

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

№ 3 (699)
Март 2017 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.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)
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. Правдинец, 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 28.03.17. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 9,45+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 4646

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Межидов В.Х., Абдуллаев А.М. Особенности формирования зерен портландцемента при совместном помоле клинкера и гипсового камня 5
Абдрахимов В.З., Лобачев Д.А., Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С. Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих, нанотехнологенных высокоглиноземистых и щелочно-земельных отходов 14
Береговой В.А., Сандин Е.В. Использование технологических масс на основе химически активированного природного сырья в производстве ячеистого стекла 24

- Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А. Исследование структуры ПВХ материалов, поверхностно усиленных полизицианатом 31

- Новиков Н.С., Жжонных А.М. Влияние теплофизических свойств пустот на теплопроводность мелкокштучных изделий 38

- ### САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА
- Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А.

Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу. Часть 3. Система сквозного расчета многоступенчатой пыле- и газоочистки дымовых газов котельных и ТЭС	46
Рохлецова Т.Л., Кривова Н.С., Кияница Л.А. Влияние реконструкции оконных проемов на величину удельной отопительной характеристики типовых панельных зданий	54
Китаев Д.Н., Хузин В.Ю., Щербаков В.И., Щукина Т.В. Температурный режим в магистральных стальных трубопроводах горячего водоснабжения при нарушениях циркуляции	62
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Гладких В.А., Королев Е.В. Усталостная долговечность сероасфальтобетона	69
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Богданов В.С., Богданов Н.Э., Гаврунов А.Ю., Ельцов М.Ю., Карагодина К.И. Кинематика измельчения материала в вибрационной мельнице	76
Мукашев А.М., Абрамчук С.И., Пуговкин А.В., Бойченко А.В., Купреков С.В., Абушкин Д.В. Аппаратно-программный комплекс учета потребляемой тепловой энергии	84
Фролова В.А., Адегова Л.А., Раевская Г.А. Оценка влияния процессов деформирования на усталостную долговечность алюминиевых сплавов	91
Чапаев Д.Б., Рафальская Т.А. Математическое описание зависимости растворимости магнетита от температуры и водородного показателя теплосетевой воды для применения в расчете интенсивности внутреннего коррозионного износа	98

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

No. 3 (699)
March 2017

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

Editorial Board:

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

- Mezhidov V.Kh., Abdulyayev A.M.** Peculiarities of formation of portlandcement potentials by joint printing of clinker and gypsum stone 5
- Abdrakhimov V.Z., Lobachev D.A., Kayrakbaev A.K., Abdrakhimova E.S.** Heat-resistant composite based on phosphate binders, nanotechnology high-alumina and alkaline earth waste 14
- Beregovoy V.A., Snadin E.V.** The use of technological materials based on chemically activated natural raw materials in the production of cellular glass ... 24
- Islamov A.M., Fakhrutdinova V.Kh., Abdrakhmanova L.A.** Study of the structure PVC materials which are surface modified by the polyisocyanate 31
- Novikov N.S., Zhzhonyh A.M.** The impact of thermo-physical properties of voids on the thermal conductivity of small-piece articles 38

SANITARY ENGINEERING

- Shilyaev M.I., Khromova E.M., Doroshkina A.A.**

Calculation of multi-stage inertial-condensation-absorption of dust and gas purification of industrial emissions into the atmosphere. Part 3. Through a multi-stage system for calculating the flue gas dust and gas cleaning boilers and thermal power plants	46
Rokhletsova T.L., Krivova N.S., Kiyanitsa L.A. Influence of reconstruction of window presses on a value of specific heating characteristics of typical panel buildings	54
Kitayev D.N., Khuzin V.Yu., Shcherbakov V.I., Shchukina T.V. Temperature mode in steel pipelines of hot water supply in circulation disturbances	62
CONSTRUCTION OF MOTOR ROAD AND BRIDGES	
Gladkikh V.A., Korolev E.V. The fatigue life of sulfur extended asphalt	69
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Bogdanov V.S., Bogdanov N.E., Gavrunov A.Yu., Yeltsov M.Yu., Karagodina K.I. Kinematics of milling the material in a vibration mill	76
Mukashev A.M., Abramchuk S.I., Pugovkin A.V., Boychenko A.V., Kuprevich S.V., Abushkin D.V. Hardware and software complex for consuming heat energy	84
Frolova V.A., Adegova L.A., Rayevskaya G.A. Influence during deformation fatigue life of aluminum alloys	91
Chapaev D.B., Rafalskaya T.A. Mathematical description of the dependence of magnetite solubility on temperature and the hydrogen index of heat network water for use in calculating the intensity of internal corrosive wear	98

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.542 : 666.94.052

В.Х. МЕЖИДОВ, А.М. АБДУЛЛАЕВ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗЕРЕН ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ПРИ СОВМЕСТНОМ ПОМОЛЕ КЛИНКЕРА И ГИПСОВОГО КАМНЯ

Исследованы морфология и химический состав поверхностей различных зерен заводского портландцемента и экспериментальных помолов клинкера с природным гипсовым камнем. Показано, что при совместном помоле клинкера и гипса вторая мягкая компонента раньше и тоньше измельчается и прилипает на поверхность зерен клинкера, образуя на них островки, пленки и слои различной толщины. Эти мягкие и вязкие агрегаты гипса снижают силы трения и столкновения частиц в процессе помола, что приводит к уменьшению интенсивности измельчения и связанный с ней удельной поверхности (S). При этом кривые изменения удельной поверхности клинкера и клинкера с 8 % гипса в зависимости от времени формируют область в интервале $S = 2000–4000 \text{ см}^2/\text{г}$, которая указывает, что присутствие гипса способно снизить величину S до 20 %. Получена зависимость концентрации гипса в различных фракциях зерен от продолжительности помола портландцемента в шаровой мельнице.

Ключевые слова: клинкер, гипс, помол, портландцемент, адгезия, наночастицы.

Из литературного обзора следует, что основным способом улучшения качества цемента все еще остается увеличение удельной поверхности [1–5]. Присутствие в цементной шихте легкоразмалываемых компонентов нарушает взаимосвязь между увеличением удельной поверхности цемента и ожидаемой прочностью его камня. Однако гранулометрические исследования частиц гипса в портландцементе (ПЦ) затруднены ввиду того, что они могут быть преимущественно в его тонкодисперсной части и неизвестно как их отделить от частиц клинкера. Поэтому мы обратились к физико-химическим процессам, которые происходят в шаровой мельнице при помоле клинкера и гипса. В работе [6] нами показано, что кривая зависимости удельной поверхности от времени помола для отдельно взятого клинкера всегда выше, чем для клинкера с природным гипсовым камнем (ПГК), и это обусловлено адгезией [6–8]. Разница между этими кривыми оказывается существенно выше в начале помола, когда на единицу поверхности клинкера при-

ходится больше гипса. Эти экспериментальные результаты требуют пересмотра представлений о присутствии гипса в портландцементе в виде самостоятельных частиц, которые, как считают, увеличивают удельную поверхность [1, 2]. В портландцементе не удается обнаружить отдельные частицы ПГК, однако присутствие гипса при помоле клинкера вместо предсказываемого повышения понижает удельную поверхность. Поэтому авторы работы [6] продолжили экспериментальные исследования, чтобы получить новые результаты, более детально раскрывающие роль гипса в технологии помола портландцемента.

Материалы и методы исследования. В опытах использованы портландцемент, клинкер и природный гипсовый камень Чири-Юртовского цементного завода (Чеченская Республика). Лабораторные образцы ПЦ, а также помол клинкера и гипса производили в шаровой мельнице РМ 100 (Германия). Для определения удельной поверхности использовали прибор ПСХ-12СП. Гранулометрический состав фракций цемента и частиц ПГК изучали с помощью сит и анализатора субмикронных частиц HARIBA (Япония). Морфологию поверхностей частиц исследовали растровым электронным микроскопом (РЭМ) Quanta 3D 200i (США). Химический состав компонентов сырья, цемента и его фракций изучали на РЭМ дисперсионно-энергетическим спектрометром EDAX. Интенсивностью рефлексов, полученных на дифрактометре Shimadzu XRD-6000, оценивали структурные изменения ПГК, обусловленные переходом двуводного гипса в полуводный в процессе его помола. При размоле клинкера с гипсом и без гипса образуются частицы без явных внешних морфологических признаков, отличающих их друг от друга. Поэтому в опытах механической нагрузкой раскалывали отдельные частицы портландцемента размерами более 60 мкм, обнажая поверхности, не измененные столкновениями и осаждением на них мелких частиц.

Обсуждение. На рис. 1 показаны цементные зерна различных размеров. Большое зерно (рис. 1) имеет множество выпуклых участков, которые образовались в процессе формирования клинкера. На малых зернах ПЦ они незаметны. На поверхности цементных зерен при соответствующих увеличениях, как правило, удается увидеть отдельные светлые частицы малых размеров, их агрегаты и/или скопления.

На поверхности зерна ПЦ (рис. 1) выделены 6 квадратных участков с различными скоплениями светлых частиц. При этом встречаются и участки, например 6, где не обнаруживаются прилипшие частицы. В табл. 1 представлен химический состав этих участков.

Как видно из рис. 1 и табл. 1, концентрация SO_3 высокая на участках 2 и 4, где в процессе помола в шаровой мельнице клинкера и гипса адгезия частиц этих компонентов создала островки. Низкая концентрация гипса на участках 1, 3, 5, где мало частиц на поверхности. На участке 6 при данном увеличении не удается обнаружить частицы адгезива, однако наличие на этой поверхности 0,3 % концентрации гипса спектрометр EDAX регистрирует надежно. Эти факты указывают на то, что основным материалом, образующим на зернах ПЦ островки и пленки, является гипс, который присутствует в мельнице в тонкодисперсном состоянии [6]. В ПЦ трудно найти отдельные

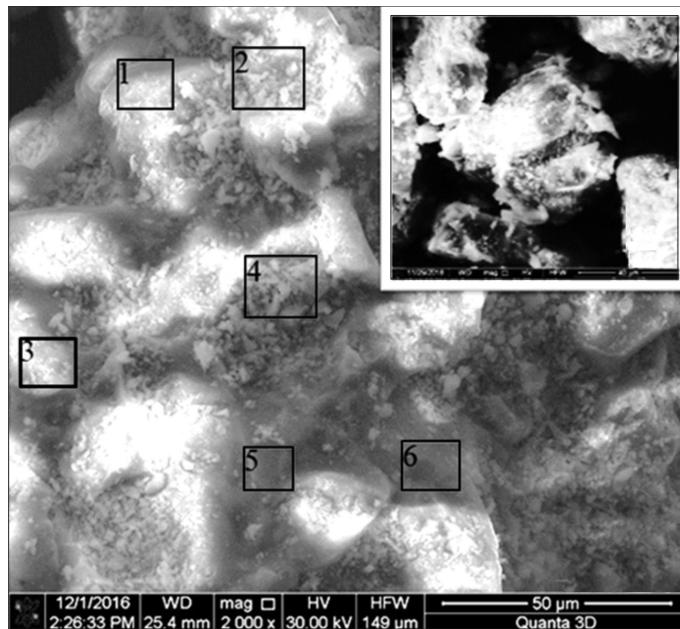


Рис. 1. Поверхности цементных зерен и площадки, для которых определяли химический состав

Таблица 1. Результаты химического анализа различных участков поверхности зерна портландцемента, мас. %

Оксиды	Участки цементного зерна (см. рис. 1)					
	1	2	3	4	5	6
MgO	0,84	0,96	1,13	2,52	2,80	2,91
Al ₂ O ₃	1,04	2,12	0,99	3,68	7,48	4,84
SiO ₂	22,44	16,68	22,88	16,24	19,3	23,26
SO ₃	1,82	5,32	0,59	6,86	0,63	0,30
CaO	72,91	69,71	73,67	66,97	62,52	64,20
Fe ₂ O ₃	0,94	0,95	0,74	2,95	4,81	4,08
K ₂ O	0,16	0,89	0,09	0,78	0,76	0,41
Na ₂ O	—	—	—	—	1,70	—

частицы гипса, так как они имеют высокую дисперсность и поэтому прилипают на зерна клинкера, образуя слои различной толщины.

На рис. 2 цифрами 1 и 4 указаны типичные поверхности зерен портландцемента, а цифрами 2 и 3 те, которые мы обнажили, отломив от них кусочки механической нагрузкой. Поверхности 1 и 4 формировались в заводских условиях при совместном помоле в шаровой мельнице клинкера и гипса, поэтому они покрыты мелкими частицами этих компонентов.

Как видно из рис. 2, гипс может образовать на поверхности зерен клинкера как островки, так и слой, полностью покрывающий частицу. Границы таких слоев видны по периметру обнаженных нами поверхностей.

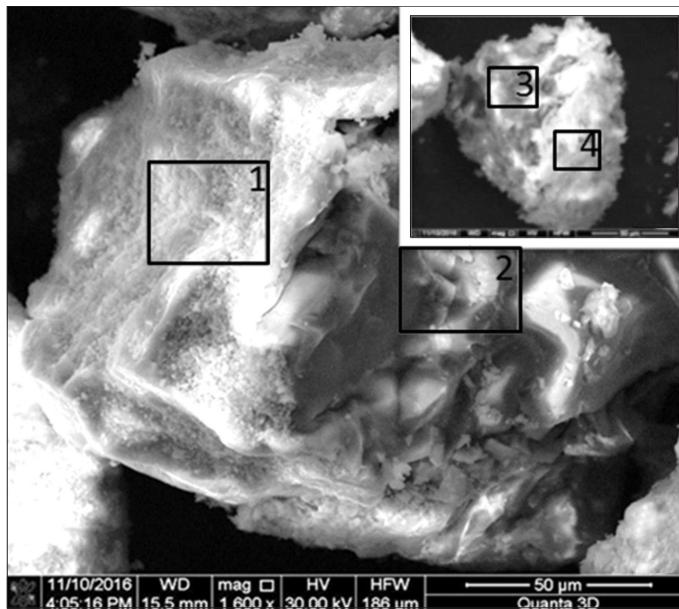


Рис. 2. Внешние поверхности цементных зерен, покрытые слоем гипса 1, 4, и внутренние поверхности 2 и 3, обнаженные механической нагрузкой

В табл. 2 приведен химический состав поверхностей частиц ПЦ, покрытых слоем гипса (1, 4) и обнаженных механическим разрушением и удалением части, покрытой гипсом (2, 3) (рис. 2).

Из табл. 2 видно, что поверхности 2 и 3, полученные в процессе разлома частиц, не содержат SO_3 , а те, что сформировались в шаровой мельнице при помоле, имеют значения концентрации SO_3 , близкие к среднему значению, которое равно 3,6 %.

Таблица 2. Химический состав участков цемента с гипсом и без него, мас. %

Оксиды	Участки на поверхности частиц ПЦ		Участки с поверхностями, обнаженными разрушением	
	1	4	2	3
MgO	1,44	1,62	1,45	1,67
Al_2O_3	4,05	3,98	3,82	3,41
SiO_2	16,97	16,82	16,28	15,43
SO_3	3,51	3,48	0,00	0,00
K_2O	1,30	1,35	1,01	1,30
CaO	67,9	68,79	70,08	69,43
Fe_2O_3	3,84	3,72	4,29	4,05

В процессе совместного помола клинкера и гипса в шаровой мельнице происходит изменение концентрации оксидов основных элементов в фракциях зерен. Для выявления этой зависимости в данной работе делали шесть помолов клинкера с 8 % гипса, отличающихся только продолжительностью,

которая составляла 2, 4, 6, 8, 10 и 12 мин. Из каждого помола получали по три фракции размерами частиц, мкм: более 80, 50–60 и менее 40. Затем определяли химический состав этих фракций. На рис. 3 представлено изменение концентрации SO_3 и SiO_2 от продолжительности помола в трех фракциях с различными размерами зерен.

Из рис. 3 следует, что в начальный период, т. е. через 2 мин помола, концентрация SO_3 в крупных фракциях выше, чем в мелких, так как они дольше взаимодействовали с гипсом и имеют более шероховатые поверхности. С увеличением времени помола кривые снижаются и сближаются.

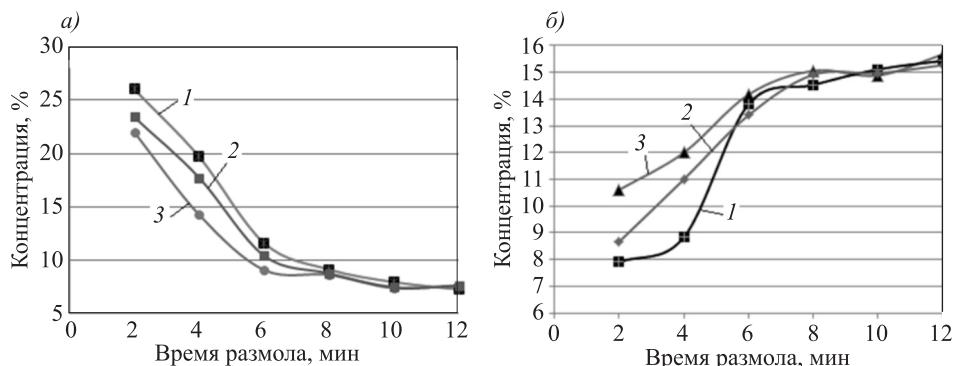


Рис. 3. Изменение концентрации SO_3 (а) и SiO_2 (б) в трех фракциях ПЦ в зависимости от продолжительности помола клинкера с 8 % ПГК
1 – фракция больше 80 мкм; 2 – 50–60 мкм; 3 – меньше 40 мкм

Падение концентрации гипса вызвано ростом поверхности измельчаемого клинкера, на которую прилипает гипс. Сближение и затем объединение кривых указывает на равенство концентрации гипса в различных фракциях ПЦ, что было отмечено нами ранее [6]. В процессе размола ПЦ на новые обнажаемые активные поверхности переходит часть ПГК, вследствие частых столкновений частиц клинкера между собой и сnano- и микрочастицами гипса, которые имеют высокую концентрацию в атмосфере мельницы, свободной от шаров и клинкера. В тех же образцах концентрация SiO_2 в мелких фракциях выше, чем в крупных. Здесь по мере роста времени помола кривые поднимаются и сливаются в одну. Точно такой характер изменения концентрации от продолжительности времени помола имеют CaO и Al_2O_3 .

На рис. 4 показано изменение удельной поверхности цементов, произведенных в лабораторной мельнице, от продолжительности размола клинкера с гипсом различной концентрации. Здесь представлен

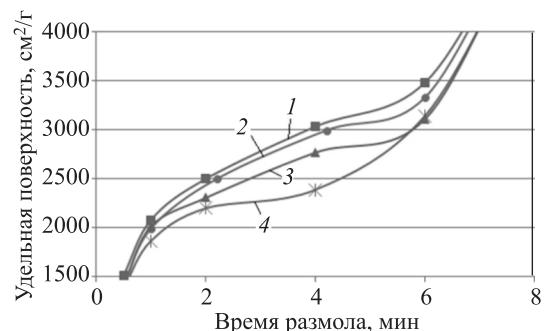


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности цемента от продолжительности размола клинкера с гипсом различной концентрации
1 – клинкер; 2 – клинкер + 4 % ПГК; 3 – клинкер + 6 % ПГК; 4 – клинкер + 8 % ПГК

временной интервал помола до 7 мин, где достигается обычно требуемая производителям удельная поверхность, далее кривые сближаются, как показано в [6].

Из рис. 4 следует, что самую высокую удельную поверхность дает размол клинкера без гипса (кривая 1), а присутствие ПГК снижает эту величину до 20 %. Если бы ПГК только размалывался в мельнице без адгезии, как предполагается в литературе [1, 2], то результат должен был оказаться обратным, т.е. измельчаемый с клинкером гипс должен был увеличить суммарную удельную поверхность полученного цемента. Она, наоборот, снижается и тем значительнее, чем выше концентрация гипса.

С учетом вышеизложенного есть основание утверждать, что мягкий гипс в шаровой мельнице интенсивно измельчается и прилипает к активным поверхностям частиц клинкера. При появлении новых поверхностей в процессе размола клинкера на них гипс переносится, вследствие адгезии в условиях трения и столкновения частиц. При этом гипс, обладающий малой твердостью и содержащий 20,9 % воды, выполняет роль твердой смазки, которая снижает силу столкновения частиц и скорость их измельчения [9]. Поэтому, как видно из рис. 4, для получения удельной поверхности 2500 см²/г в присутствии гипса потребовалось времени в 2 раза больше, чем для размола клинкера без гипса.

В процессе размола клинкера с гипсом для реализации адгезии второй компоненты требуется время, определяемое скоростью измельчения клинкера, концентрацией ПГК, реологией и трибологией в мельнице. Все это влияет на контуры области, которая образована зависимостью S от времени при размоле отдельно клинкера и затем клинкера вместе с гипсом. Если помол будет завершен в области активного влияния ПГК на S , тогда определенная доля частиц клинкера окажется без достаточной адгезии гипса, что может сократить сроки хранения ПЦ и привести к ложному схватыванию.

На рис. 5 представлены результаты рентгеноструктурного анализа ПГК после измельчения в течение 3 и 16 мин. Из приведенного следует, что с увеличением времени помола интенсивность рефлексов $d = 7,547; 4,260; 3,785; 3,053; 2,877 \text{ \AA}$ падает.

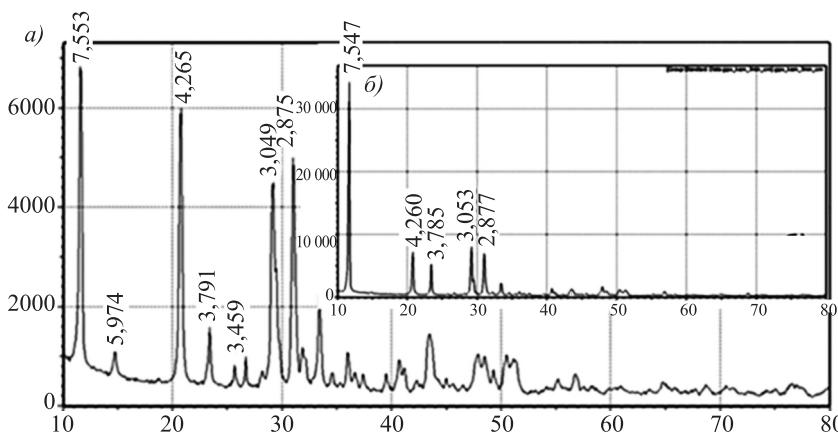


Рис. 5. Рентгенограммы природного гипсового камня, измельченного в шаровой мельнице в течение 16 (а) и 3 мин (б)

На рис. 5, *a* наблюдается снижение интенсивности пиков по сравнению с рис. 5, *b*, что объясняется постепенным испарением воды из ПГК с ростом температуры в камере помола в ходе измельчения. После 16 мин помола возникают новые пики $d = 5,974, 3,459 \text{ \AA}$, межплоскостные расстояния которых соответствуют полуводному гипсу. Кроме того, наблюдается увеличение сигналов уровня шумов, свидетельствующих о появлении нано-размерных частиц гипса.

Из приведенного следует, что при получении портландцемента совместным помолом клинкера и ПГК в шаровой мельнице происходит испарение воды из части двуводного ПГК с переходом его в полуводное состояние.

Выводы. 1. Показано, что в процессе получения портландцемента в шаровой мельнице происходит интенсивная адгезия гипса на поверхности частиц клинкера в видеnano- и микрочастиц, тонких пленок, островков и слоев.

2. Построены кривые зависимости концентрации гипса в различных фракциях от времени размола, которые характеризуют кинетику процесса адгезии на клинкере.

3. Выявлена область, в которой активно уменьшается удельная поверхность помола клинкера при добавлении гипса, и дано ей объяснение с позиций роли адгезии.

