forces of a quay wall with Bragg sensors [Текст] / W. Moerman et al. // Journal of structural engineering. — 2005. — Vol. 131, N 2. — P. 322–328.
3. Sasajima, T. A Project for the Field Observation of Seismic Behavior of Full-Sized Test Gravity Type Quay Wall [Текст] / T. Sasajima et al. // Proc. of the 13th world Conf. on Earthquake Engineering. — 2004.
4. Chintalapudi, K. Monitoring civil structures with a wireless sensor network [Текст] / K. Chintalapudi et al. // Internet Computing. — IEEE. — 2006. — Vol. 10, N 2. — P. 26–34.
5. Tazoh, T. Centrifuge tests on pile foundation-structure systems affected by liquefaction-induced soil flow after quay wall failure [Текст] / T. Tazoh et al. // Advances in Deep Foundations. — 2007. — P. 409.
6. YE, Q. Monitoring analysis and deformation characteristics of a deep foundation pit [Текст] / Q. YE, Q. WU // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. — 2010. — P. S2.
7. Kuzmenko, A. Monitoring the technical condition of dams of hydroelectric power plants with an automated monitoring and earthquake registration system [Текст] / A. Kuzmenko, D. Vorobyeva, E. Zolotukhin // Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2012 IEEE. — IEEE, 2012. — P. 1–4.
8. Ichii, K. Surface Wave-Based Health Monitoring Method for a Sheet Pile Quay Wall [Текст] / K. Ichii et al. // International Journal of Structural Stability and Dynamics. — 2014.
9. Балонин, Н.А. Новые информационные технологии мониторинга гидротехнических сооружений [Текст] / Н.А. Балонин, П.А. Гарифин, В.Е. Марлей // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — № 4. — С.150–154.
10. Балонин, Н.А. Перспективы использования информационных технологий для мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений [Текст] / Н.А. Балонин, П.А. Гарифин, В.Е. Марлей // Научно-технические ведомости С.-Петербург. гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2010. — № 1(93). — С. 171–176.
11. Гарифин, П.А. Обеспечение контролеспособности сооружений — один из этапов построения прогнозных моделей [Текст] / П.А. Гарифин, В.Е. Марлей, Г.Г. Рябов // Журнал университета водных коммуникаций — 2010. — № 1. — С. 8–14.
12. Гарифин, П.А. Разработка автоматизированной системы для непрерывного контроля технического состояния гидротехнических сооружений [Текст] / П.А. Гарифин, В.Е. Марлей, Е.О. Ольховик, С.В. Шабанов // Гидротехника XXI век. — 2013. — № 2(14). — С. 50–53.
13. Олейник, А.Ю. Разработка системы мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе интернет-технологий и микроконтроллеров [Текст] / А.Ю. Олейник, А.В. Макшанов, В.Е. Марлей // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 1(29). — С. 215–222.
14. Van der Linden, G.W. Optimal sensor placement for health monitoring of civil structures [Текст] / G.W. Van der Linden et al. // American Control Conference (ACC), 2011. — IEEE, 2011. — P. 3116–3121.
15. Movva, G. Optimal sensor placement for structural health monitoring: a comparative study between the control engineering and civil engineering approaches [Текст] / G. Movva et al. // SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. — International Society for Optics and Photonics, 2013. — P. 86941K-86941K-10.
16. Малько, А.В. Организация мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений Светлинской ГЭС (Вилуйской ГЭС-3) [Текст] / А.В. Малько и др. // Гидротехническое строительство. — 2012. — № 12. — С. 2–10.

17. Устинов, А.В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений [Текст] / А.В. Устинов // Гидротехническое строительство. — 2014. — № 6. — С. 39–43.
18. Рыжков, И.В. Разработка методики мониторинга строительных конструкций АЭС [Текст] / И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева, Е.А. Бауск // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. — 2013. — № 1–2. — С. 85–92.
19. Соколич, И. Анализ параметров грунта по результатам перемещений шпунтовой стенки, полученным из инклинометрических измерений [Текст] / И. Соколич, Б. Вукадинович // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2010. — № 2. — С. 1–7.
20. Нигметов, Г.М. Концепция информационно-управляющей системы защиты от катастрофического землетрясения [Текст] / Г.М. Нигметов, А.А. Кузьмин, Ю.В. Прус // Технологии техносферной безопасности. — 2013. — № 5(51). — 10 с.
21. Нигметов, Г.М. Проблема мониторинга инженерной безопасности зданий и сооружений [Текст] / Г.М. Нигметов // Технологии гражданской безопасности. — 2004. — № 2. — С. 80–85.
22. Фролов, Д. Применимость программного обеспечения ANSYS, Inc. при расчетах конструкций на сейсмические воздействия [Текст] / Д. Фролов, О. Ушаков // САПР и графика. — 2011. — № 11. — С. 42–44.

ГАРИБИН Павел Андреевич, д-р техн. наук, проф.

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург

ОЛЬХОВИК Евгений Олегович, канд. техн. наук, доц.

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург

ШАБАНОВ Сергей Викторович, асп.

ООО «Балтморпроект», г. Санкт-Петербург

Получено 13.01.15

Garbin Pavel Andreevich, doctor of technical sciences, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

Ol'khovik Evgeniy Olegovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

Shabanov Sergey Viktorovich, post-graduate student, LLC «Baltmorproekt», Saint-Petersburg, Russia

THE METHODOLOGY OF ORGANIZATION OF CONTINUOUS MONITORING OF TECHNICAL STATE OF HYDRAULIC STRUCTURES OF WATER TRANSPORT

The possibilities of a new approach for assessing of technical state of hydraulic structures on the basis of the automated measuring systems, information technologies, including microcontrollers and measuring sensors built on the modern microelectromechanical technologies are considered. The methodology for organization of the system of continuous automated monitoring of operation of the hydraulic structures of water transport, interacting with the environment is proposed. The new strategy for the technical state monitoring, a series of the elaborated structural schemes for the automation of the measurements are proposed. The essence of the proposed deterministic model for the technical state assessing is disclosed in the form of «the automated monitoring of the technical state» — «the complex model of assessment of the technical state» — «the predictive model». The developed model allows to provide the safety of operation of the hydraulic structures already on a completely new practical level and give the qualitative prediction on the predetermined time period, i.e.

fully implement the concept of the life-cycle analysis. The methods for joint inclinometric and dynamic instrumental observations are offered that in complex implement a new integrated approach for the hydraulic structures monitoring and give a possibility in the future to get safe and justified information about the technical state.

Key words: hydraulic structures, technical condition, continuous monitoring, inclinometer monitoring, dynamic effect.

REFERENCES

1. Iai, S. Seismic Performance of Quay Walls–Kobe Earthquake [Text] / S. Iai et al. // Earthquake Criteria Workshop. — Yokohama, Japan. — 1997.
2. Moerman, W. Measuring ground anchor forces of a quay wall with Bragg sensors [Text] / W. Moerman et al. // Journal of structural engineering. — 2005. — Vol. 131, N 2. — P. 322–328.
3. Sasajima, T. A Project for the Field Observation of Seismic Behavior of Full-Sized Test Gravity Type Quay Wall [Text] / T. Sasajima et al. // Proc. of the 13th world Conf. on Earthquake Engineering. — 2004.
4. Chintalapudi, K. Monitoring civil structures with a wireless sensor network [Text] / K. Chintalapudi et al. // Internet Computing. — IEEE. — 2006. — Vol. 10, N 2. — P. 26–34.
5. Tazoh, T. Centrifuge tests on pile foundation-structure systems affected by liquefaction-induced soil flow after quay wall failure [Text] / T. Tazoh et al. // Advances in Deep Foundations. — 2007. — P. 409.
6. YE, Q. Monitoring analysis and deformation characteristics of a deep foundation pit [Text] / Q. YE, Q. WU // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. — 2010. — P. S2.
7. Kuzmenko, A. Monitoring the technical condition of dams of hydroelectric power plants with an automated monitoring and earthquake registration system [Text] / A. Kuzmenko, D. Vorobyeva, E. Zolotukhin // Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2012 IEEE. — IEEE, 2012. — P. 1–4.
8. Ichii, K. Surface Wave-Based Health Monitoring Method for a Sheet Pile Quay Wall [Text] / K. Ichii et al. // International Journal of Structural Stability and Dynamics. — 2014.
9. Balonin, N.A. New information technologies for hydraulic structures monitoring [Text] / N.A. Balonin, P.A. Garabin, V.E. Marley // Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. — 2009. — N 4. — P. 150–154.
10. Balonin, N.A. Prospects for the use of information technologies for monitoring the technical condition of hydraulic structures [Text] / N.A. Balonin, P.A. Garabin, V.E. Marley // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems. — 2010. — N 1(93). — P. 171–176.
11. Garabin, P.A. Providing the ability to control structures — one of the stages of construction of predictive models [Text] / P.A. Garabin, V.E. Marley, G.G. Ryabov // Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. — 2010. — N 1. — P. 8–14.
12. Garabin, P.A. Development of an automated system for continuous monitoring of the technical condition of hydraulic structure [Text] / P.A. Garabin, V.E. Marley, E.O. Ol'khovik, S.V. Shabanov // Hydraulic engineering the XXI century. — 2013. — N 2(14) — P. 50–53.
13. Oleynik, A.Yu. Development monitoring system strain engineering at the web-based and microcontrollers [Text] / A.Yu. Oleynik, A.V. Makshanov, V.E. Marley // Vestnik Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. — 2015. — N 1(29). — P. 215–222.
14. Van der Linden, G.W. Optimal sensor placement for health monitoring of civil structures [Text] / G.W. Van der Linden et al. // American Control Conference (ACC), 2011. — IEEE, 2011. — P. 3116–3121.

15. Movva, G. Optimal sensor placement for structural health monitoring: a comparative study between the control engineering and civil engineering approaches [Text] / G. Movva et al. // SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. — International Society for Optics and Photonics, 2013. — P. 86941K-86941K-10.
 16. Malko, A.V. Organization condition monitoring of hydraulic structure Svetlinskoye HPP (HPP-Vilyuiskaya 3) [Text] / A.V. Malko // Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. — 2012. — N 12. — P. 2-10.
 17. Ustinov, A.V. The technology of satellite geodetic monitoring of hydraulic structures [Text] / A.V. Ustinov // Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. — 2014. — N 6. — P. 39-43.
 18. Ryzhkov, I.V. Development of methodology for monitoring of building structures NPP [Text] / I.V. Ryzhkov, E.A. Ponomareva, E.A. Bausk // Visnik Pridniprovs'koi derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi. — 2013. — N 1-2. — P. 85-92.
 19. Sokolich, I. Analysis of soil parameters on the results sheet pile wall displacement obtained from the inclinometer measurements [Text] / I. Sokolich, B. Vukadinovich // Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoy stroitel'stvo. — 2010. — N 2. — P. 1-7.
 20. Nigmatov, G.M. Concept information management system of protection against catastrophic earthquake [Text] / G.M. Nigmatov, A.A. Kuz'min, Yu.V. Prus // Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. — 2013. — N 5(51). — 10 p.
 21. Nigmatov, G.M. Engineering problem of monitoring the safety of buildings and constructions [Text] / G.M. Nigmatov // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. — 2004. — N 2. — P. 80-85.
 22. Frolov, D. Applicability of software ANSYS, Inc. in the calculation of structures to seismic action [Text] / D. Frolov, O. Ushakov // SAPR i grafika. — 2011. — N 11. — P. 42-44.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.98:691

В.Н. АЗАРОВ, С.А. КОШКАРЕВ

К МОДЕЛИ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ В СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ С ФИЛЬТРУЮЩЕ-ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ В СТРОЙИНДУСТРИИ

Статья посвящена описанию и расчету эффективных эколого-охраных процессов пылеулавливания, снижающих выбросы пыли в атмосферу и количество образующихся отходов в строительстве и стройиндустрии. Для описания процесса сепарации пыли из очищаемого газа и агломерации частиц пыли с гранулами слоя материала была предложена модель на основе применения вероятностного метода. Проведено испытание и представлены основные результаты исследования газораспределительной решетки опытной конструкции для пылеулавливающего устройства с фильтрующе-взвешенным слоем частиц-зерен. Приведены результаты экспериментального определения коэффициента квазидиффузионного перемешивания D для некоторых материалов в фильтрующе-взвешенном слое частиц-зерен в устройствах с предложенной конструкцией газораспределительной решетки. Рекомендовано применение результатов для разработки пылеуловителей систем обеспыливания аспирационных выбросов стройиндустрии.

Ключевые слова: пыль, фильтрующе-взвешенный слой, сепарация, улавливание, газораспределительная решетка, выброс, отход, атмосфера, аспирация.

Одним из перспективных эколого-охраных технологических процессов в строительстве может стать пылеулавливание в фильтрующе-взвешенных слоях. В последнее время появляются новые модификации конструкций многофункциональных аппаратов лоткового типа с тангенциально-щелевыми газораспределительными решетками¹. Такие устройства находят все более широкое применение в аспирационных системах на комбинатах строительных материалов (ЖБИ), цементных и асфальтобетонных заводах, установках по производству растворобетонных смесей и других производствах.

Аппараты лоткового типа обладают рядом преимуществ. Перемешивание материала в слое в продольном направлении значительно меньше, чем в аппаратах с цилиндрическим поперечным сечением корпуса.

Коэффициенты квазидиффузионного эффективного перемешивания D в продольном направлении по движению слоя гранулированных материалов (ГМ) l в аппаратах лоткового типа с тангенциально-щелевыми газораспределительными решетками имеют меньшие значения, чем в аппаратах с цилиндрическим поперечным сечением корпуса, значения критерия Пекле — более высокие величины, $Pe \rightarrow \infty$. К основным их достоинствам можно также отнести простоту масштабирования. Применение аппаратов

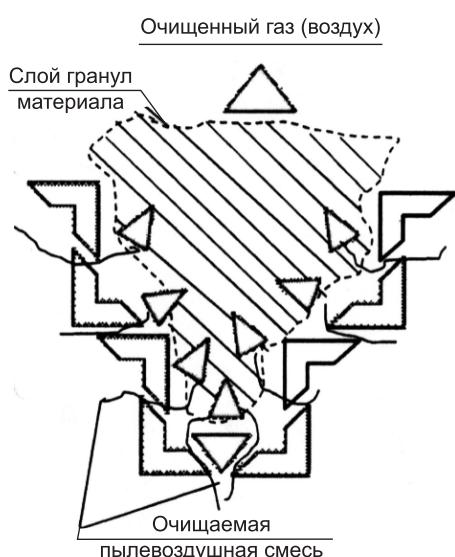
¹ Пат. 1816498 Россия, МКИ B 01.J 8/44. Газораспределительная решетка для аппаратов с псевдоожиженным слоем / С.А. Кошкарев, В.Ф. Фролов; заявл. 01.04.91; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19.

лоткового типа для сушки, гранулирования, других технологических процессов, в том числе, например, пылеулавливания и пневмоклассификации в фильтрующе-взвешенных слоях (ФВС) дисперсных и ГМ делают актуальными исследования по изучению процессов движения и закономерности взаимодействующих фаз в них [1, 2].

Недостаточно разработанные для аппаратов с тангенциально-щелевыми газораспределительными решетками модельные представления и инженерные методы расчета непрерывных процессов пылеулавливания в ФВС требуют их дальнейшего развития².

На рисунке изображена принципиальная схема работы пылеуловителя и движение потоков в нем.

Анализ литературных данных показывает, что ведутся исследования по описанию разнообразных процессов в ФВС и псевдоожиженном слое



и разработке конструкций аппаратов и устройств. Так, известен патент³, который представляет устройство для разделения частиц материалов, отличающихся по плотности, и для сепарации из материала, содержащего пыль, загрязняющих веществ или других нежелательных примесей. Полученный материал с большей плотностью (концентрацией), очищенный от примесей, направляется для дальнейшей переработки. В изобретении используется конструкция, сочетающая скруббер и устройство с псевдоожиженным слоем, для сепарации нежелательных частиц примесей при обработке органических материалов, например, угля.

В патенте⁴ представлены тканевый фильтр с псевдоожиженным слоем пыли и способ его технического обслуживания. Устройство предназначено для очистки пылевоздушных потоков в конструкции, сочетающей тканевый фильтр с псевдоожиженным слоем дисперсных частиц материалов.

В прикладном исследовании по созданию эффективного технологического процесса сепарации дисперсного углерода из аэрозольного потока в слое углеродных гранул⁵ получены результаты осаждения аэрозоли тех-

² Кошкарев С.А., Кисленко Т.А., Рыльцев В.В. О применении на предприятиях стройиндустрии аппаратов пылеулавливания с фильтрующе-взвешенным слоем // Биосферная совместимость. 2013. № 2. С. 18–19.

³ Yun S. et al. Systems and methods for reducing dust in granular material: pat. № 8833564 USA. 2014.

⁴ Пат. № 2008130069 Россия, МКИ B01D 35/12. Тканевый фильтр с псевдоожиженным слоем пыли и способ его технического обслуживания / Брингфорс Нильс, Охман Стефан, заявка № 2008130069/15; заявл. 12.12.2006; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3.

⁵ Дмитриев К.И. Разработка процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в слое углеродных гранул: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2012. 22 с.

нического углерода из аэрозольного потока в фильтре со слоем его гранул. Установлены оптимальные характеристики фильтрующего слоя и технологические параметры процесса осаждения аэрозоля технического углерода в фильтрующем слое углеродных гранул с достижением высокой эффективности пылеулавливания.

Обзор только некоторой части научно-технической литературы показал, что дальнейшее изучение и интенсификация процесса пылеулавливания, совершенствование и разработка новых конструкций пылеуловителей, в том числе фильтров с псевдоожженным слоем, устройств улавливания различных видов пылей во взвешенно-фильтрующем слое гранулированных материалов остаются актуальными. При этом разработанные новые конструкции пылеуловителей внедряются в промышленности и стройиндустрии в системах обеспыливания выбросов систем вытяжной вентиляции аспирации.

Рассмотрим одну из возможных моделей описания пылеулавливания в аппарате ФВС при перекрестном движении слоя ГМ и запыленного газа. Для описания многих периодических и непрерывных процессов, в числе которых и пылеулавливание в ФВС ГМ, может быть применен вероятностный метод на основе уравнения Фоккера–Планка [3], которое в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{v} - D\vec{\nabla})F + \frac{\partial}{\partial x}\left(u - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}\right)bF = 0, \quad (1)$$

где $F(\vec{r}, x, t)$ — плотность функции распределения числа частиц по их массам;

$\vec{\nabla}$ — оператор Гамильтона, $r = \{r_i, i = \overline{1, 3}\}$;

r_i — пространственные компоненты вектора \vec{r} ;
 x — некоторая пространственная координата, имеющая связь с массой частицы;

D — эффективный коэффициент перемешивания частиц (коэффициент квазидиффузии перемешивания);

0,5b — коэффициент диффузии в пространстве x , учитывающий стохастическую неравномерность изменения массы частицы;

$\vec{v} = \{v_i, i = \overline{1, 3}\}$, v_i — компоненты вектора скорости движения частиц массой x ;

u — массовая скорость роста частиц.

При использовании уравнения (1) можно с вполне определенной степенью обоснованности принять, что в аппарате при пылеулавливании в ФВС ГМ улавливаемые из очищаемого газа частицы пыли, в конечном счете, агрегируются на поверхности гранул материала, составляющего слой, или образуют новые агломераты-частицы. Частицы, неосевшие «не-захваченные» на поверхности гранул-зерен ФВС, будут уноситься из слоя материала. Такие частицы составляют долю проскока частиц пыли ζ в пылеуловителе и определяют эффективность пылеулавливания η , связанную соотношением

$$\eta = (1 - \zeta). \quad (2)$$

Таким образом, доля проскока частиц пыли ζ в пылеуловителе является функцией массовой скорости роста частиц u . При этом уравнение (1) для протяженных аппаратов с учетом эффективного квазидиффузии

онного перемешивания D в продольном направлении по движению ГМ l имеет вид

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) = \frac{\partial}{\partial l} D \frac{\partial F}{\partial l} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(F)}{\partial l^2}(bF) = 0. \quad (3)$$

Если принять, что в аппарате при незначительных числах псевдоожижения перемешивание ГМ весьма незначительно (практически им можно пренебречь), пылеуловитель ФВС с движущимся слоем ГМ работает в режиме идеального вытеснения. Тогда при $D = 0$, $v = \text{const}$, в квазистационарном процессе $\frac{\partial F}{\partial t} = 0$ принимает упрощенный вид

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) + \frac{\partial}{\partial l}(vF) - \frac{\partial}{\partial l}\left(D \frac{\partial F}{\partial l}\right) = 0 \quad (4)$$

и с учетом значения $F(x, t)$ — плотности распределения частиц крупной фракции по массам (более 10 мкм, (PM10)), при

$$F(x, t)\Big|_{l=0} = F_0(x)$$

имеет решение

$$F(x, t) = \int_0^\infty F_0(x) G(x, s, t) ds\Big|_{t_0=0}, \quad (5)$$

где $G(x, s, t)$ — плотность распределения частиц крупных фракций по массам x , мелких фракций по массам s (менее 10 мкм, (PM10)). При

$$G(x, l, s, t_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{(x-s-\Delta(t))^2} e^{-(2\sigma)^2}, \quad (6)$$

$$x \in (m, \infty), \quad t \in (t_1, \infty), \quad t_1 \geq t_0.$$

Если учитывать перемешивание ГМ в продольном направлении и принять его постоянным по длине аппарата $D = \text{const}$, а в первом приближении пренебречь стохастической неравномерностью градиента массы частицы при диффузии в пространстве l (значение коэффициента $b = 0$), то уравнение (3) принимает вид [4]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) + \frac{\partial}{\partial l}(vF) - \frac{\partial}{\partial l} D \left(\frac{\partial F}{\partial l} \right) = 0. \quad (7)$$

Начальные и граничные условия записываются как

$$F(l, x, t)\Big|_{l=0} = 0 \quad l > 0, \quad \left(F - \frac{D}{v} \frac{\partial}{\partial l} F \right)\Big|_{l=0} = F_0(x, t), \quad \left(\frac{\partial F}{\partial l} \right)\Big|_{l=L} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (7) имеет общий вид:

$$F(l, x, t) = \int_0^t \phi(x, t_0; t, t_0) q_l(l; t, t_0) dt_0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) для начальных и граничных условий, сформированных в [3, 4]:

$$\phi(x, l; t, t_0)\Big|_{t=t_0} = \phi(x, t_0, 0) = F_0(x, t_0), \quad \phi\Big|_{x=\infty_0} = 0,$$

$$q_t(l; t, t_0) \Big|_{l=t_0} = 0, \quad l > 0,$$

$$q_t(l; t, t_0) \Big|_{l=L} = 1, \quad t > t_0, \quad \frac{\partial}{\partial l} q \Big|_{l=L} = 0, \quad (10)$$

где t_0 — время входа частицы в аппарат; $t - t_0 = \tau$ — время пребывания частицы в аппарате (экспериментальные значения).

Функция $q_t(l; t, t_0) = \frac{\partial}{\partial l} q$ имеет вид (для полубесконечного канала):

$$q(l; t, t_0) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{l - v\tau}{\sqrt{2D\tau}} \right) + e^{\frac{v\tau}{D}} \left[1 - \Phi \left(\frac{l - v\tau}{\sqrt{2D\tau}} \right) \right] \right\},$$

$$q_\tau = \frac{1}{2\sqrt{\pi D\tau}} \frac{l}{\tau} e^{\frac{(l-v\tau)^2}{2D\tau}}. \quad (11)$$

Для начальных и граничных условий первого рода:

$$q(l; t, t_0) = \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi D\tau}} e^{-\frac{(l-v\tau)^2}{4D\tau}} \frac{1}{2} \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{l - v\tau}{\sqrt{2D\tau}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v\tau}{D} + \frac{v\tau^2}{D} \right) e^{\frac{v\tau}{D}} \left[1 - \Phi \left(\frac{l + v\tau}{\sqrt{2D\tau}} \right) \right] \right\}.$$

Для начальных и граничных условий второго рода:

$$q_\tau = \frac{1}{2\sqrt{\pi D\tau}} e^{-\frac{(l-v\tau)^2}{4D\tau}} - \frac{v^2}{2D} e^{\frac{vl}{D}} \left[1 - \Phi \left(\frac{l + v\tau}{\sqrt{2D\tau}} \right) \right]. \quad (12)$$

Плотность функции распределения частиц по времени их пребывания в пылеуловителе $E(\tau)$ связана с функцией q_τ следующим соотношением:

$$E(\tau) = q_\tau(l, \tau) \Big|_{l=L}. \quad (13)$$

Плотность функции распределения частиц по времени их пребывания в пылеуловителе по x на выходе из аппарата определяется выражением

$$F_\infty(x) = \int_0^t F_0(x - \Delta(\tau)) E(\tau) d\tau, \quad \text{где } \Delta(\tau) = \int_0^\tau u(t) dt. \quad (14)$$

В уравнении (14) под x принимается масса, объем, радиус частицы-гранулы ВФС пылеуловителя, u — массовая, объемная, линейная скорость роста частицы-гранулы ФВС.

Для большинства реальных процессов пылеулавливания величина среднеквадратичного отклонения $\sigma_1 \ll 1$, где

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2D}{Lv}}. \quad (15)$$

Вид функции $E(\tau)$ при $\sigma_1 \ll 1$ и с учетом (15) не зависит от типа граничных условий и может быть представлен нормальным распределением⁶:

$$E(\tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma_1\tau} e^{-\frac{t\left(1-\frac{t}{\tau}\right)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad \tau = \frac{L}{v}. \quad (16)$$

Соотношение (16) в значительной степени упрощает конечный вид получаемых решений и может использоваться при решении прикладных задач расчета процесса пылеулавливания в аппарате ФВС.

Коэффициент квазидиффузационного перемешивания гранул ГМ в продольном направлении D исследовался экспериментально при определении среднего времени пребывания гранул материала в пылеуловителе ФВС τ . Например, значение D для мелких гранул керамзита изменялось в интервале от 10^{-7} до $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ в исследованном диапазоне аэродинамических режимов. В качестве метода был применен известный метод метки — «вымывания» вбрасываемых меченых (окрашенных) частиц трассера из аппарата. Результаты анализа рассмотренной в работе модели описания пылеулавливания (1)–(16) показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными по определению концентрации уловленных частиц пыли материалом слоя в патрубке выгрузки. При этом среднеквадратическое отклонение составляло в среднем $6 \pm 1 \%$.

Применение разработанной конструкции пылеуловителей снижает выбросы пыли в атмосферу и количество образующихся отходов производства, когда уловленную пыль со слоем зерен (гранул) материала целесообразно возвращать в производственный цикл. Это повышает экологическую безопасность стройиндустрии в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Флисюк, О.М. Гранулирование во взвешенном слое [Текст] / О.М. Флисюк, В.Ф. Фролов. — СПб. : Химиздат, 2007. — 208 с.
2. Кошкарев, С.А. Непрерывная сушка дисперсных материалов в аппаратах лотковой и цилиндрической формы [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.А. Кошкарев. — СПб., 1992. — 20 с.
3. Флисюк, О.М. Моделирование процесса эволюции дисперсного состава частиц в аппарате со взвешенным слоем периодического и непрерывного действия [Текст] / О.М. Флисюк, В.Ф. Фролов // Теорет. основы хим. технологии. — 2007. — Т. 41, № 3. — С. 334–337.
4. Флисюк, О.М. Теоретический анализ процесса укрупнения в проточных аппаратах со взвешенным слоем [Текст] / О.М. Флисюк, В.Ф. Фролов, Ю.С. Сидоренко // Теорет. основы хим. технологии. — 2010. — Т. 44, № 1. — С. 118–120.

*АЗАРОВ Валерий Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kaf_bgdvt@mail.ru
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
КОШКАРЕВ Сергей Аркадьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: cool.koshka12@mail.ru
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 12.01.15

⁶ Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969. 624 с.

Azarov Valeriy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kaf_bgdvt@mail.ru, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Koshkarev Sergey Arcadievich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: cool.koshka12@mail.ru, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

MODEL OF DUST CAPTURING IN FILTERING-FLUID BED' SEPARATING DEVICES IN CONSTRUCTION INDUSTRY

Article is devoted to the description and calculation of the effective ecological security processes of catching of dust reducing emissions of dust in the atmosphere and quantity of the formed waste in construction and building industry. For the description of process of separation of dust of the cleared gas and agglomeration of particles of dust with granules of a layer of material the model on the basis of application of a probabilistic method was offered. Test is carried out and the main results of research of a gas-distributing lattice of a skilled design for the device catching dust with filtering-the weighed layer of particles-grains are presented. Results of experimental determination of coefficient of quasi diffusion hashing of D for some materials are given in the filtering weighed layer of particles grains in devices with the offered design of a gas-distributing lattice. Application of results for development of catchers of dust from systems of dust removal of aspiration emissions of building industry is recommended.

Key words: dust, filtering-fluidizing bed, separation, capture, gas-spread grid, emission, pollutant, atmosphere, aspiration.

REFERENCES

1. Flisyuk, O.M. Granulirovanie vo vzveshennom sloe [Text] / O.M. Flisyuk, V.F. Frolov. — SPb. : Himizdat, 2007. — 208 p.
2. Koshkarev, S.A. Nepreryvnaja sushka dispersnyh materialov v apparatah lotkovoj i cilindricheskoy formy [Text] : avtoref. dis. ... cand. of tech. sci. / S.A. Koshkarev. — SPb., 1992. — 20 p.
3. Flisyuk, O.M. Modelirovanie processa jevoljucii dispersnogo sostava chastic v apparaite so vzveshennym sloem periodicheskogo i nepreryvnogo dejstvija [Text] / O.M. Flisyuk, V.F. Frolov // Teoreticheskie osnovy him. tehnologii. — 2007. — Vol. 41, N 3. — P. 334–337.
4. Flisyuk, O.M. Teoreticheskij analiz processa ukrupnenija v protochnyh apparatah so vzveshennym sloem [Text] / O.M. Flisyuk, V.F. Frolov, Yu.S. Sidorenko // Teoreticheskie osnovy him. tehnologii. — 2010. — Vol. 44, N 1. — P. 118–120.

УДК 697.975.003.13

В.С. СТЕПАНОВ, О.В. СУХАРЕВА, Е.Э. БАЙМАЧЕВ, Д.С. ЛИНКЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СПЛИТ-СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Приведены результаты исследований энергоэффективности систем кондиционирования воздуха с парокомпрессионной холодильной машиной эксергетическим методом. Проанализированы применяемые в технике кондиционирования воздуха методы определения эффективности их работы и предложен метод, основывающийся на отношении реального и идеализированного эксергетических коэффициентов полезного действия. Определены реальные относительные эксергетические коэффициенты полезного действия серийно выпускаемых в настоящее время моделей сплит-кондиционеров.

Ключевые слова: энергоэффективность, кондиционирование, эксергия, сплит-система, идеализированный аналог, хладагент.

В настоящее время существует большое число способов и показателей оценки энергоэффективности систем кондиционирования воздуха и методов их определения. Наибольшее распространение получили способы оценки термодинамической эффективности, формируемые на основе холодильного коэффициента (EER, COP), определяемого как отношение количества полученного установкой тепла или холода и потребленной ею энергии. На этой базе построены и другие известные показатели, используемые за рубежом: ESEER (European Season Energy Efficiency Ratio) — европейский сезонный показатель энергетической эффективности; IPLV (Integrated Part Load Values) — интегральный показатель при частичной нагрузке; SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) — сезонный показатель энергетической эффективности. Холодильный коэффициент в режиме охлаждения рассчитывается, как правило, производителем оборудования по стандарту EUROVENT при температуре внутреннего воздуха по сухому термометру, равной 27 °C, и по влажному термометру, равной 19 °C. Температура наружного воздуха принимается по сухому термометру 35 °C, по влажному — 24 °C [1]. Температурные условия реальной эксплуатации систем кондиционирования, как правило, существенно отличаются от данных указанного стандарта, что часто приводит к несовпадению фактических характеристик энергопотребления климатического оборудования с заявленными в его техническом паспорте и соответственно к глубокому разочарованию потребителя.

Многие исследователи отмечали неправомерность использования холодильного коэффициента в качестве показателя термодинамического совершенства систем кондиционирования. Например, Г.Д. Бэр в своей работе [2] указывает, что мерой эффективности холодильной установки является не холодильный коэффициент, а эксергетический коэффициент полезного действия (КПД). Х. Баэр предложил оценивать эффективность

холодильных установок по величине потерь в них эксергии [3]. В работе С.В. Бруха [4] рассчитаны значения фактических холодильных коэффициентов различных систем кондиционирования и определен эксергетический холодильный коэффициент для условий их эксплуатации по стандарту Eurovent. В последнее время был опубликован ряд работ с оценкой эффективности работы систем кондиционирования воздуха по фактору суммарного эквивалентного воздействия на потепление климата «TEWI». Кроме того, в публикациях предлагается ряд других показателей энергоэффективности. Важно отметить, что, к сожалению, наиболее распространенным способом остается оценка энергоэффективности систем кондиционирования воздуха с парокомпрессионными холодильными машинами по величине их холодильного коэффициента.

При работе систем кондиционирования воздуха подводимые к ним и отводимые от них энергетические потоки имеют различные потенциалы, поэтому проводить объективную оценку их эффективности возможно, только применяя эксергетический метод. Однако в связи с тем, что часть процессов в установках кондиционирования протекает при температурах ниже температуры окружающей среды, многие ранее разработанные подходы к оценке величины эксергии в них оказались неработоспособными [5].

В работах авторов настоящей статьи [6–8] было предложено оценивать эффективность сплит-систем кондиционирования воздуха по относительному эксергетическому КПД, определяемому как отношение эксергетических КПД реальной установки и КПД ее идеализированного аналога:

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{отн}} = \frac{\eta_p}{\eta_i}. \quad (1)$$

В качестве идеализированного аналога была принята парокомпрессионная холодильная машина, работающая при температуре конденсации хладагента, равной температуре наружного воздуха, и температуре кипения хладагента, равной температуре внутреннего воздуха. В состав идеальной машины входит компрессор, работающий при постоянной энтропии. Машина работает с отсутствием защитного перегрева хладагента в испарителе, без гидравлических потерь давления в трубопроводах; без расхода электрической энергии (эксергии) на работу вентиляторов обдува теплообменников и системы автоматики.

Цикл работы такой идеализированной машины, работающей на хладагенте R410a, приведен на рис. 1.

Для сравнения энергоэффективности различных, серийно выпускаемых в настоящее время сплит-систем кондиционирования воздуха, работающих на хладагенте R410a (наиболее распространенного в климатической индустрии), были проведены расчеты по определению значений их относительного эксергетического КПД. При этом исследовались системы кондиционирования холодильной мощностью от 2,5 до 8,0 кВт таких известных марок, как Kentatsu, Mitsubishi Electric, Samsung, Midea и Daikin.

Относительный эксергетический КПД определялся в зависимости от соотношения температур внутреннего и наружного воздуха по выражениям:

— если $T_{\text{h}} \geq T_{\text{b}}$, то

$$\eta_e = \frac{e_{q0}}{w_t} = \frac{\left(\frac{T_{\text{h}} - T_{\text{b}}}{T_{\text{h}}} \right) \cdot Q_0}{i_2 - i_1} = \frac{\left(\frac{T_{\text{h}} - T_{\text{b}}}{T_{\text{h}}} \right) \cdot [Q_0 / (Q_0 / (i_1 - i_4))] }{i_2 - i_1} = \\ = \frac{\left(\frac{T_{\text{h}} - T_{\text{b}}}{T_{\text{h}}} \right) \cdot (i_1 - i_4)}{i_2 - i_1}; \quad (2)$$

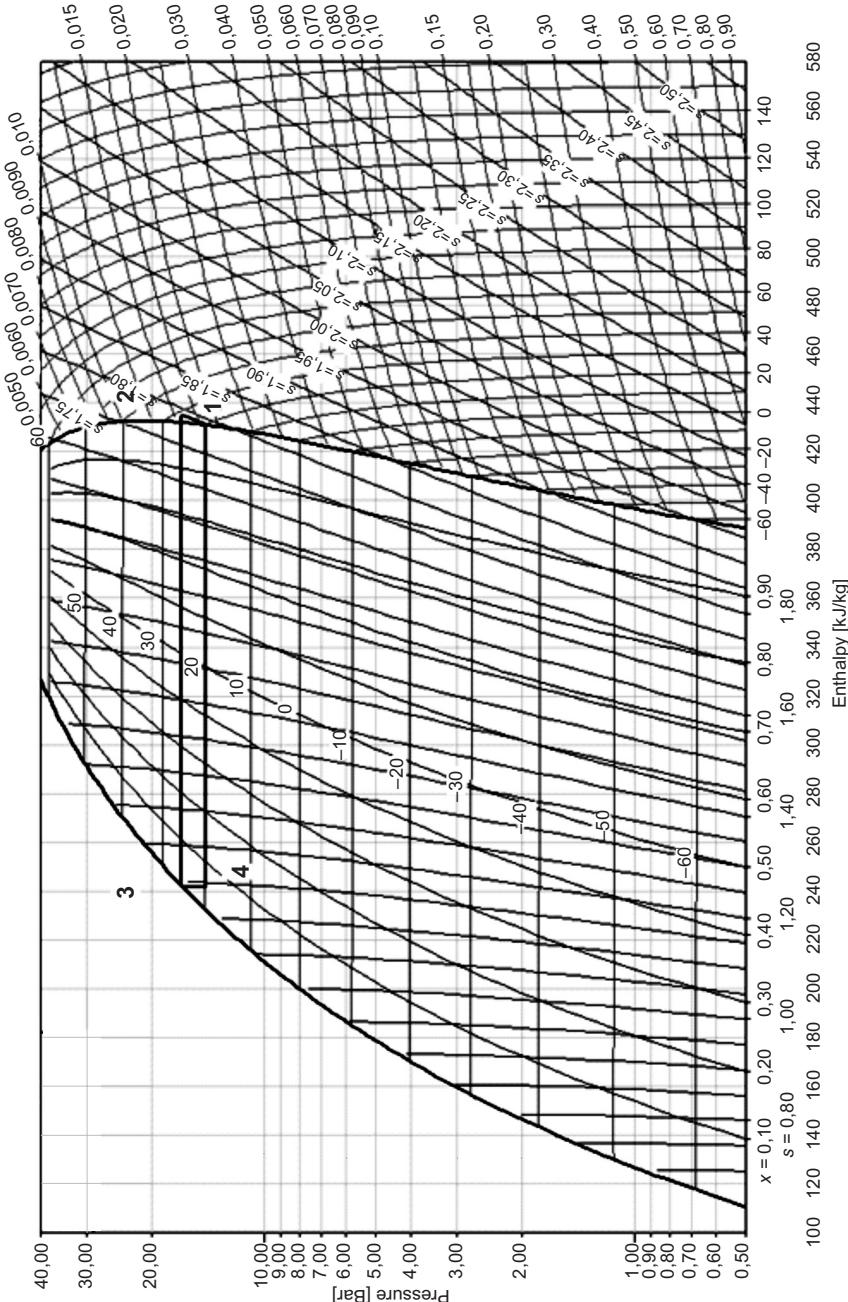


Рис. 1. Идеальный цикл хладагента R410a парокомпрессионной холодильной установки на $P-i$ диаграмме (давление-энталпия), выполненный в программном комплексе CoolPack