4. По данным рентгеноструктурного анализа показано, что в процессе совместного помола клинкера и ПГК в шаровой мельнице происходит переход части двуводного гипса в полуводный, а измельчение регистрируется увеличением интенсивности уровня шума.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энтин З.Б. О взаимосвязи гранулометрии и прочности цемента // Цемент и его применение. 2009. № 6. С. 111–113.
2. Зобин И.А. Способы помола и дисперсный состав продукта // Цемент и его применение. 2014. № 3. С. 42–44.
3. Волжанский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. М.: Эколит, 2011. 344 с.
4. Черкасов Р.А. Интенсификация помола цемента с применением комплексных технологических добавок: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2015. 232 с.
5. Михеева Ф.В., Нилова Г.М., Арчекова В.М. Закономерности процесса измельчения многокомпонентных цементов // Труды НИИЦемент. М., 1983. Вып. 73. С. 52–67.
6. Абдулаев А.М., Межидов В.Х. Адгезия гипса на клинкере в процессе их размола // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 9. С. 50–59.
7. Зимон А.Д., Павлов А.Н. Коллоидная химия наночастиц / Моск. гос. ун-т технологий и управления. М.: Науч. мир, 2012. 244 с.
8. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976. 431 с.
9. Платэ Н.А., Прокопенко В.В., Каргин В.А. Полимеризация некоторых мономеров при диспергировании неорганических веществ // Высокомолекулярные соединения. 1959. Т. 1, № 11. С. 1713–1720.

Межидов Вахид Хумайдович, д-р хим. наук, проф.; E-mail: nizkp@mail.ru
Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщика

Абдуллаев Абухан Магомедович, асп.; E-mail: han-100@mail.ru

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), г. Грозный

Получено после доработки 15.02.17

Mezhidov Vakhid Khumaidovich, DSc, Professor; E-mail: nizkp@mail.ru

Grozny State Oil Technical University of a name the akad. M.D. Millionschikova, Russia

Abdullaev Abukhan Magomedovich, Post-graduate Student; E-mail: han-100@mail.ru

Complex Institute name after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

PECULIARITIES OF FORMATION OF PORTLANDCEMENT POTENTIALS BY JOINT PRINTING OF CLINKER AND GYPSUM STONE

The morphology and chemical composition of the surfaces of various fractions of grain factory Portland cement clinker grinding and experimental with the natural gypsum stone. It is shown that when co-grinding of clinker and gypsum before the second soft component and finely ground and adheres to the surface of the grains clinker forming islands on them, films and layers of different thickness. These soft and sticky plaster units reduce friction and collision force of particles during grinding, which leads to a decrease in the intensity of the grinding and related specific surface area (S). The curves change specific surface clinker the clinker and gypsum to 8 %, depending on the time region is formed in the range of $S = 2000\text{--}4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, which indicates that the presence of gypsum can reduce the magnitude of S to 20 %. The dependence of the gypsum concentration in the different fractions of the duration of grain portlandcement grinding in a ball mill.

К e y w o r d s: clinker, gypsum, grinding, Portland cement, adhesion of nanoparticles.

REFERENCES

1. Entin Z.B. O vzaimosvyazi granulometrii i prochnosti tsementa [On the relationship between particle size and strength of cement]. Tsement i yego primeneniye [Cement and its applications]. 2009. No. 6. Pp. 111–113. (in Russian)
2. Zlobin I.A. Sposoby pomola i dispersnyy sostav produkta [Methods for grinding and dispersion of the product]. Tsement i yego primeneniye [Cement and its application]. 2014. No. 3. Pp. 42–44. (in Russian)
3. Volzhanskiy A.V., Burov Yu.S., Kolokol'nikov V.S. Mineral'nyye vyazhushchiye veshchestva [Mineral binders]. Moscow, 2011. 344 p. (in Russian)
4. Cherkasov R.A. Intensifikatsiya pomola tsementa s primeneniem kompleksnykh tekhnologicheskikh dobavok [The intensification of cement grinding with the use of complex processing aids]. Belgorod, 2015. 232 p. (in Russian)
5. Mikhеeva F.V., Nilova G.M., Archekova V.M. Zakonomernosti protsesса izmel'cheniya mnogokomponentnykh tsementov [Laws of process of grinding of blended cements]. Trudy NIITsement [Proceedings RICEMENT]. Moscow, 1983. Iss. 73. Pp. 52–67. (in Russian)
6. Abdullaev A.M., Mezhidov V.Kh. Adgeziya gipsa na klinkere v protsesse ikh razmola [Adhesion of plaster to the clinker in the process of grinding]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 9. Pp. 50–59. (in Russian)

7. Zim'on A.D., Pavlov A.N. Kolloidnaya khimiya nanochastits [Colloid chemistry of nanoparticles]. Moscow, 2012. 244 p. (in Russian)
 8. Zim'on A.D. Adgeziya pyli i poroshkov [Adhesion of dust and powders]. Moscow, 1976. 431 p. (in Russian)
 9. Plate N.A., Prokopenko V.V., Kargin V.A. Polimerizatsiya nekotorykh monomerov pri dispersirovaniyu neorganicheskikh veshchestv [Polymerization of some monomers by dispersing inorganic substances]. Vysokomolekulyarnyye soyedineniya [Macromolecular compounds]. 1959. Vol. 1, No. 11. Pp. 1713–1720. (in Russian)
-

УДК 691.327 : 666.974.2

В.З. АБДРАХИМОВ, Д.А. ЛОБАЧЕВ, А.К. КАЙРАКБАЕВ,
Е.С. АБДРАХИМОВА

**ЖАРОСТОЙКИЙ КОМПОЗИТ
НА ОСНОВЕ ФОСФАТНЫХ СВЯЗУЮЩИХ,
НАНОТЕХНОГЕННЫХ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ
И ЩЕЛОЧНО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Исследовано влияние нанотехнологенных высокоглиноземистых сырьевых отходов: отработанного катализатора ИМ-2201 и шлама, образующегося в результате травления алюминия и его сплавов, щелочно-земельных отходов (известковой муки и доломитовых высеек), на физико-механические свойства жаростойких композитов на основе фосфатных связующих. Полученное техническое решение при использовании высокоглиноземистых, щелочно-земельных и кальций-содержащих отходов позволяет повысить физико-механические показатели жаростойких бетонов. Разработаны инновационные предложения по использованию отработанного катализатора ИМ-2201, шлама, образующегося в результате травления алюминия и его сплавов, известковой муки и доломитовых высеек в производстве жаростойких бетонов, новизна которых подтверждена шестью патентами РФ.

Ключевые слова: жаростойкий бетон, фосфатные связующие, отработанный катализатор ИМ-2201, шлам, образующийся в результате травления алюминия и его сплавов, известковая мука и доломитовые высечки.

Введение. Бурное развитие промышленно-технологической цивилизации неизбежно приведет к истощению природных сырьевых материалов и накоплению большого количества твердых отходов [1]. Ухудшение экологической обстановки связано с загрязнением атмосферы выбросами предприятий металлургии и нефтехимии. Вклад металлургии в выбросы оксида серы составляет 15 %, причем около половины из них дает цветная металлургия, не меньше – нефтехимия [2, 3]. При получении цветных металлов выделяется химический фактор, который значительно увеличивает экологическую напряженность в регионах.

Отрасль строительных материалов, в отличие от других отраслей, обладает неограниченными возможностями использования отходов, что объясняется крупными масштабами строительного комплекса, его материалоемкостью и номенклатурой изделий. Создание безотходных технологий производства материалов, обладающих высокими физико-термическими свойствами, для конструкций футеровки тепловых агрегатов – одна из важных экологических проблем [1, 4, 5].

Фосфатные связующие, по сравнению с минеральными вяжущими: портландские и глиноземистые цементы, жидкое стекло и силикат-глыба, обладают наибольшей химической активностью к оксидам и гидроксидам, из которых состоит большинство промышленных отходов [6]. По химиче-

скому составу любого техногенного неорганического продукта можно определить его коэффициент активности и спрогнозировать процесс фосфатного связывания, т. е. оценить условия применения тех или иных отходов производств для получения жаростойких бетонов. Исследования ученых показали, что из отходов производств в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены многие строительные материалы.

Фосфатные связующие, применяемые в жаростойких бетонах, относятся к химическим связующим, которые дают возможность широко использовать многие неорганические отходы промышленности, в том числе нанотехногенного сырья – высокоглиноземистые отходы нефтехимии и цветной металлургии. При формировании прочного камня в бетоне происходит силикатное или фосфатное связывание неорганических отходов в устойчивые высокотемпературные соединения. Пропитка оgneупорных заполнителей химическими связующими упрочняет их, а в некоторых случаях и повышает оgneупорность, что очень важно для жаростойких бетонов.

Цель работы. 1. Получение жаростойких бетонов на основе отходов производств: а) отработанного катализатора ИМ-2201; б) доломитовых высевок; в) шлама, образующегося в результате травления алюминия и его сплавов концентрированными растворами едкого натра; г) кальцийсодержащего шлама; д) известковой муки и ортофосфорной кислоты.

2. Исследование структуры пористости полученных образцов.

Сырьевые материалы. *Отработанный катализатор ИМ-2201.* В Самарской области развито нефтехимическое производство: в Новокуйбышевске – нефтекомбинат и в Тольятти – завод синтетического каучука, на которых образуются значительные количества высокоглиноземистых отходов. В настоящей работе использовался отработанный катализатор ИМ-2201 – это техногенный отход Новокуйбышевского нефтехимического комбината^{1–3}. Химический состав отработанного катализатора ИМ-2201 представлен в табл. 1. Высокая оgneупорность отработанного катализатора (2000 °C) обусловлена его химико-минералогическим составом.

Исследуемые техногенные шламовые отходы от высокодисперсных порошкообразных материалов природного и техногенного происхождения отличаются наноразмерностью, которая находится пределах от 80 до 3000 нм и зависит от условий образования. В настоящей работе для получения жаростойкого бетона использовался отработанный катализатор ИМ-2201 техногенного происхождения с наноразмерностью от 100 до 200 нм.

Отходы Самарского металлургического завода. На Самарском металлургическом заводе техногенные отходы производства представ-

¹ Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Исследование фазового состава керамических материалов на основе алюмосодержащих отходов цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности // Новые оgneупоры. 2015. № 1. С. 3–9.

² Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Влияние высокоглиноземистых нанотехногенных отходов нефтехимии на термостойкость клинкерного кирпича // Стекло и керамика. 2015. № 9. С. 32–38.

³ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. К вопросу использования алюмосодержащего нанотехногенного сырья в производстве керамических композиционных материалов // Материаловедение. 2014. № 12. С. 44–52.

Таблица 1. Химические составы техногенного сырья

Отходы	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	П.п.п.
1. Отработанный катализатор ИМ-2201	7–8	73–75	0,1–0,2	–	0,1–0,15	12–15	1,2–1,8	–
2. Шлам, образующийся в результате травления алюминия и его сплавов концентрированными растворами едкого натра	1,2–2,0	45–50	0,5–0,85	1,1,2–1,5	2,5–5,5	–	9,5–11	32–38
3. Кальцийсодержащий шлам обработки алюминия карбонатным шламом, образующимся после умягчения воды	4,5–8,5	2–12,5	0,5–0,8	30–46	7–8,5	–	12–1,5	37–40
4. Алюмокальциевый шлам	8–9	14,8–16,8	0,7–0,9	25–28	8–9	–	1,2–1,5	35–39
5. Известковая мука	33,2	6,2	1,4	42,1	3,5	–	2,3	11,3
6. Доломитовые высыпки	34,7	7,9	1,8	34	8,7	–	1,4	11,5

лены шламами, которые являются высокодисперсными продуктами. Среди них:

шлам, образующийся в результате травления алюминия и его сплавов концентрированными растворами едкого натра (алюмощелочной);

кальцийсодержащий шлам обработки алюминия карбонатным шламом, который образуется после умягчения воды (шлам систем водоочистки);

алюмокальциевый шлам, представляющий собой смесь первых двух. Химический состав исследуемых отходов приведен в табл. 1.

Данные техногенные отходы можно применять в качестве компонентов фосфатных вяжущих вместо дорогостоящих технических продуктов, например, Al(OH)₃, CaCO₃, MgCO₃, так как эти шламы в основном состоят из карбоната кальция – CaCO₃ и гидроксида алюминия Al(OH)₃. По способу образования, значениям удельной поверхности и размеру частиц данные шламы можно отнести к нанотехногенному сырью. Основным для производства жаростойких бетонов является *шлам щелочного травления*, который образуется в результате травления алюминия и его сплавов концентрированными растворами едкого натра с небольшим количеством специальных веществ^{1, 4}. Чаще всего алюминий и его сплавы травят в растворе, содержащем 50–150 г/л едкого натра, нагретом до 50–70 °C. Продолжительность травления зависит от состояния поверхности и концентрации едкого натра (0,5–1,5 мин).

После регенерации щелочей из отработанных травильных растворов глиноземсодержащий шлам осаждается, концентрируется на дне ванны и постепенно кристаллизуется. Полученные шламы имеют высокое содержание

⁴ Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Инновационные направления по использованию шламов щелочного травления и солевых алюминиевых шлаков в производстве жаростойких композитов и кислотоупорах // Экология и промышленность России. 2014. № 11. С. 36–37.

Al_2O_3 ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 40 \%$, см. табл. 1), что способствует значительному повышению термостойкости при его использовании в составе жаростойких бетонов (композитах). Кроме того, повышенное содержание в шламе щелочей ($\text{R}_2\text{O} > 10 \%$, см. табл. 1) позволяет снизить температуру обжига жаростойких бетонов и тем самым повысить прочность изделия. Следует отметить, что отличительной особенностью таких шламов от других наполнителей и ототщителей является высокая степень дисперсности. Положительное следствие высокой дисперсности шлама ($9000\text{--}10\,000 \text{ см}^2/\text{г}$) – большая его пластичность, что способствует улучшению формовочных свойств бетонных композиций.

Известковая мука представляет собой отход Жигулевского известкового завода^{5, 6}.

Исследования показали, что взаимодействие карбонатов двухвалентных металлов, содержащихся в известковой муке, с ортофосфорной кислотой происходит с выделением тепла. Для фосфатных систем выделение тепла является важным фактором, способствующим образованию твердеющей структуры. Химический состав исследуемой известковой муки представлен в табл. 1.

Доломитовые высыпки являются отходами Соковского карьера (Самарская область)^{5, 6}. Химический состав исследуемых отходов представлен в табл. 1. Исследования показали, что из-за низкой твердости зерен доломита он не может использоваться в качестве мелкого заполнителя для обычных бетонов, в связи с чем для получения жаростойких бетонов был принят химический способ связывания доломитсодержащих отходов за счет применения фосфатных затворителей.

Щебень. Для изготовления жаростойких бетонов использовался щебень, отвечающий требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» М600, 800–1000, со средней плотностью зерен от 2,0 до 2,5 $\text{т}/\text{м}^3$ из карбонатных пород, добываемых в Самарской области, фракции 5–10 мм.

Песок отвечал требованиям ГОСТ 8736–93 «Песок для строительных работ. Технические условия». Песок речной, добываемый в Самарской области, имел следующие показатели: средняя плотность в сухом состоянии $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$, содержание илистых, пылевидных и глинистых частиц не более 0,7 % по массе, истинная плотность песка речного $2,65 \text{ г}/\text{см}^3$, наличие суглинка, комков глины и прочих засоряющих примесей не более 0,05 %, модуль крупности 1,68.

Ортофосфорная кислота. Для изготовления жаростойких бетонов использовалась в качестве связующей ортофосфорная кислота H_3PO_4 в чистом виде по ГОСТ 6552–80, норма – чистый (ч.) ОКП 26 1213 0021 10. Массовая доля ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) не менее 85 %, плотность не менее $1,69 \text{ г}/\text{см}^3$.

⁵ Абдрахимов В.З., Колпаков А.В. Использование кальцийсодержащих отходов: доломитовых высыпок и известняковой муки в производстве кирпича // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 5. С. 34–39.

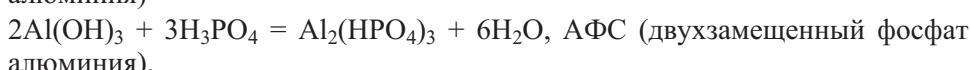
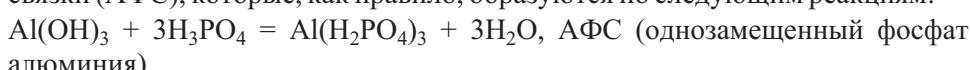
⁶ Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З. Исследование регрессивным методом влияния содержания кальцийсодержащих отходов: доломитовых высыпок и известняковой муки на физико-механические показатели керамического кирпича // Экол. системы и приборы. 2015. № 5. С. 34–41.

Технологический процесс. Технологический процесс производства бесцементных жаростойких бетонов и изготовления изделий и конструкций из них включает в себя приготовление формовочной массы, формование изделий и термообработку. Следует отметить, что для своего затвердевания и набора марочной прочности жаростойкие бетоны требуют особой термообработки. Для бетонов на ортофосфорной кислоте с компонентами, представленными в табл. 2, – нагревание до 500 °C с подъемом температуры до 200 °C со скоростью 60 °C и до 500 °C – 150 °C/ч, выдерживание в течение 4 ч, охлаждение вместе с печью. На составы для производства жаростойких бетонов получены шесть патентов РФ⁷⁻¹².

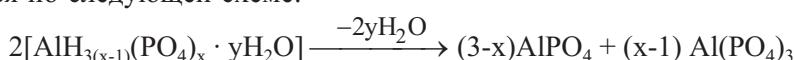
В табл. 2 представлены основные физико-механические показатели жаростойкого бетона. Как видно, жаростойкий бетон из предложенных составов имеет высокие показатели по механической прочности и морозостойкости.

Более высокие показатели имеют образцы из состава № 5, содержащие наибольшее количество нанотехногенного сырья.

На основе ортофосфорной кислоты и высокоглиноземистых отходов нефтехимии, как было указано в работе [3], получаются алюмофосфатные связки (АФС), которые, как правило, образуются по следующим реакциям:



Большинство кислых ортофосфатов алюминия при нагревании превращаются по следующей схеме:



⁷ Пат. 2567911 RU C1 04 В 28/34. Композиция для изготовления жаростойких бетонов / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. Заявка 2014116503/03. Дата подачи 23.04.2014. Опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31. Патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет.

⁸ Пат. 2558567 RU C1 04 В 28/34. Композиция для изготовления жаростойких бетонов / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. Заявка 2014115129/03. Дата подачи 15.04.2014. Опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22. Патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет.

⁹ Пат. 2568443 RU C1 04 В 28/34. Композиция для изготовления жаростойких бетонов / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. Заявка 2014113816/03. Дата подачи 08.04.2014. Опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32. Патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет.

¹⁰ Пат. 2553115 RU C1 04 В 28/34. Композиция для изготовления жаростойких бетонов / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. Заявка 2014114129/03. Дата подачи 09.04.2014. Опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16. Патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет.

¹¹ Пат. 2580866 RU C1 04 В 28/34. Композиция для изготовления жаростойких бетонов / Е.С. Абдрахимова. Заявка 2014149777/03. Дата подачи 09.12.2014. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. Патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет.

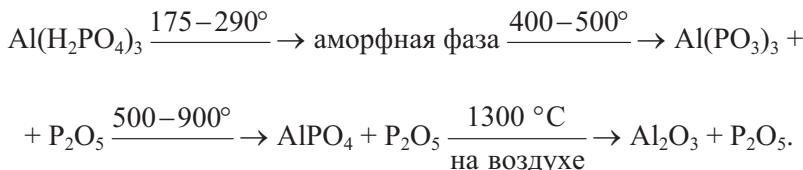
¹² Пат. 2568203 RU C1 04 В 28/34. Композиция для изготовления жаростойких композитов / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. Заявка 2014112138/03. Дата подачи 28.03.2014. Опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31. Патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет.

Таблица 2. Составы для получения жаростойких бетонов

Компонент	Содержание компонентов в составах, мас. %					
	1	2	3	4	5	6
Отработанный катализатор ИМ-2201	12	12	12	12	12	12
Шлам, образующийся в результате травления алюминия и его сплавов концентрированными растворами едкого натра	27	27	12	27	27	12
Известковая мука	—	11	—	—	—	—
Доломитовые высыпки	11	—	—	—	—	—
Щебень	38	38	27	38	—	27
Ортофосфорная кислота	12	12	11	12	12	11
Песок речной	—	—	25	11	—	25
Кальцийсодержащий шлам обработки алюминия карбонатным шламом	—	—	13	—	38	13
Алюмокальциевый шлам	—	—	—	—	11	—
<i>Основные физико-механические показатели</i>						
Механическая прочность на сжатие, МПа	51	58	52	58	62,8	54
Морозостойкость, циклы	52	58	53	59	63	53



Температуры фазовых превращений $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ могут быть следующими:



Твердение происходит в результате химического взаимодействия ортофосфорной кислоты с наполнителем, особенно с тонкомолотой ее частью, и последующих реакций полимеризации и поликонденсации, которые усиливаются по мере сушки и нагревания бетона.

Если в используемых отходах содержится даже небольшое количество наночастиц, то энергию Гиббса можно записать в виде¹⁻³

$$G_i^{\text{нк}} = G_i^{\text{mac}} + \sigma_i f_i,$$

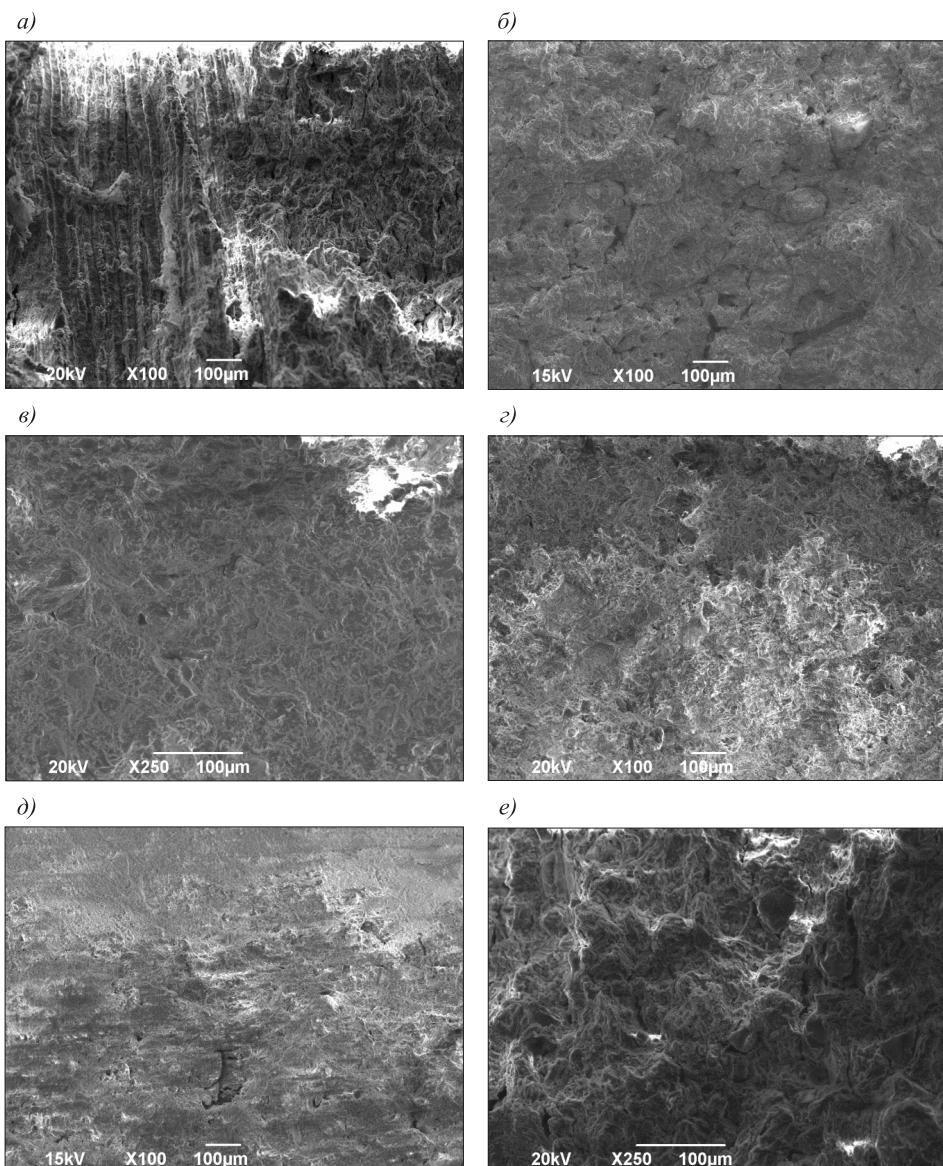
где $G_i^{\text{нк}}$ и G_i^{mac} – энергия Гиббса нанокристаллических и массивных фаз соответственно;

σ_i и f_i – поверхностное натяжение и поверхность частиц i -й фазы соответственно.