— если $T_h \leq T_b$, то

$$\eta_e = \frac{e_{q0}}{w_t} = \frac{\left(\frac{T_b - T_h}{T_b}\right) \cdot Q_0}{i_2 - i_1} = \frac{\left(\frac{T_b - T_h}{T_b}\right) \cdot [Q_0 / (Q_0 / (i_1 - i_4))]}{i_2 - i_1} = \\ = \frac{\left(\frac{T_b - T_h}{T_b}\right) \cdot (i_1 - i_4)}{i_2 - i_1}. \quad (3)$$

Здесь e_{q0} — эксергия, которой обладает хладагент после испарителя, кДж/кг;

w_t — эксергия, подводимая к компрессору, кДж/кг;

T_h — температура окружающей среды (наружного воздуха), К;

T_b — температура внутреннего воздуха охлаждаемого помещения, К;

Q_0 — холодопроизводительность системы кондиционирования, кВт;

m — поток хладагента, кг/ч;

i_2 — удельная энталпия хладагента на выходе из компрессора, кДж/кг;

i_1 — удельная энталпия хладагента на входе в компрессор, кДж/кг;

$i_4 = i_3$ — удельные энталпии хладагента на входе в испарительный теплообменник (i_4) и на входе в дросселирующее устройство (i_3), кДж/кг.

Поскольку в принятом идеализированном аналоге $T_h > T_b$, что соответствует наиболее распространенным режимам работы сплит-систем

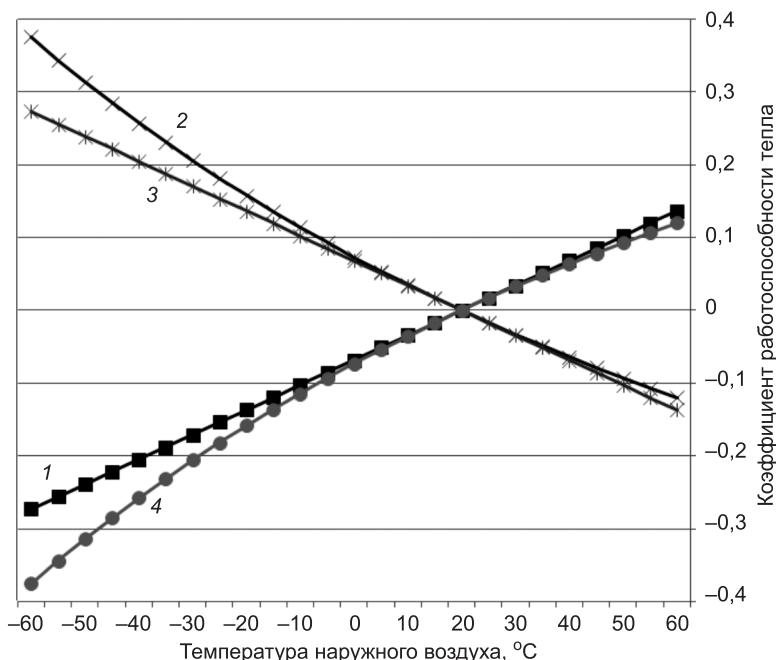


Рис. 2. Значения коэффициента работоспособности тепла, найденные по методикам [1–4]: 1 — $\left(\frac{T_h}{T_b} - 1\right)$, $\left|\frac{T_h}{T_b} - 1\right|$; 2 — $\left(\frac{T_b - T_h}{T_h}\right)$; 3 — $\left(\frac{T_b - T_h}{T_b}\right)$;

4 — $\left(\frac{T_h - T_b}{T_h}\right)$; при различных температурах наружного воздуха и температуре внутреннего воздуха, равной 20 °C

кондиционирования в режиме охлаждения, для определения относительного эксергетического КПД использовалась формула (2). Необходимо обратить внимание, что в диапазоне температур, в котором происходит массовая эксплуатация климатической техники, значения коэффициента работоспособности тепла, найденные с помощью различных методик, оказываются близкими по величине, что нетрудно видеть на рис. 2, 3.

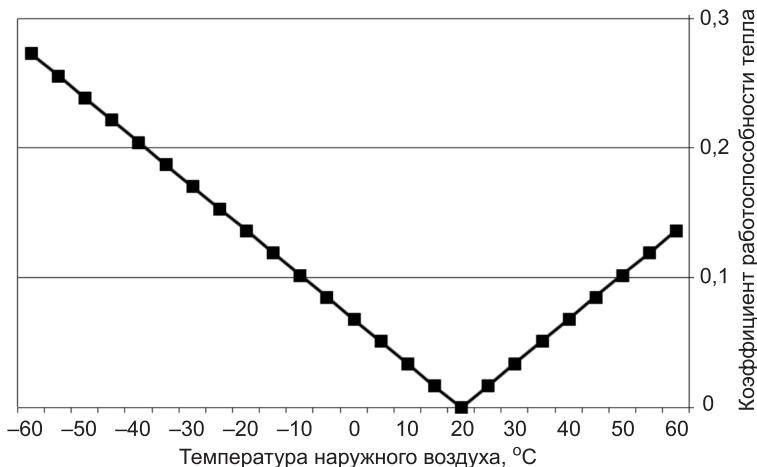


Рис. 3. Значения коэффициента работоспособности тепла, найденные по методике [5–9]: $\left(\frac{T_h - T_b}{T_h}\right)$, если $T_h \geq T_b$ и $\left(\frac{T_b - T_h}{T_b}\right)$, если $T_h \leq T_b$; при различных температурах наружного воздуха и температуре внутреннего воздуха, равной 20 °C

Была осуществлена оценка термодинамической эффективности рассмотренных систем кондиционирования воздуха на основе предложенного авторами показателя — относительного эксергетического КПД, рассчитанного с учетом уточненной методики расчета коэффициента работоспособности тепла при температуре ниже температуры окружающей среды. Результаты расчетов приведены в таблице.

Анализируя данные таблицы, нетрудно увидеть низкие значения относительных КПД рассмотренных систем. Это говорит о том, что КПД реальных систем существенно ниже КПД их идеализированного аналога. На основе анализа можно сделать вывод о том, что в конкретных климатических условиях и определенных параметрах микроклимата внутри помещения улучшить термодинамические характеристики сплит-систем кондиционирования можно следующим образом.

— Путем увеличения изоэнтропической эффективности компрессоров. Это приведет к уменьшению разности значений энтропии хладагента на выходе и входе компрессора.

— Путем увеличения испарительной поверхности теплообменника. В современной практике проектирования систем кондиционирования воздуха приветствуется незначительное увеличение размеров конденсатора, что приводит к переохлаждению в нем жидкого хладагента. Тем не менее кипение хладагента в парокомпрессионной холодильной машине начинается, как правило, уже в элементах дросселирующего устройства — тер-

Значения относительных экспергетических КПД некоторых моделей сплит-систем кондиционирования воздуха

Модель	Q_0	η_e	Модель	Q_0	η_e
DAIKIN FTYN25L	2,5	0,326	Mitsubishi Electric MS-GF 50 VA	4,85	0,333
DAIKIN FTYN35L	3,21	0,327			
DAIKIN FTYN50L	5,0	0,326	Mitsubishi Electric MS-GF 60 VA	6,4	0,300
DAIKIN FTYN60L	6,01	0,327			
DAIKIN FTYN80L	7,62	0,369	Mitsubishi Electric MS-GF 80 VA	8,0	0,293
Midea MS09	2,64	0,286			
Midea MS12	3,52	0,265	Kentatsu KSGC26HFAN1 / KSRC26HFAN1	2,64	0,286
Midea MS18	5,28	0,286			
Midea MS21	6,15	0,286	Kentatsu KSGC35HFAN1 / KSRC35HFAN1	3,52	0,269
Midea MS24	7,03	0,304			
Samsung AQ09T	2,8	0,331	Kentatsu KSGC53HFAN1 / KSRC53HFAN1	5,28	0,287
Samsung AQ12	3,5	0,327			
Samsung AQ18	5,2	0,286	Kentatsu KSGC61HFAN1 / KSRC61HFAN1	6,15	0,286
Samsung AQ24	6,8	0,288			
Mitsubishi Electric MS-GF 25 VA	2,5	0,322	Kentatsu KSGC70HFAN1 / KSRC70HFAN1	7,03	0,285
Mitsubishi Electric MS-GF 35 VA	3,45	0,313			

морегулирующем вентиле или в капиллярной трубке. Смешая процесс кипения хладагента в испаритель, можно существенно увеличить энергоэффективность системы.

— Применение более энергоэффективных хладагентов, обладающих более низкими давлениями испарения и конденсации. При этом нельзя не отметить, что в последние десятилетия в угоду сомнительной экологичности происходят обратные процессы. Наблюдается постоянное ухудшение термодинамических характеристик хладагентов, применяемых в технике кондиционирования воздуха и холодоснабжения, при переходе от R22 к R407c и R410a. Этот переход сопровождается повышением рабочих давлений и как следствие ведет к увеличению энергозатрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Реальная энергоэффективность систем кондиционирования. Технический центр компании DAICHI [Текст] / Мир климата. — 2009. — № 58. — С. 56–60.
2. Бэр, Г.Д. Техническая термодинамика. Теоретические основы и технические приложения [Текст] / Г.Д. Бэр; пер. с нем. д-ра техн. наук Э.А. Ашратова и канд. техн. наук О.А. Кардасевича; под ред. проф. В.М. Бродянского и проф. Г.Н. Костенко. — М. : Мир, 1977. — 519 с.
3. Баэр, Х. Термодинамика воздушного холодильного цикла с дросселированием [Текст] / Х. Баэр // Вопросы термодинамического анализа. — М. : Мир, 1965. — 250 с.
4. Брух, С.В. Сравнительный анализ энергоэффективности мультизональных систем кондиционирования воздуха [Текст] / С.В. Брух // СОК. — 2004. — № 2.

5. Степанов, В.С. Эксергетический анализ процессов, протекающих при температурах ниже температуры окружающей среды [Текст] / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, А.А. Старикова // Вестник ИрГТУ. — 2014. — № 7 (90). — С. 121–128.
6. Степанов, В.С. Методы оценки термодинамической эффективности систем поддержания микроклимата [Текст] / В.С. Степанов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 10. — С. 46–54.
7. Степанов, В.С. Обоснование выбора способа тепловлажностной обработки воздуха в системах вентиляции и кондиционирования [Текст] / В.С. Степанов, Е.Э. Баймачев, А.В. Выгонец и др. // Вестник ИрГТУ. — 2011. — № 5 (52). — С. 90–94.
8. Баймачев, Е.Э. Определение эффективности работы сплит-системы кондиционирования с парокомпрессионной холодильной машиной [Текст] / Е.Э. Баймачев, О.В. Шарова // Вестник ВСГТУ. — 2014. — № 2. — С. 21–27.
9. Шарова, О.В. Оценка эффективности использования эксергии в установках кондиционирования воздуха [Текст] / О.В. Шарова. — Вестник ИрГТУ. — 2013. — № 11 (82). — С. 190–196.

СТЕПАНОВ Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, проф.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет
СУХАРЕВА Ольга Владимировна, асп.*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет
БАЙМАЧЕВ Евгений Эдуардович, канд. техн. наук*

Иркутский национальный исследовательский технический университет

ЛИНКЕВИЧ Денис Сергеевич, магистр

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Получено 16.01.15

Stepanov Vladimir Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, Irkutsk National Research Technical University, Russia

Sukhareva Olga Vladimirovna, post-graduate student, Irkutsk National Research Technical University, Russia

Baymachev Evgeniy Eduardovich, candidate of technical sciences, Irkutsk National Research Technical University, Russia

Linkevich Denis Sergeevich, master, Irkutsk National Research Technical University, Russia

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY SPLIT SYSTEMS OF AIR CONDITIONING

The results of studies of energy efficiency of air conditioning systems with vapor compression chiller exergy method. Analyzed the technique used in air conditioning methods for determining the effectiveness of their work and propose a method based on the ratio of the real and idealized exergetic efficiencies. Determine the actual relative exergetic efficiencies of commercially available models currently split air conditioners.

Key words: energy efficiency, air-conditioning, exergy, split system, idealized analog, refrigerant.

REFERENCES

1. The real energy efficiency of air conditioning systems. Technical center DAICHI [Text] // Mir climata. — 2009. — N 58. — P. 56–60.
2. Ber, G.D. Technical thermodynamics. Theoretical basis and technical applications [Text] / G.D. Ber; transl. from the germ. E.A. Ashratov, O.A. Kardasevich; ed. by V.M. Brodyanskiy, G.N. Kostenko. — M. : Mir, 1977. — 519 p.
3. Baer, H. Thermodynamics of air refrigeration cycle with throttling [Text] / H. Baer // Questions of thermodynamic analysis. — M. : Mir, 1965. — 250 p.

4. Brukh, S.V. Comparative analysis of energy efficiency multi-zone air-conditioning systems [Text] / S.V. Brukh // SOK. — 2004. — N 2.
 5. Stepanov, V.S. Exergy analysis of the processes occurring at temperatures below ambient temperature [Text] / V.S. Stepanov, T.B. Stepanova, A.A. Starikova // Vestnik IrSTU. — 2014. — N 7 (90). — P. 121–128.
 6. Stepanov, V.S. Methods for assessing the thermodynamic efficiency climate control systems [Text] / V.S. Stepanov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 10. — P. 46–54.
 7. Stepanov, V.S. Justification of the choice of the method of heat and humidity of air treatment in ventilation and air conditioning [Text] / V.S. Stepanov, E.E. Baymachev, A.V. Vygonets et al. // Vestnik IrSTU. — 2011. — N 5 (52). — P. 90–94.
 8. Baymachev, E.E. Determination of the effectiveness of split air-conditioning system with vapor compression chiller [Text] / E.E. Baymachev, O.V. Sharova // Vestnik VSGUTU. — 2014. — N 2. — P. 21–27.
 9. Sharova, O.V. Evaluation in exergy efficiency of air conditioning units [Text] / O.V. Sharova // Vestnik IrSTU. — 2013. — N 11 (82). — P. 190–196.
-

УДК 697.98 : 621.311.22

М.И. ШИЛЯЕВ, Е.М. ХРОМОВА, С.Н. ШИРОКОВА

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ИНЕРЦИОННО-КОНДЕНСАЦИОННО-АБСОРБЦИОННОЙ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ И ТЭС, РАБОТАЮЩИХ НА УГЛЕ*

Рассматривается вариант сквозного расчета комплексной двухступенчатой очистки дымовых газов котельных от золоуноса и SO_2 с помощью дымососов-пылеуловителей (ДП) — первой ступени и скруббера Вентури (СВ) — второй ступени. Расчет проводится с помощью универсального метода расчета инерционных пылеуловителей (УМР) на первой ступени и математической модели абсорбционно-конденсационной пыле- и газоочистки (МАК ПГО) — на второй, разработанных авторами. Расчет показал возможности УМР и МАК ПГО подбирать и оптимизировать компоновку и режимно-конструктивные параметры пылегазоочистного оборудования по габаритам и энергозатратам при требуемых санитарных нормах пыли и SO_2 в дымовых выбросах от котельных и ТЭС в атмосфере.

Ключевые слова: инерционные пылеуловители, скруббера Вентури, абсорбционно-конденсационная пыле- и газоочистка, капли жидкости, абсорбция, хемосорбция, эффективности пылеулавливания и газоочистки.

Постановка задачи и ее решение. В качестве апробации и оценки возможностей разработанных авторами методов расчета инерционных пылеуловителей и абсорбционно-конденсационной пыле- и газоочистки рассматривается вариант двухступенчатой очистки дымовых газов котельной от пыли и SO_2 с помощью дымососов-пылеуловителей и скрубберов Вентури при конкретных параметрах пыли и газов:

Объемный расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$	100
Концентрация пыли в дымовых газах, $\text{г}/\text{м}^3$	14
Плотность ¹ частиц пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$	2400
Температура газов, $^\circ\text{C}$	130
Масс-медианный размер ¹ частиц пыли d_{50} , $\mu\text{м}$	18
Стандартное геометрическое отклонение ¹ σ	2,9
Влагосодержание дымовых газов d_{w_0} , $\text{кг}/\text{кг}$ сух. газа	0,1
Концентрация SO_2 в дымовых газах $d_{\text{SO}_2,0}$, $\text{кг}/\text{кг}$ сух. газа	0,1.

В [2] приведены параметры ДП, для наших условий наиболее подходящим будет ДП-15 с диаметром рабочего колеса $D = 1500$ мм, диаметром начальной окружности улитки $d_0 = 2250$ мм, производительностью по очищаемому газу $L = 40-60$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, полном давлении (при $20\text{ }^\circ\text{C}$) 4,0-3,0 кПа, диаметре циклона типа ЦН-15 в рециркуляционном кольце $d_u = 800$ мм и его гидравлическом сопротивлении $\Delta P = 1000$ Па. Если рассчитывать расход газа через аппарат, как указано в [2], по формуле

$$L = \frac{3}{4}\pi d_0 \cdot B \cdot V_0 = \frac{3}{4}\pi d_0^2 \cdot 0,375V_0, \quad (1)$$

* Статья выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0004 ФЦП.

¹ Взяты для условий сжигания кемеровского тощего угля [1].