Отсюда видно, что в системе появляется еще один независимый параметр – поверхность, а следовательно, возникает дополнительная степень свободы.

Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантово-механических проявлений, что способствует повышению физико-механических показателей.

При уменьшении размера зерен увеличивается общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участков, растет их избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе. Экспериментальные исследования и практический опыт подтверждают важнейшую роль степени измельчения (или использования наноразмерных сырьевых материа-



Микроструктура образцов

a – состав 1; б – состав 2; в – состав 3; г – состав 4; д – состав 5; е – состав 6

Увеличение: *a, б, г, д* ×100; *в, е* ×250

лов) в производстве строительных материалов. Микроструктура образцов составов № 1–6 выполнена на электронном растровом сканирующем микроскопе JEOL-6390A.

Поры, как и в работах [7, 8], изучали на свежих сколах образцов при увеличении $\times 100$ и $\times 250$ (рисунок). Как видно, для образцов всех составов характерно наличие трех типов пор: щелевидных, изотермических и причудливой формы, как назвал их автор работы [7]. В образцах состава 2, 4 и 5 (рисунок, б, г и д) наблюдаются также округлые и овальные закрытые полости.

Поры и, следовательно, неоднородности материала, неблагоприятно сказываются на свойствах керамических изделий, причем вредное влияние на механическую прочность вытянутых (щелевидных) пор оценивается приблизительно в 5 раз больше, чем округлых [7]. Кроме того, наличие щелевидных пор предполагает неполное завершение процессов спекания.

Выводы. Исследовано влияние нанотехнологенных высокоглиноземистых сырьевых отходов: отработанного катализатора ИМ-2201 и шлама, образующегося в результате травления алюминия и его сплавов, щелочно-земельных отходов (известковой муки и доломитовых высевок), на физико-механические свойства жаростойких композитов на основе фосфатных связующих. Полученные жаростойкие бетоны имели высокие показатели механической прочности и морозостойкости.

Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантово-механических проявлений. Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды и уменьшению объема капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности формовочной массы и прочностных показателей изделий.

Полученное техническое решение при использовании высокоглиноземистых, щелочно-земельных и кальцийсодержащих отходов позволяет повысить показатели механической прочности и морозостойкости жаростойких бетонов. Разработаны инновационные предложения по использованию отработанного катализатора ИМ-2201, шлама, образующегося в результате травления алюминия и его сплавов; известковой муки и доломитовых высевок в производстве жаростойких бетонов, новизна которых подтверждена патентами РФ. Использование отходов производства для изготовления строительных материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для получения жаростойких бетонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахимов В.З., Рощупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С., Каиракбаев А.К., Колпаков А.В. Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих и высокоглиноземистых отходов // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 33–40.
2. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Использование отходов цветной металлургии в производстве жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20, № 2. С. 32–38.

3. Рощупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Колпаков А.В. Инновационные разработки технологии направленной структурно-химической модификации футеровочных материалов на основе отходов цветной металлургии и фосфатных связующих // Новые огнеупоры. 2015. № 7. С. 52–56.
4. Хлыстов А.И., Абдрахимов В.З., Колпаков И.В. Экологические и практические аспекты использования пиритных огарков и высокоглиноземистых отходов нефтехимии в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Огнеупоры и техн. керамика. 2009. № 4–5. С. 35–42.
5. Абдрахимов В.З., Хлыстов А.И. Использование железосодержащих и высокоглиноземистых техногенных образований в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Стройт. вестн. Рос. инж. акад. 2000. Вып. 11. С. 108–115.
6. Абдрахимов В.З., Хлыстов А.И., Семенчев В.К. Использование техногенных образований в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Новые огнеупоры. 2010. № 5. С. 53–57.
7. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.
8. Павлов В.Ф., Мещерякова И.В., Грум-Гричайлло О.С. Роль оксида железа в формировании структуры кислотоупорного фарфора // Научные исследования в области механизации технологических процессов, разработки новых составов масс и глазурей: Тр. НИИстройкерамики, 1982. С. 48–55.

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

Лобачев Дмитрий Анатольевич, ст. препод.

Самарский государственный технический университет

Кайракбаев Аят Крымович, канд. физ.-мат. наук, доц.

Казахско-Русский международный университет, Актобе, Республика Казахстан

Абдрахимова Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доц.

Самарский Национальный исследовательский университет

Получено после доработки 06.02.17

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

Lobachev Dmitriy Anatolyevich, Senior Lecturer

Samara State Technical University, Russia

Kayrakbaev Ayat Krymovich, PhD, Ass. Professor

Kazakh-Russian International University, Aktobe, Kazakhstan

Abdrakhimova Elena Sergeevna, PhD, Ass. Professor

Samara National Research University, Russia

HEAT-RESISTANT COMPOSITE BASED ON PHOSPHATE BINDERS, NANOTECHNOLOGY HIGH-ALUMINA AND ALKALINE EARTH WASTE

The influence nanotechnology high-alumina raw material wastes: spent catalyst IM-2201 and sludge, resulting from the etching of aluminum and its alloys; alkaline earth waste: limestone and dolomite flour bran on the physical and mechanical properties of heat-resistant composites based on phosphate binders. The technical solution of high-alumina and alkaline earth waste allows to improve the physico-mechanical properties of heat-resistant concrete. Developed innovative proposals for the use of spent catalyst IM-2201, sludge, resulting from the etching of aluminum and its alloys; limestone powder

and dolomite bran in the production of heat-resistant concrete, the novelty of which is confirmed by 6 Patents of the Russian Federation.

K e y w o r d s: heat-resistant concrete, phosphate binders, the waste catalyst IM-2201, sludge, resulting from the etching of aluminum and its alloys, limestone flour, dolomite fines.

REFERENCES

1. A b d r a k h i m o v V.Z., R o s h c h u p k i n a I.Yu., A b d r a k h i m o v a E.S., K a y r a k b a e v A.K., K o l p a k o v A.V. Zharostoykiy kompozit na osnove fosfatnykh svyazuyushchikh i vysokoglinozemistykh otkhodov [Heat-resistant composite based phosphate binding and high-alumina waste]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 8. Pp. 33–40. (in Russian)
2. A b d r a k h i m o v a E.S., A b d r a k h i m o v V.Z. Ispol'zovanie otkhodov tsvetnoy metallurgii v proizvodstve zharostoykikh betonov na osnove fosfatnykh svyazuyushchikh [The Use of waste of non-ferrous metallurgy in the production of refractory concretes based on phosphate binders]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]. 2016. T. 20, No. 2. Pp. 32–38. (in Russian)
3. R o s h c h u p k i n a I.Yu., A b d r a k h i m o v a E.S., K a y r a k b a e v A.K., A b d r a k h i m o v V.Z., K o l p a k o v A.V. Innovatsionnye razrabotki tekhnologii napravленnoy strukturno-khimicheskoy modifikatsii futerovochnykh materialov na osnove otkhodov tsvetnoy metallurgii i fosfatnykh svyazuyushchikh [Innovative technology development directed structural-chemical modification of the lining of the waste materials based on nonferrous metallurgy and phosphate binders]. Novye ogneupory [New refractories]. 2015. No. 7. Pp. 52–56. (in Russian)
4. K h l y s t o v A.I., A b d r a k h i m o v V.Z., C o v c o v I.V. Ekologicheskie i prakticheskie aspekty ispol'zovaniya piritnykh ogarkov i vysokoglinozemistykh otkhodov neftekhimii v proizvodstve bezobzhigovykh ogneupornykh kompozitov [Ecological and practical aspects of the use of burnt pyrites and high-alumina petrochemical waste in the production of chemically bonded refractory composites]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika [Refractories and technical ceramics]. 2009. No. 4–5. Pp. 35–42. (in Russian)
5. A b d r a k h i m o v V.Z., K h l y s t o v A.I. Ispol'zovanie zhelezosoderzhashchikh i vysokoglinozemistykh tekhnogenennykh obrazovaniy v proizvodstve bezobzhigovykh ogneupornykh kompozitov [The use of iron and alumina technogenic formations in the production of chemically bonded refractory composites]. Stroitel'nyy vestnik Rossiyskoy inzhenernoy akademii [Construction Bulletin of the Russian Academy of Engineering]. 2000. Vol. 11. Pp. 108–115. (in Russian)
6. A b d r a k h i m o v V.Z., K h l y s t o v A.I., S e m e n y c h e v V.K. Ispol'zovanie tekhnogenennykh obrazovaniy v proizvodstve bezobzhigovykh ogneupornykh kompozitov [The use of technogenic formations in the production of chemically bonded refractory composites]. Novye ogneupory [New refractories]. 2010. No. 5. Pp. 53–57. (in Russian)
7. P a v l o v V.F. Fiziko-khimicheskie osnovy obzhiga izdeliy stroitel'noy keramiki [Physico-chemical principles of firing building ceramic products]. Moscow, Stroyizdat, 1977. 272 p. (in Russian)
8. P a v l o v V.F., M e s h c h e r y a k o v a I.V., G r u m - G r z h i m a i l o O.S. Rol' oksida zheleza v formirovaniy struktury kislotoupornogo farfora [The role of iron oxide in the structure formation of acid-resistant porcelain]. Nauchnye issledovaniya v oblasti mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov, razrabotki novykh sostavov mass i glazurey: trudy NIIstroykeramiki [Research in the field of mechanization of technological processes, development of new compositions, masses and coatings: Proceedings of Nitroacetate], 1982. Pp. 48–55. (in Russian)

УДК 691.6.002.3

В.А. БЕРЕГОВОЙ, Е.В. СНАДИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАСС НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЯЧЕИСТОГО СТЕКЛА

Разработаны технологические массы на основе водных растворов силикатов натрия и калия, получаемые в результате низкотермального синтеза щелочных растворов природных опок. Сочетание химической активности и термических свойств позволяет использовать данные массы в качестве основного компонента шихт в технологии пористого стекла.

Ключевые слова: пористое стекло, технологические массы, силикаты натрия и калия, опока.

Введение. Технологические связки, содержащие водные растворы Na_2SiO_3 или K_2SiO_3 , хорошо зарекомендовали себя при изготовлении формоочвенных смесей для литейного производства. Несмотря на улучшенные технические показатели калиевого жидкого стекла, в промышленности больше распространены его аналоги на основе силикатов натрия. На примере опочных горных пород в работе оценивалась целесообразность выработки химически активированных сырьевых масс из природного сырья, модифицированных растворами едкого натра и кали, применительно к ресурсосберегающей технологии получения ячеистого стекла [1].

На первом этапе производили синтез жидкостекольного связующего вещества. В основе применяемого способа лежит высокая растворимость опалкристобалитового кремнезема в слабых растворах щелочей [2]. Ранее эту особенность отдельных разновидностей кремнеземистых пород успешно опробовали для выработки метасиликатов натрия на заводе по выпуску технического и декоративного стекла. Варку сырьевой массы из природного трепела проводили при атмосферном давлении, температуре нагрева 95 °C и концентрации раствора едкого натра 5–10 % [2, 3].

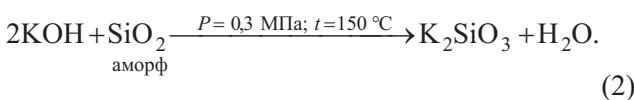
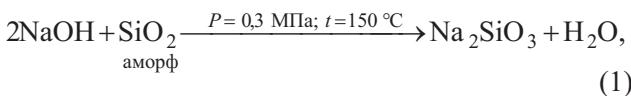
Материалы и методы исследования. В исследованиях источниками активного кремнезема являлись природные опоки, характеризующиеся подходящим многокомпонентным минеральным составом, состоящим из кремнезема (60–70 %), а также терригенных примесей глинистых минералов (5–15 %) и обломочного песчано-алевритового материала (10–15 %).

Высокая химическая активность опоки (поглощение CaO равно 290–310 мг/г) обусловлена наличием, наряду с хемогенным опалом, органогенных кремневых остатков с высокоразвитой внутренней поверхностью в виде радиолярий, спикул губок и панцирей диатомей. Сложный минеральный состав ускоряет процессы взаимодействия опочной массы и корректирующих добавок при обжиге, способствуя снижению температуры образования расплава. Это позволяет формировать «длинные» стекла с расширенным

температурным диапазоном рабочей вязкости, хорошо вспениваемые при введении газообразующих веществ.

Перед загрузкой в автоклав горную породу измельчали до удельной поверхности частиц 6500 см²/г. Синтез жидкостекольной связки осуществляли в лабораторной установке, состоящей из термокамеры, внутри которой расположены герметичные стальные цилиндры-автоклавы (рис. 1) с обрабатываемой сырьевой массой.

Взаимодействие природного и щелочного компонентов, происходящее в условиях автоклавной обработки (рис. 2), описывается уравнениями:



Жидкостекольная связка – щелочной компонент NaOH содержит, %: опока – 55,6; щелочь – 18,5; вода – 25,9. Силикатный модуль – 3,0–3,5; ρ – 1,37 г/см³. Расслаиваемости нет. Представляет собой вязкую массу серого цвета.

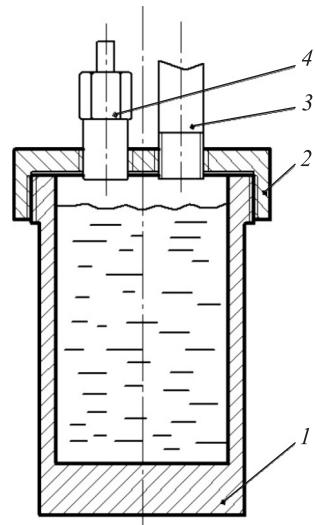


Рис. 1. Принципиальная схема автоклава

1 – стальной цилиндр; 2 – крышка цилиндра; 3 – патрубок манометра; 4 – клапан избыточного давления

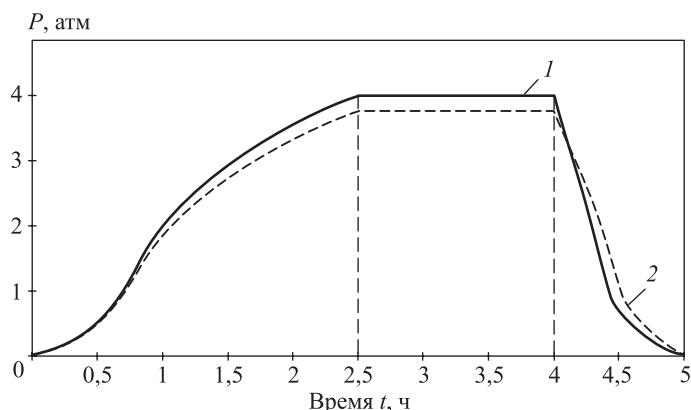
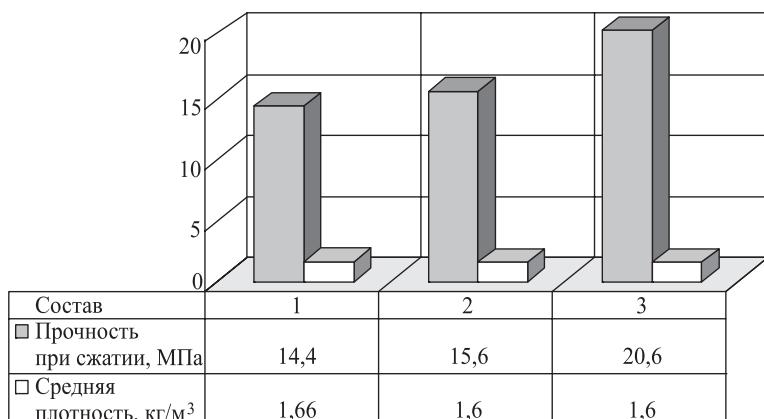


Рис. 2. Режим обработки опочной сырьевой массы с добавлением NaOH (1) и KOH (2)

Оценку качества связующего вещества проводили по прочности контрольных образцов с наполнителем в виде фракционированного кварцевового песка (0,14–0,315 мм). Перед испытанием материал выдерживали в форме в течение 11±1 ч, затем освобождали из форм и высушивали при температуре 60±2 °С. Результаты испытаний контрольных составов, а также их сравнение с показателями материала из натриевого жидкого стекла заводского изготовления (ГОСТ 13078–81) приведены на рис. 3.



*Rис. 3. Показатели свойств составов на основе
1 – натриевого жидкого стекла; 2 и 3 – натриевой и калиевой жидкок-
стекольных связок*

Обсуждение. Анализ данных рис. 3 показывает, что применение синтезированного в лаборатории связующего вещества обеспечивает увеличение прочности затвердевшего раствора в сравнении с промышленным аналогом. Использование в качестве щелочного компонента КОН предпочтительнее, поскольку получаемое в этом случае жидкостекольное связующее превосходит по этому показателю натриевый аналог на 30 %.

Оценку влияния предварительной термической активации сырья на улучшение показателей связки проводили путем его нагрева и выдержки в течение 2 ч при температуре 400–800 °С. Процессы активации сильно зависят от температуры и типа опоки (табл. 1).

Таблица 1. Процессы активации природного сырья

Процесс	Температура, °С	Тип опоки	
		трепеловидная	кремнистая
Удаление связанной влаги	300	+	+
Окисление органических примесей	400	+	+
Полиморфные превращения кварца	573	+	+
Дегидратация глинистых минералов	580–600	+	–
Восстановление оксидов железа	550	+	–
Декарбонизация	750	+	–

Результаты испытаний образцов на жидкостекольных связках из опочного сырья, подвергнутого термической обработке, приведены на рис. 4.

Из данных рис. 4 видно, что влияние термической активации природного компонента на качество связующего вещества более заметно при использовании трепеловидной опоки, что связано с увеличением количества проходящих процессов (см. табл. 1). При этом оптимальная температура подготовки сырья составляет 400 °С.

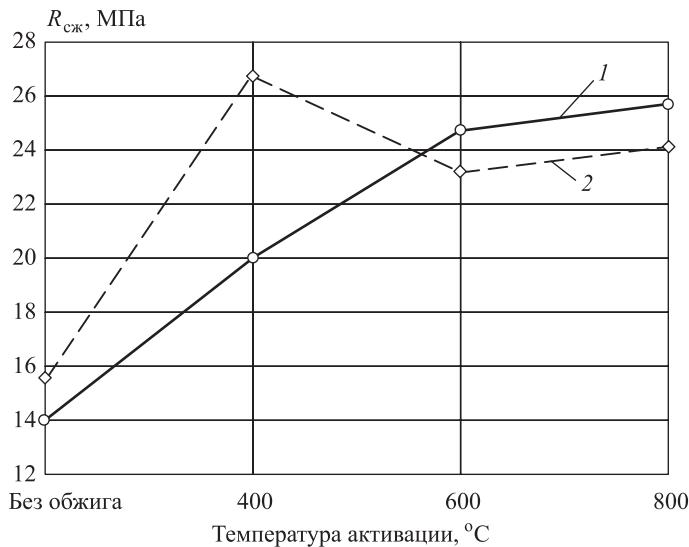


Рис. 4. Влияние температуры активации и вида сырья на связующую способность Na-технологических связок
1 – прочность образцов на кремнистой опоке; 2 – то же на трепеловидной опоке

Совместное влияние давления внутри автоклава и содержания химического активатора (NaOH или KOH) на качество связующего вещества показано на рис. 5.

В связи с большим потенциалом использования гранулированного пеностекла в составах декоративных и теплосберегающих сухих штукатурных смесей, легких бетонов синтезированные связки были опробованы для получения мелкого (фракция 2–5 мм) и крупного (фракция 10–40 мм) заполнителей. Основными функциями связки в стекольной шихте являются упрочнение сырцовых гранул и формирование маловязкого расплава при последующем нагреве. Процесс получения ячеистого гранулированного стекла включает два этапа:

1. Варка «губчатого» стекла при температуре 850 °C из смеси природной опоки и добавок-модификаторов следующего состава, % от массы: KNO_3 3–5; CaO 5–6; K_2CO_3 и Na_2CO 18–20. В результате термообработки образуется стекломасса, микроструктура которой состоит из переохлажденных расплавов в системе $kNa_2O(mK_2O) - nCaO - mSiO_2$ и остаточной кристаллической фазы (высокотемпературные модификации SiO_2) [4].

2. Гранулирование и вспенивание сырца. Для получения сырцовой массы предварительно измельченное губчатое стекло смешивали с технологической связкой (8–12 %) и порошком известняка (состав 1, табл. 2) или угольным порошком (состав 2, табл. 2). Перед обжигом смесь компактировали путем продавливания через фильтры диаметром 2–10 мм [5].

Температурные режимы процессов варки стекла и его вспенивания, использованные для получения гранулята, показаны на рис. 6, внешний вид материала – на рис. 7.

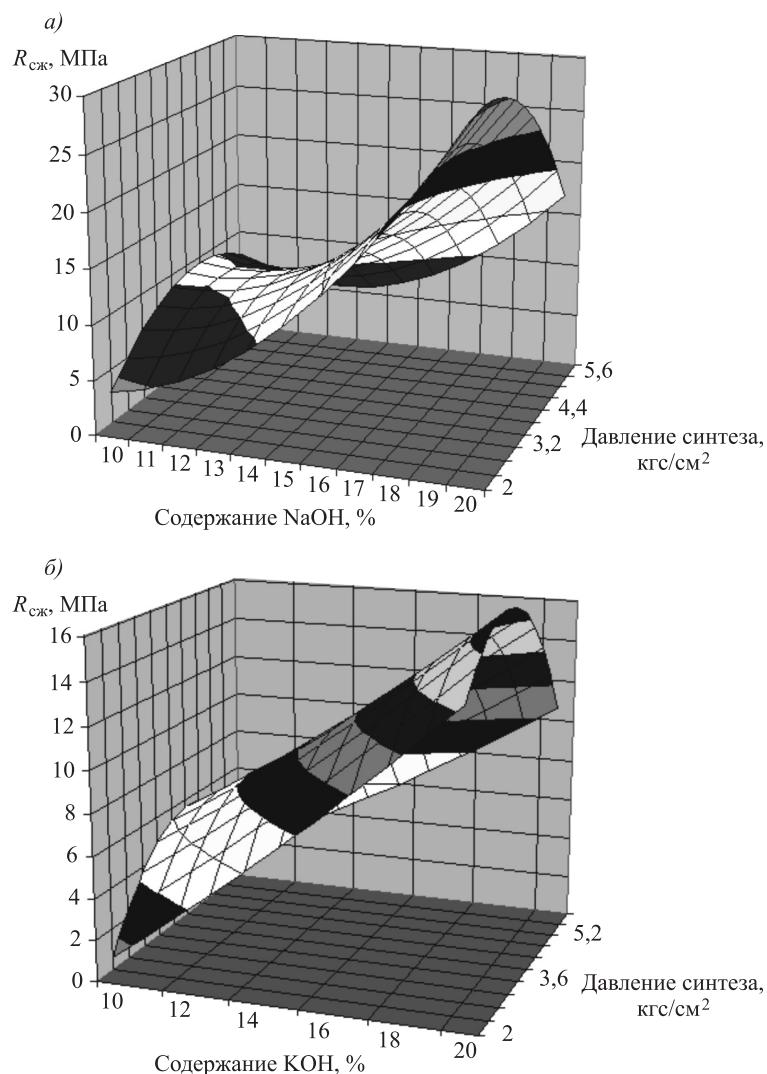
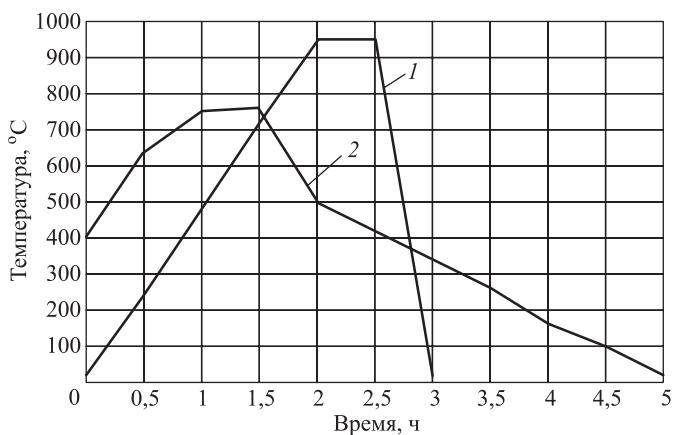


Рис. 5. Влияние параметров процесса на связующую способность синтезируемого вещества опоки трепеловидной (а) и кремнистой (б)



*Рис. 6. Температурные режимы процессов термообработки
1 – варка стекла; 2 – вспенивание гранул*

Таблица 2. Свойства керамзитового гравия и гранулированного пеностекла

Показатель	Керамзитовый гравий	Вариант состава разработанного материала	
		1	2
Прочность на сжатие, МПа	0,6–4,5	1,0–1,5	1,1–1,8
Водопоглощение, мас. %	8–12	3,0–3,5	2,8–4,9
Средняя плотность, кг/м ³	300–800	250–300	290–420
Теплопроводность, Вт/(м · °C)	0,12–0,16	0,065–0,07	0,06–0,063
Цвет	Коричневый	Желтый, зеленый, красный	Темно-серый

Свойства гранулированного пеностекла, вырабатываемого на основе модифицированных опочных масс, приведены в табл. 2.

Выводы. Анализ данных свидетельствует, что разработанные составы гранулированного ячеистого стекла позитивно отличаются по показателям плотности, теплопроводности и водопоглощения от широко используемого керамзитового гравия.

Показана перспективность местных разновидностей доступного опочного сырья для осуществления малоэнергоемкого процесса получения связующего вещества, выполняющего роль активного структуроформирующего компонента в сырьевых шихтах для выработки высококачественного гранулированного ячеистого стекла.



Рис. . Гранулированное пеностекло из опочного сырья

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Береговой В.А., Костин Д.С., Береговой А.М. Теплоизоляционная газостеклокерамика на основе кремнистых горных пород // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 43–50.
2. Дистанов У.Г., Конюхова Т.П. Опалкристобалитовые породы – приоритетное сырье для получения жидкого стекла и стеклоизделий // Минеральные ресурсы России. 2009. № 4. С. 17–23.
3. Мелконян Р.Г. Технология получения калиевого и натриевого жидкого стекол путем гидротермально-щелочной переработки аморфных горных пород // Техника и технология силикатов. 2012. Т. 19. № 4. С. 20–26.
4. Береговой В.А. Моделирование структуры и прогнозирование свойств пористых композиционных материалов на стеклокристаллической матрице // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 22–30.
5. Береговой В.А., Сорокин Д.С. Стеклокристаллические материалы на основе кремнистых пород // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 54–57.

Береговой Виталий Александрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: vabereg@rambler.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Снадин Евгений Валерьевич, асп.; E-mail: techbeton@pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 24.02.17

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich, DSc, Professor; E-mail: vabereg@rambler.ru
Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Snadin Evgeniy Valer'evich, Post-graduate Student; E-mail: techbeton@pguas.ru
Penza State University of Architecture and Construction, Russia

THE USE OF TECHNOLOGICAL MATERIALS BASED ON CHEMICALLY ACTIVATED NATURAL RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF CELLULAR GLASS

The technological masses on the basis of water solutions of silicates of sodium and potassium developed as a result of low-thermal synthesis of alkaline solutions of a natural silica clay is developed. The combination of chemical activity and thermal properties allows to use the received masses as the main component of the technology mix in the technology of porous glass.

К e y w o r d s: porous glass, technological mass, silicates of sodium and potassium, silica clay.

REFERENCES

1. Beregovoy V.A., Kostin D.S., Beregovoy A.M. Teploizolyatsionnaya gazostekrokeramika na osnove kremnistykh gornykh porod [Heat-insulation porous glass ceramic on basis of silica clay mountain sorts]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 10. Pp. 43–50. (in Russian)
2. Distanov U.G., Kon'yukhova T.P. Opalkristobalitovye porody – prioritetnoe syr'e dlya polucheniya zhidkogo stekla i stekloizdeliy [Opalcrystobalite rocks – priority raw materials for receiving liquid glass and glass products]. Mineral'nye resursy Rossii [Mineral resources of Russia]. 2009. No. 4. Pp. 17–23. (in Russian)
3. Melkonyan R.G. Tekhnologiya polucheniya kalievogo i natrievogo zhidkikh stekol putem gidrotermal'no-shchelochnoy pererabotki amorfnykh gornykh porod [Technology of receiving potassium and sodium liquid glasses by hydro-thermo-alkaline processing of amorphous rocks]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov [The technician and technology of silicates]. 2012. Vol. 19, No. 4. Pp. 20–26. (in Russian)
4. Beregovoy V.A. Modelirovaniye struktury i prognozirovaniye svoystv poristykh kompozitsionnykh materialov na steklokristallicheskoy matritse [Modeling of structure and property prediction of porous composite materials on glass-ceramic matrix]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4. Pp. 22–29. (in Russian)
5. Beregovoy V.A., Sorokin D.S. Steklokristallicheskie materialy na osnove kremnistykh porod [Glass-crystal materials on the base of flask rock]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and engineering]. 2015. No. 1. Pp. 54–57. (in Russian)

УДК 691.175 : 678.743.22

А.М. ИСЛАМОВ, В.Х. ФАХРУТДИНОВА, Л.А. АБДРАХМАНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПВХ МАТЕРИАЛОВ, ПОВЕРХНОСТНО УСИЛЕННЫХ ПОЛИИЗОЦИАНАТОМ

В работе представлены результаты изучения структуры градиентных полимерных материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ), имеющих усиленные поверхностные свойства. Данные материалы получены путем диффузионной пропитки ПВХ в реакционноспособном олигомере полиизоцианате до определенной степени набухания с его последующим термоотверждением в сетчатый полимер. Было выявлено, что в поверхностном слое полученных материалов концентрация отверженного полиизоцианата уменьшается по линейному градиенту в глубь образца и образует с линейными макромолекулами ПВХ совместные структуры типа полузаимопроникающих сеток, имеющих большую плотность упаковки и меньшую дефектность, которые и обуславливают улучшение механических и эксплуатационных свойств данных материалов.

Ключевые слова: поливинилхлорид, полиизоцианат, полузаимопроникающие сетки, градиентность, диффузия.

Введение. Полимерные материалы на основе поливинилхлорида (ПВХ) хорошо зарекомендовали себя в качестве изделий строительного и промышленного назначения (напольные рулонные и плиточные материалы, облицовка гальванических ванн, химически стойкие элементы аппаратуры, листы, трубы, газоходы и т. д.), благодаря высоким показателям физико-механических свойств, стойкости к жидким и газообразным агрессивным средам и малой стоимости. Как правило, при воздействии эксплуатационных факторов износ материалов происходит неравномерно по всему объему. В основном разрушению подвергается их поверхностный слой, что приводит к преждевременному выходу материала из строя, в то время как его внутренняя часть остается неизменной. Во избежание этого необходимо усиление поверхностных слоев ПВХ материалов различными способами модификации.

Существует множество различных (механических, энергетических, диффузионных) методов модификации поверхностных свойств полимерных материалов с целью увеличения их твердости, ударной вязкости, износостойкости, стойкости к царапанию и т.д. [1–3]. На наш взгляд, перспективно усиление поверхности ПВХ путем создания на его основе градиентных полузаимопроникающих сеток (градиентные полу-ВПС). Принцип их получения, в нашем случае, заключается в том, что предварительно сформированное изделие из линейного полимера ПВХ пропитывается в реакционноспособном олигомере (или мономере), который в дальнейшем подвергается полимеризации с образованием второго сетчатого полимера, концентрация которого в матрице ПВХ изменяется от поверхности в глубь, вследствие ограниченности процессов диффузии [4]. В результате образу-

ются материалы, свойства которых отличаются от свойств индивидуальных полимеров.

Ранее нами были проведены исследования по поверхностной модификации ПВХ материалов путем их пропитки в реакционноспособном олигомере полизицианате (ПИЦ) с последующим температурным отверждением [5]. Была показана возможность и эффективность данного способа модификации, позволяющая получать материалы на основе ПВХ с усиленными поверхностными свойствами, благодаря образованию структур типа полу-ВПС между линейными макромолекулами ПВХ и сетчатыми продуктами отверждения ПИЦ.

В данной работе основное внимание уделено подробному исследованию структуры данных композитов, формирующейся в результате отверждения ПИЦ, продиффундировавшего в поверхностные слои ПВХ.

Объекты и методы исследования. Исследования проводились на ПВХ образцах, размерами $20 \times 20 \times 4$ мм, полученных путем вальцевания и последующего прессования композиции, состоящей из 100 м.ч. ПВХ С-7058-М (ГОСТ 14332–78) и 3 м.ч. стеарата кальция (ТУ 6-09-4104-87). В качестве изоцианатного олигомера был использован полизицианат марки Lupranate M20S, с массовой долей NCO-групп 30–32 %, представляющий собой смесь дифенилметан-4,4'-диизоцианата с полифенилметан-полизицианатами (52 %) с молекулярной массой 1070–1100.

Структура модифицированных образцов изучалась с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа «Merlin» («CarlZeiss»), совмещенного со спектрометром энергетической дисперсии «INCA X-MAX».

Результаты и обсуждение. Изучение процесса насыщения ПВХ образцов в результате пропитки в ПИЦ при различных температурно-временных условиях показало, что возрастание температуры приводит к снижению времени достижения равновесной степени набухания и к закономерному увеличению коэффициентов сорбции и проницаемости (таблица). Уменьшение усредненного во времени коэффициента диффузии с ростом температуры пропитки, вероятно, связано с увеличением молекулярной массы

Характеристики процесса пропитки ПВХ в ПИЦ

Температура пропитки, °C	Время t , ч	Степень набухания α , %	Коэффициент диффузии D , $\times 10^{-6}$ см 2 /с	Коэффициент сорбции S , г/см 3	Коэффициент проницаемости P , $\times 10^{-8}$ г/(с · см)
20	—	0	—	—	—
40	4	0,15	1,61	0,0015	0,25
60	5	0,40	1,59	0,0050	0,80
80	8	1,45	1,15	0,0190	2,19

диффузанта ПИЦ, вследствие незначительного протекания процесса полимеризации. Диффузия олигомера при 20 °C в данных временных режимах не происходит.

Изменения свойств по толщине ПВХ образцов в результате температурного отверждения ПИЦ (при 100 °C в течение 40 мин) позволили выявить оптимальную степень набухания – 0,3–0,4 %, при которой достигается максимальное увеличение физико-механических и эксплуатационных показателей

(микротвердость, твердость по Бринеллю, сопротивление истираемости, химическая стойкость и т. д.). В зависимости от температуры пропитки данная степень набухания может быть достигнута за разный промежуток времени, поэтому были определены линии равной степени пропитки в координатах температура–время (рис. 1), имеющие ценность с технологической точки зрения, по которым можно выбирать режимы набухания. Видно, что возрастание температуры приводит к их сближению, т.е. к снижению времени достижения соответствующей степени насыщения. Пользуясь представленными зависимостями, можно для обеспечения необходимой степени пропитки при реализации технологии диффузационной модификации ПВХ подбирать различные температурно-временные режимы.

На процесс формирования структуры модифицированных ПВХ образцов главным образом будут влиять концентрация ПИЦ в поверхностном слое блока ПВХ и характер его распределения. Поэтому первоначально была рассчитана средняя локальная концентрация $\alpha_{лок}$ диффузанта, %:

ПВХ, пропитанный при 60 °C ($\alpha = 0,4 \%$) 16,8

ПВХ, пропитанный при 80 °C ($\alpha = 1,45 \%$) 78.

Представленные данные показывают, что локальная концентрация в поверхностном слое на несколько порядков превышает степени набухания образцов.

На основе данных микротвердости по сечению образцов был сделан вывод, что имеет место градиентное изменение концентрации диффузанта от поверхности в глубь композита, зависящее от глубины проникновения молекул реакционноспособного олигомера в ПВХ. Градиентность структуры характерна для данных типов материалов (градиентные ВПС) и в зависимости от разных факторов профиль изменения ее концентрации может иметь линейный, сигмоидальный или параболический характер [6].

С целью оценки изменения концентрации олигомера в поверхностных слоях был использован метод элементного анализа, с помощью которого проанализирован химический состав градиентных слоев по толщине. Количественный анализ основан на пропорциональности интенсивности спектральных линий атомной концентрации исследуемого элемента. Определение концентрации элементов проводилось на поперечном срезе ПВХ образцов в направлении от поверхности к центру по соответствующим точкам через каждые 40 мкм.

О содержании диффузанта судили по изменению концентрации элементов углерода и кислорода. Химическое состояние поверхности необработанного ПВХ является практически постоянным по мере увеличе-

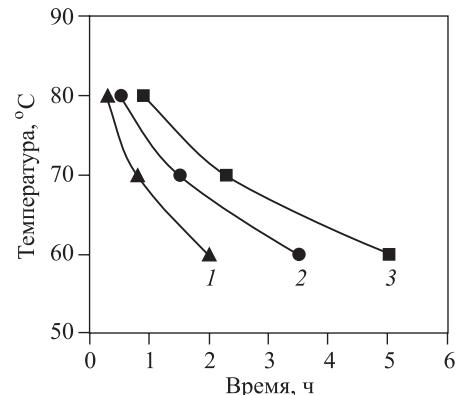


Рис. 1. Линии равной степени пропитки ПВХ в полиизоцианате при степени набухания, %
1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,4

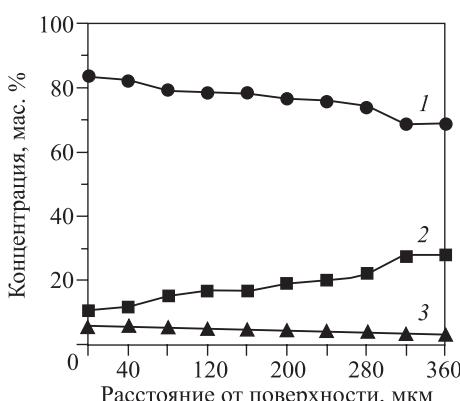


Рис. 2. Изменение концентрации элементов от поверхности в глубь образца для ПВХ после пропитки при 60 °С с последующей тепловлажностной обработкой (ТО)

1 – углерод; 2 – хлор; 3 – кислород

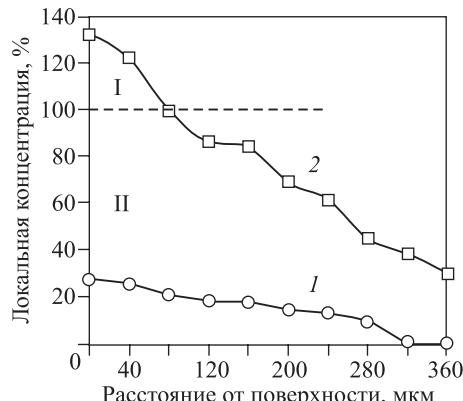


Рис. 3. Изменение локальной концентрации диффузанта от поверхности в глубь образца для ПВХ со степенью насыщения 0,4 (1) и 1,45 % (2)

ния расстояния от поверхности образца и совпадает с характеристикой поверхностью-модифицированного ПВХ на глубине 250 мкм (концентрация углерода 78 %, кислорода 2 %, хлора 18 %), где содержание ПИЦ минимально (рис. 2).

Профиль распределения элементов для модифицированного ПВХ монотонно изменяется от поверхности в глубь образца. Концентрация атомов хлора, присущая ПВХ, является более низкой, по мере углубления в образец она начинает возрастать. Монотонное уменьшение концентрации элементов углерода, также соответствующего изоцианатной группе, говорит о том, что распределение диффундировавшего ПИЦ и его продуктов отверждения идет по линейному градиенту.

Соотнесение рассчитанной средней локальной концентрации диффузанта в поверхностных слоях в соответствии с градиентом распределения элементов хлора и кислорода позволило получить приблизительный профиль распределения локальной концентрации продуктов отверждения ПИЦ (рис. 3).

Как видно, в образцах с оптимальной степенью пропитки ($\alpha = 0,4 \%$) наибольшая локальная концентрация диффузанта в поверхности ПВХ составляет $\sim 27 \%$, по мере углубления в образец она непрерывно изменяется, что, вероятно, является достаточным для создания усиленного поверхностного слоя. Структуру данных образцов можно охарактеризовать типом полу-ВПС II рода (см. рис. 3, область II), где сетчатые продукты отверждения ПИЦ распределены в матрице линейного полимера.

Для образцов, пропитанных при 80 °С, увеличение степени насыщения ($\alpha = 1,45 \%$) обуславливает высокие значения локальной концентрации ($\sim 130 \%$). Поверхность этих образцов характеризуется структурой полу-ВПС I рода (см. рис. 3, область I), где преобладающей фазой являются отверженные продукты ПИЦ, в которых распределен линейный полимер ПВХ. По мере приближения к центру образца, когда концентрация диффузанта и соот-

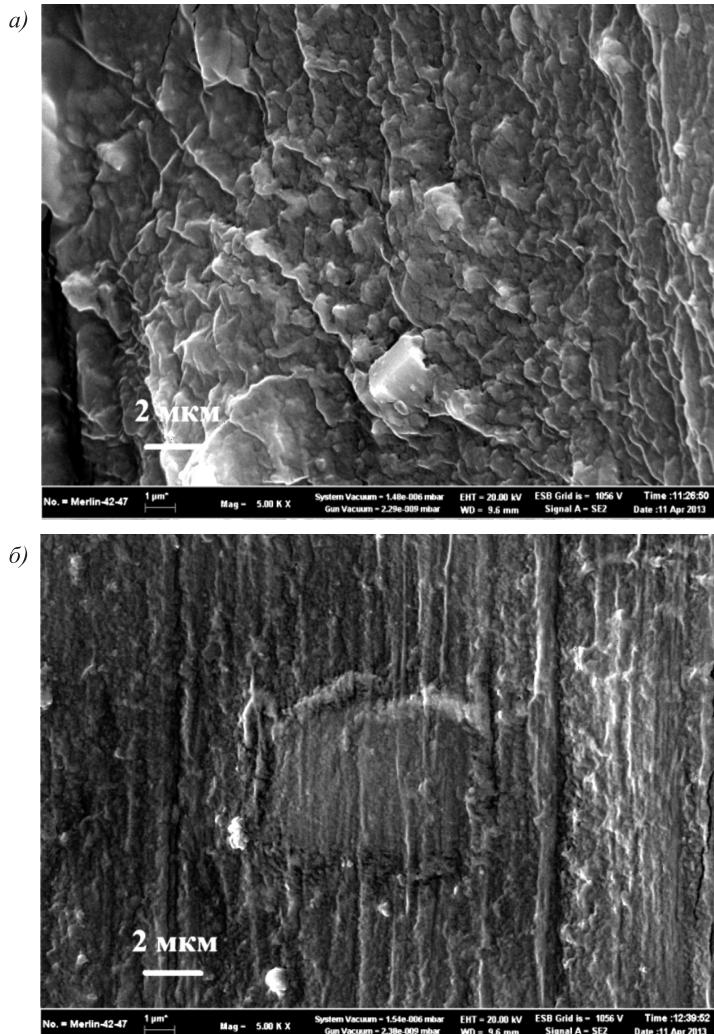


Рис. 4. Электронные микрофотографии с различным увеличением поперечного среза образцов исходного ПВХ (а), ПВХ после пропитки при 60 °С (б) с последующей ТО

ветственно отверженного олигомера уменьшается, происходит инверсия фаз с переходом к структуре типа полу-ВПС II рода.

Улучшение физико-механических свойств в результате появления градиента концентрации объясняют несколькими гипотезами. Одна из них заключается в том, что данные градиентные материалы рассматривают как совокупность бесконечного множества слоев, состав и модули упругости которых монотонно изменяются при удалении от поверхности в глубь образца. При деформации образца все слои растягиваются в одинаковой степени, напряжение в каждом слое соответствует его модулю. Такое распределение напряжений способствует развитию пластической деформации, а не хрупкому разрушению, и приводит к увеличению разрывных удлинений и энергии разрушения [7, 8]. Другая гипотеза связывает повышение прочности градиентных полу-ВПС с уменьшением дефектности поверхностных слоев [9].

Анализ микрофотографий увеличенной области поверхностного слоя на поперечном срезе образцов (рис. 4) показал, что немодифицированный ПВХ при большом увеличении ($\times 5000$) характеризуется рыхлой структурой. В результате диффузационной модификации возникает менее дефектная, уплотненная структура (рис. 4, б).

Выводы. Таким образом, в результате диффузационной модификации ПВХ материалов имеет место линейное градиентное распределение продуктов отверждения ПИЦ в поверхностных слоях ПВХ, присутствие которых приводит к образованию совместных взаимопроникающих структур, являющихся менее дефектными, более уплотненными и позволяющими увеличить сопротивление полимерных материалов внешним воздействиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ротрекл Б., Гудичек К., Канареек Я., Станек Я. Поверхностная обработка пластмасс / Пер. с чеш.; под ред. Ш.Л. Лельчука. Л.: Химия, 1972. 184 с.
2. Штурман А.А., Леонов С.В. Обработка полимерных деталей при отрицательной температуре // Пласт. массы. 1990. № 6. С. 31–33.
3. Gregor H., Sharmat A., Gruniger M. Добавки для повышения стойкости к царапанию автомобильных пластиков как конкуренты защитным эмалям // Пласт. массы. 2006. № 10. С. 39–42.
4. Thomas S., Grande D., Cvelbar U., Raju K., Narayan R., Thomas S.P., Akhina H. Micro- and nano-structured interpenetrating polymer networks. From design to application. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016. 407 p.
5. Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А., Старостина И.А., Ягунд Э.М., Кузнецова Л.М. Поверхностное усиление ПВХ полиизоцианатом // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 3. С. 28–33.
6. Бровко А.А., Горбач Л.А., Сергеева Л.М. Вязкоупругие свойства и моделирование процесса формирования полиуретан-полиакрилатных градиентных взаимопроникающих полимерных сеток // Полимер. журн. 2009. Т. 31, № 4. С. 299–310.
7. Akovali G., Biliyar K., Shen M. Gradient polymers by diffusion polymerization // Journal of applied polymer science. 1976. Vol. 20, Iss. 9. Pp. 2419–2427.
8. Сергеева Л.М., Горбач Л.А. Градиентные взаимопроникающие полимерные сетки: получение и свойства // Успехи химии. 1996. Т. 65, № 4. С. 367–376.
9. Martin G.C., Enssani E., Shen M. Mechanical behavior of gradient polymers // Journal of applied polymer science. 1981. Vol. 26, Iss. 5. Pp. 1465–1473.