где B — ширина улитки;

$\frac{3}{4}\pi d_0 \cdot B$ — условная по расходу газа поверхность цилиндра;

$B = 0,375 d_0$, то для $L = 60$ тыс. м³/ч $V_0 = 3,73$ м/с (рекомендуемая скорость $V_0 = 2,0\text{--}3,5$ м/с).

Для очистки дымового газа с расходом 100 м³/с (360 тыс. м³/ч) таких аппаратов параллельно надо установить 6 шт.

Произведем расчет эффективности пылеулавливания с помощью ДП на заданные параметры этого аппарата, пыли и газа (динамическая вязкость газа $\mu = (130^\circ\text{C}) = 23,4 \cdot 10^{-6}$ Па · с) по формуле

$$\eta_{\Sigma 1} = 1 - K_{\Sigma 1} = 1 - \int_0^{\infty} K_{\delta_{DP}} g(\delta) d\delta, \quad (2)$$

где фракционный просок ДП

$$K_{\delta_{DP}} = e^{-a Stk_{DP}^n}, \quad Stk_{DP} = \frac{\rho_m \delta^2}{18\mu} \frac{V_0}{d_0}, \quad (3)$$

$a = 30,0$, $n = 0,45$ (из банка данных инерционных пылеуловителей [2]), $V_0 = 3,73$ м/с, $d_0 = 2,25$ м, $\rho_m = 2400$ кг/м³, параметры логарифмически нормального закона распределения частиц пыли (ЛНР) $\delta_{50} = 18$ мкм, $\sigma = 2,9$. Если перейти к новой переменной

$$t = \frac{\ln \frac{\delta}{\delta_{50}}}{\ln \sigma}, \quad (4)$$

то интеграл (2) можно записать в виде

$$K_{\Sigma 1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\alpha \sigma^{2nt} - \frac{t^2}{2}\right) dt = f(\alpha, \sigma^n), \quad (5)$$

где $\alpha = a Stk_{50}^n$, $Stk_{50} = \tau_{50} \frac{V_0}{d_0}$, $\tau_{50} = \frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18\mu}$.

Расчет на заданные параметры можно с достаточной точностью произвести в пределах $t = -4 \div +4$ с помощью ПЭВМ, но можно воспользоваться универсальной номограммой [2], которая при

$$\alpha = a \left(\frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18\mu} \frac{V_0}{d_0} \right)^n = 30 \left(\frac{2400 (18 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 3,73}{18 \cdot 23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,25} \right)^{0,45} = 2,217, \quad 1 \text{ г} \alpha = 0,346,$$

$$\sigma^n = (2,9)^{0,45} = 1,615 \quad \text{дает} \quad K_{\Sigma 1} \approx 0,2 \quad \text{и} \quad \eta_{\Sigma 1} = 0,8.$$

Расчет рециркуляционного циклона ЦН-15 диаметром $d_u = 0,8$ м при рекомендуемой в [2, 4] скорости в плане $V_u = 3,5$ м/с методом НИИОГАЗ дает на приведенные выше параметры пыли и газа эффективность пылеулавливания $\eta_u = 78\%$. В [2] отмечается, что если эффективность циклона больше эффективности улитки ДП $\eta_{ул}$, то следует принимать эффективность ДП с циклоном равной эффективности ДП. В данном случае

$\eta_{\text{ц}} < \eta_{\text{ул}}$. В этой связи целесообразно вместо циклона ЦН-15 выбрать циклон другого типа, более эффективный при тех же параметрах. Так, вместо циклона ЦН-15 в данном случае можно принять циклон ЦН-11, эффективность пылеулавливания в котором будет равна 82 %, при этом рециркуляционный расход газа через него составит $L_{\text{ц}} = 15,5$ тыс. м³/ч, что является четвертью общего очищаемого расхода через один ДП $L_{\text{ДП}}$ и соответствует рекомендациям, приведенным в [2]: $L_{\text{ц}}/L_{\text{ДП}}$ должно быть не менее 0,15–0,20. Если в качестве рециркуляционного циклона принять циклон ЦН-11 диаметром 0,6 м, то $\eta_{\text{ц}} = 92$ %, а $L_{\text{ц}}/L_{\text{ДП}} = 0,177$, что также соответствует рекомендациям [2].

Таким образом, на первой ступени сухой очистки дымовых газов улавливается 80 % пыли и концентрация ее на выходе из ДП и на входе в СВ будет равна

$$c_{2\text{вх}} = 14 \cdot 0,2 = 2,8 \text{ г/м}^3,$$

при этом содержание SO₂ в газах остается прежним. Однако, согласно примеру расчета [2, с. 17], концентрация пыли $c_{2\text{вх}} = 2,8 \text{ г/м}^3$ слишком высока, чтобы за счет рассеивания из трубы котельной высотой $H = 80$ м в приземном слое атмосферы была обеспечена $c_{\text{ПДК}} = 0,25 \text{ мг/м}^3$. Для этого нужна эффективность пылеулавливания $\eta_{\Sigma 1} \approx 93$ %.

Произведем расчет абсорбционно-конденсационной пыле- и газоочистки с помощью модели [3] во второй ступени, в качестве которой выберем скруббер Вентури. Положим, что дымовой газ в ДП охлаждается до 120 °C, тогда объемный расход его уменьшится до 351 тыс. м³/ч (97,5 м³/с). Если задать диаметр горловины трубы Вентури (ТВ) $d_{\text{ТВ}} = 1$ м, то скорость газа в горловине будет равна $U_0 = 124,2$ м/с при установке одной ТВ, при установке параллельно двух ТВ $U_0 = 62,1$ м/с. Проведем расчет этих двух вариантов при следующих параметрах:

- концентрация пыли в дымовых газах $c_{2\text{вх}} = 2,8 \text{ г/м}^3$;
- температура парогазового потока $T_{00} = 393 \text{ К}$;
- температура разбрзгиваемой воды $T_{k0} = 288 \text{ К}$ (15 °C);
- коэффициент орошения $q = 1,5$; 5 л воды/м³ газа;
- размер улавливаемых частиц на капли $\delta = 0,1$; 1 мкм;
- угол раствора диффузора ТВ $\alpha = 7^\circ$.

Результаты расчета девяти вариантов представлены в таблице. Здесь же приведены гидравлические потери в скрубберах Вентури, при этом коэффициент гидравлического сопротивления ТВ определялся по формуле [2]

$$\xi_{\text{ТВ}} = \xi_{\text{сух}} \left(1 + 0,63q^{0,7} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho} \right), \quad (6)$$

где для стандартной ТВ принято $\xi_{\text{сух}} = 0,15$.

Общие гидравлические потери рассчитаны по известной зависимости

$$\Delta P_{\text{ТВ}} = \xi_{\text{ТВ}} \rho \frac{U_0^2}{2}, \quad (7)$$

в которой учтено $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho(T_{00} = 393 \text{ К}) = 0,9 \text{ кг/м}^3$.

Результаты расчетов пыле- и газоочистки в СВ

Варианты расчетов	ΔP_{TB} , кПа	V_0 , м/с	T_{k0} , К	T_{00} , К	V_{k0} , м/с	q , л/м ³	δ_0 , мкм	d_{no} , кг/кг с.г.	$d_{SO_2,0}$, кг/кг с.г.	η_{SO_2} , %	\bar{x}_{SO_2}	η_n , %	\bar{x}_n
1	15,426	124,2	288	393	4	1,5	1	0,1	0,1	3,72	0,1	99,76	0,2
2	3,856	62,1	288	393	4	1,5	1	0,1	0,1	4,07	0,2	92,04	0,4
3	15,426	124,2	288	393	4	1,5	0,1	0,1	0,1	2,76	0,1	15,33	1
4	3,856	62,1	288	393	4	1,5	0,1	0,1	0,1	2,76	0,2	6,08	1
5	18,903	124,2	288	393	4	5	1	0,1	0,1	19,76	0,3	100	0,01
6	4,726	62,1	288	393	4	5	1	0,1	0,1	19,61	0,3	100	0,01
7	18,903	124,2	288	393	4	5	0,1	0,1	0,1	18,24	0,2	43,96	1
8	4,726	62,1	288	393	4	5	0,1	0,1	0,1	19,63	0,4	21,66	1
9	7,514	62,1	288	393	4	10	0,1	0,1	0,1	17,44	0,6	34,80	1

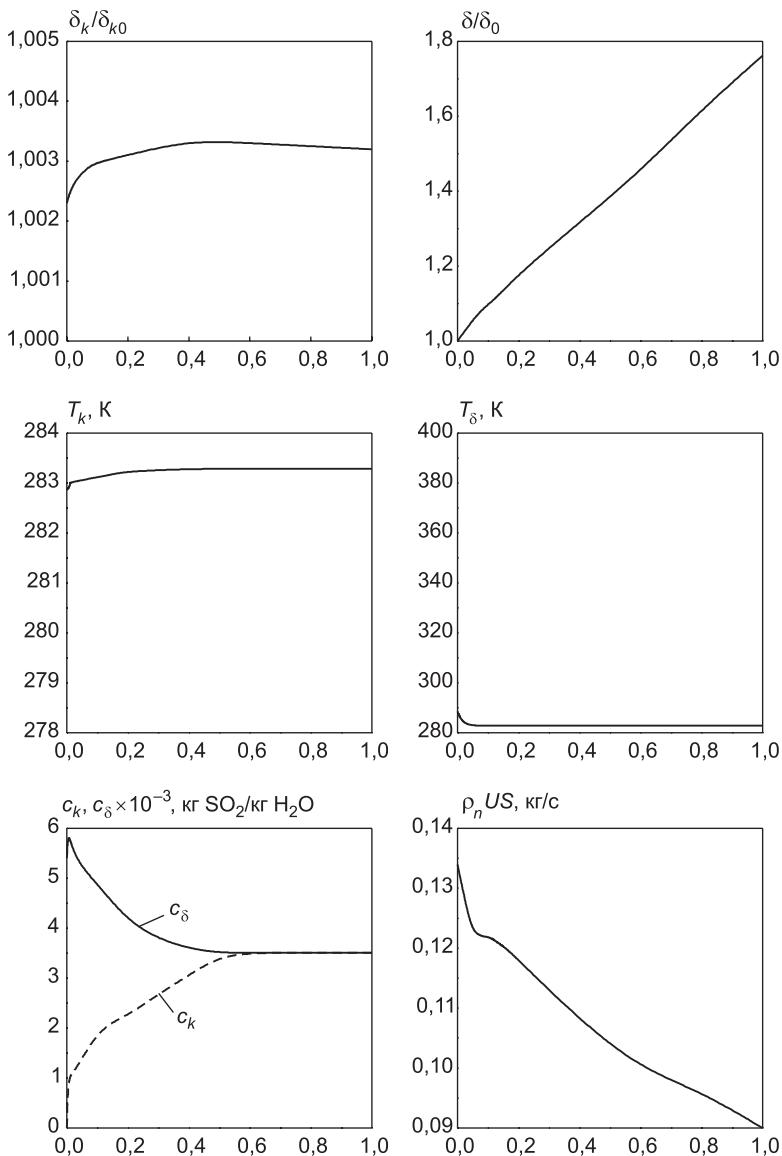
Примечание. \bar{x}_{SO_2} и \bar{x}_n — относительные расстояния (к заданной длине диффузора СВ $l = 10$ м), на которых достигаются равновесные (или максимальное) значения эффективности абсорбирования $SO_2 \eta_{SO_2}$ на воду и эффективности конденсационного улавливания частиц пыли η_n .

Из таблицы видно:

1. Эффективность абсорбирования SO_2 на воду слабо зависит от скорости очищаемого газа в горловине ТВ, откуда следует, что предпочтение целесообразно отдавать меньшим скоростям, при которых гидравлическое сопротивление ТВ будет квадратично от скорости меньшим. В нашем случае предпочтительнее $U_0 = 62,1$ м/с по сравнению с $U_0 = 124,2$ м/с, когда гидравлическое сопротивление в первом случае в 4 раза меньше, чем во втором. При этом условие равновесного состояния достигается на длине диффузора ТВ, значительно меньшей, чем рекомендуемая в [5, 6] и равная 10–15 диаметров горловины ТВ. Для данных расчетов $\bar{x}_{SO_2} = 0,1 - 0,6$, или $x_{SO_2} = 1 - 6$ м, остальная длина, в данном случае до 10 м, излишняя. Выбор достаточной конструктивной длины диффузора делается по расчету.

2. Эффективность пылеулавливания существенно зависит от скорости в горловине ТВ: чем выше скорость, тем выше эффективность. Частицы размером 1 мкм полностью улавливаются уже на начальной длине диффузора, частицы размером 0,1 мкм улавливаются слабее и на всей расчетной длине диффузора. Наиболее высокая эффективность пылеулавливания достигается при повышенных коэффициентах орошения $q = 5 - 10$ л/м³, приемлемый из которых можно выбрать по расчету. Для более строгой оценки эффективности улавливания полидисперсной пыли, поступающей в СВ из ДП, можно сделать на основе этой модели по аналогии с работой [7].

На рисунке представлены расчеты зависимости параметров абсорбционно-конденсационного процесса пыле- и газоочистки в СВ для варианта 9 (см. таблицу) по длине диффузора, где δ_k , δ_{k0} — текущий и начальный размер капель диспергируемой воды, δ_{k0} — рассчитывается по формуле Нукиямы — Танасавы [2]; δ , δ_0 — текущий и начальный размер частиц пыли, δ представляет собой размер «образования» — частица



Расчетные параметры пыле- и газоочистки в СВ по условиям таблицы (вариант 9)

с конденсатом на ее поверхности, в данном случае размер «образования» превышает размер исходной частицы на выходе из диффузора ТВ почти в 1,8 раза; T_k — текущая температура капель; T_δ — текущая температура «образований»; c_k и c_δ — концентрация раствора SO_2 в каплях и конденсате «образований»; в данном случае равновесное состояние процесса абсорбции наступает уже при $\bar{x}_{\text{so}_2} = 0,6$; $\rho_n US$ — массовый расход частиц пыли по длине диффузора, ρ_n — концентрация пыли, U — текущая скорость парогазового потока, S — текущая площадь поперечного сечения диффузора; процесс пылеулавливания на расчетной длине $l = 10$ м не заканчивается, достаточная длина определяется по расчету.

Выводы. Представленный в работе анализ нескольких вариантов компьютерного сквозного расчета комплексной двухступенчатой пыле- и газоочистки свидетельствует о продуктивности использования разрабо-

танных авторами методов и моделей в инженерной практике как математического инструмента для выбора пыле- и газоочистного оборудования и оптимизации его режимных и конструктивных параметров.

Процесс физической абсорбции не позволяет достаточно глубоко очищать газы от вредных газовых компонентов, однако предложенный подход с использованием математической модели абсорбционно-конденсационной пыле- и газоочистки в форсуночных скрубберах дает возможность ее применять и для хемасорбционного, более эффективного процесса, если экспериментально будут установлены для него зависимости для коэффициентов фазового равновесия от температуры и концентраций водных растворов абсорбентов по отношению к соответствующим абсорбтивам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Р у с а н о в, А.А. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике [Текст] / А.А. Рusanov, И.Н. Урбах, А.П. Анастасиади. — М. : Изд-во «Энергия», 1969. — 456 с.
2. Ш и л я е в, М.И. Методы расчета пылеулавливающих систем [Текст] / М.И. Шиляев. — М. : ФОРУМ, ИНФРА-М, 2014. — 320 с.
3. Ш и л я е в, М.И. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков [Текст] / М.И. Шиляев. — М. : ФОРУМ, ИНФРА-М, 2015. — 288 с.
4. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации [Текст]. — Ярославль : Всесоюзное объединение по очистке газов и пылеулавливанию, 1970. — 94 с.
5. Р а м м, В.М. Абсорбция газов [Текст] / В.М. Рамм. — М. : Изд-во «Химия», 1976. — 655 с.
6. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / под общ. ред. А.А. Рusanова. — М. : Изд-во «Энергия», 1975. — 296 с.
7. Ш и л я е в, М.И. Моделирование абсорбционно-конденсационной газоочистки пылегазового потока с полидисперсной пылью в форсуночных скрубберах [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, А.В. Григорьев, И.П. Опарина // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Энергоресурсосберегающие технологии в системах ЖКХ как виды охраны окружающей среды», 24–26 сентября 2013 г. — Томск : ТГАСУ, 2013. — С. 161–163.

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

Томский государственный архитектурно-строительный университет

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

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ШИРОКОВА Светлана Николаевна, асп.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 16.01.15

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

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

Shirokova Svetlana Nikolaevna, post-graduate student, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A TWO-STAGE INERTIAL-CONDENSATION-ABSORPTION DUST AND GAS PURIFICATION OF FLUE GAS FROM COAL-FIRED BOILERS AND THERMAL POWER PLANTS

The paper considers calculation of complex two-stage purification of boiler flue gases from fly ash and SO₂ using smoke exhaust-dust collectors (first stage) and Venturi scrubber (second stage). The calculation is performed using the universal method for inertial dust collectors (first stage) and mathematical model of absorption-condensation dust and gas purification (second stage). The mathematical model is developed by authors. The calculation has proved the ability of universal method and mathematical model to select and improve general arrangement as well as design and operation mode parameters of dust and gas purification equipment in size and energy consumption. It also considers the required sanitary standards of dust and SO₂ in smoke emissions from boiler houses and thermal power plants.

Key words: inertia dust collectors, venturi scrubbers, absorption-condensation dust — and gas purification, liquid droplets, absorption, chemisorption, efficiency of dust and gas purification.

REFERENCES

1. Rusanov, A.A. Flue gas cleaning in industrial power [Text] / A.A. Rusanov, I.N. Urbach, A.P. Anastasiadi. — M. : Publishing house «Energy», 1969. — 456 p.
2. Shilyaev, M.I. Methods for calculating the dedusting systems [Text] / M.I. Shilyaev. — M. : FORUM, INFRA-M, 2014. — 320 p.
3. Shilyaev, M.I. Aerodynamics and heat transfer gas-dispersion streams [Text] / M.I. Shilyaev. — M. : FORUM, INFRA-M, 2015. — 288 p.
4. Cyclones NIIOGAZ. Guidelines for the design, construction, installation and operation [Text]. — Yaroslavl : Union Association gas cleaning and dust removal, 1970. — 94 p.
5. Ramm, V.M. Absorption of gases [Text] / V.M. Ramm. — M. : Publishing house «Chemistry», 1976. — 655 p.
6. Handbook of dust- and ash collection [Text] / ed. A.A. Rusanov. — M. : Publishing house «Energy», 1975. — 296 p.
7. Shilyaev, M.I. Modeling absorption — condensing gas cleaning dust and gas flow from the nozzle in a polydisperse dust scrubbers [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.V. Grigoriev, I.P. Oparina // Proceedings of the International scientific and practical conference of students, graduate students, young scientists «Energy-saving technologies in the systems of public utilities as a kind of environmental protection», 24–26 September 2013. — Tomsk : TSUACE, 2013. — P. 161–163.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.131

В.В. ВЕСЕЛОВ, В.А. БЕЛЯКОВ, В.Б. САЛЬНИКОВ

РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ПРОМЕРЗАНИЯ — ОТТАИВАНИЯ ГРУНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается метод решения нестационарной и нелинейной тепловой задачи промерзания — оттаивания грунта в двумерной постановке с использованием компьютерных программ на основе метода конечных элементов, например, программы COSMOS/M (Structural Research & Analysis Corp.). Приводятся характерные особенности (вызванные нелинейностью и нестационарностью задачи) по заданию исходных данных в программу расчета.

Актуальность статьи обусловлена необходимостью расчета температурных полей в основании для прогноза поведения зданий и сооружений при промерзании—оттаивании грунта. Практическая значимость — обеспечение использования стандартных программ для решения тепловой задачи промерзания—оттаивания грунта. Научную новизну составляют полученные результаты анализа изменения температурных полей и их стабилизация в многолетнем цикле промерзания—оттаивания оснований.

Ключевые слова: нестационарная и нелинейная тепловая задача, промерзание—оттаивание грунта, метод конечных элементов.

Для теплового прогноза состояния оснований зданий и сооружений в условиях сезонного промерзания грунтов [1–3] требуется выполнить численный анализ температурных полей в грунте в процессе промерзания — оттаивания.

В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по выполнению тепловых расчетов промерзания — оттаивания грунта (нелинейных и нестационарных, с учетом фазовых переходов воды). При решении таких задач в дву- и трехмерной постановке компьютерными программами на основе МКЭ возникают трудности с постановкой задачи: заданием граничных условий, выбором расчетной схемы задачи и др.

В статье рассмотрено решение нестационарной и нелинейной тепловой задачи в двумерной постановке с использованием компьютерных программ расчета на основе метода конечных элементов [4], например, программы COSMOS/M (Structural Research & Analysis Corp.).

Программа имеет достаточно универсальный характер и позволяет решать множество задач данного класса. Особенности конкретной задачи отражаются в исходной информации и не требуют изменения алгоритма решения. Тем не менее среди перечисленных вопросов (применительно к задачам промерзания грунтов) есть принципиальные вопросы — способ задания краевых условий, конфигурация расчетной области и пр., заслуживающие отдельного изучения и анализа.

Рассмотрена задача промерзания оголенной от снега и растительности поверхности (расчетная схема «бесснежная поляна»).

Расчетная схема «бесснежная поляна» — полупространство (в частном, двумерном случае — полуплоскость) из бесконечного по простирации массива вещества, неоднородного по теплофизическим характеристикам, ограниченного сверху плоскостью (линией). Эта «поляна», как постулируется нормативами, свободна от снега и растительного покрова; на нее действуют сверху — знакопеременный тепловой поток от наружного воздуха и солнечной радиации, снизу — геотермальный поток, характеризующий влияние нижележащего массива грунта, с характерным для рассматриваемой местности температурным градиентом.

При задании исходных данных в программу теплотехнического расчета, прежде всего, необходимо ввести теплофизические характеристики грунтов. Так как учитывается нелинейная работа грунтов, требуется специальные приемы для задания исходных значений в компьютерную программу.

Нелинейность теплофизических свойств грунтов вызвана различием значений характеристик для талого и мерзлого состояний грунта. Диапазон температур, в пределах которого происходят фазовые переходы, находится в пределах от 0 до -3°C (для глин и суглинков в среднем от 0 до -2°C , а для песков от 0 до $0,2\text{--}0,5^{\circ}\text{C}$).

При вводе исходных данных в программу расчета конкретные значения характеристик для талого и мерзлого состояния грунта трансформированы в непрерывные зависимости свойств грунта от температуры. Например, для суглинка с теплопроводностью $\lambda = 1,57 / 1,45$ (мерзлый и талый грунт) зависимость теплопроводности от температуры показана на рис. 1.

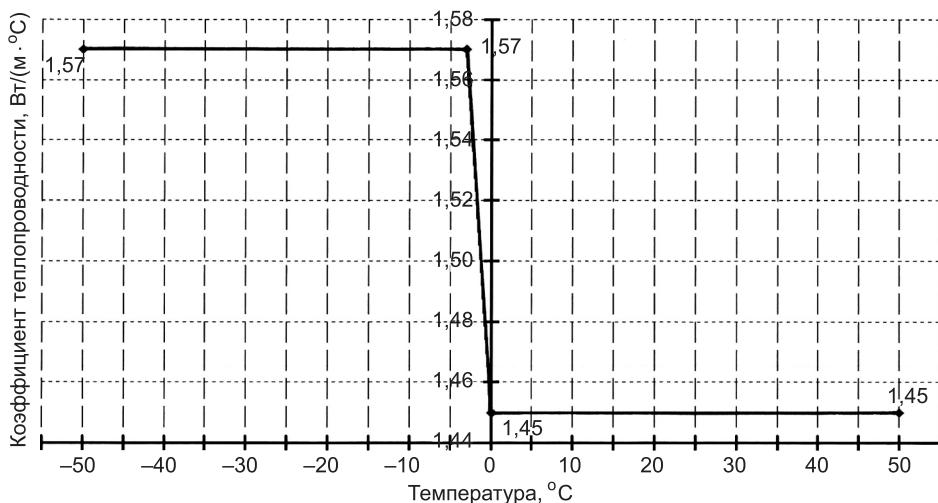


Рис. 1. График зависимости теплопроводности грунта от температуры

Для теплоемкости грунта для ввода значений в программу расчета использованы аналогичные принципы построения непрерывных зависимостей, описывающие изменения теплоемкости грунта при изменении температуры. Кроме того, в предлагаемой методике расчетов принято,

что все тепловыделения и теплопоглощения, связанные с фазовыми переходами воды, будут учтены при задании зависимости теплоемкости грунта от температуры. В этом случае на графике зависимости удельной теплоемкости от температуры появляется характерный скачок на интервале температур основных фазовых переходов от -3 до 0 $^{\circ}\text{C}$. Количественно площадь скачка на графике равна удельной теплоте фазовых переходов объема жидкости в грунте.

Выявлено, что различный диапазон задания фазовых переходов при постоянной площади под графиком практически не влияет на температурные поля за пределами зоны фазовых переходов (выше и ниже ее по глубине грунта) и на глубину промерзания, так как размер зоны фазовых переходов при этом составляет не более 5–15 см (при промерзании грунта в естественных условиях). То есть основной фактор, влияющий на распределение температуры в грунте за пределами зоны фазовых переходов, — это площадь эпюры графика эффективной теплоемкости.

С достаточной для расчетной практики точностью принято, что начало диапазона фазовых переходов соответствует температуре начала замерзания грунта $t_{\text{зам}}$ (хотя для реальных грунтов температура $t_{\text{зам}}$ несколько меньше 0 $^{\circ}\text{C}$). Кроме того, нижняя граница диапазона фазовых переходов условно принята за температуру конца замерзания t_k (при данной температуре в грунте уже не остается большого количества незамерзшей воды). Для примера, при известной влажности и плотности грунта определяется площадь эпюры участка графика, имеющего характерный пик (см. график эффективной теплоемкости на рис. 2). Для построения графика удельной теплоемкости производим следующие вычисления: масса воды в объеме грунта равна произведению его влажности на плотность сухого грунта $0,3 \times 1400$ кг/м³ = 420 кг/м³.

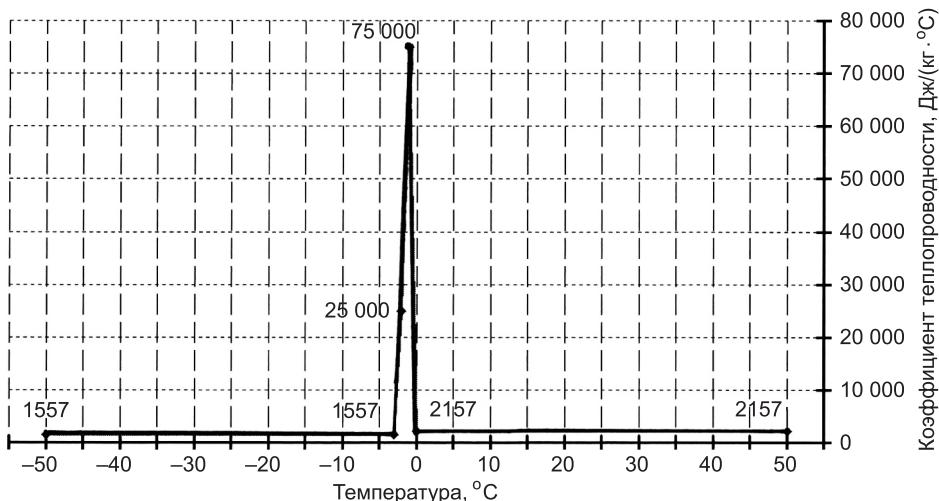


Рис. 2. График зависимости удельной теплоемкости грунта от температуры с учетом фазовых переходов воды, содержащейся в объеме грунта

Теплота фазовых переходов для вычисленной массы воды в объеме грунта:

$$Q_{\phi,\text{п}} = 420 \times 3,35 \cdot 105 \text{ Дж/кг} = 140,7 \text{ МДж/м}^3,$$

где 3,35 105 Дж/кг — удельная теплота фазовых переходов для воды.

Тогда площадь эпюры участка графика, имеющего характерный пик:

$$140\ 700\ 000 \text{ Дж} / \text{м}^3 / (1 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1400 \text{ кг} / \text{м}^3) = 100\ 500 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}),$$

где $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ — длина участка графика.

При вводе исходных данных в расчет значения температур воздуха по СП «Строительная климатология» и пособия к нему были трансформированы в непрерывные зависимости температуры от времени (условие ввода исходных данных в программу расчета). На рис. 3 показан график зависимости температуры воздуха от времени.

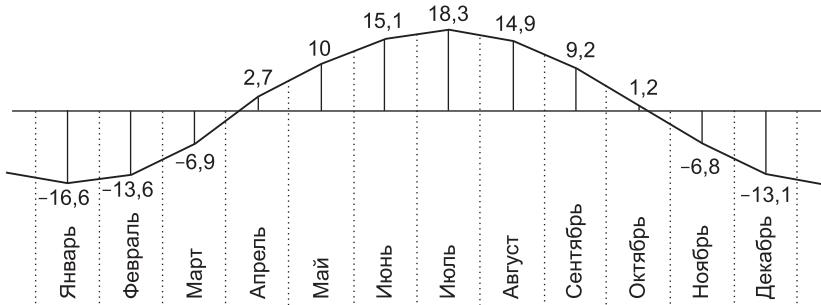


Рис. 3. Кривая нормативной температуры наружного воздуха, г. Екатеринбург

Графики изменения величины солнечной радиации в зависимости от времени года строились по значениям суммарной солнечной радиации, также по данным упомянутого выше СП и пособия. Общий вид графика для Екатеринбурга показан на рис. 4.

При выполнении расчетов учтено не суммарное значение солнечной радиации, а только поглощенная ее часть. Для расчета величины поглощенной радиации учитывалась характеристика отражательной способности земной поверхности (альбедо αL). Используя в расчетах схему «бесснежная поляна», когда зимой снег расчищается, а летом удаляется какая-либо растительность с поверхности грунта, завышается (в запас) рассчитываемая глубина промерзания, но также получаются сопоставимые данные для сравнения экспериментов по схеме «бесснежная поляна» и результатов расчета по аналогичной схеме. Средневзвешенное значение коэффициента отражения грунтом солнечной радиации (использованное в расчетах) составляет 0,3, а коэффициента поглощения 0,7.

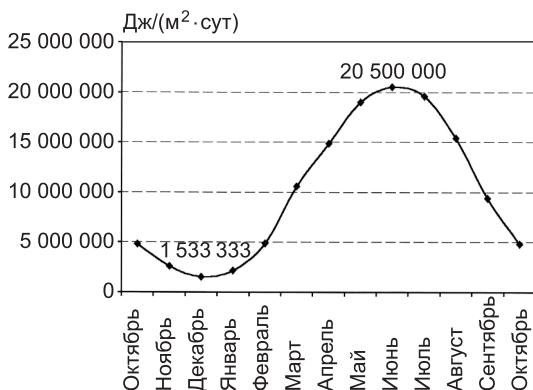


Рис. 4. Зависимость изменения величины солнечной радиации от времени для г. Екатеринбурга
Для июня по СНИП 615 МДж / м^2 , в размерностях расчета $615/30$ сут = $20,5 \text{ МДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{сут})$

использованное в расчетах) составляет 0,3, а коэффициента поглощения 0,7.

Выполнен анализ по определению оптимальной глубины расчетной зоны, приведены результаты такого анализа [5, 6]. Выявлено, до какой глубины влияют (проявляются) различные возмущающие факторы на поверхности и их сочетания, а также с какой глубины они перестают прояв-

отражения грунтом солнечной радиации (использованное в расчетах)

составляет 0,3, а коэффициента поглощения 0,7.

Выполнен анализ по определению оптимальной глубины расчетной зоны, приведены результаты такого анализа [5, 6]. Выявлено, до какой глубины влияют (проявляются) различные возмущающие факторы на поверхности и их сочетания, а также с какой глубины они перестают прояв-

ляться, т.е. определен критерий расчетной зоны. Само понятие расчетной зоны (как оно здесь сформулировано) не является абсолютно точным и определенным, потому что теоретически воздействие поверхности распространяется бесконечно глубоко. Например, задав на «гарантированной» глубине 50 м постоянную температуру, уже на глубине 49 м хоть немного, но температура будет изменяться, т.е. строго постоянной она будет только на глубине 50 м. Следовательно, понятие расчетной зоны привязано к определенным допускам; она (и это повторяется) не задается абсолютно точно.

Установлено, что глубина 15 м и краевое условие, задаваемое на ней, обладают инвариантностью относительно верхних краевых условий задачи, следовательно, расчетная глубина обеспечена доказательной базой и выбрана правильно. Влияние возмущающих факторов приводилось к поверхности расчетной зоны. Возможны случаи, когда какие-либо возмущения действуют на определенной отметке от поверхности (например, дно заглубленного сооружения находится на отм. -8 000 м). При этом для нахождения глубины расчетной зоны необходимо к отметке действия возмущающего фактора прибавить 15 м (в приведенном примере расчетная зона составит 23 м). Таким образом, глубина 15 м выбрана как универсальная нижняя граница, позволяющая корректно рассчитывать не только тепловые задачи с естественным температурным режимом на поверхности, но и заглубленные сооружения, подвалы и пр.

Формирование и динамика процессов сезонного промерзания пород определяются структурой радиационно-теплового баланса поверхности. Для изучения связи тепловых процессов, протекающих в горных породах, с тепловыми процессами, протекающими на земной поверхности, необходимо рассматривать влияние всех составляющих радиационно-теплового баланса на температуру поверхности и подстилающих пород. Так как в среднем за год теплосодержание слоя грунта в пределах глубины расчетной зоны не меняется (т.е. никакое количество тепла не накапливается и не вытекает из слоя), существует некий поток, влияющий на массив грунта (влияющий, как краевое условие снизу). На этом основании было составлено уравнение теплового баланса и оценены источники тепла (радиация, геотермальное тепло, потери через конвекцию), а также расчетами и аналитически была определена степень влияния каждого источника.

Расчетами выявлено, что температуры внизу расчетной зоны и величина теплового потока снизу — на верхних слоях — отражаются мало (например, на глубине промерзания), геотермальный поток тепла почти не влияет на них. Этот фактор (тепловой поток снизу) следует считать малозначительным и задавать его в реальных расчетах можно обоснованно с точностью до порядка. Определена примерная величина такого теплового потока (приемлемая для расчетов с заданной точностью), которая согласуется с понятием геотермальной ступени. Градиент температур в грунте в среднем составляет 20 °С на 1000 м, или (0,02).

Таким образом, нет большой разницы, а) задавать ли на глубине 15 м температуру 3 или 15 °С (при задании граничного условия снизу через постоянную температуру на заданной глубине; менее предпочтительный способ задания граничного условия по сравнению с тепловым потоком); б) или соответствующий геотермальной ступени тепловой поток (с точностью до порядка, в зависимости от средней теплопроводности массива), так как это является естественным «люфтом», практически не влияющим на тепловой баланс системы. Как следствие, решать

обратную задачу бесполезно — пытаться подобрать нужную температуру / поток на фиксированной глубине в зависимости от остальных исходных данных.

Начальное распределение температур в грунте, близкое к реальному, можно получить, составив уравнение теплового баланса для расчетного года и построив график среднегодовых температур в грунте (рис. 5).

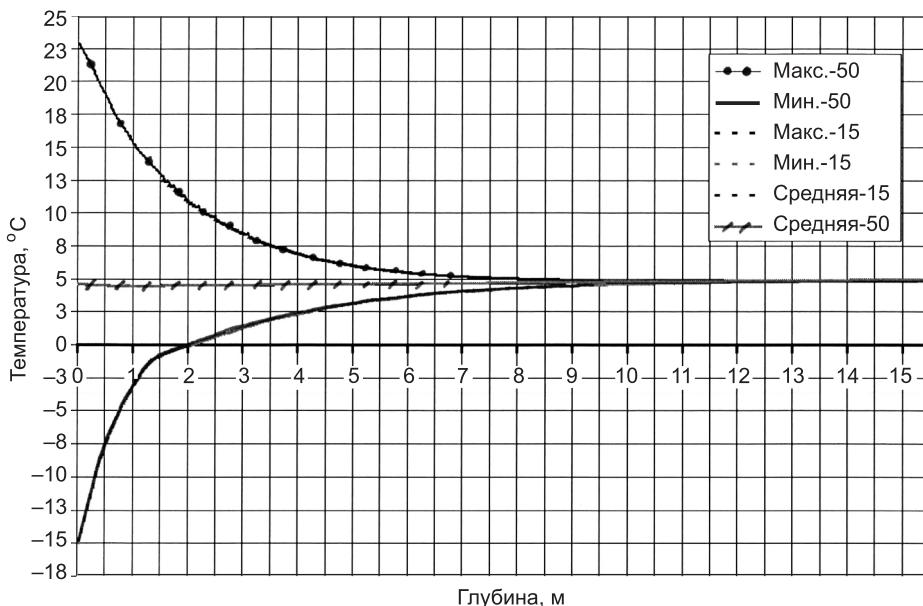


Рис. 5. Общий вид графика среднегодовой температуры и ее амплитуды по глубине расчетной зоны для Екатеринбурга без учета возмущающих факторов

Выводы. 1. Решая с помощью компьютерных программ нестационарные тепловые задачи, необходимо задать некую начальную температуру для каждого узла расчетной зоны, близкую к предполагаемым реальным значениям (или точные значения, полученные аналитически).

2. Авторами рассмотрен и решен такой постановочный вопрос, как проблема задания начального распределения температур в массиве грунта. Предложен способ назначения начального распределения температур. При решении задачи необходимо задать начальную температуру от 5 до 10 °C для всего массива грунта. После чего требуется произвести расчет большого числа годовых циклов. Практика показывает, что в течение 3–5 годовых циклов задача сама выходит на температурное распределение, характерное для грунта в естественных условиях залегания.