Исламов Анвар Махмутович, канд. техн. наук, ассист.; E-mail: iam16@yandex.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Фахрутдинова Венера Хафизовна, канд. хим. наук, доц.; E-mail: olvik@list.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Абдрахманова Ляйля Абдулловна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: laa@kgasu.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 20.02.17

Islamov Anvar Makhmutovich, PhD, Assistant; E-mail: iam16@yandex.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Fakhrutdinova Venera Khafizovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: olvik@list.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Abdrakhmanova Lyaylya Abdullovna, DSc, Professor; E-mail: laa@kgasu.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

STUDY OF THE STRUCTURE PVC MATERIALS WHICH ARE SURFACE MODIFICATED BY THE POLYISOCYANATE

In work presents the results of studying the structure of gradient polymeric materials based on polyvinylchloride (PVC) having enhanced surface properties. These materials were obtained by diffusion impregnation of PVC in a reactive oligomer – polyisocyanate to a certain degree of swelling, followed by its thermosetting into a cross-linked polymer. It was found that in the surface layer of the obtained materials the concentration of the cured polyisocyanate decreases along a linear gradient into the interior of the sample, and forms together with linear PVC macromolecules joint structures of the type of semi-interpenetrating networks having a greater density and less defect, which cause an increase in the mechanical and performance properties of these materials.

K e y w o r d s: polyvinylchloride, polyisocyanate, semi-interpenetrating networks, gradient, diffusion.

REFERENCES

1. Rotrek1 B., Gudichek K., Kanareyek Ya., Stanek Ya. Poverkhnostnaya obrabotka plastmass [Surface treatment of plastics]. Leningrad, Chemistry, 1972. 184 p. (in Russian)
2. Shturman A.A., Leonov S.V. Obrabotka polimernykh detaley pri otritsatel'noy temperaturye [Processing of polymer parts at a negative temperature]. Plasticheskiye massy [Plastics]. 1990. No. 6. Pp. 31–33. (in Russian)
3. Gregor H., Sharma A., Brunner M. Dobavki dlya povysheniya stoykosti k tsarapaniyu avtomobil'nykh plastikov kak konkurenty zashchitnym emalyam [Additives to enhance the scratch resistance of automotive plastics as competitors to protective enamels]. Plasticheskiye massy [Plastics]. 2006. No. 10. Pp. 39–42. (in Russian)
4. Thomas S., Grande D., Cvelbar U., Raju K., Narayan R., Thomas S.P., Akhina H. Micro- and nano-structured interpenetrating polymer networks. From design to application. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2016. 407 p.
5. Islamov A.M., Fakhrutdinova V.Kh., Abdrafahmanova L.A., Starostina I.A., Yagund E.M., Kuznetsova L.M. Poverkhnostnoye usileniye PVKh poliizotsianatom [Surface reinforcement of PVC by reactive oligomers]. Izvestiya vuзов. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 3. Pp. 28–33. (in Russian)
6. Brovko A.A., Gorbach L.A., Sergeyeva L.M. Vyazkouprugiye svoystva i modelirovaniye protsesssa formirovaniya poliuretan-poliakrilatnykh gradiyentnykh vzaimopronikayushchikh polimernykh setok [Viscoelastic properties and modeling of the process of formation of polyurethane-polyacrylate gradient interpenetrating polymer networks]. Polimerniy zhurnal [Polymer Journal]. 2009. Vol. 31, No. 4. Pp. 299–310. (in Russian)
7. Akovali G., Biliyar K., Shen M. Gradient polymers by diffusion polymerization. Journal of applied polymer science. 1976. Vol. 20, Iss. 9. Pp. 2419–2427.
8. Sergeyeva L.M., Gorbach L.A. Gradiyentnyye vzaimopronikayushchiye polimernyye setki: polucheniye i svoystva [Gradient interpenetrating polymeric networks: obtaining and properties]. Uspekhi khimii [Russian Chemical Reviews]. 1996. Vol. 65, No. 4. Pp. 367–376. (in Russian)
9. Martin G.C., Enssani E., Shen M. Mechanical behavior of gradient polymers // Journal of applied polymer science. 1981. Vol. 26, Iss. 5. Pp. 1465–1473.

УДК 691.42 : 536.21

Н.С. НОВИКОВ, А.М. ЖЖОНЫХ

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПУСТОТ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕЛКОШТУЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Строительные материалы предлагаются рассматривать в качестве двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы и заполнителя. Проанализировано влияние теплофизических свойств пустот на примере кирпича формата 1НФ путем численного эксперимента методом конечно-элементного анализа, а также аналитического расчета. Приводятся результаты расчетов, их корреляция, уравнения регрессии и выводы по полученным данным.

Ключевые слова: пустотность, кирпич, теплопроводность, Ansys, конечно-элементный анализ.

Стремление получить легкий, прочный, теплоизоляционный материал привело к созданию специальных пустот в мелкоштучных изделиях. Известно, что коэффициент теплопроводности зависит от пористости, его снижение при увеличении пористости связано с тем, что поры материала заполнены воздухом, который имеет низкую теплопроводность [1]. На практике, при монтаже мелкоштучных изделий, пустоты оказываются частично заполнены кладочным раствором [2], который имеет высокую теплопроводность. В ряде стран Европы и в России находят применение крупногабаритные пустотельные керамические камни, в которых пустоты заполнены минеральной ватой [3]. Российский рынок также наполнен различными теплоблоками и термоблоками, у которых в качестве наполнителя используется пенополистирол. Большую номенклатуру мелкоштучных изделий с различным расположением пустот представляет ГОСТ 530 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия». В работе [4] отмечено, что в современной литературе нет четкого обоснования выбора того или иного расположения пустот. Чтобы понять какие виды пустот наиболее эффективны, на примере кирпича формата 1НФ воспользуемся аналитическим методом расчета. Примечательно, что приложение А, ГОСТ 530–2012 содержит меньшую номенклатуру кирпича формата 1НФ, чем приложение А, ГОСТ 530–2007. Форма, размеры и расположение пустот были взяты из приложения А, ГОСТ 530–2007.

Подробный анализ моделей теплопроводности капиллярно-пористых и дисперсных тел представлен в работе [5]. В статье [6] описано, что при расположении слоев вдоль потока тепла теплопроводность системы будет максимальной и ее можно рассчитать по формуле

$$\lambda_{\max}(\varphi) = \lambda_p \varphi + (1 - \varphi) \lambda_m, \quad (1)$$

где λ_p – теплопроводность заполнителя; φ – объемная доля заполнителя; λ_m – теплопроводность матрицы.

Если слои материалов перпендикулярны потоку тепла, эффективная теплопроводность системы минимальная и определяется по формуле

$$\lambda_{\min}(\varphi) = \frac{\lambda_p \lambda_m}{\lambda_m \varphi + \lambda_p (1-\varphi)}. \quad (2)$$

Известна формула (3) ГОСТ 9758–2012 для вычисления теплопроводности крупного заполнителя

$$\lambda_k = \lambda_p \frac{\varphi (2\lambda_p + \lambda_b) - 2(\lambda_b - \lambda_p)}{\varphi (2\lambda_p + \lambda_b) + (\lambda_b - \lambda_p)}, \quad (3)$$

где λ_p – теплопроводность растворной части бетона; λ_b – теплопроводность бетона.

Формула (3) может быть преобразована в формулу (4) определения теплопроводности в зависимости от объемной доли заполнителя

$$\lambda_g(\varphi) = \frac{\lambda_m(\lambda_p + 2\lambda_m + 2\varphi\lambda_p - 2\varphi\lambda_m)}{\varphi\lambda_m - \lambda_p(\varphi - 1) + 2\lambda_m}. \quad (4)$$

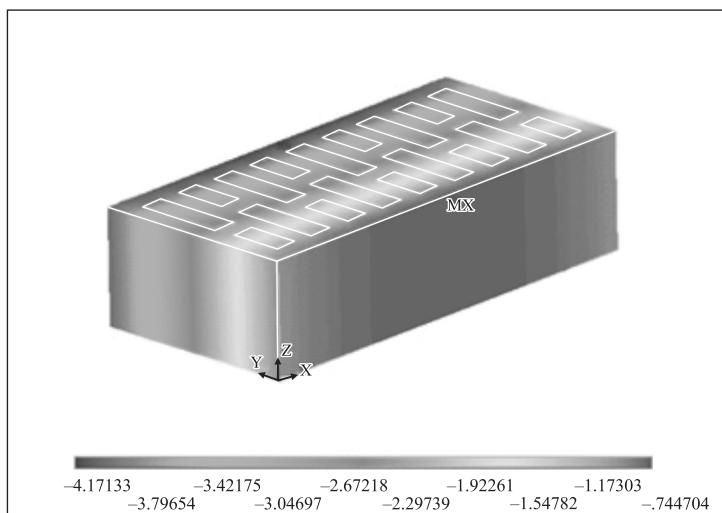
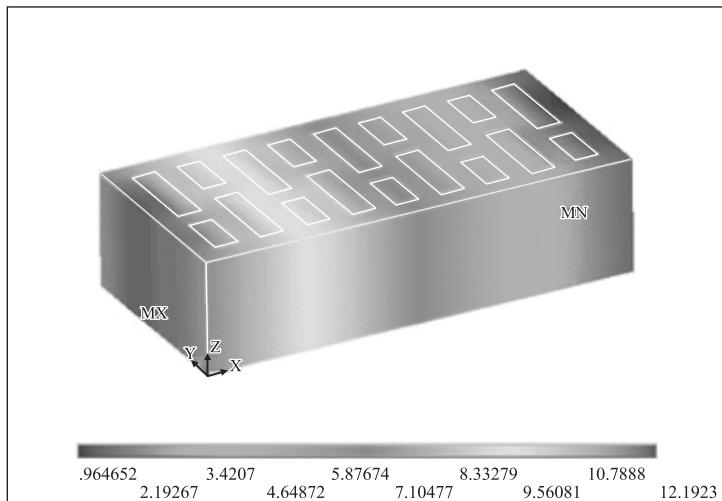
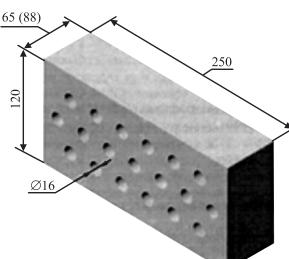
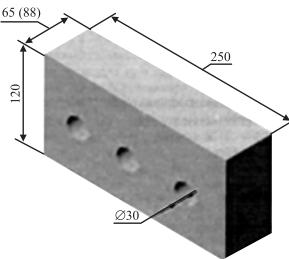
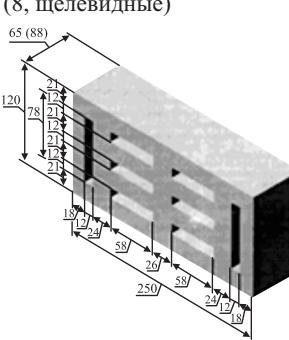
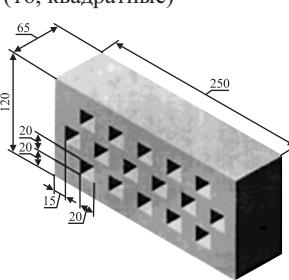
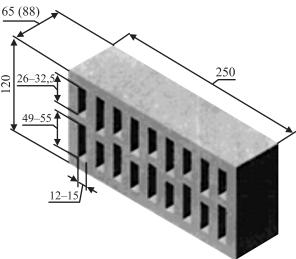
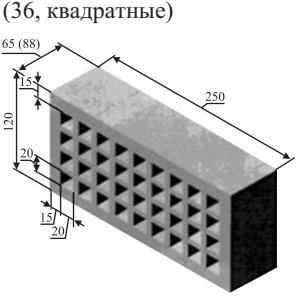
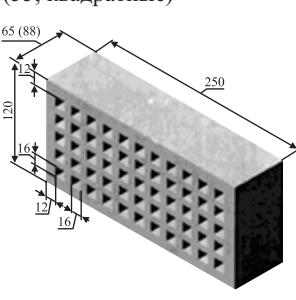


Рис. 1. Распределение температуры в кирпиче

Таблица 1. Результаты моделирования и аналитических расчетов

Кирпич (количество пустот, форма)	Теплопроводность, Вт/(м · °C)							Пустот- ность, %	
	заданная		расчетная						
			аналитическая		численная				
	λ_m	λ_p	λ_{\max}	λ_{\min}	λ_g	λ_1	λ_2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ц19 (19, цилиндрические)	65 (88) 	2,0	0,04	1,75	0,28	1,65	1,56	1,57	12,7
		2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
		2,0	1,02	1,88	1,78	1,85	1,84	1,84	
		1,0	0,04	0,88	0,25	0,83	0,79	0,79	
		1,0	2,00	1,13	1,07	1,10	1,09	1,09	
		1,0	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		1,5	2,00	1,56	1,55	1,56	1,56	1,56	
		1,5	0,04	1,31	0,27	1,24	1,17	1,18	
		1,5	1,02	1,44	1,42	1,43	1,43	1,43	
ц3 (3, цилиндрические)	65 (88) 	2,0	0,04	1,86	0,45	1,80	1,74	1,76	7,1
		2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
		2,0	1,02	1,93	1,87	1,92	1,91	1,91	
		1,0	0,04	0,93	0,37	0,90	0,88	0,88	
		1,0	2,00	1,07	1,04	1,05	1,05	1,05	
		1,0	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		1,5	2,00	1,54	1,53	1,53	1,53	1,53	
		1,5	0,04	1,40	0,42	1,35	1,31	1,32	
		1,5	1,02	1,47	1,45	1,46	1,46	1,46	
щ8 (8, щелевидные)	65 (88) 	2,0	0,04	1,64	0,20	1,50	1,08	1,06	18,6
		2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
		2,0	1,02	1,82	1,70	1,79	1,74	1,77	
		1,0	0,04	0,82	0,18	0,76	0,57	0,56	
		1,0	2,00	1,19	1,10	1,15	1,14	1,16	
		1,0	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		1,5	2,00	1,59	1,57	1,59	1,59	1,59	
		1,5	0,04	1,23	0,19	1,13	0,83	0,81	
		1,5	1,02	1,41	1,38	1,40	1,39	1,39	
к16 (16, квадратные)	65 	2,0	0,04	1,58	0,18	1,44	1,30	1,31	21,3
		2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
		2,0	1,02	1,79	1,66	1,76	1,75	1,75	
		1,0	0,04	0,80	0,16	0,73	0,66	0,67	
		1,0	2,00	1,21	1,12	1,17	1,15	1,15	
		1,0	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		1,5	2,00	1,61	1,59	1,60	1,59	1,59	
		1,5	0,04	1,19	0,17	1,08	0,98	0,99	
		1,5	1,02	1,40	1,36	1,39	1,39	1,39	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
щ18 (18, щелевидные) 	2,0	0,04	1,33	0,11	1,14	1,14	0,69	
	2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
	2,0	1,02	1,66	1,50	1,62	1,63	1,57	
	1,0	0,04	0,67	0,11	0,58	0,58	0,37	
	1,0	2,00	1,34	1,21	1,28	1,29	1,24	
	1,0	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	
	1,5	2,00	1,67	1,64	1,66	1,66	1,65	
	1,5	0,04	1,00	0,11	0,86	0,86	0,53	
	1,5	1,02	1,34	1,29	1,32	1,33	1,31	
к36 (36, квадратные) 	2,0	0,04	1,06	0,08	0,87	0,68	0,74	
	2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
	2,0	1,02	1,53	1,37	1,49	1,46	1,46	
	1,0	0,04	0,54	0,08	0,45	0,35	0,39	
	1,0	2,00	1,48	1,32	1,41	1,37	1,39	
	1,0	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	
	1,5	2,00	1,74	1,71	1,73	1,72	1,72	
	1,5	0,04	0,80	0,08	0,66	0,51	0,56	
	1,5	1,02	1,27	1,22	1,26	1,25	1,25	
к55 (55, квадратные) 	2,0	0,04	1,08	0,08	0,89	0,68	0,76	
	2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
	2,0	1,02	1,54	1,38	1,50	1,46	1,47	
	1,0	0,04	0,55	0,08	0,46	0,37	0,40	
	1,0	2,00	1,47	1,31	1,40	1,37	1,37	
	1,0	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	
	1,5	2,00	1,74	1,70	1,72	1,71	1,72	
	1,5	0,04	0,82	0,08	0,67	0,54	0,58	
	1,5	1,02	1,28	1,23	1,26	1,25	1,26	

Одним из методов теплотехнической оценки является численный эксперимент. Такой метод позволяет сократить количество трудоемких, долговременных, сложных и зачастую дорогостоящих экспериментальных исследований. Расчет проводился методом конечно-элементного анализа в универсальном программном комплексе Ansys [7]. Для моделирования теплопроводности использовался четырехгранный, квадратичный (со срединными узлами) элемент Solid87 [8]. Тепловой поток задавался граничными условиями третьего рода. Теплопроводность матрицы в интервале от 1,0 до 2,0 Вт/(м · °C), теплопроводность заполнителя от 0,04 до 2 Вт/(м · °C). На рис. 1 видно распределение температуры на примере кирпича формата 1НФ с 18 щелевидными пустотами. Слева тепловой поток направлен вдоль ложка, справа – вдоль тычка.

Результаты численного и аналитического расчета приведены в табл. 1, где λ_1 и λ_2 – теплопроводность кирпича вдоль тычка и теплопровод-

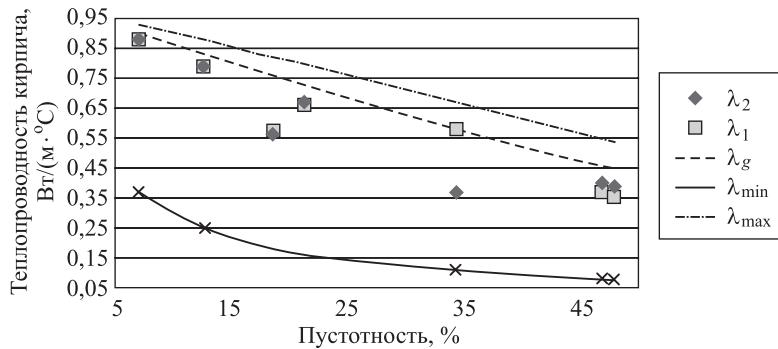


Рис. 2. Зависимость теплопроводности от пустотности

ность кирпича вдоль ложка соответственно, полученные путем моделирования.

На рис. 2 представлена зависимость теплопроводности от пустотности при значениях $\lambda_m = 1$ и $\lambda_p = 0,04$. Сплошными линиями показаны результаты аналитических расчетов по формулам (1), (2) и (4), маркерами – результаты численных расчетов методом конечных элементов.

Следует отметить, что теплопроводность вдоль и поперек у исследуемых кирпичей практически одинакова, однако резко отличается для щелевидного кирпича с пустотностью 34,4 %.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции в зависимости теплопроводности от пустотности

	$\lambda_{max}(1)$	$\lambda_{min}(2)$	$\lambda_g(4)$	λ_1
$\lambda_{max}(1)$	1,00	0,74	0,99	0,97
$\lambda_{min}(2)$	0,74	1,00	0,80	0,86
$\lambda_g(4)$	0,99	0,80	1,00	0,99
λ_1	0,97	0,86	0,99	1,00

Для исследования влияния теплопроводности матрицы и пустот на теплопроводность кирпича, полученную путем моделирования, рассмотрим уравнения регрессии. Уровни варьирования приняты в кодированных единицах. В результате расчетов получены уравнения регрессии, представленные в табл. 3.

Качество аппроксимации для всех полученных уравнений хорошо видно на рис. 3.

Исследуемые параметры имеют различную степень влияния (абсолютную величину коэффициентов) в зависимости от расположения пустот в кирпиче:

$$\lambda_m > \lambda_m \lambda_p > \lambda_p > \lambda_p^2 - \text{для кирпича ц19};$$

$$\lambda_m > \lambda_p > \lambda_p^2 > \lambda_m \lambda_p - \text{для кирпича ц3};$$

$$\lambda_p > \lambda_m > \lambda_p^2 > \lambda_m \lambda_p - \text{для кирпича щ8, щ18, к36, к55};$$

$$\lambda_m > \lambda_p > \lambda_p^2 > \lambda_m \lambda_p - \text{для кирпича к16}.$$

Члены с отрицательным знаком в уравнении свидетельствуют о том, что увеличение значения каждого фактора от минимума -1 до максимума $+1$ при прочих равных условиях с некоторого значения вызывает изменение

Таблица 3. Уравнения регрессии

Направление теплового потока	Кирпич	Уравнение
Вдоль ложка	ц19	$1,429 + 0,42\lambda_m + 0,185\lambda_p - 0,058\lambda_p^2 + 0,32\lambda_m\lambda_p$
	ц3	$1,456 + 0,457\lambda_m + 0,103\lambda_p - 0,033\lambda_p^2 + 0,017\lambda_m\lambda_p$
	щ8	$1,39 + 0,352\lambda_m + 0,387\lambda_p - 0,190\lambda_p^2 + 0,085\lambda_m\lambda_p$
	к16	$1,387 + 0,373\lambda_m + 0,295\lambda_p - 0,095\lambda_p^2 + 0,052\lambda_m\lambda_p$
	щ18	$1,308 + 0,273\lambda_m + 0,550\lambda_p - 0,217\lambda_p^2 + 0,110\lambda_m\lambda_p$
	к36	$1,248 + 0,235\lambda_m + 0,570\lambda_p - 0,107\lambda_p^2 + 0,065\lambda_m\lambda_p$
	к55	$1,259 + 0,242\lambda_m + 0,558\lambda_p - 0,108\lambda_p^2 + 0,067\lambda_m\lambda_p$
Вдоль тычка	ц19	$1,428 + 0,42\lambda_m + 0,188\lambda_p - 0,062\lambda_p^2 + 0,35\lambda_m\lambda_p$
	ц3	$1,456 + 0,453\lambda_m + 0,108\lambda_p - 0,038\lambda_p^2 + 0,022\lambda_m\lambda_p$
	щ8	$1,387 + 0,352\lambda_m + 0,375\lambda_p - 0,175\lambda_p^2 + 0,087\lambda_m\lambda_p$
	к16	$1,387 + 0,373\lambda_m + 0,3\lambda_p - 0,1\lambda_p^2 + 0,052\lambda_m\lambda_p$
	щ18	$1,329 + 0,315\lambda_m + 0,395\lambda_p - 0,068\lambda_p^2 + 0,037\lambda_m\lambda_p$
	к36	$1,250 + 0,235\lambda_m + 0,591\lambda_p - 0,135\lambda_p^2 + 0,075\lambda_m\lambda_p$
	к55	$1,252 + 0,232\lambda_m + 0,582\lambda_p - 0,128\lambda_p^2 + 0,080\lambda_m\lambda_p$

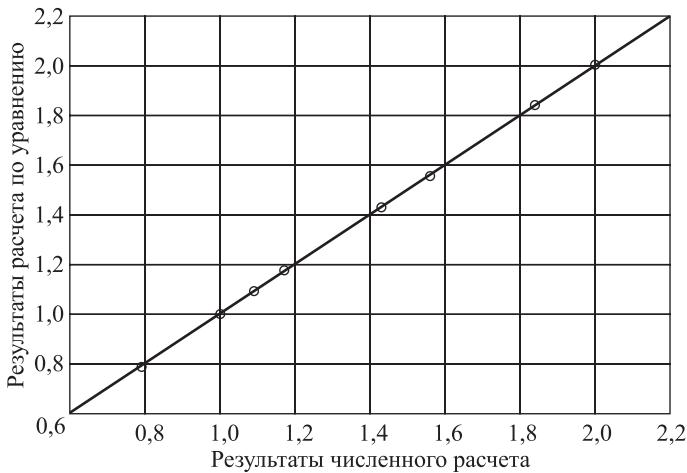


Рис. 3. Качество аппроксимации двухфакторного эксперимента

ние теплопроводности, т.е. обнаруживается зона экстремума. Положительный коэффициент при взаимодействии факторов показывает, что уменьшить теплопроводность можно одновременным снижением теплопроводности матрицы и увеличением теплопроводности заполнителя либо наоборот.

Заключение. Для кирпича с пустотностью менее 30 % (исключение составляет кирпич с 8 щелевидными отверстиями) эффективнее уменьшать теплопроводность, понижая теплопроводность матрицы. Уменьшать теплопроводность кирпича с пустотностью более 30 % эффективнее, понижая теплопроводность пустот.

У исследуемых образцов с пустотностью до 21,3 % теплопроводность, рассчитанная вдоль и поперек, практически идентична. У кирпича с пустотностью более 21,3 % разница может достигать 11,8 %. Исключение составляют кирпичи со щелевидными пустотами, теплопроводность которых в значительной степени зависит от расположения пустот по отношению к тепловому потоку, и разница может достигать 39,5 %.

Результаты, полученные по преобразованной формуле (3) ГОСТ 9758–2012, сопоставимы с результатами, вычисленными методом конечных элементов. Для прогнозирования теплопроводности кирпича следует пользоваться формулой (4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепанов В.И., Панченко Ю.Ф., Черных Н.А., Панченко Д.А. Влияние размера пустот на теплотехническую эффективность стеновых материалов // Научные труды SWorld. 2014. Т. 16, № 2. С. 90–96.
2. Валуэских В.П., Палкин П.А., Коробов М.А. Повышение энергоэффективности кирпичной кладки // Научные труды SWorld. 2012. Т. 47, № 4. С. 83–88.
3. Ищук М.К., Ширый М.В. Экспериментальные исследования прочности и деформаций кладки из крупноформатных керамических камней с заполнением пустот утеплителем // Стройт. материалы. 2012. № 5. С. 93–95.
4. Анисакова Т.В., Рахимбаев Ш.М., Кафтаева М.В. Влияние формы и расположения пустот и пор на коэффициент теплопроводности стеновых ограждающих конструкций зданий // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 186.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справ. М.: Энергия, 1971. 550 с.
6. Назиров Р.А., Волков А.Н., Фаткулина-Яськова Л.М. Моделирование теплопроводности легких бетонов на крупном заполнителе // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2013. № 2 (24). С. 238–246.
7. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Аул А.А., Нагибович А.И., Афанасьева И.Н., Коzyrev О.А., Павлов А.С. Верификационный отчет по программному комплексу Ansys Mechanical. М.: ЗАО НИЦ СтаДиО, НОЦ КМ МГСУ, 2009. Т. 4.
8. Thermal Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 12.1, 2010.

Новиков Никита Сергеевич, асп.; E-mail: novikov.nick.s@gmail.com

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Жжоных Алексей Максимович, асп.; E-mail: aspirantura.sfu@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 17.02.17

Novikov Nikita Sergeevich, Post-graduate Student; E-mail: novikov.nick.s@gmail.com
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Zzhzhonyh Aleksej Maksimovich, Post-graduate Student;
E-mail: aspirantura.sfu@mail.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

THE IMPACT OF THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF VOIDS ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF SMALL-PIECE ARTICLES

Building materials are suggested to be considered as a two component system consisting of matrix and filler. The authors analyzed the influence of the thermal properties of the voids

using the bricks 1NF format as the example. Numerical simulation was used for the analysis method of element method as well as the calculation formulas. There are the results of calculations of correlation, regression equations and conclusions from data in the article.

Keywords: emptiness, bricks, thermal conductivity, Ansys, finite element analysis.

REFERENCES

1. Cherepanov V.I., Panchenko Yu.F., Chernykh N.A., Panchenko D.A. Vliyanie razmera pustot na teplotekhnicheskuyu effektivnost' stenovykh materialov [Influence of the size of voids on the thermal performance of wall materials]. Nauchnye trudy SWorld [Scientific works of SWorld]. 2014. T. 16, No. 2. Pp. 90–96. (in Russian)
2. Valuyskikh V.P., Palkin P.A., Krobov M.A. Povyshenie energoeffektivnosti kirkichnoy kladki [Improving the energy efficiency of brickwork]. Nauchnye trudy SWorld [Scientific works of SWorld]. 2012. T. 47, No. 4. Pp. 83–88. (in Russian)
3. Ishchuk M.K., Shiray M.V. Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i deformatsiy kladki iz krupnoformatnykh keramicheskikh kamney s zapolneniem pustot uteplitelem [Experimental studies of the strength and deformations of masonry from large-format ceramic stones with the filling of voids with a heater]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2012. No. 5. Pp. 93–95. (in Russian)
4. Anikanova T.V., Rakimbaev Sh.M., Kafteeva M.V. Vliyanie formy i raspolozheniya pustot i por na koefitsient teploprovodnosti stenovykh ogranichayushchikh konstruktsiy zdaniy [Influence of the shape and arrangement of voids and pores on the coefficient of thermal conductivity of wall enclosing structures of buildings]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2014. No. 5. P. 186. (in Russian)
5. Lykov A.V. Teplomassoobmen: Spravochnik [Heat and mass transfer: Handbook]. Moscow, 1971. 550 p. (in Russian)
6. Nazirov R.A., Volkov A.N., Fatkulina-Yas'kova L.M. Modelirovaniye teploprovodnosti legkikh betonov na krupnom zapolnitele [Simulation of the thermal conductivity of light concretes on a large aggregate]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. 2013. No. 2 (24). Pp. 238–246. (in Russian)
7. Belostotskiy A.M., Dubinskiy S.I., Aul A.A., Nagibovich A.I., Afanas'eva I.N., Kozyrev O.A., Pavlov A.S. Verifikatsionnyy otchet po programmnomu kompleksu Ansys Mechanical [Verification report on the software complex Ansys Mechanical]. Moscow, 2009. (in Russian)
8. Thermal Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 12.1, 2010.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА



УДК 697.98.001.24

М.И. ШИЛЯЕВ, Е.М. ХРОМОВА, А.А. ДОРОШКИНА

РАСЧЕТ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ИНЕРЦИОННО-КОНДЕНСАЦИОННО-АБСОРБЦИОННОЙ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

Часть 3. СИСТЕМА СКВОЗНОГО РАСЧЕТА МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ И ТЭС

Проанализирован пример расчета трехступенчатой комплексной инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки дымовых газов котельной, работающей на угольном топливе с использованием разработанных авторами методов расчета и математических моделей для инерционных пылеуловителей и абсорберов. Показано, что с помощью этих методов и моделей можно оптимально расчетным путем подобрать газоочистное оборудование по типу аппаратов, их компоновке, габаритам и энергозатратам на пылеулавливание и абсорбцию вредных газовых компонентов при условии обеспечения санитарных норм выбросов в атмосферу.

Ключевые слова: инерционные пылеуловители, форсуночные скруббера, пенные аппараты, многоступенчатая пыле- и газоочистка.

Введение. В основу расчета первой ступени положен универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей (УМР) [1, 2], а также энергетический принцип (ЭП) сравнения пылеуловителей и систем из них (каскадных, батарейных) по удельным энергозатратам на очистку газов. УМР и ЭП позволяют расчетным путем подобрать менее энергоемкое пылеулавливающее оборудование для I ступени сухой очистки дымовых газов от пыли. При этом I ступень в свою очередь может быть двух-, трехступенчатой. Количество ступеней определяется вариацией расчетов [3]. На основе обобщенной абсорбционно-конденсационной модели рассчитываются II, III ступени, в которых осуществляется очистка газа после I ступени конденсационным способом от тонкодисперсной пыли за счет ее укрупнения конденсатом паров жидкости и повышения инерционно-столкновительного эффекта с каплями жидкости в форсуночных аппаратах (скрубберах Вентури (СВ)), полых форсуночных скрубберах (ПФС) [4]. В III ступени окончательной очистки

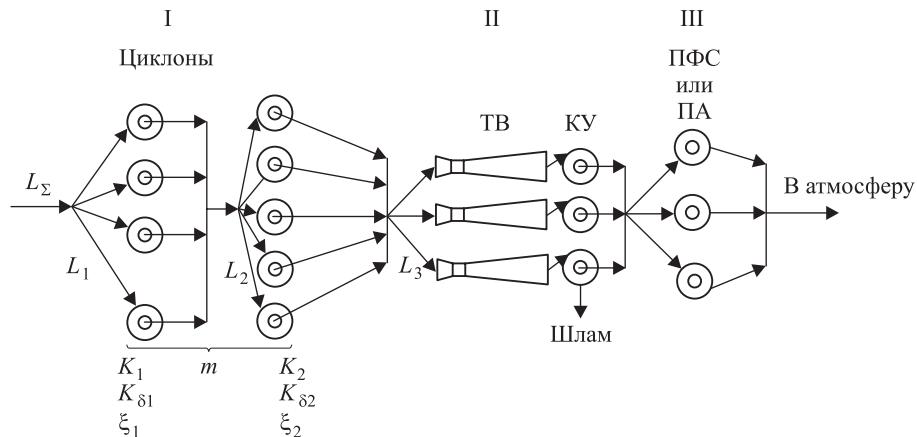


Рис. 1. Схема многоступенчатой пыле- и газоочистки

I – сухая очистка газов от пыли; II – конденсационно-абсорбционная пыле- и газоочистка; III – окончательная абсорбционная газоочистка

газов от вредных газовых компонентов могут быть использованы ПФС или пенные аппараты (ПА), для которых разработаны авторами собственные модели тепломассообмена и абсорбционной газоочистки [1, 2, 5, 6].

Рассмотрим подробно и последовательно подходы и основы расчета пыле- и газоочистки на отдельных ступенях трехступенчатой системы (рис. 1), условия перехода от ступени к ступени и получение окончательного результата по параметрам вредных компонентов в выбросах в атмосферу.

Ступень I. Предлагается использовать аппараты сухой инерционной очистки газов от пыли, в частности, циклоны различных типов, либо другие устройства, например, дымососы-пылеуловители [7], жалюзийные пылеуловители и др. Как показано в работе [3], для целей комплексной пыле-газоочистки на этой ступени достаточно одного ряда инерционных аппаратов, позволяющих уловить основную массу наиболее крупных частиц и существенно снизить концентрацию и размер их в потоке, что благоприятствует достижению высокой эффективности пылеулавливания конденсационным способом в форсуночных скрубберах ступени II, как установлено в работе [4].

Ступень II. Обеспечивает комплексную конденсационно-абсорбционную очистку газов от пыли и вредных газовых компонентов. Продолжим расчет пылегазоочистки на ступенях II и III по параметрам пыли и газа на выходе из ступени I, соответствующих параметрам на входе в ступень II, примера работы [3]. Поскольку температура газов после их очистки от пыли на I ступени остается еще достаточно высокой (выше 100 °C), использование ПА недопустимо, ПФС – нежелательно ввиду их громоздкости. Наиболее целесообразно для очистки больших расходов газов на этой ступени устанавливать СВ – трубы Вентури (ТВ) с каплеуловителями (КУ) и шламоотстойниками с осветлением воды, используемой для орошения потока в горловине ТВ, с добавлением свежей, замещающей выбывающую вместе со шламом из рециркуляционного цикла. Преимущественный выбор для этой ступени СВ определяется прежде всего высокой производительностью аппаратов и высокой эффективностью пыле- и газоочистки при сравни-

тельно умеренных их габаритах. Кроме того, как показывают расчеты, в СВ после ступени I сухой газоочистки газов наиболее тонкая пыль практически полностью улавливается конденсационным способом в ступени II. При этом очищаемый газ охлаждается до температур, допускающих использование ПФС и ПА для конденсационно-абсорбционной доочистки газов от оставшейся тонкодисперской пыли и вредных газовых компонентов до концентраций, соответствующих санитарным нормам.

На этой ступени производится расчет с помощью математической модели абсорбционно-конденсационной газоочистки (МАКО – модель абсорбционно-конденсационной очистки) в форсуночных скрубберах, подробно изложенной, проанализированной в работах [5, 6]. Для вхождения в расчет на этой ступени необходимо поставить следующие начальные условия (для СВ их привязывают к горловине ТВ) при $x = 0$:

- температура газов $T = T_{02}$, К (температура T_{02} должна соответствовать температуре газов, выходящих из I ступени сухой очистки);
- влагосодержание газов $d = d_0$, кг/кг сух. газов (должно задаваться по влажности дымовых газов, поступающих на газоочистку);
- скорость газов U_0 в горловине ТВ определяется по расходу очищаемого газа L_Σ , количеству ТВ K_{TB} , устанавливаемых параллельно, и диаметру их горловины D_r

$$U_0 = \frac{4L_\Sigma}{K_{\text{TB}}\pi D_r^2} \frac{T_{02}}{T_{r1}}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где T_{r1} – температура газов, поступающих на очистку в систему;

- коэффициент орошения задается по требуемой эффективности газоочистки, при этом

$$q = \frac{L_{\text{ж}}}{L_\Sigma} \frac{T_{r1}}{T_{02}}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2)$$

где $L_{\text{ж}}$ – объемный расход жидкости;

- размер капель жидкости δ_{k0} в горловине ТВ определяется по формуле Нукиямы–Танасавы

$$\delta_{k0} = \frac{0,585}{U_0 - V_{k0}} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}} + 53,4 \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\sqrt{\rho_{\text{ж}}\sigma_{\text{ж}}}} \right)^{0,45} \tilde{q}, \text{ м}, \quad (3)$$

где V_{k0} – скорость капель в горловине ТВ, можно принять $V_{k0} = 0\text{--}4$ м/с [2], $\sigma_{\text{ж}}$, $\mu_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – коэффициенты поверхностного натяжения, динамической вязкости и плотность распыливаемой жидкости; поскольку чаще всего распыливается вода или слабые водные растворы (абсорбенты) при температурах 5–20 °C, то можно принять $\sigma_{\text{ж}} = 0,072$ Н/м, $\mu_{\text{ж}} = 10^{-3}$ Па · с, $\rho_{\text{ж}} = 10^3$ кг/м³;

U_0 – скорость газа в горловине трубы Вентури;

\tilde{q} – коэффициент орошения, м³/м³;

- температура капель T_{k0} , К, задается в пределах 5–20 °C и определяется по требуемой эффективности газоочистки вариацией расчетов;

- концентрация частиц пыли определяется на выходе из ступени I применительно к входу газов в ступень II;
- газосодержание (SO_2 , NO_x и пр.) $d_i = d_{i0}$ задается;
- угол раствора диффузора $\alpha = 6\text{--}7^\circ$, но можно определять вариацией расчетов по обеспечению максимума эффективности газоочистки (см.: [4]);
- необходимые теплофизические постоянные задаются по справочным данным (указаны в МАКО);
- необходимая длина диффузора СВ определяется по расчету.

Ступень III. Предназначена для абсорбционной очистки дымовых газов от вредных газовых компонентов (как показывают расчеты, все частицы пыли практически полностью улавливаются на ступени II в СВ). В качестве ступени III можно использовать ПФС или ПА. В ПФС, к сожалению, скорости очищаемых газов ограничены в прямоточном и противоточном варианте (не более 1 м/с), что влечет за собой громоздкость очистного оборудования из этих аппаратов как по их диаметрам, количеству в параллельной установке, так и по высоте. Их абсорбционная эффективность, как показывают расчеты, невысока. Значительным преимуществом в сравнении с ПФС обладают ПА, в свободном сечении которых скорость очищаемых газов можно обеспечивать до 3 м/с, абсорбционная их эффективность несравнимо более высокая, коэффициент орошения в несколько раз ниже [6]. К тому же орошение пенного слоя над решеткой можно организовать совместно с форсуночным орошением, как и в противоточном ПФС, что даст дополнительное улавливание вредных газовых компонентов на капли орошающей жидкости после пенного слоя.

Очистка дымовых газов на III ступени осуществляется только от вредных газовых компонентов за счет абсорбционного процесса. Расчет производится на основе модели тепломассообмена в барботажных аппаратах [6]. Если используются на этой ступени ПА, то необходимо задать следующие начальные условия:

- температура газов под газораспределительной решеткой $T = T_{03}$, К (задается приближенно по значению на выходе из диффузора ТВ, на самом деле она будет несколько ниже за счет охлаждения газов в КУ);
- температура жидкости, поступающей на газораспределительную решетку $T_{ж0} = 5\text{--}20^\circ\text{C}$ (определяется в последующем вариацией расчетов по обеспечению требуемой эффективности);
- коэффициент орошения $q = 0,5\text{--}10 \text{ л}/\text{м}^3$ (определяется в последующем вариацией расчетов по обеспечению требуемой эффективности при минимальных энергозатратах);
- газосодержание (SO_2 , NO_x и пр.) $d_i = d_{i3}$ задается по значениям на выходе из ТВ ступени II;
- влагосодержание $d = d_3$ задается по значениям на выходе из ТВ ступени II;
- скорость газа под решеткой 2,5–3,0 м/с;
- диаметр отверстий 4–6 мм;
- живое сечение в решетке $s = 0,06\text{--}0,012 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Если на этой ступени снова используется СВ, то начальные условия для горловины ТВ задаются для парогазового потока так же, как и для ступени II, по ее выходным параметрам.

Численная реализация системы расчета на ступенях II и III. Исходные данные для расчета приведены в [3].

Исходя из изложенного в [3], для рассматриваемого примера расчета в этой статье целесообразно на I ступени сухого пылеулавливания установить только один ряд циклонов ЦН-11, оставшуюся в газе пыль с концентрацией $3,25 \text{ г}/\text{м}^3$ пустить на доулавливание конденсационным способом в СВ ступени II.

Предположим, что газ в циклонах охлаждается до 120°C . Далее он поступает на ступень II мокрой очистки, осуществляющейся с помощью стандартизированного СВ с диаметром горловины $D_r = 1 \text{ м}$, углом раствора диффузора $\alpha = 7^\circ$, длиной диффузора $l = 10 \text{ м}$. В горловину ТВ подводится диспергируемая вода с температурой $t_w = 5^\circ\text{C}$ при коэффициенте орошения $q = 15 \text{ л}/\text{м}^3$. Для очистки $100 \text{ м}^3/\text{с}$ газа надо установить параллельно 2 такие трубы. По

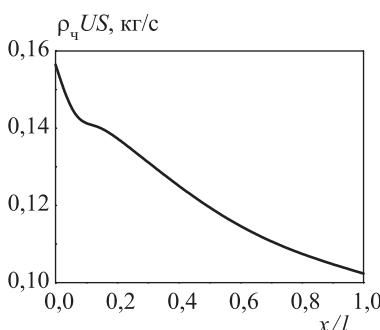


Рис. 2. Распределение потока частиц пыли размером $\delta_{40} = 0,1 \text{ мкм}$ по длине диффузора ТВ

ρ_4 – массовая концентрация частиц; U – скорость парогазового потока; S – текущая площадь поперечного сечения диффузора. Параметры расчета приведены в статье [3]

выходным параметрам пыли и газа из циклонов расчет СВ дает полную очистку его от пыли с размером частиц $\delta_{40} = 1 \text{ мкм}$ уже на входе в диффузор ТВ, частицы размером $\delta_{40} = 0,1 \text{ мкм}$ с той же входной концентрацией улавливаются на 35 % на всей длине диффузора (рис. 2), а SO_2 на капли до равновесного состояния извлекается на расстоянии около 7 м с эффективностью 59 % (рис. 3, а). Большую длину l изготавливать нецелесообразно (рекомендуемая по справочникам $l = (10-15)D_r$). На ступени III, состоящей из 14 ПФС диаметром $D = 3 \text{ м}$, высотой $H = 12 \text{ м}$, при орошении водой с температурой $t_w = 5^\circ\text{C}$, $q = 15 \text{ л}/\text{м}^3$ окончательная очистка газов от SO_2 осуществляется до 62 %, причем на полной высоте аппаратов (рис. 3, б).

Установка двух ПА диаметром

3 м вместо ПФС в качестве ступени III позволяет очистить дымовой газ от SO_2 почти до 80 % при орошении газораспределительной решетки водой с температурой $t_w = 5^\circ\text{C}$ и расходом порядка $q = 5 \text{ л}/\text{м}^3$ очищаемого газа,

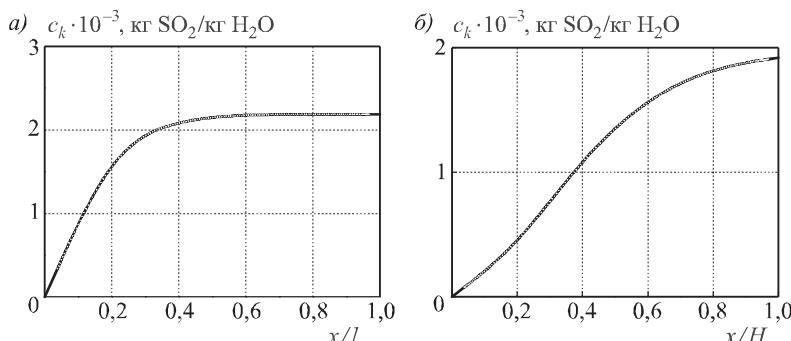


Рис. 3. Накопление концентрации SO_2 в каплях воды в диффузоре СВ (а) и по высоте ПФС (б). Параметры расчета приведены в статье [3]

что втрое ниже принятых в расчете значений коэффициента орошения для СВ и ПФС.

Выбор типов аппаратов, наиболее рациональной их компоновки, а также их конструктивных параметров для конкретных условий может быть сделан на основе вариации расчетов с помощью УМР, ЭП и разработанных авторами конденсационно-абсорбционных моделей. При использовании специальных водных растворов-абсорбентов эффективность газоочистки от SO_2 можно существенно повысить и минимизировать габариты оборудования и энергозатраты на сам процесс газоочистки с помощью разработанной авторами системы расчета. Для хемосорбции коэффициенты фазового равновесия в зависимости от концентрации и температуры раствора абсорбента определяются на основе решения обратной краевой задачи по уравнениям модели [5, 6] с использованием экспериментальных данных по входным и выходным параметрам потока, измеряемым, например, на трубе Вентури лабораторного стенда.

Пример расчета двухступенчатой пыле- и газоочистки для тех же исходных данных с использованием на ступени I дымососов-пылеуловителей и на ступени II скрубберов Вентури приведен в [7].

Выводы. Представлены и проанализированы алгоритм и пример расчета комплексной трехступенчатой системы пыле- и газоочистки с помощью сухих инерционных аппаратов – циклонов НИИОГАЗ и мокрых газоочистителей типа скрубберов Вентури, полых форсуночных скрубберов и пенных аппаратов на основе разработанных авторами методов расчета и физико-математических моделей тепломассообмена в этих аппаратах. Показана возможность оптимизации процессов газоочистки и оборудования на основе комплексного подхода и сквозного его расчета с помощью этих методов и моделей, реализуемых на ЭВМ, при этом программное обеспечение расчетов каждой ступени пыле- и газоочистки может быть использовано автономно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиляев М.И., Шиляев А.М., Грищенко Е.П. Методы расчета пылеуловителей. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2006. 385 с.
2. Шиляев М.И. Методы расчета пылеулавливающих систем. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2014. 320 с.
3. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу. Часть 1. Универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей и каскадов из них // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 1. С. 65–79.
4. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу. Часть 2. Конденсационно-абсорбционная модель процесса тепломассообмена и комплексной пылегазоочистки в форсуночных аппаратах // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 2. С. 39–51.
5. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers. Mass transfer – advances in sustainable energy and environment oriented numerical modeling. Vienna, Austria: In Tech, 2013. Pp. 163–194.

6. Шиляев М.И., Толстых А.В. Моделирование абсорбционного массообмена в пленном аппарате с учетом изменения концентраций абсорбируемых газов в жидкости // Теорет. основы хим. технологии. 2015. Т. 49, № 5. С. 563.
7. 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 // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 2. С. 88–94.