3. Далее достаточно добавить рассчитываемую конструкцию, продолжить выполнение расчета и получить решение нестационарной тепловой задачи. Экспериментально в период с 2002 по 2014 г. установлена хорошая сходимость результатов компьютерных расчетов с данными натурных исследований тепловых полей в основании малозаглубленных фундаментов зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Design guide for frost-protected shallow foundations [Текст] / U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research. — 1994. — 46 р.

2. Coutts, R.J. Finite Element Modelling of Transient Non-Linear Heat Flow Using the Node State Method. Intl. Ground Freezing Conf. France. November 1994. — P. 876–892.
3. Пат. 2237780 МКИ 7 Е 02 D 27/01, 27/35. Теплоизолированный фундамент [Текст] / В.В. Лушников, Ю.Р. Оржеховский, В.В. Веселов. — № 2002118813/03; заявл. 12.07.2002; опубл. 27.01.2004, RU БИПМ № 3.
4. Веселов, В.В. Методика расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно-промерзающих грунтах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / В.В. Веселов. — Пермь, 2004. — 24 с.
5. Веселов, В.В. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчета [Текст] / В.В. Веселов, В.А. Беляков // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 8 (26). — С. 13–18.
6. Веселов, В.В. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: его работа в сезонно-промерзающих грунтах, практика теплового расчета, проектирования и строительства [Текст] / В.В. Веселов, В.А. Беляков, В.Б. Сальников // Научно-теоретический и практический журнал. — Уральск, 2014. — № 44 (123). — С. 29 –49.

ВЕСЕЛОВ Владимир Вячеславович, канд. техн. наук, главный специалист ООО «Институт проектирования, архитектуры и дизайна», Екатеринбург
БЕЛЯКОВ Владимир Александрович, канд. техн. наук, доц.

Уральский государственный технический университет — УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

САЛЬНИКОВ Виктор Борисович, канд. техн. наук, доц.

Уральский государственный технический университет — УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Получено после доработки 16.01.15

Veselov Vladimir Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, the chief specialist «Institute of Construction Design» LLC, Ekaterinburg, Russia

Belyakov Vladimir Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Ural State Technical University — UPI named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Salnikov Victor Borisovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Ural State Technical University — UPI named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

THE SOLUTION TO THE NONSTATIONARY AND NONLINEAR PROBLEM OF FREEZING/THAWING OF THE SOIL IN A 2D TARGET SETTING, USING SOFTWARE BASED ON THE FINITE-ELEMENT METHOD

The article focuses on a technique for solving the nonstationary and nonlinear problem of freezing/thawing of soil in a 2D target setting, using software based on the finite-element method. The COSMOS/M package from Structural Research & Analysis Corp. is used as an example. The article also mentions some peculiarities of data input, caused by the nonlinearity and nonstationarity of the problem.

The relevance of the article is due to the necessity of calculation temperature fields in the basis to predict the behavior of buildings and structures during the freezing–thawing soil. Practical importance—ensuring the use of standard programs to solve the heat problem of freezing and thawing of the soil. Scientific novelty are the results of the analysis temperature fields and their stabilization.

Key words: nonstationary and nonlinear problem, freezing–thawing of soil, the finite-element method.

REFERENCES

1. Design guide for frost-protected shallow foundations [Text] / U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research. — 1994. — 46 p.
 2. Coutts, R.J. Finite Element Modelling of Transient Non-Linear Heat Flow Using the Node State Method. Intl. Ground Freezing Conf. France. November 1994. — P. 876–892.
 3. Pat. 2237780 МСИ 7 Е 02 D 27/01, 27/35. Warmly isolated foundation [Text] / V.V. Lushnikov, Yu.R. Orzhehovskiy, V.V. Veselov. — N 2002118813/03; it is declared 12.07.2002; it is publ. 27.01.2004, RU the Bull. N 3.
 4. Veselov, V.V. Design procedure warmly isolated the foundations on seasonally freezing through grounds [Text]: the author's abstract of the diss. ... of a cand. tech. sci.: 05.23.02 / V.V. Veselov. — Perm, 2004. — 24 p.
 5. Veselov, V.V. Frost-protected shallow foundation: its work in seasonally-freezing through grounds, practice of thermal calculation [Text] / V.V. Veselov, V.A. Belyakov // Magazine of Civil Engineering. — 2011. — N 8 (26). — P. 13–18.
 6. Veselov, V.V. Frost-protected shallow foundation: its work in seasonally-freezing through grounds, the practice of thermal calculation, design and construction [Text] / V.V. Veselov, V.A. Belyakov, V.B. Salnikov // Ural scientific Herald.— Uralsk, 2014. — P. 29–49 (in Kazakstan).
-

УДК 691:620.17

В.М. ТИХОМИРОВ, Ю.В. АСТАХОВ, А.С. САМОШКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

В настоящее время проблема сцепления в железобетоне исследуется различными экспериментально-расчетными методами. При ее решении трудно учесть детальное распределение напряжений в зоне контакта арматуры с бетоном. Поэтому методы носят феноменологический характер и строятся на основе базисных экспериментов.

В работе предлагается новое направление исследования контактного взаимодействия арматуры с бетоном. Представлены исследования на основе испытаний на выдергивание арматуры из бетонной обоймы и нового алгоритма численного моделирования сцепления, учитывающего нелинейное деформирование в области контакта. Для этого были использованы соотношения «технической теории сцепления» М.М. Холмянского, предположение об идеальной текучести бетона в зоне контакта и критерий текучести Мизеса.

Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными при выдергивании высокопрочной проволоки и базальтопластиковой арматуры показало их хорошее соответствие.

Ключевые слова: сцепление арматуры с бетоном, идеальная текучесть, механические характеристики контактного слоя, численное моделирование.

Анализ механического взаимодействия арматуры с бетоном сложная и до конца нерешенная проблема. При ее решении не учитывается детальное распределение напряжений в зоне контакта арматуры с бетоном. Поэтому математические модели таких решений носят феноменологический характер, т.е. они строятся на основе базисных экспериментов [1, 2].

Наиболее разработанной моделью такого типа является техническая теория сцепления [1], в которой взаимодействие арматуры с бетоном описывается нормальным законом сцепления — зависимостью касательных напряжений τ в контактной зоне от взаимных продольных смещений бетона и арматуры g :

$$\tau = B \frac{\ln(1+\alpha g)}{1+\alpha g}. \quad (1)$$

Постоянные коэффициенты α и B зависят от профиля и диаметра арматуры, механических характеристик бетона, скорости приложения нагрузки и некоторых других факторов и являются параметрами сцепления.

В качестве базисного эксперимента для определения постоянных α и B используют выдергивание арматурного стержня при продольном приложении усилия (рис. 1). Для длинных образцов на основе нормального закона сцепления (1) получена интегральная зависимость напряжения

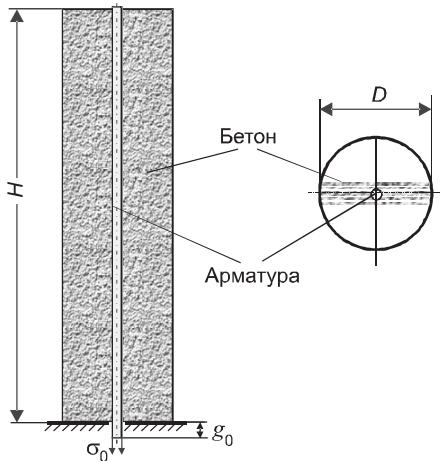


Рис. 1. Схема испытания на выдергивание

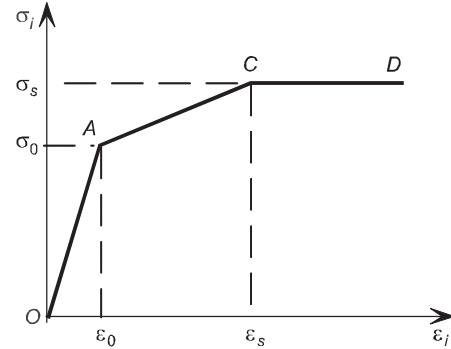


Рис. 2. Трехлинейная диаграмма деформирования бетона в зоне контакта

в нагруженном сечении арматуры σ_0 и смещением этого сечения относительно бетонной обоймы g_0 [1]

$$g_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{\sigma_0}{k} \right) - 1 \right], \quad k = \sqrt{\frac{Bp}{A_s \alpha} \cdot \frac{E_s}{(1+n\mu)}}, \quad (2)$$

где $n = E_s/E_b$, $\mu = A_s/A_b$, E_s и E_b — модули упругости арматуры и бетона; A_s и A_b — площади сечения арматуры и бетона; p — периметр сечения арматурного стержня.

При континуальном подходе к расчету нелинейных процессов, происходящих в контактном слое арматура — бетон, достаточно сложно реализовать выполнение зависимости (1).

В работе предложен новый подход к решению данной контактной задачи, где для определения механических характеристик бетона в зоне контакта с арматурой используется обобщенный параметр сцепления B . Необходимо учесть, что в контактном слое происходят одновременно несколько процессов: ползучесть, пластическая деформация, деструкция (разрушение) и проскальзывание, что обуславливает нелинейный характер деформирования.

Предлагается кривую деформирования бетона — зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ε_i представить в виде трехлинейной диаграммы (рис. 2):

интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}; \quad (3)$$

интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}, \quad (4)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 — главные напряжения;

ε_1 , ε_2 , ε_3 — главные деформации.

Участок OA соответствует упругому деформированию. Точка A является началом участка упрочнения, когда доля необратимых деформаций пластичности и ползучести становится значительной, соответственно σ_0 — условное напряжение начала нелинейного деформирования. На участке AC при $\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_s$ происходит накопление повреждений контактного слоя. Точка C соответствует разрушению зоны контакта, после которой начинается проскальзывание арматуры относительно бетонной обоймы, а σ_s — напряжению скольжения.

Такое представление связи деформаций и напряжений позволяет математически описать наличие больших деформаций и разрушения в области взаимодействия арматуры с бетоном без учета разгрузки, которая происходит по достижению максимальных усилий сцепления в контактном слое. Таким образом, при моделировании задачи необходимо выбрать три независимых параметра: σ_0 , σ_s , ε_s .

Оценим адекватность такого представления деформирования бетона без учета участка упрочнения, т.е. примем модель идеальной текучести бетона (рис. 3). Это позволяет описать контактную задачу для длинных армированных бетонных образцов, когда зона пластичности распространяется не на всю длину анкеровки.

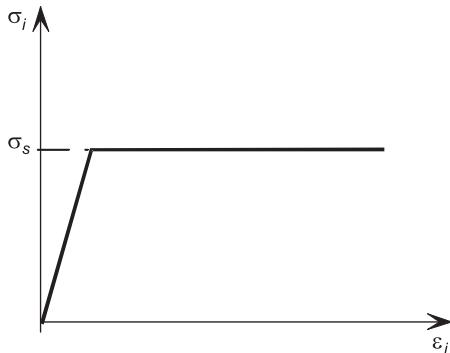


Рис. 3. Диаграмма идеального скольжения в зоне контакта (идеального упруго-пластического тела)

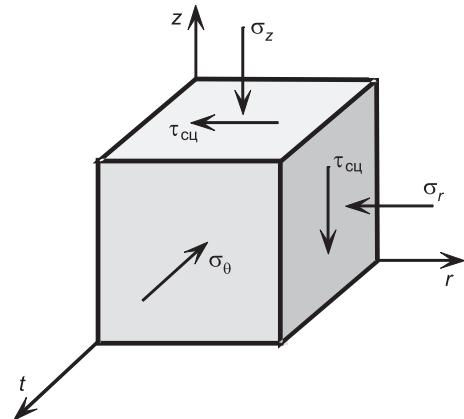


Рис. 4. Напряженное состояние в зоне контакта

При выборе критерия перехода в предельное (пластическое) состояние необходимо учесть, что при выдергивании арматуры из бетона контактный слой находится в объемном напряженном состоянии. На каждый малый элемент действуют сжимающие продольные, окружные и радиальные напряжения. Поэтому в качестве такого критерия будем использовать условие Мизеса, где учитываются все три главных напряжения — σ_1 , σ_2 , σ_3 :

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_s^2. \quad (5)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо определить, кроме упругих постоянных, одну характеристику модельного материала σ_s — напряжение скольжения. Для обоснования выбора значения этого параметра проведем анализ зависимости (1) с учетом выбранного критерия (5).

На рис. 4 представлено напряженное состояние точки, расположенной в зоне нелинейного перераспределения напряжений. Здесь на сдвиг в плоскости контактного слоя накладывается гидростатическое сжатие

$\sigma_0 = \sigma_z = \sigma_r = \sigma$. В этом случае главные напряжения $\sigma_1 = \sigma + \tau_{\text{сц}}$; $\sigma_2 = \sigma$; $\sigma_3 = \sigma - \tau_{\text{сц}}$.

Из формулы (3) получим

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 6\tau_{\text{сц}}^2 = 2\sigma_s^2,$$

а касательные напряжения, при которых начинается скольжение:

$$\tau_{\text{сц}} = 0,577\sigma_s. \quad (6)$$

С другой стороны, $\tau_{\text{сц}}$ можно определить из анализа зависимости (1), график которой представлен на рис. 5.

Здесь касательные напряжения достигают максимального значения при

$$\frac{d\tau}{dg} = Ba \frac{1 - \ln(1 + \alpha g)}{(1 + \alpha g)^2} = 0.$$

Откуда смещение $g^* = \frac{e - 1}{\alpha}$, напряже-
ния

$$\tau_{\text{сц}} = \frac{B}{e} = 0,368B. \quad (7)$$

Рис. 5. Распределение касательных напряжений по нормальному закону сцепления

Используя последнее соотношение, получим связь между напряжением σ_s и обобщенным параметром сцепления B

$$\sigma_s = 0,638B. \quad (8)$$

Это показывает, что для выбора значения σ_s можно использовать величину B , которая в свою очередь рассчитывается согласно соотношению (2) по экспериментально полученным смещениям g_0 и напряжениям σ_0 .

Для проверки этого вывода методом конечных элементов была проведена численная реализация осесимметричной задачи — выдергивание высокопрочной проволоки из цилиндрической бетонной обоймы по расчетной схеме, представленной на рис. 1.

Значения параметров сцепления для различного типа и диаметра высокопрочной проволоки приведены в работе [1]. Для проволоки диаметром 3 мм имеем $17,5 \leq B \leq 34$ МПа. Следовательно, напряжения скольжения σ_s , по нашим оценкам, формула (8), будут меняться в диапазоне от 10 до 20 МПа. Для проволоки диаметром 6 мм соответственно получим $5 \leq \sigma_s \leq 16$ МПа.

Для сравнения результатов при проведении модельных расчетов напряжение скольжения для образцов с арматурой диаметром 6 и 3 мм задавалось одинаковым $\sigma_s = 11$ МПа. В целях исключения влияния краевых эффектов диаметр бетонной призмы $D = 100$ мм, высота образца $H = 400$ мм. Другие механические характеристики материалов:

для бетона — модуль начальной упругости $E_b = 3,25 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $v_b = 0,2$;

для стальной проволоки — $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, $v_s = 0,3$.

Расчет выполнялся в программном комплексе COSMOS/M. Параметры сетки конечных элементов были подобраны с учетом больших градиентов деформаций и условия сходимости физически нелинейной задачи:

в зоне контакта бетона и арматуры радиальный размер конечного элемента принимался минимальным; ближе к внешней поверхности увеличивался в 10 раз; по осевому направлению размеры всех элементов выбирались одинаковыми. Решение задачи строилось с применением обычного итерационного метода Ньютона — Рафсона в постановке больших деформаций.

На рис. 6 представлены данные численного анализа: темные точки для диаметра арматуры 3 мм; светлые точки для диаметра 6 мм. Сплошная линия 1 и пунктирная линия 2 соответствуют аппроксимации данных расчета зависимостью (2) для проволоки диаметром 3 и 6 мм.

Анализ данных, полученных

методом конечного элемента, показал, что расчетные значения смещений g_0 и напряжений σ_0 для арматуры разного диаметра 3 и 6 мм хорошо соответствуют зависимости (2) при одинаковом параметре $B = 22$ МПа. Исключением является начальный участок нагружения $0 < g_0 < 0,05$ мм. Однако оказалось, что полученное соотношение между напряжением σ_s и величиной параметра B

$$\sigma_s = 0,5B \quad (9)$$

не согласуется с теоретической оценкой — соотношение (8). Это объясняется тем, что модель идеального скольжения, положенная в основу расчета, не учитывает накопление повреждений от начала нагружения до проскальзывания арматуры.

Также было определено, что зоны нелинейного деформирования были меньше длины анкеровки. Это позволяет считать исследуемые образцы относительно длинными по определению М.М. Холмянского [1].

Данные выводы были проверены при моделировании выдергивания высокопрочной проволоки Вр-II и базальтопластиковой арматуры одинакового диаметра 3 мм из бетонной призмы 100×100×400 мм [2].

Аппроксимация экспериментальных результатов для высокопрочной проволоки зависимостью (2) дала хорошую сходимость при $B = 26,8$ МПа и $\alpha = 17,5$ мм⁻¹ во всем диапазоне смещений: $0 < g_0 < 0,6$ мм. Это следует из рис. 7, а, где экспериментальные данные показаны светлыми точками. Крестиками нанесены результаты численного моделирования при следующих механических характеристиках упругопластической задачи: $E_b = 3,9 \cdot 10^4$ МПа; $v_b = 0,2$; $\sigma_s = 0,5B = 13,4$ МПа.