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

Дорошкина Александра Анатольевна, студ.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 29.12.16

Shilyaev Mikhail Ivanovich, DSc, Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Khromova Elena Mikhaylovna, PhD, Ass. Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Doroshkina Aleksandra Anatol'evna, Student

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

CALCULATION OF MULTI-STAGE INERTIAL-CONDENSATION-ABSORPTION OF DUST AND GAS PURIFICATION OF INDUSTRIAL EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

Part 3. THROUGH A MULTI-STAGE SYSTEM FOR CALCULATING THE FLUE GAS DUST AND GAS CLEANING BOILERS AND THERMAL POWER PLANTS

Analyzed an example of calculating the three-stage integrated inertial-condensation-absorption dust- and gas-cleaning boiler flue gas, running on coal, using calculation methods developed by the authors and mathematical models for inertial dust collectors and absorbers. It is shown that by using these methods and models can be optimized by calculation to choose gas-scrubbing equipment type devices, their arrangement, size and power consumption for dust removal and absorption of harmful gaseous components, provided that health standards in emissions.

Key words: inertial dust separators, nozzle type scrubbers, bubble machines, multi-dust and gas cleaning.

REFERENCES

1. Shilyaev M.I., Shilyaev A.M., Grishchenko E.P. Metody rascheta pyleuloviteley [Methods for calculating the precipitators]. Tomsk: Publishing TSUAB, 2006. 385 p. (in Russian)
2. Shilyaev M.I. Metody rascheta pyleulavlivayushchikh sistem [Methods for calculating the dust collecting systems]. Moscow, FORUM, INFRA-M, 2014. 320 p. (in Russian)
3. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Doroshkina A.A. Raschet mnogostupenchatoy inertsionno-kondensatsionno-absorbsionnoy pyle- i gazoochistki

promyshlennykh vybrosov v atmosferu. Chast' 1. Universal'nyy metod rascheta inertsionnykh pyleuloviteley i kaskadov iz nikh [Calculation of multi-stage inertial-condensation-absorption of dust and gas purification of industrial emissions into the atmosphere. Part 1. A universal method for calculating inertial dust traps and cascades of them]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 1. Pp. 65–79. (in Russian)

4. Shil'yayev M.I., Khromova E.M., Doroshkina A.A. Raschet mnogostupenchatoy inertsionno-kondensatsionno-absorbsionnoy pyle- i gazoochistki promyshlennykh vybrosov v atmosferu. Chast' 2. Kondensatsionno-absorbsionnaya model' protessa teplomassoobmena i kompleksnoy pylegazoochistki v forsunochnykh apparatakh [Calculation of multi-stage inertial-condensation-absorption of dust and gas purification of industrial emissions into the atmosphere. Part 2. Condensation-absorption model of heat and mass transfer and integrated gas treatment devices in the nozzle]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 2. Pp. 39–51. (in Russian)
5. Shil'yayev M.I., Khromova E.M. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers. Mass transfer – advances in sustainable energy and environment oriented numerical modeling. Vienna, Austria, In Tech, 2013. Pp. 163–194.
6. Shil'yayev M.I., Tolstykh A.V. Modelirovaniye absorbsionnogo massoobmena v pennom apparaite s uchetom izmeneniya kontsentratsiy absorbiruemikh gazov v zhidkosti [Modeling absorption mass transfer in the foam machine, adjusting absorbable gas concentrations in the fluid]. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical Engineering]. 2015. T. 49, No. 5. P. 563. (in Russian)
7. Shil'yayev M.I., Khromova E.M., Shirokova S.N. Otsenka effektivnosti dvukhstupenchatoy inertsionno-kondensatsionno-absorbsionnoy pyle- i gazoochistki dymovykh gazov kotel'nykh i TES, rabotayushchikh na ugle [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]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 2. Pp. 88–94. (in Russian)

УДК 697.133

Т.Л. РОХЛЕЦОВА, Н.С. КРИВОВА, Л.А. КИЯНИЦА

ВЛИЯНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ОКОННЫХ ПРОЕМОВ НА ВЕЛИЧИНУ УДЕЛЬНОЙ ОТОПИТЕЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Определены отопительные характеристики типовых панельных зданий при замене старых деревянных окон на современные с многокамерными профилями и теплоизолирующими стеклопакетами. Показано уменьшение отопительной нагрузки на здания при замене старых деревянных окон на современные энергосберегающие оконные конструкции на примере типовых серий жилых зданий для трех городов, расположенных в разных климатических зонах России. Обоснован процент снижения отопительной нагрузки для зданий при заключении договора с энергоснабжающей организацией на поставку теплоты. Установлено, что использование справочных данных об удельной отопительной характеристике для зданий постройки 1960–1990-х гг. при определении нагрузки на систему отопления дает завышенные результаты минимум на 26 %.

Ключевые слова: удельная отопительная характеристика, термическое сопротивление, коэффициент теплопередачи.

Введение. В связи с заменой в зданиях, построенных 20 лет назад и более, окон с деревянными переплетами на современные пластиковые необходимо уточнить тепловую нагрузку на эти здания для перезаключения договоров на поставку теплоты с энергоснабжающей организацией. Для этого нужно установить удельную отопительную характеристику здания. Существует способ определения фактической удельной тепловой характеристики здания при помощи телевизионного контроля и с помощью узлов учета [1]. Также есть метод определения фактических отопительных нагрузок при резко меняющихся величинах наружных температур с учетом изменения количества теплоты, аккумулируемого ограждающими конструкциями зданий [2]. Однако чаще всего стараются использовать справочные данные. Но справочными данными об отопительных характеристиках зданий воспользоваться не представляется возможным, так как в справочниках приведены данные для старых деревянных окон в раздельных переплетах, имеющих пониженное термическое сопротивление, не соответствующие требованиям энергосбережения [3].

Целью данной работы является определение отопительной характеристики здания при замене старых деревянных окон на современные с многокамерными профилями и теплоизолирующими стеклопакетами. Расчеты проведены для жилых зданий наиболее распространенных типовых серий постройки после 1960 г. для трех городов России различных климатических зон – Москвы ($t_h = -26^{\circ}\text{C}$), Новосибирска ($t_h = -39^{\circ}\text{C}$) и Краснодара ($t_h = -19^{\circ}\text{C}$).

Методы. Удельная отопительная характеристика здания согласно МГСН 2.01–99 «Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению» – это максимальный тепловой поток на отопление здания при разности температур внутренней и наружной среды в 1 °C, отнесенный к 1 м³ отапливаемого объема здания. Удельная отопительная характеристика здания – один из важных теплотехнических параметров, который обязательно указывается в энергетическом паспорте здания. Знание его необходимо для проведения проектно-строительных работ, а также потребителю тепловой энергии, так как его значение существенно влияет на сумму ежемесячной оплаты в течение отопительного сезона.

В настоящее время, как правило, значения удельной отопительной характеристики здания нормируются федеральными и территориальными строительными нормами – СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», ТСН 23-304-99 «Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению», приказом Госстроя РФ от 06.05.2000 № 105 «Об утверждении Методики определения количеств тепловой энергии и теплоносителей в водяных системах коммунального теплоснабжения». В методиках некоторых саморегулируемых организаций в области энергетического обследования для жилых зданий удельная отопительная характеристика q_o , Вт/(м³ · °C), определяется по формуле МДС 41-4.2000 «Методика определения количеств тепловой энергии и теплоносителя в водяных системах коммунального теплоснабжения»

$$q_o = \frac{a}{n \sqrt{V}}, \quad (1)$$

где a , n – постоянные коэффициенты, принимаемые для зданий постройки до 1958 г., $a = 1,93$ Вт/(м³ · °C), $n = 6$; для зданий постройки после 1958 г. $a = 1,51$ Вт/(м³ · °C), $n = 8$;

V – отапливаемый объем здания, м³.

Недостатком уравнения (1) является то, что оно не учитывает район застройки. В результате полученные удельные отопительные характеристики зданий для различных городов будут одинаковыми.

Фактическая удельная отопительная характеристика q_o^ϕ , Вт/(м³ · °C), определяется как

$$q_o^\phi = \frac{1163 \cdot 10^3 \cdot Q_r^\phi}{24 z_h^\phi (t_{int}^\phi - t_{ext}^\phi) V}, \quad (2)$$

где Q_r^ϕ – суммарное фактическое потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период, Вт/(м³ · °C);

t_{int}^ϕ , t_{ext}^ϕ – внутренняя и наружная температура воздуха, °C;

z_h^ϕ – фактическая продолжительность отопительного периода в отчетном (базовом) году, сут;

V – отапливаемый объем здания, м³.

Достоинства уравнения (2) заключаются в относительной простоте определения фактических значений параметров, входящих в него. Его недостатки заключаются в том, что оно не учитывает неоднородность внутренней тем-

пературы воздуха помещений различного назначения внутри здания. В случае отсутствия раздельного учета расхода тепловой энергии на отопление встроено-пристроенных помещений в отчетном (базовом) году расход тепла можно определить: а) по проекту; б) тепловым потерям через ограждающие конструкции; в) укрупненным показателям через отношения площади встроенного помещения к площади всего здания или кубатуры встроенных помещений к кубатуре всего здания при одинаковых условиях (этажности встроенного помещения, высоты помещения, внутренней расчетной температуры воздуха и т.д.).

Профессором Н.С. Ермолаевым была предложена формула для расчета удельной отопительной характеристики здания q_o , Вт/(м³ · °C), любого назначения с использованием данных о планировочных характеристиках [4]

$$q_o = \frac{P}{S} [k_{ct} + \beta_{ok}(k_{ok} - k_{ct})] + \frac{1}{H} (\psi k_{pol} + \phi k_{pot}), \quad (3)$$

где P – периметр здания, м;

S – площадь здания в плане, м²;

H – высота здания от уровня земли до верха утепляющего слоя чердачного перекрытия, м;

β_{ok} = 0,18 – коэффициент, учитывающий остекление (отношение площади остекления к площади ограждения) по СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», п. 5.11;

ψ = 0,9; ϕ = 0,6 – поправочные коэффициенты на нормируемую разность температур [5, п. 5.3];

k_{ok} , k_{ct} , k_{pot} , k_{pol} – коэффициенты теплопередачи соответственно окон, стен, потолков, полов, Вт/(м² · °C).

Для расчетов по формуле (3) необходимо знать термическое сопротивление стен, окон и перекрытий (подвальных и чердачных) зданий. Определить величины термических сопротивлений можно по нормативам теплозащиты зданий, действующих во время их постройки.

Требуемое сопротивление теплопередаче R_o^{tp} , м² · °C/Вт, ограждающих конструкций определяется по формуле СНиП II-A.7-71 «Строительная теплотехника. Нормы проектирования»

$$R_o^{tp} = \frac{n(t_{int} - t_{ext})}{\Delta t^H \alpha_B}, \quad (4)$$

где n – коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху (СНиП II-A.7-71, табл. 1);

t_{int} – расчетная температура внутреннего воздуха, принимаемая по нормам проектирования зданий и сооружений соответствующего назначения, °C;

t_{ext} – расчетная зимняя температура наружного воздуха, °C (СНиП II-A.7-71, п. 2.4);

Δt^H – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °C (СНиП II-A.7-71, табл. 2);

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м² · °C), (СНиП II-А.7-71, табл. 6).

Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м² · °C), ограждающих конструкций можно определить по формуле

$$k = \frac{1}{R_o^{\text{tp}}}. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены величины требуемого сопротивления теплопередаче и коэффициента теплопередачи по формулам (4), (5) по действующим во время постройки жилых домов нормативам по теплозащите зданий (СНиП II-А.7-71) для Новосибирска.

Таблица 1. Расчетные величины требуемого сопротивления теплопередаче и коэффициента теплопередачи типовых панельных домов с деревянными окнами в раздельных переплетах

Ограждающая конструкция	n	$t_{\text{int}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ext}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t^{\text{H}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{в}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$R_o^{\text{tp}}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
Стена	1	21	-39	6	8,72	1,15	0,87
Пол	0,4			4		0,69	1,45
Потолок	0,8			4		1,38	0,73
Окно		[4, табл. 3]				0,52	1,92

При замене окон с деревянными переплетами на современные пластиковые реконструированные оконные проемы будут иметь следующие теплотехнические характеристики:

тип окна – 4М1-12-4М1-12-И4;

$R_{\text{ок}}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – 0,68;

$k_{\text{ок}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ – 1,47.

Расчетные величины термического сопротивления теплопередаче и коэффициента теплопередачи старых и новых оконных проемов для Новосибирска, Москвы и Краснодара приведены в табл. 2.

В табл. 3 представлены результаты расчетов фактической величины удельной отопительной характеристики $q_o^{\Phi}, \text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, для типовых зданий в Новосибирске, Москве и Краснодаре с пластиковыми окнами и их сравнение с величинами удельной отопительной характеристики $q_o, \text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, зданий до реконструкции оконных проемов.

Таблица 2. Расчетные величины термического сопротивления теплопередаче и коэффициента теплопередачи для окон с деревянными переплетами и современных пластиковых

Город	$t_{\text{ext}}, ^\circ\text{C}$	$R_c^*, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_h^*, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$k_c^*, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$k_h^*, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
Новосибирск	-39	0,52	0,68	1,92	1,47
Москва	-26	0,38	0,68	2,63	
Краснодар	-19	0,34	0,68	2,94	

* Индекс «с» – окна с деревянными переплетами, «н» – пластиковые окна.

Таблица 3. Результаты расчета фактической отопительной характеристики при замене деревянных окон на пластиковые и ее сравнение с отопительной характеристикой до реконструкции

Тип дома	Строительный объем, м ³	Табличное значение q_o [1], Вт/(м ³ · °C)	Фактическое значение q_o^ϕ по формуле (3), Вт/(м ³ · °C)	Разность Δ , %
<i>Новосибирск</i>				
П55-4/12	8422	0,434	0,296	32
П55-2/12	12 279	0,402	0,262	35
П44-4/16	15 820	0,392	0,250	36
П43/16	24 951	0,392	0,215	45
П42/16	28 676	0,381	0,193	49
И-700А	49 665	0,360	0,164	54
<i>Москва</i>				
П55-4/12	8422	0,515	0,360	30
П55-2/12	12 279	0,477	0,318	33
П44-4/16	15 820	0,465	0,304	35
П43/16	24 951	0,465	0,262	44
П42/16	28 676	0,452	0,235	48
И-700А	49 665	0,427	0,199	53
<i>Краснодар</i>				
П55-4/12	8422	0,558	0,412	26
П55-2/12	12 279	0,517	0,364	30
П44-4/16	15 820	0,503	0,347	31
П43/16	24 951	0,503	0,299	41
П42/16	28 676	0,490	0,269	45
И-700А	49 665	0,463	0,228	51

Разность фактической отопительной характеристики и отопительной характеристики до реконструкции окон Δ , %, определяется по формуле

$$\Delta = \frac{q_o - q_o^\phi}{q_o} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Установлен диапазон изменения удельной отопительной характеристики после реконструкции окон. Для различных городов и типов зданий он варьируется от 26 до 54 % (см. табл. 3). Такой интервал между максимальным и минимальным значением табличной и фактической удельной отопительной характеристики для различных типов зданий обусловлен тем, что в справочнике [3] приведены значения q_o с учетом фактического коэффициента теплотехнической неоднородности наружных конструкций, зависящего от типа здания. В расчетах это учесть не представлялось возможным.

На рис. 1 приведены значения разности Δ , %, для различных типов зданий и городов. Можно судить, что для зданий, построенных в различных климатических зонах, при замене старых деревянных окон на современные

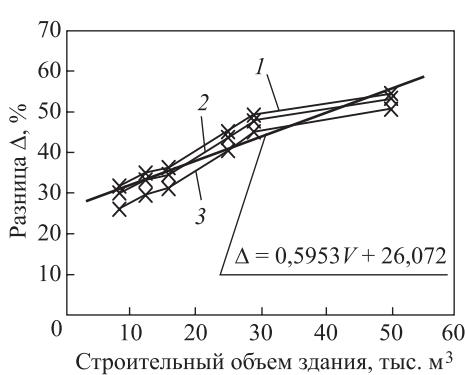


Рис. 1. Разности фактической отопительной характеристики и отопительной характеристики до реконструкции окон для трех городов и трендовая линия
1 – Новосибирск; 2 – Москва; 3 – Краснодар

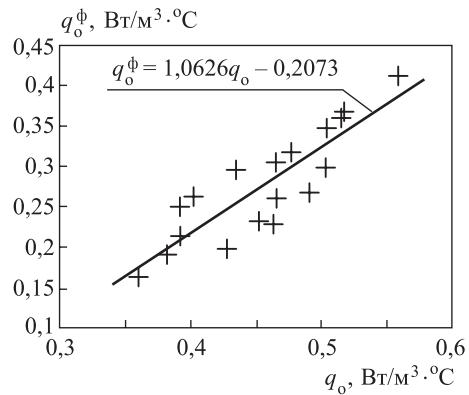


Рис. 2. Корреляция между величинами фактической удельной отопительной характеристики и табличными значениями удельной отопительной характеристики до реконструкции окон

пластиковые наблюдается общая тенденция к большему уменьшению величины удельной отопительной характеристики с увеличением строительного объема здания. За меру уменьшения величины удельной отопительной характеристики примем разницу, определенную по формуле (6). Аппроксимирующая прямая (см. рис. 1) для величины Δ , %, является трендовой линией для ряда значений в исследуемом интервале типовых зданий различных городов и их строительных объемов ($8422\text{--}49\,665\text{ м}^3$). При этом отклонение от трендовой линии не превышает 18,6 %.

Корреляция между величинами фактической удельной отопительной характеристики и табличными значениями удельной отопительной характеристики до реконструкции окон показана на рис. 2. Для прямой, характеризующей взаимосвязь этих двух параметров, определены коэффициент корреляции $r = 0,87$; коэффициент детерминации $r^2 = 0,76$, по которым можно судить о наличии взаимосвязи между величинами q_o^{Φ} и q_o .

Полученные результаты позволяют судить, что для зданий постройки до 1990–2000-х гг. при массовой замене деревянных окон на пластиковые использование справочных данных об удельной отопительной характеристике при определении нагрузки на систему отопления дает завышенные результаты минимум на 26 %, что приводит при отсутствии автоматического регулирования в ИТП и терmostатических клапанов у отопительных приборов к избыточному отпуску тепловой энергии на отопление, увеличению температуры воздуха в помещениях выше допустимой и, следовательно, ухудшению самочувствия граждан.

Выводы. 1. Определены отопительные характеристики типовых панельных зданий при замене старых деревянных окон на современные с многокамерными профилями и теплосберегающими стеклопакетами.

2. Для зданий, построенных в различных климатических зонах, при замене старых деревянных окон на современные пластиковые наблюдается общая тенденция к большему уменьшению величины удельной отопительной характеристики с увеличением строительного объема здания.

3. Определен диапазон изменения удельной отопительной характеристики после реконструкции окон. Для различных городов и типов зданий он варьируется от 26 до 54 %.

4. Использование справочных данных об удельной отопительной характеристике для зданий постройки 1960–1990-х гг. при определении нагрузки на систему отопления дает завышенные результаты минимум на 26 %.

5. При перезаключении договора с энергоснабжающей организацией на поставку теплоты для зданий постройки 1960–1990-х гг. допустимо снижение отопительной нагрузки на здание минимум на 26 % по сравнению с проектным значением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пухкал В.А. Определение удельной отопительной характеристики жилых зданий при энергетическом обследовании // Вестн. гражд. инженеров. 2014. № 4. С. 99–103.
2. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В., Федоров Д.Г. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений // Вестн. Чуваш. ун-та. 2015. № 1. С. 20–28.
3. Манюк В.И., Каплинский Я.И. и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: справ. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.
4. Еромолаев Н.С. Проблемы теплоснабжения и отопления многоэтажных зданий. М.: Стройиздат, 1949. 250 с.
5. Основы систем теплоснабжения: метод. указания к лаб. работам О-75 / Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; сост. В.М. Мельников [и др.]. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2013. 74 с.

Рохлецова Татьяна Лаврентьевна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: rokhlecovat@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Кривова Наталья Сергеевна, студ.; E-mail: nataly1993@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Кияница Лаврентий Александрович, асп.; E-mail: lavretij.kijanitza@yandex.ru

Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск

Получено 20.02.17

Rokhletsova Tat'yana Lavrent'evna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: rokhlecovat@yandex.ru

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

Krivova Natalia Sergeevna, Student; E-mail: nataly1993@yandex.ru

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

Kiyanitsa Lavrentiy Aleksandrovich, Post-graduate Student;

E-mail: lavretij.kijanitza@yandex.ru

Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

INFLUENCE OF RECONSTRUCTION OF WINDOW PRESSES ON A VALUE OF SPECIFIC HEATING CHARACTERISTICS OF TYPICAL PANEL BUILDINGS

The heating characteristics of typical panel buildings are defined when replacing old wooden windows with modern windows with multi-chamber profiles and heat-insulating double-glazed windows. A decrease in the heating load for buildings is shown when replacing old wooden windows with modern energy-saving window structures using the example of a typical series of residential buildings for 3 cities located in different climatic zones of Russia. The percentage of decrease in the heating load for buildings at the conclusion of a contract with an energy supply organization for heat is justified. It is shown that the use of reference data on the specific heating characteristic for buildings built in the 1960–1990s in determining the load on the heating system gives overestimated results by at least 26 %.

K e y w o r d s: specific heating characteristic, thermal resistance, heat transfer coefficient.

REFERENCES

1. P u k h k a l V.A. Opredelenie udel'noy ototel'noy kharakteristiki zhilykh zdaniy pri energeticheskem obsledovanii [Definition of the specific heating characteristic of residential buildings at power inspection]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of civil engineers]. 2014. No. 4. Pp. 99–103. (in Russian)
2. A f a n a s ' e v V.V., K o v a l e v V.G., T a r a s o v V.A., T a r a s o v a V.V., F e d o r o v D.G. Issledovanie nestatsionarnykh teplovyykh rezhimov otopeniya zdaniy i sooruzheniy [Research of non-stationary thermal modes of heating of buildings and constructions]. Vestnik Chuvashskogo universiteta [Bulletin of the Chuvash University]. 2015. No. 1. Pp. 20–28. (in Russian)
3. M a n y u k V.I., K a p l i n s k i y Ya.I. Naladka i ekspluatatsiya vodyanykh teplovyykh setey. Spravochnik [Adjustment and operation of water heating networks. Directory]. Moscow, Stroyizdat, 1988. 432 p. (in Russian)
4. E r m o l a e v N.S. Problemy teplosnabzheniya i otopeniya mnogoetazhnykh zdaniy [Problems of heat supply and heating of multi-storey buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1949. 250 p. (in Russian)
5. Osnovy sistem teplosnabzheniya: metod. ukazaniya k lab. rabotam [Fundamentals of heat supply systems. Methodical instructions for laboratory work]. Vladimir, 2013. 74 p. (in Russian)

УДК 696.41

Д.Н. КИТАЕВ, В.Ю. ХУЗИН, В.И. ЩЕРБАКОВ, Т.В. ЩУКИНА

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ
В МАГИСТРАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ
ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ
ПРИ НАРУШЕНИЯХ ЦИРКУЛЯЦИИ**

При отсутствии циркуляции воды в системе горячего водоснабжения происходит ее остывание и температура в местах водоразбора становится ниже нормативной. При невозможности предоставления качественных услуг населению предусмотрена корректировка платежей, но ее выполнение с требуемым обоснованием и точностью осложнено отсутствием данных по изменению температуры воды в трубопроводах с течением времени. Предварительное определение ущерба от остывания воды в системах горячего водоснабжения требует проведения затратных экспериментов, поэтому предложено уравнение, позволяющее с достаточной точностью оценить охлаждение. Рассчитанные изменения температуры воды с течением времени в стальных неизолированных горизонтальных трубопроводах различных диаметров, используемых в системах горячего водоснабжения зданий, показали, что наиболее интенсивно понижение происходит в трубопроводах в первые 2–3 ч после прекращения циркуляции, а за 6–12 ч температура воды может стать равной температуре окружающей среды. Полученные результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: горячее водоснабжение, трубопроводы, потери тепла, тепло передача, коэффициент теплоотдачи, жилищно-коммунальное хозяйство.