Аналогичная обработка результатов была проведена и для базальтопластиковой арматуры (рис. 7, б). Аппроксимация экспериментальных данных выражением (2) дала следующие параметры нормального закона

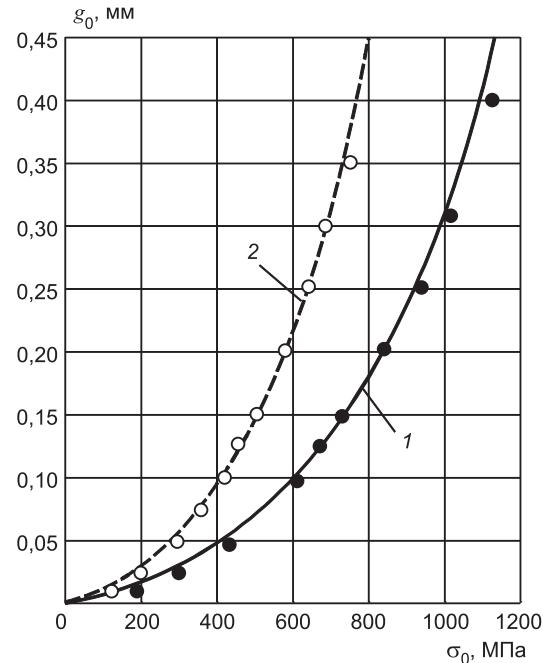


Рис. 6. Сравнительная оценка результатов численного расчета

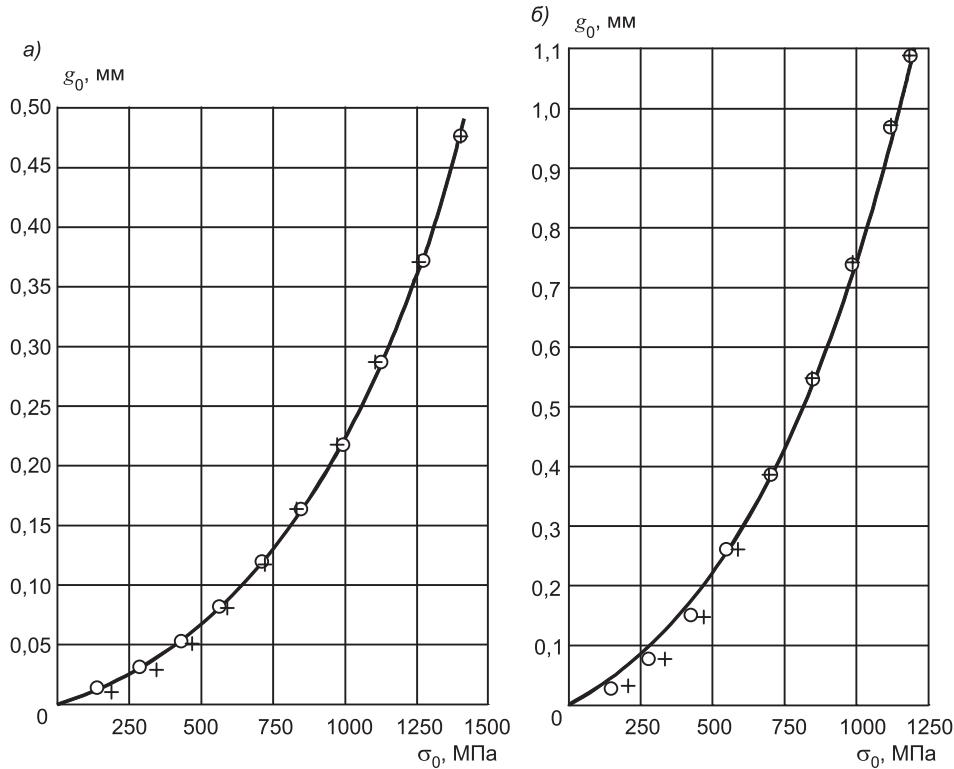


Рис. 7. Результаты обработки экспериментальных данных [2]:
а — выдергивание высокопрочной проволоки Вр-II; б — базальтопластиковой арматуры

сцепления: $B = 30,5$ МПа и $\alpha = 61,5$ см⁻¹. Численная реализация выдергивания базальтопластиковой арматуры из бетонного цилиндра была проведена при $\sigma_s = 0,5B = 15,25$ МПа. Результаты расчета представлены на рис. 7, б крестиками.

Можно отметить, что для стальной и для базальтопластиковой арматуры результаты расчетов оказались схожими. При относительно низких нагрузках $\sigma_0 \leq 500$ МПа модель оказалась более жесткой (при одинаковых перемещениях нагрузки на реальный образец ниже).

При высоких нагрузках $\sigma_0 > 500$ МПа наблюдается хорошая сходимость с экспериментальными данными и результатами их обработки с использованием нормального закона сцепления.

Необходимо отметить, что исследуемые образцы во всем диапазоне нагрузок можно отнести к длинным, так как зона взаимодействия арматуры и бетонной матрицы при максимальных нагрузках была меньше длины анкеровки 400 мм.

Результаты проведенных исследований показали:

- а) нелинейное контактное взаимодействие арматуры с бетоном можно численно смоделировать, используя представление идеальной текучести бетона;
- б) правильность предложенного алгоритма определения напряжения скольжения σ_s с использованием обобщенного параметра сцепления B ;
- в) соответствие расчетных и экспериментальных данных в области рабочих нагрузок армированных конструкций;

- г) пределы применения данной модели:
- образец должен быть относительно длинным, т.е. зона перераспределения напряжений меньше длины анкеровки;
 - модель не учитывает накопление повреждений от начала нагружения до проскальзывания арматуры, в результате чего при малых нагрузках это дает заниженную оценку смещений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмянский, М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность [Текст] / М.М. Холмянский. — М. : Стройиздат, 1997. — 569 с.
2. Тихомиров, В.М. Экспериментально-расчетное исследование взаимодействия стальной и базальтопластиковой арматуры с бетоном [Текст] / В.М. Тихомиров, Ю.В. Астахов // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 11. — С. 128–137.

ТИХОМИРОВ Виктор Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: twm@stu.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

АСТАХОВ Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
САМОШКИН Антон Сергеевич, асп.; E-mail: ASSamoshkin.stu@gmail.com
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 14.01.15

Tikhomirov Victor Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: twm@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Astakhov Yuryi Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Samoshkin Anton Sergeevich, post-graduate student; E-mail: ASSamoshkin.stu@gmail.com, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

THE MODELING OF ELASTIC-PLASTIC INTERACTION FIBER REINFORCEMENT WITH CONCRETE

The analyses bond-sleep relation has been resolved for many variety ways today. The very hard to set exact stress-strain distribution for bond-slip relation in contact zone, therefore the solution have phenomenological type and make on the basis of experiments.

In the paper give new way for analyses contact interaction of the reinforced with concrete. The method based on great number previous experimental works. In the research have given pull-out test with central reinforced specimen and new capacity for analyze nonlinear straining of bond layers. The «Technical bond-sleep theory» by M.M. Kholmyansky, perfect yield bond layer and Mises yield criterion give new applying for reserve and analyses contact interaction.

The comparison of received result with experimental data for high-tensile wire and basaltic fiber theirs good equivalence when operational loads has been indicated.

Key words: interaction fiber reinforcement with concrete, perfect yield, mechanical parameters of bond layers, model of numerical analysis.

REFERENCES

1. Kholmyanskiy, M.M. Concrete and reinforced concrete. The deformability and strength [Text] / M.M. Kholmyanskiy. — M. : Stroyizdat, 1997. — 569 p.
2. Tikhomirov, V.M. The experimental-numerical modeling of interaction steel and basaltic fiber reinforcement with concrete [Text] / V.M. Tikhomirov, Yu.V. Astakhov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 11. — P. 128–137.

УДК 691.001

А.Н. ХАРХАРДИН, В.В. СТРОКОВА, В.В. НЕЛЮБОВА

ДИСКРЕТНАЯ ТОПОЛОГИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОСТЫХ ВЕЩЕСТВ*

Приводятся полученные нами результаты по развитию науки дискретной топологии и приложению ее основных закономерностей к дисперсным материалам, микро- и наночастицам с необычным проявлением свойств, к топологическим и, в частности, фазовым переходам и вытекающих из них следствий и предсказаний.

Ключевые слова: дискретная топология, дисперсные (зернистые) материалы, критические состояния, кластеры и наночастицы, топологические переходы.

Единство непрерывного и дискретного в окружающем нас мире, излучения и вещества, жидкого и твердого его состояния приводит к необходимости рассмотрения изучаемых объектов в единстве геометрии и физики — дискретной топологии. Дискретная топология изучает как кристаллические упорядоченные, так и неупорядоченные структуры и физические состояния объектов материального мира, естественным образом или искусственно наделенных дискретностью на различном масштабном уровне корпускулярных образований от атома до космических тел. Математическим аппаратом ее исследований являются полученные нами основные [1, 2] и новые закономерности дискретных систем, проявляющих корпускулярно-волновой дуализм.

Уравнение фазотопологических переходов (ФТП):

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

где η_1 — плотность упаковки элементов дискретности излучения или вещества,

отсюда константа Грюнейзена для многих металлов:

$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta = \eta_1 / 3k \ln[2000(\sqrt{3}-1)^9 \eta_1^5], k \geq 1.$$

Полученное рекуррентное уравнение (1) позволяет построить схемы уровней ФТП, физические состояния, определяемые по плотности упаковки частиц дисперсных материалов либо атомов кристаллических веществ (металлов): твердое в тройной точке, твердое вблизи температуры плавления, жидкое и критическое. Уровни топологического (фазового) состояния (ФТС) вещества в виде тетраэдров примыкают друг к другу через точки перегретого и переохлажденного состояния. Они состоят из трех подуровней: однородного плотного, неоднородного плотного с критической плотностью упаковки элементов дискретности и рыхлого состояния вещества (рис. 1–3).

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

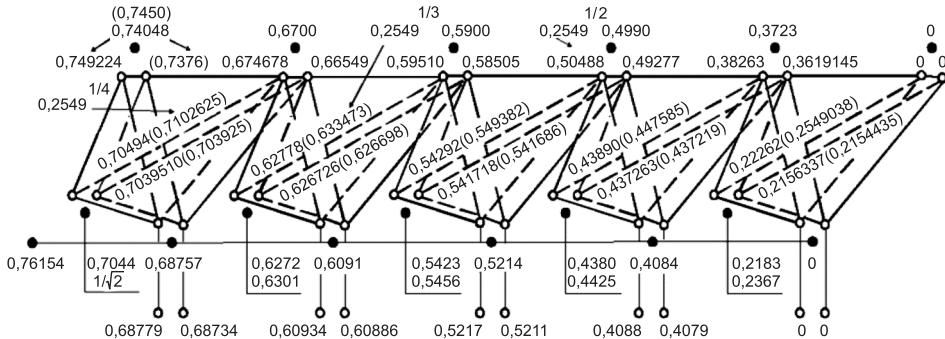


Рис. 1. Построение схемы уравнений ФТС веществ, имеющих гексагональную плотноупакованную (ГПУ) кристаллическую решетку

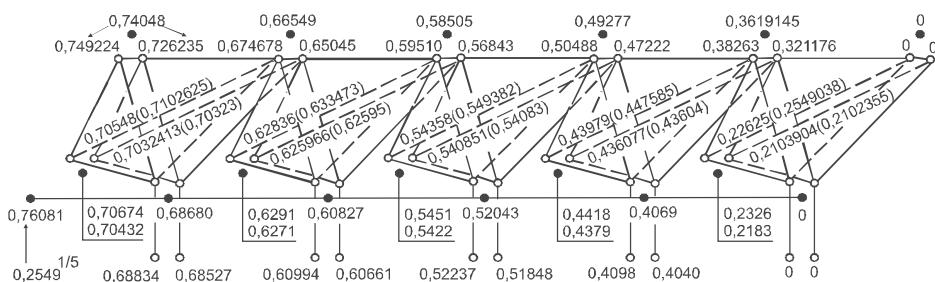


Рис. 2. Схема уровней ФТС веществ, имеющих гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку

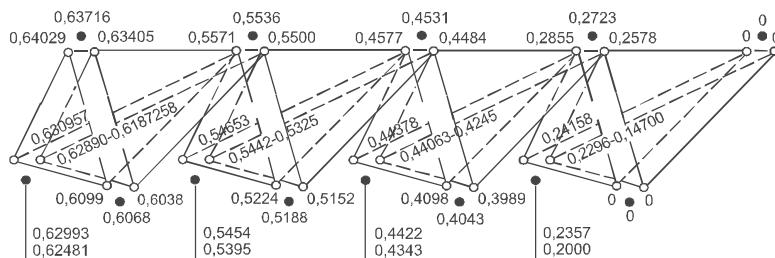


Рис. 3. Схема уровней фазотопологических состояний (ФТС) неупорядоченных систем

Изменение информационной энтропии при топологических (фазовых) переходах [3], при $\eta_1 = 0,64029..0,64976$ имеем

$$\Delta S = k_B \ln \left[\frac{\eta_1}{3k \ln [2000(\sqrt{3}-1)^9 \eta_1^5]} \right] =$$

$$= k_B \ln \left\{ \frac{0,6403..0,64976}{3 \ln [120,754(0,6403..0,64976)^5]} \right\} \approx -2,5k_B,$$

где k_B — постоянная Больцмана, $k \geq 1$.

Индекс амплитуды плотности упаковки элементов дискретности вещества:

$$C_3 = \eta_{c2} / k_1^n, \text{ при } n = 0 \quad C_3 = \eta_{c2} \leq \eta_1^n \approx 0,1,$$

$n = (15 \dots 23)/3$ — зависит от плотности упаковки элементов дискретности: для систематических укладок атомов в кристаллах при $0,6802 \leq \eta_1 \leq 0,7405$ ($18 \leq n \leq 23$) / 3, а для случайных упаковок частиц при $0,63096 \leq \eta_1 \leq 0,64976$ ($15 \leq n \leq 16$) / 3.

$$C_3 = \eta_1^{23/3} = 0,74048^{23/3} = \eta_{c2} = 0,1 \text{ и } C_3 = 0,2549 \cdot \eta_1^m,$$

где $m = 2$ — для случайных упаковок и $m = (7 \dots 9,3)/3$ — для систематических укладок элементов дискретности вещества (атомов).

$$C_3 \leq (0,64658736 \dots 0,63347284 \dots 0,63095734)^5 \leq 0,113015 \dots 0,102009 \dots 0,1,$$

$$C_3 = \eta_1^3 \eta_1^2 = 0,6334728^3 \cdot 0,6465874^2 = 0,2542 \cdot 0,418075 = 0,1062768,$$

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

$$C_3 = \eta_{c1} \eta_1^2 = 0,2549 \cdot 0,6465874^2 = 0,6402894^5 = 0,10657,$$

$$C_3 = \eta_{c1} \eta_1^2 = 0,74048^5 \cdot 0,74048^{8/3} = 0,74048^{23/3} = 0,100,$$

$$C_3 = \eta_{c1} \eta_1^2 = 0,2549 \cdot 0,74048^{3,1} = 0,100.$$

Перколяционный уровень протекания [4]:

$$f_y = \eta_{c1} \eta_1 \leq \eta_1^4 = 0,2549 \cdot 0,64976 = 0,1656,$$

$$f_y = \eta_{c1} \eta_1 \leq \eta_1^4 = 0,2549 \cdot 0,640289 = 0,1632,$$

$$f_y = \eta_{c1} \eta_1 = \eta_1^4 = 0,2549 \cdot 0,6340528 = 0,6340528^4 = 0,1616,$$

$$f_y \leq \eta_1^4 \leq (0,6340528 \dots 0,6402894)^4 = 0,161622 \dots 0,168076,$$

$$f_y = \eta_{c1} \eta_1 = \eta_1^5 \eta_1 = 0,74048^5 \cdot 0,74048 = 0,22262 \cdot 0,74048 = 0,16485.$$

Распределение частиц в смеси при высокоплотной случайной упаковке:

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

Здесь D , η_1 — средний размер частиц (обычно $D \leq 40$ мм) выбираемой наиболее крупной узкой фракции зернистого сырья и плотность их упаковки соответственно.

Расход (массовая часть) каждой фракции в смеси вычисляется по формуле

$$G_i = (1 - \sigma_{n-1}) \frac{\eta_n}{\sigma_{n-1}} \beta_n \sum_{i=1}^{n-1} G_i, \quad (3)$$

где σ_{n-1} — плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из $n - 1$ фракций;

η_n — плотность упаковки зерен каждой узкой фракции, определяется экспериментально, $\eta_1 = \sigma_1$, $G_1 = 100$ мас. ч.;

β_n — коэффициент разъединения зерен в смеси, состоящей из $n - 1$ фракций, и рационального заполнения пустот зернами вводимой очередной мелкой фракции.

Выражения для β_n имеют вид:

$$1 \leq \beta_n \leq (\sigma_{n-1} / \eta_n)^{\frac{1}{n-1}} \text{ — для подвижных зернистых смесей;}$$

$\beta_n = (\sigma_{n-1} / \eta_n)^{m-n}$ — для умеренно подвижных смесей, $m \leq 3$ — постоянная величина:

$m = 0; 1; 2; 3$ и $m = n$ — для снижения расхода мелких фракций, при $m = n$ $\beta_n = 1$;

$(\sigma_{n-1} / \eta_n)^{1-n} \leq \beta_n \leq (\sigma_{n-1} / \eta_n)^{2-n}$ — для жестких зернистых смесей при минимальном расходе (в массовых частях) мелких фракций (см. таблицу).

Составы в массовых частях высокоплотных зернистых смесей

Ситовые фракции, мм	$\beta_n = 1$	$\beta_n = \left(\frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$	$\beta_n = \left(\frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n} \right)^{3-n}$	$\beta_n = \left(\frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n} \right)^{1-n}$	$\beta_n = \left(\frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n} \right)^{2-n}$
40–20	100	100	100	100	100
20–10	43	42	42	44	43
10–5	52	53	50	49	50
3,5–1,5	57	59	51	42	46
1,5–0,75	57	60	38	26	32
0,75–0,31	50	53	22	22	17
0,16–0,06	39	42	8	4	6
В с е г о	398	409	311	287	294
Плотность упаковки, σ_n	0,890	0,884	0,846	0,838	0,840

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

теоретическая (каноническая) плотность произвольной упаковки сферических частиц при отсутствии сил трения и их взаимодействия, первая критическая (каноническая) плотность упаковки взаимодействующих частиц при их агрегировании в процессе сухого механического измельчения и вторая критическая при мокром способе измельчения материалов соответственно:

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

минимальный линейный размер аппарата с зернистым материалом при отсутствии пристеночного влияния [4] на плотность упаковки его частиц:

$$D \geq [10\eta(\sqrt{3}-1)^3]^3 d \geq 60,38\eta^3 d (\Phi_{ap} / \Phi_q), \quad (4)$$

где $\eta(\sigma_n)$, d — плотность упаковки частиц в смеси и средний их размер;

Φ_{ap}, Φ_q — фактор формы аппарата и частиц, $\Phi \geq 1$;

наибольшая плотность случайной (произвольной) упаковки сферических частиц в аппарате сферической формы

$$\eta_1 = (\eta_{c1}\eta_{1t}^2)^{0,2} = (0,2549 \cdot 0,64976^2)^{0,2} = 0,1076172^{0,2} = 0,6402894;$$

стандартная плотность случайной упаковки частиц в плотном зернистом (дисперсном) слое

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

Покажем применимость уравнения (1) к расчету характеристик конденсированного состояния вещества, наделенного атомной дискретностью.

Необходимый ряд значений η_1 рассчитаем по уравнению (1) в обратной последовательности от $\eta_{c1} = 1 / 10(\sqrt{3} - 1)^3 = 0,25490381$ методом последовательного приближения до получаемой величины $\eta_1 = 0,633472840524149$:

$$\begin{aligned}\eta_1 &= 1 / 10(\sqrt{3} - 1)^3 = 0,254903810567665797 \xrightarrow{(1)} \\ &\rightarrow 0,447584998986761523 \rightarrow 0,549381930184422884 \rightarrow \\ &\rightarrow 0,63347284052414922.\end{aligned}$$

Полученная величина $\eta_1 = 0,63347284$ определяет собственный объем одного грамм-моля атомов гелия в виде

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

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

При $V_c = 4,5804344 \text{ см}^3$ радиус атома гелия $r = 1,2199558 \text{ \AA} = 0,122 \text{ нм}$. Экспериментальный результат $r = 0,122 \text{ нм}$.

Плотность упаковки атомов гелия при критическом состоянии:

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

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

$$V_{kp} = 4,58043 \text{ см}^3 / \text{моль} / 0,07969 = 54,474 \text{ см}^3 / \text{моль}.$$

Экспериментальный результат — $V_{kp} = 54,474 \text{ см}^3 / \text{моль}$.

Средняя плотность случайной упаковки частиц в плотном зернистом (монодисперсном) слое:

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

Плотность случайной упаковки частиц в рыхлом дисперсном слое:

$$\eta_1 \leq 10(\sqrt{3} - 1)^9 \leq 0,6037693.$$

Критические плотности случайной упаковки частиц в дисперсном и тонкодисперсном слое:

$$\eta_{c1} \leq 10(\sqrt{3} - 1)^{12} \leq 0,23686, \quad \eta_{c2} \leq 10(\sqrt{3} - 1)^{15} \leq 0,09292.$$

Минимальные плотности случайной упаковки ультрадисперсных частиц в воздушной среде:

$$\eta_{c2} \leq 10(\sqrt{3} - 1)^{18} \leq 0,03645, \quad \eta_{c1} \leq 10(\sqrt{3} - 1)^{21} \leq 0,0143 \text{ и т.д.}$$

либо в общем виде для дискретных значений η_1 дисперсных материалов:

$$\eta_1 = 10(\sqrt{3} - 1)^{3(3+n)} = 10 \cdot 0,3923^{3+n}.$$

Размер корпускулярных образований вещества — элементов их дискретности из закономерности (2) при $n' = 3$, а $\eta_{c1} = \eta_1^3 = 0,2549038$ получим

$$D = (10\eta_1 / 10\eta_{c1})^{mn/3} d / \eta_s^{1/9} = (\eta_1 / \eta_1^{n'})^n d / \eta_s = (3,923\eta_1)^n d / \eta_1^{1/9}, \quad (5)$$

где $\eta_s = \eta_1^{1/9...1/3}$ — плотность упаковки атомов в поверхности поперечного сечения кристаллических кластерных образований и при случайной их упаковке соответственно $n' = 5...3...1, 0$.

Для различных упаковок из выражения (5) получим:

для плотнейших — $\eta_1 \leq 0,74048, D \leq 2,905^n d / \eta_s \leq 3^n d$,

для икосаэдрической — $\eta_1 \leq 0,68834, D \leq 2,70^n d / \eta_s \leq 2,70^n d / 0,9069^{3/4} \leq 2,905^n d$,

для случайной — $\eta_1 \leq 0,64976, D \leq 2,549^n d / \eta_1^{1/3}$,

(произвольной) — $\eta_1 \leq 0,64029, D \leq 2,512^n d / \eta_1^{1/3}$,

где $\eta_s = (\pi / 2\sqrt{3})^{1/3} = 0,9069^{1/3} = 0,968 \approx \eta_1^{1/9} = 0,74048^{1/9} = 0,9672$.

Из частных выражений (3) при $\eta_1 = 0,68834, n = 1$ и $\eta_s = \eta_1^{3/4} = 0,9293$ соответственно следует, что икосаэдрическая атомная агрегация (кластер) состоит из одного поверхностного слоя атомов. При отсутствии центрального атома размер центральной поры равен $0,9d$, что соответствует размеру центральной поры в икосаэдрической упаковке атомов, контактирующих между собой. Так закладываются вакансии в кристаллах и потенциальная возможность роста сферических агрегаций.

Найдем размер кластерных образований и наночастиц, при котором проявляются их необычные свойства [6]. Запишем выражение (5) в следующем виде:

$$D = (3,923\eta_1)^{3n} d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^3)^n d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_{c1})^n d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^{n'})^n d / \eta_1^{1/9}, \quad (6)$$

$$D = (60,38\eta_{c2})^n d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^{n''})^n d / \eta_1^{1/9}, \quad (7)$$

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

Координационное число элементов дискретности: для случайных упаковок и систематических укладок простейшие выражения имеют вид соответственно:

$$Z = 8,5\eta_1 / 0,6340528 = 13,40\eta_1, \quad (8)$$

$$Z = 8,8\eta_1 / 0,6402894 = 13,74\eta_1, \quad (9)$$

$$Z = 12\eta_1 / 0,74048 = 16,20\eta_1. \quad (10)$$

В 1959 г. Дж. Бернал получил такой же результат для одинаковых пластилиновых шариков, попудренных мелом и спрессованных в сплошной ком ($\eta_1 = 1$). У получившихся из спрессованных шариков фигур в среднем было 13,3 грани, т.е. 13,3 касания центрального шарика с контактируемыми с ним окружающими его шариками при случайной их упаковке [7].

Потенциал парного взаимодействия микрочастиц при критическом состоянии дисперсного материала, получаемого сухим способом измельчения:

$$\varphi = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^4 - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^2 \right], \quad (11)$$

либо

$$\varphi = 4\epsilon (\eta^{4/3} - \eta^{2/3}) = 4\epsilon \eta^{2/3} (\eta^{2/3} - 1), \quad (12)$$

где σ — средний диаметр монодисперсных частиц, r — среднее расстояние между взаимодействующими частицами, определяется по плотности упаковки рыхлого, неуплотненного дисперсного слоя.

Решения уравнения (11) и получаемого из него уравнения для сил взаимодействия частиц, как первая производная $d\varphi / dr$, дают величины первой $\eta_{c1} \leq 0,64029^{10/3}$ и второй $\eta_{c2} \leq 0,64029^5$ критической плотности случайной (произвольной) упаковки микрочастиц.

Запишем уравнения (4), (6) для излучения и вещества в слабой зависимости от η_i :

$$D / \eta_i^n d = 60,38^n = 1; 60,38; 3645,37; 220096,456; 13288748.... \quad (13)$$

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

$$D = 60,38 \eta_i^n d. \quad (14)$$

Третья константа уравнения (11) входит в выражение для определения величины постоянной Планка. Если отношение h / \bar{e} представим в виде произведения плотности упаковок элементов дискретности псевдотвердого, псевдожидкого и критического состояния неупорядоченных систем, величины которых рассчитаны по уравнению фазотопологических переходов (ФТП) [1], то

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

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

$$h / \bar{e} = 220096 \cdot (0,54938193 \cdot 0,447584999 \cdot 0,25490381) k / C, \quad (15)$$

где C — коэффициент размерности, $C = 1 \cdot 10^{-21}$ эрг · с / ед. CGSE. При $k = 0,9999671818564$ — величина получена при восхождении по уравнению (1) от $\eta_i = 0,640289423105$ до 1, имеем

$$h / \bar{e} = 1,379555798505 \cdot 10^4 \cdot 0,9999671818564 \cdot 10^{-21} \text{ эрг} \cdot \text{с} / \text{ед. CGSE} = \\ = \mathbf{1,37951052404459324} \cdot \mathbf{10^{-17}} \text{ эрг} \cdot \text{с} / \text{ед. CGSE}.$$

Согласно современным данным

$$h / \bar{e} = 6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{ эрг} \cdot \text{с} / (1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,1 \text{ с} \times \\ \times 2,99792458 \cdot 10^{10} \text{ см} / \text{с}) = 1,379510132183684 \cdot 10^{-17} \text{ эрг} \cdot \text{с} / \text{ед. CGSE},$$

где $\bar{e} = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,1 \text{ с} \cdot 2,99792458 \cdot 10^{10} \text{ см} / \text{с} = \\ = 4,80320427187535 \cdot 10^{-10}$ ед. CGSE;

$2,99792458 \cdot 10^{10} \text{ см} / \text{с}$ — современная величина скорости света.

Вторая константа уравнения (13) представляет собой длину волны границы серии Бальмера видимой области линейчатого спектра поглощения одноатомных газов:

$$\lambda_B = \frac{1 \text{ \AA}}{(0,1 \cdot 0,64976)^3 k^2} = \frac{100 \text{ \AA}}{0,2549 \cdot 0,64028942^5 k^2} = 3645,6(3645,6) \text{ \AA};$$

$$\begin{aligned} \lambda_B &= [10(\sqrt{3}-1)^3]^6 / k^2 = 60,3769286^2 \text{ \AA} / k^2 = \\ &= 3645,37 \text{ \AA} / 0,9999671818^2 = 3645,6 \text{ \AA}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_\infty &= (0,640326743^5 \cdot 4k_0'^{2/3}) / (\sqrt{3}-1)^3 \cdot 10^{-5} \text{ см} = \\ &= 1,09677585(1,096775) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}. \end{aligned}$$

При этом

$$\lambda_B = 4 / R_\infty = 4 / 1,09677585 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} = 3645,0533 \text{ \AA}.$$

Для получения квантово-механической величины выражение для λ_B записывается в виде

$$\lambda_B = 1000 \text{ \AA} / (0,64976^3 / k_0'^{2/3}) = 3647,053(3647,0533) \text{ \AA},$$

где $k_0'^{2/3} = \{[1 + (\sqrt{3}-1)^6] / (2\sqrt{3}/3)\}^{2/3} = 0,99930939^{2/3} = 0,99953954$.

Топологическая константа Ридберга для атома водорода:

$$R_\infty^H = 4 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \cdot 0,6497595264^3 / k^{2552} = 1,0973731554282 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1},$$

где показатель степени при k равен: $10\eta_{c2} / k_0^{\eta_1^{10/3}} = 2,549 / 0,9948452^{0,22625} = 2,5520204$;

k_0 — расходимость кривизны топологического пространства с евклидовым на уровне размера просвета, образуемого между тремя соприкасающимися шарами, $k_0 = (\sqrt{3}-1)^6 / (2\sqrt{3}/3-1) = 0,994845223$; $\eta_1 = 0,6402894$.

По данным «КОДАТА-2006» $R_\infty^H = 1,09737315685 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ [8].

Для ультрафиолетовой области спектра поглощения (серия Лаймана):

$$\lambda_L = 1000 \text{ \AA} / (0,1 \cdot 0,64976)^{10/3} k_0 = 911,456(911,27) \text{ \AA}$$

либо

$$\lambda_L = 1 / R_\infty^H = 1 / (1,0973731554282 \dots 1,09737315568527) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} = 911,267 \text{ \AA}.$$

Для инфракрасной области спектра поглощения (серия Пфундта):

$$\lambda_n = 1000 \text{ \AA} / [1 / 10(\sqrt{3}-1)^2] 0,64976^{10/3} k_0^2 = 22789,2(22782) \text{ \AA}.$$

Эти выводы подтверждают корпускулярно-волновой дуализм дискретных систем. В скобках приведены данные, полученные на основе спектроскопических измерений и квантово-механических расчетов.

Таким образом, полученные первоначальные теоретические результаты раскрывают практические возможности дискретной топологии по исследованию дисперсных материалов, простых кристаллических и необычно конденсированных веществ в зависимости от размера элементов их дискретности: атома, кластера, нано- и микрочастиц и их агрегаций, макрочастиц и излучения. Дискретная топология может внести свой вклад в изучение структурной топологии излучения и вещества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных материалов [Текст] / А.Н. Хархардин. — Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. — 288 с.
2. Сулейманова, Л.А. Топологические свойства полидисперсных композиционных вяжущих для неавтоклавных ячеистых бетонов [Текст] / Л.А. Сулейманова, В.С. Лесовик, А.Н. Хархардин // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. — 2013. — № 2. — С. 46–50.
3. Займан, Дж. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем [Текст] / Дж. Займан; пер. с англ.— М. : Мир, 1982. — 592 с.
4. Эфрос, А.Л. Физика и геометрия беспорядка [Текст] / А.Л. Эфрос. — М. : Наука, 1982. — 176 с.
5. Аэрлов, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем [Текст] / М.Э. Аэрлов, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. — Л. : Химия, 1979. — С. 176.
6. Чижик, С.Л. Размерные явления при фазовом переходе жидкость — кристалл [Текст] / С.Л. Чижик // Журн. эксперимент. и теорет. физики. — 1985. — Т. 88, вып. 5. — С. 1706–1717.
7. Левитин, К.Е. Геометрическая рапсодия [Текст] / К.Е. Левитин. — М. : Знание, 1984. — 176 с.
8. Каршенбойм, С.Г. Новые рекомендованные значения фундаментальных физических постоянных (КОДАТА-2006) [Текст] / С.Г. Каршенбойм // УФН. — 2008. — Т. 178, № 10. — С. 1057–1062.

ХАРХАРДИН Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
СТРОКОВА Валерия Валерьевна, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
НЕЛЮБОВА Виктория Викторовна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 19.01.15

Kharkhardin Anatoliy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Strokova Valeria Valerievna, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Nelyubova Viktoriya Viktorovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

DISCRETE TOPOLOGY DISPERSED MATERIALS AND ELEMENTARY SUBSTANCES

The paper describes the results on the development of science discrete topology and its application its basic laws to the disperse materials, micro- and nanoparticles with an unusual display of properties, to topological and, in particular, phase transitions and their consequences and predictions.

Key words: discrete topology, disperse (granular) materials, critical states, clusters and nanoparticles, topological transitions.

REFERENCES

1. Kharkhardin, A.N. Structural topology of dispersed materials [Text] / A.N. Kharkhardin. — Belgorod : BSTU, 2011. — 288 p.
 2. Suleimanova, L.A. The topological properties of polydisperse composite binders for nonautoclave cellular concretes [Text] / L.A. Suleimanova, V.S. Lesovik, A.N. Kharkhardin // Bulletin of Belgorod Shukhov State Technological University. — 2013. — N 2. — P. 46–50.
 3. Zajman, J. Disorder models. The theoretical physics of homogeneously disorder systems [Text] / J. Zajman; transl. from Engl. — M. : Publishing house «The world», 1982. — 592 p.
 4. Efros, A.L. Physics and Geometry of Disorder [Text] / A.L. Efros. — M. : Publishing house «Science», 1982. — 176 p.
 5. Aerov, M.E. Apparatus with a stationary granular layer [Text] / M.E. Aerov, O.M. Todes, D.A. Narinskiy. — L. : Chemistry, 1979. — P. 176.
 6. Chizik, S.L. Dimensional effects at the phase transition liquid — crystal [Text] / S.L. Chizik // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 1985. — Vol. 88, Issue 5. — P. 1706–1717.
 7. Levitin, K.E. Geometric rhapsody [Text] / K.E. Levitin. — M. : Knowledge, 1984. — 176 p.
 8. Karshenboim, S.G. New recommended values of the fundamental physical constants (CODATA-2006) [Text] / S.G. Karshenboim // Advances of physical sciences (YFN). — 2008. — Vol. 178, N 10. — P. 1057–1062.
-

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫВНЫХ ВОД СТАНЦИЙ ВОДОПОДГОТОВКИ

В НГАСУ (Сибстрин) разработана технология осветления и повторного использования промывных вод фильтровальных сооружений станций водоподготовки, включающая обработку воды коагулянтом, отстаивание в отстойнике-накопителе, осветление в реакторе-осветлителе, сбор и хранение в резервуаре очищенной промывной воды и использование в замкнутом цикле промывки фильтров. Применение в технологии разработанного нами комплексного коагулянта СК-1 из смеси водных растворов сульфата (СА) и оксихлорида алюминия (ОХА) в отношении доз 2:1 по оксиду алюминия (Al_2O_3) повышает качество очищаемой воды и снижает объем образующегося осадка. Последующее осветление на реакторе-осветлителе обеспечивает высокое качество осветленной промывной воды для промывки фильтровальных сооружений станций водоподготовки.

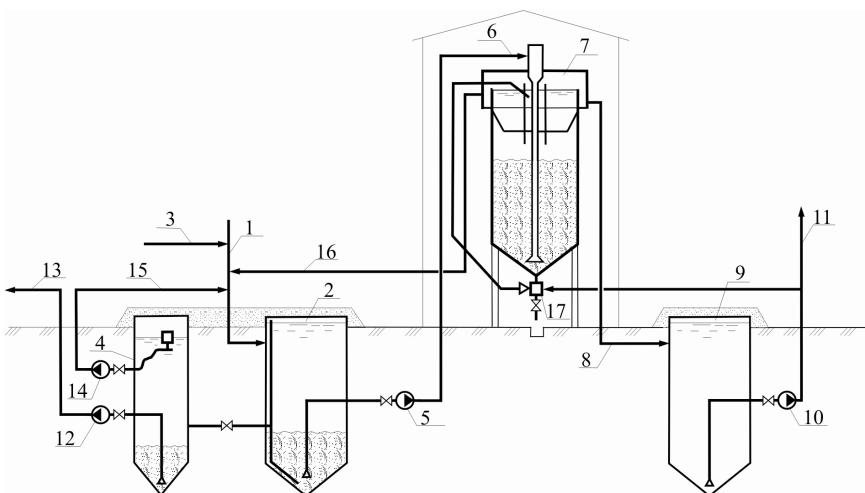


Рис. 1. Технологическая схема очистки и утилизации промывных вод
1 — трубопровод сброса отработанной промывной воды; 2 — отстойник-накопитель; 3 — трубопровод ввода коагулянта; 4 — уплотнитель; 5 — подкачивающий насос; 6 — подающий трубопровод отстоянной воды; 7 — реактор-осветлитель; 8 — трубопровод отведения очищенной промывной воды; 9 — резервуар очищенной промывной воды; 10 — промывной насос; 11 — трубопровод подачи промывной воды на промывку фильтров; 12 — насос перекачки осадка; 13 — трубопровод подачи осадка на обезвоживание; 14 — насос перекачки надиловой воды; 15 — трубопровод подачи надиловой воды в отстойник-накопитель; 16 — трубопровод отведения промывной воды из реактора-осветлителя; 17 — гидроэлеватор

Разработчики: Сколубович Ю.Л., д-р техн. наук, профессор;
Войтов Е.Л., д-р техн. наук, доцент

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: ntio@sibstrin.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел./факс: (383) 266-28-89

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
 - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список;

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и **e-mail** авторов;

— **название статьи на английском языке**;

— **аннотация на английском языке**;

— **ключевые слова на английском языке**;

— **библиографический список на английском языке**.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. **Русские и греческие буквы** и индексы, а также **цифры**, **аббревиатуры** и **стандартные функции** (Re, cos и др.) набираются **прямым шрифтом**. **Латинские буквы** набирать **курсивом**. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2015 г. — из расчета 900 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публикавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

**ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»**

Журнал имеет разделы

**Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений**

Строительные материалы и изделия

Экономика и организация строительства

Автоматизация и технология строительного производства

Гидротехническое строительство

Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов

Строительные и дорожные машины

Научные проблемы архитектуры и экологии

Научно-методический

В лабораториях вузов

Внедрение научных достижений в производство

Научная информация

**На 1-е полугодие 2015 г.
каталожная цена за 6 месяцев — 3000 р.
цена отдельного номера — 500 р.**

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 2 (674) 2015

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*