Сохраняющаяся тенденция повышенного внимания к вопросам жилищно-коммунального хозяйства и энергоэффективности его функционирования проявляется в росте качества предоставляемых коммунальных услуг населению [1]. Тем не менее потребителям часто приходится сталкиваться с услугами, особенно по горячему водоснабжению, не отвечающими предъявляемым к ним требованиям [2]. Согласно действующим санитарно-эпидемиологическим нормам и правилам эксплуатации, температура горячей воды в местах водоразбора должна быть не менее 60 °С. К сожалению, такое значение не всегда выдерживается. Одной из причин ненормативных температур в местах водоразбора является нарушение, а в ряде случаев отсутствие циркуляции воды в системе [3].

По действующим правилам предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах допустимое отклонение температуры воды составляет в ночное время (с 0.00 до 5.00 ч) не более чем 5 °С, а в дневное время (с 5.00 до 0.00) не более 3 °С. В случае нарушения за каждые 3 °С отступления от допустимых отклонений температуры горячей воды плата за коммунальную услугу в расчетный период, в котором произошло указанное отступление, снижается на 0,1 % от размера платы, определенного за период неудовлетворитель-

ного качества, за каждый час отступления от допустимых отклонений суммарно. При температуре горячей воды в точке разбора ниже 40 °С начисление за потребление производится суммарно за период по тарифу за холодную воду.

Проживающие в многоквартирных домах при отсутствии циркуляции в системе горячего водоснабжения вынуждены сливать охлажденную воду, оплачивая ее расход [4], поэтому крайне важно прогнозирование температуры по времени отсутствия циркуляции. Возможное изменение температуры теплоносителя при отсутствии движения в трубах необходимо также знать и учитывать при регулировании системы отопления пропусками и для оценки потенциала энергосбережения в системах жизнеобеспечения [5]. Отсутствие инженерной методики расчета потерь тепла, вызванных остановкой циркуляции в системах горячего водоснабжения, делает затруднительным обоснование убытков от некачественного предоставления коммунальной услуги при обращении граждан в суды. Учитывая все перечисленные последствия, можно заключить, что решение задачи по расчету значений температур воды в трубопроводах систем горячего водоснабжения при отсутствии циркуляции является актуальным, а результаты исследований позволяют создать методику оценки ущерба от некачественных услуг по горячему водоснабжению без проведения дорогостоящих камеральных измерений.

Рассмотрим нестационарную задачу охлаждения воды в стальном неизолированном трубопроводе системы горячего водоснабжения [6]. В многоквартирных домах диаметры магистралей, проложенных в подвалах, не превышают 150 мм, и, как правило, меньше 100 мм. Количество теплоты dQ , Вт, которое трубопровод отдает за время $d\tau$, с, окружающему воздуху, определяется выражением [7]

$$dQ = -c\rho V \left(\frac{dt}{d\tau} \right) d\tau, \quad (1)$$

где c – теплоемкость жидкости, Дж/(кг · °C);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

V – объем трубопровода, м³;

t – температура воды в трубопроводе, °C.

Согласно закону сохранения энергии, количество теплоты, определяемое уравнением (1), передается поверхностью трубопровода, имеющей площадь F , окружающему воздуху с температурой t_0

$$dQ = \alpha F(t - t_0) d\tau, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °C).

Приравняв уравнения (1) и (2), разделив переменные и проинтегрировав, получим выражение

$$\ln(t - t_0) = -\frac{\alpha F \tau}{c \rho V} + C. \quad (3)$$

Задавая начальные условия $\tau = 0$, $t = t_r$, $t_0 = t_b$, находим постоянную интегрирования и получаем выражение вида

$$t = t_{\text{в}} + (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) \exp\left(-\frac{\alpha F \tau}{c \rho V}\right). \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет определить температуру воды в трубопроводе с течением времени при отсутствии циркуляции воды.

Для расчетов по формуле (4) примем следующие допущения. Диапазон изменения температуры горячей воды в рассматриваемой задаче от 60 °C до температуры окружающей среды в подвале жилого многоквартирного дома. Температурный режим подвалов не нормируется, но возможный диапазон в соответствии с данными измерений в зданиях, построенных по типовым проектам, составляет 0 ≤ t_в ≤ 25 °C. Теплоемкость воды принимаем постоянной и равной c = 4187 Дж/(кг · °C). Плотность воды находим по средней температуре t_{ср} между t_г и t_в в соответствии с зависимостью

$$\rho = -0,004t_{\text{ср}}^2 - 0,058t_{\text{ср}} + 1000,98. \quad (5)$$

Определяющее значение при вычислениях по формуле (4) имеет коэффициент теплоотдачи α, который в общем случае является суммой коэффициента теплоотдачи конвекцией α_к и излучением α_л, Вт/(м² · °C) [8]. Теплоотдача от поверхности трубопроводов магистральных сетей горячего водоснабжения, проложенных по подвальным помещениям, происходит за счет естественной конвекции, и поэтому коэффициент теплоотдачи можно определить по формуле Нуссельта [8]

$$\alpha_{\text{k}} = 1,164 \sqrt{\frac{t_{\text{г}} - t_{\text{в}}}{d}}, \quad (6)$$

где d – диаметр трубопровода, мм.

Для определения коэффициента теплоотдачи излучением следует воспользоваться формулой Стефана–Больцмана [8]

$$\alpha_{\text{l}} = \frac{C \left[\left(\frac{273 + t_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{п}} - t_{\text{в}}}, \quad (7)$$

где C – коэффициент излучения, принятый для стальных поверхностей равным 4,536 Вт/(м² · K⁴).

По формулам (4)–(7) были проведены расчеты тепловых режимов горячей воды для стальных труб диаметром 48–159 мм, используемых в качестве магистралей системы ГВС. Для выполнения данной задачи температура горячей воды принималась равной t_г = 60 °C, а воздуха t_в – в интервале 0 ≤ t_в ≤ 25 °C с шагом в 5 °C.

С целью проверки адекватности полученной модели были проведены экспериментальные исследования изменений температуры воды в стальных трубопроводах системы горячего водоснабжения посредством термопар типа ДТПЛ011, предназначенных для непрерывного фиксирования показаний. Измерения температуры производились восьмиканальным устройством типа УКТ38, предназначенным для приема и преобразования сигналов,

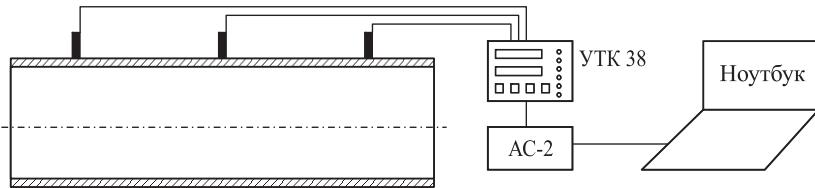


Рис. 1. Схема измерений температуры воды в трубопроводе

поступающих от работающих с ним датчиков, в значения контролируемых ими физических величин и отображения одного из этих значений на встроенным цифровом индикаторе. В комплекте с адаптером сети ОВЕН АС-2 прибор обеспечивает передачу на ПК показаний по всем задействованным каналам контроля. Схема измерений представлена на рис. 1.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований и расчетов по аналитической модели (4) для стальных труб диаметром 57, 108, 159 мм. В качестве теплоносителя использовалась вода из системы ГВС с температурой $t_r = 58,2^\circ\text{C}$, температура воздуха составляла $t_b = 16,6^\circ\text{C}$.

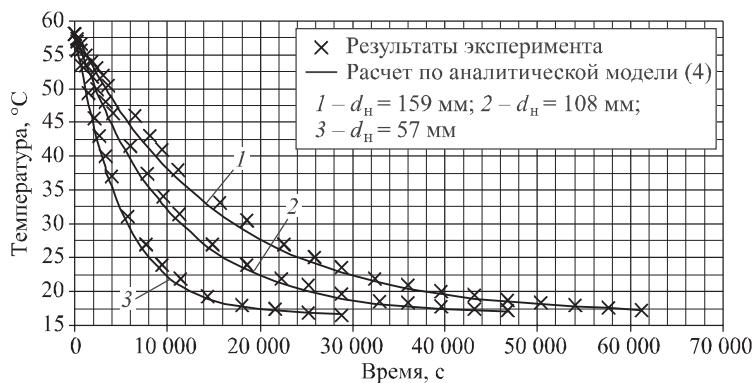


Рис. 2. Изменения температуры горячей воды

Расчет отклонений аналитических значений от экспериментальных показал, что средние значения ошибок составляют 0,71, 1,57, 1,64 % для диаметров труб соответственно 57, 108, 159 мм. Из представленных результатов следует, что аналитическая модель (4) с допустимой погрешностью может быть использована для расчета температур горячей воды при охлаждении в стальных трубопроводах при отсутствии циркуляции с течением времени.

На рис. 3 представлены результаты расчета изменений температуры горячей воды для стальных труб диаметром 48–159 мм, используемых в качестве магистралей системы ГВС. Температура горячей воды принята равной $t_r = 60^\circ\text{C}$, температура воздуха $t_b = 5^\circ\text{C}$.

Из рис. 3 следует, что за 3 ч (10 800 с) отсутствия циркуляции температура воды в стальной трубе диаметром 48 мм станет равной 8,9 °C; 57 мм – 11,4 °C; 76 мм – 16,2 °C; 89 мм – 19,4 °C; 108 мм – 23,6 °C; 133 мм – 28 °C; 159 мм – 31,8 °C. Наиболее интенсивное падение температуры наблюдается в первые 2–3 ч отсутствия циркуляции и возможного водоразбора. Темпе-

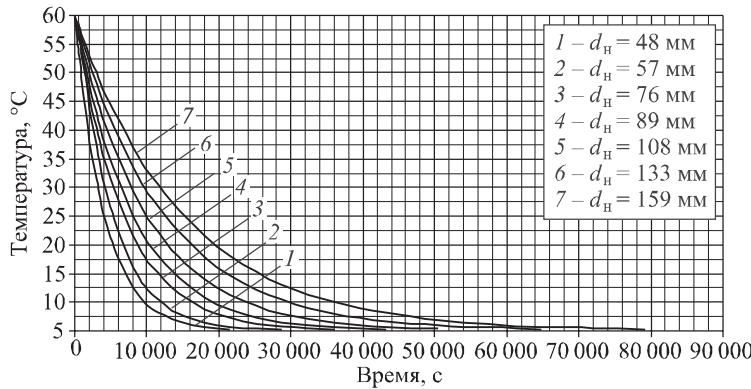


Рис. 3. Изменение температуры воды с течением времени для стальных труб диаметром 48–159 мм

ратура горячей воды станет практически равной окружающей среде в среднем за 6–12 ч простоя. График, представленный на рис. 3, имеет практическое приложение, так как делает возможным проведение перерасчетов за предоставленную услугу в соответствии с прогнозируемым снижением температуры воды в горизонтальных магистралях системы ГВС, проложенных в подвалах или чердаках, в зависимости от времени отсутствия циркуляции.

Выводы. Полученное уравнение (4) позволяет определить снижение температуры воды в трубопроводах с течением времени при отсутствии циркуляции и водоразбора. На основе расчетных данных построены тепловые режимы в стальных неизолированных горизонтальных трубопроводах различных диаметров для наиболее характерных условий эксплуатации. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие возможность использования разработанной модели с допустимой погрешностью.

Установлено, что наиболее интенсивно охлаждение воды происходит в течение первых 2–3 ч после прекращения циркуляции, а в зависимости от диаметра трубопровода температура воды может стать равной температуре окружающей среды за 6–12 ч.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Семенов В.Н., Китаев Д.Н., Грабовый П.Г., Журавлева И.В., Мартыненко Г.Н., Манохин В.Я., Сергеев В.А., Овсянников А.С. Комплексное развитие систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования: моногр. Воронеж: Изд-во Воронеж. ГАСУ, 2010. 135 с.
- Семенов В.Н., Китаев Д.Н., Щукина Т.В., Королев Д.Ю. Энергосбережение и повышение энергоэффективности для объектов социальной сферы // Энергосбережение. 2010. № 6. С. 38–43.
- Семенов В.Н., Сазонов Э.В., Китаев Д.Н., Тертычный О.В., Щукина Т.В. Влияние энергосберегающих технологий на развитие тепловых сетей // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 8. С. 78–83.
- Китаев Д.Н., Хузин В.Ю. Охлаждение воды в трубопроводах системы горячего водоснабжения при отсутствии циркуляции // Градостроительство, инфраструктура, коммуникации. 2017. № 1. С. 9–13.

5. Щукина Т.В., Китаев Д.Н., Тертычный О.В. Влияние расположения бесканальной тепловой сети на теплопотери // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по материалам Междунар. заоч. науч.-практ. конф. 31 мая 2012 г.: в 5 ч. Ч. 4. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2012. С. 136–138.
6. Черных Е.М., Китаев Д.Н. Математическая модель конвективного теплообмена при зарядке теплового аккумулятора // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Энергетика. 2007. Т. 3, № 6. С. 124–128.
7. Теплотехника / под ред. А.П. Баскакова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
8. Соколов Е.Я. Теплофизика и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 472 с.

Китаев Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: dim.kit@rambler.ru
Воронежский государственный технический университет

Хузин Владимир Юрьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: v.huzin@mail.ru
Воронежский государственный технический университет

Шербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: scher@vgasu.vrn.ru
Воронежский государственный технический университет

Щукина Татьяна Васильевна, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: schukina.niki@yandex.ru
Воронежский государственный технический университет

Получено 13.02.17

Kitaev Dmitry Nikolaevich, PhD, Ass. Professor; E-mail: dim.kit@rambler.ru
Voronezh State Technical University, Russia

Khuzin Vladimir Yurievich, PhD, Ass. Professor; E-mail: v.huzin@mail.ru
Voronezh State Technical University, Russia

Shcherbakov Vladimir Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: scher@vgasu.vrn.ru
Voronezh State Technical University, Russia

Shchukina Tatiana Vasilievna, PhD, Ass. Professor; E-mail: schukina.niki@yandex.ru
Voronezh State Technical University, Russia

TEMPERATURE MODE IN STEEL PIPELINES OF HOT WATER SUPPLY IN CIRCULATION DISTURBANCES

In the absence of circulation of water in the hot water supply system, it cools down and the temperature in the places of water distribution becomes lower than the normative one. If it is impossible to provide quality services to the population, there is an adjustment of payments, but its implementation with the required justification and accuracy is complicated by the lack of data on changes in water temperatures in pipelines over time. Preliminary determination of the damage from cooling water in hot water systems requires costly experiments. According to the proposed equation, water temperatures were calculated with cooling over time in steel non-insulated horizontal pipelines of various diameters used in hot water supply systems of buildings. It has been established that the most intensive cooling of water in pipelines occurs within the first 2–3 hours after the circulation ceases. For 6–12 hours the water temperature can become equal to the ambient temperature. The results obtained are confirmed by experimental studies.

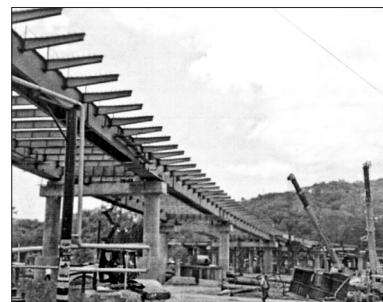
К e y w o r d s: hot water supply, pipelines, heat loss, heat transfer, heat transfer coefficient, housing and communal services.

REFERENCES

1. Semenov V.N., Kitaev D.N., Grabovyyj P.G., Zhuravleva I.V., Martynenko G.N., Manohin V.Ya., Sergeev V.A., Ovsyannikov A.S.

- Kompleksnoe razvitiye sistem kommunal'noy infrastruktury munitsipal'nogo obrazovaniya: monografiya [Comprehensive development of municipal infrastructure of the municipality: Monograph]. Voronezh, 2010. 135 p. (in Russian)
2. Semenov V.N., Kitaev D.N., Shchukina T.V., Korolyov D.Yu. Energosberezhenie i povyshenie energoeffektivnosti dlya ob"ektorov sotsial'noy sfery [Energy conservation and energy efficiency improvements for social facilities]. Energosberezhenie [Energy saving]. 2010. No. 6. Pp. 38–43. (in Russian)
3. Semenov V.N., Sazonov E.V., Kitaev D.N., Tertychnyj O.V., Shchukina T.V. Vliyanie ehnergosberegayushchikh tekhnologij na razvitiye teplovyykh setej [The influence of energy-saving technologies on the development of the structure of thermal networks]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 8. Pp. 78–83. (in Russian)
4. Kitaev D.N., Khuzin V.Yu. Okhlazhdennye vody v truboprovodakh sistemy goryachego vodosnabzheniya pri otsutstvii tsirkulyatsii [Water cooling in pipelines of hot water supply system in the absence of circulation]. Gradostroitel'stvo, infrastruktura, kommunikatsii [Urban planning, infrastructure, communications]. 2017. No. 1. Pp. 9–13. (in Russian)
5. Shchukina T.V., Kitaev D.N., Tertychnyj O.V. Vliyanie raspolozheniya beskanal'noy teplovoy seti na teplopoteri [Influence of the location of the non-channel heat network on heat loss]. Nauka i obrazovanie v XXI veke: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 31 maya 2012 g. [Science and education in the 21st century: a collection of scientific papers on the materials of the International Correspondence Scientific and Practical Conference on May 31, 2012]. Tambov: Publishing house of the TRPA “Business-Science-Society”, 2012. Pp. 136–138. (in Russian)
6. Chernyh E.M., Kitaev D.N. Matematicheskaya model' konvektivnogo teploperenosha pri zaryadke teplovogo akkumulyatora [A mathematical model of convective heat transfer heat while charging the battery]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Energetika» [Bulletin of Voronezh State Technical University. “Energy” series]. 2007. Vol. 3, No 6. Pp. 124–128. (in Russian)
7. Basakov A.P. Teplotekhnika [Heat engineering]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 224 p. (in Russian)
8. Sokolov E.Ya. Teplofiksatsiya i teplovye seti [District heating and heat networks]. Moscow, MEI Publishing, 1999. 472 p. (in Russian)

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ



УДК 625.855.3:620.178.3

В.А. ГЛАДКИХ, Е.В. КОРОЛЕВ

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СЕРОАСФАЛЬТОБЕТОНА*

С использованием современных методов испытаний проведены исследования усталостной долговечности сероасфальтобетона с различным содержанием серы. Установлено, что усталостная долговечность сероасфальтобетона с 30 и 40%-м содержанием серного модификатора значительно выше, чем у традиционных асфальтобетонов. Так, показатель усталости сероасфальтобетона, определенный согласно методу EN 12697-24, при указанных содержаниях серного модификатора в 4,1 и 6,0 раз выше, чем у традиционного асфальтобетона, а согласно методу Pavement technology в 3 и 5 раз соответственно.

Ключевые слова: асфальтобетон, сероасфальтобетон, дорожное покрытие, усталостная долговечность, серный модификатор, система динамических испытаний Dynapave 130, анализатор асфальтового покрытия.

В процессе эксплуатации асфальтобетонных дорожных покрытий происходит постепенное снижение их прочностных и других физико-механических характеристик, обусловленное процессами необратимых разрушений структуры материала [1]. Анализ исследований [1–6] показал, что разрушение асфальтобетона при многократном циклическом нагружении обусловлено процессами усталости, т.е. возникновением и накоплением микродефектов с последующим образованием макродефектов.

Анализ работ в области исследования новых видов асфальтобетонов, в частности сероасфальтобетона, показал, что вопрос его усталостной долговечности практически не изучен, несмотря на то, что данный параметр оказывает серьезное влияние на долговечность дорожного покрытия. Очевидно, что установление влияния серы на величину усталостной долговечности является актуальной научной задачей, решение которой позволит разработать сероасфальтобетон с требуемыми параметрами качества.

В соответствии с существующей нормативной базой подбор составов асфальтобетонных смесей во многих странах базируется на лабораторных испытаниях, часто не соответствующих реальным режимам нагружения асфальтобетона в процессе эксплуатации [5]. Поэтому в современных усло-

* Печатается при поддержке Стипендии Президента РФ СП-2627.2016.1.

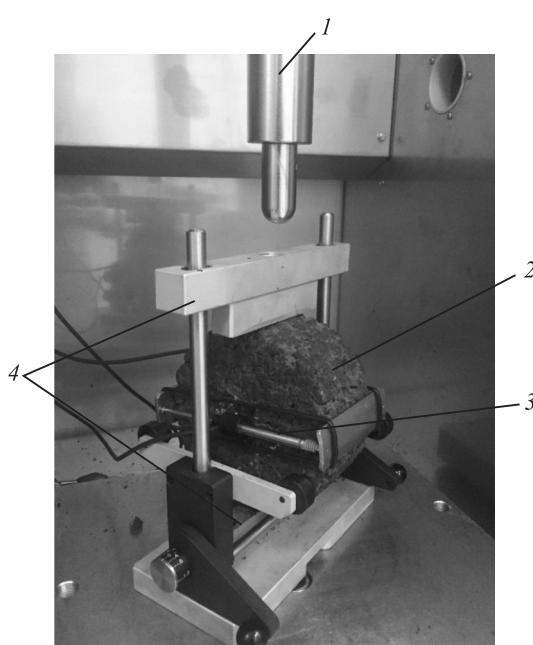
виях высокоскоростного интенсивного движения транспортных средств для объективной оценки усталостной долговечности материалов дорожного покрытия необходимо переходить на новые методы их испытания, соответствующие по условиям нагружения реальному воздействию транспортного потока. В европейских странах широкое распространение получили методы оценки усталостной долговечности асфальтобетона, регламентированные стандартом EN 12697-24, а в США – стандартами AASHTO TP8 и AASHTO T321.

Учитывая вышеизложенное, для оценки усталостной долговечности сероасфальтобетонов применялись методы EN 12697-24 и Pavement Technology. Исследование по методу EN 12697-24 проводилось с помощью серво-гидравлической системы динамических испытаний Dyparave 130. Данный метод характеризует поведение асфальтобетона в условиях приложения повторяющихся нагрузок с использованием схемы на непрямое растяжение. Испытуемые образцы подвергаются воздействию повторяющейся

синусоидальной нагрузки, вызывающей растяжение, перпендикулярное оси приложения нагрузки (рис. 1).

Разрушением образца считается момент появления вертикальной трещины. Наступление предела усталости определяется как общее количество приложений нагрузки до разрушения образца, при этом с помощью тензометра устанавливается результатирующая горизонтальная деформация. Для испытаний применялись цилиндрические образцы сероасфальтобетона и контрольного состава диаметром 150 мм и высотой 70 мм, изготовленные с помощью вибропресса Uniframe. Образцы термостатировались и испытывались при температуре $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Метод Pavement Technology заключается в определении количества циклов проезда металлического колеса по асфальтобетонному об-



*Рис. 1. Схема испытаний образцов асфальтобетона на усталостную долговечность
1 – нагружающее устройство; 2 – образец; 3 – тензометр; 4 – нагружающие полосы*

личества циклов проезда металлического колеса по асфальтобетонному образцу-балке, после которого балка разрушается или скорость нарастания деформаций превышает 1,0 мм за 10 рабочих проходов. Исследования согласно этому методу проводили с использованием анализатора асфальтового покрытия APA, Pavement Technology Inc. Во время теста испытывали три балочных образца с размерами $300 \times 125 \times 75$ мм, при температуре 20°C и давлении колеса на образец 1,72 МПа. Перед испытанием образцы асфальтобетона выдерживали в климатической камере в течение 120 ч при темпе-

туре 85 ± 3 °С, таким образом моделировалось его старение. Затем образцы-балки устанавливали в форму так, чтобы центральная часть балки могла перемещаться в вертикальном направлении при приложении нагрузки (рис. 2). Во время теста прибором фиксировался прогиб балки.

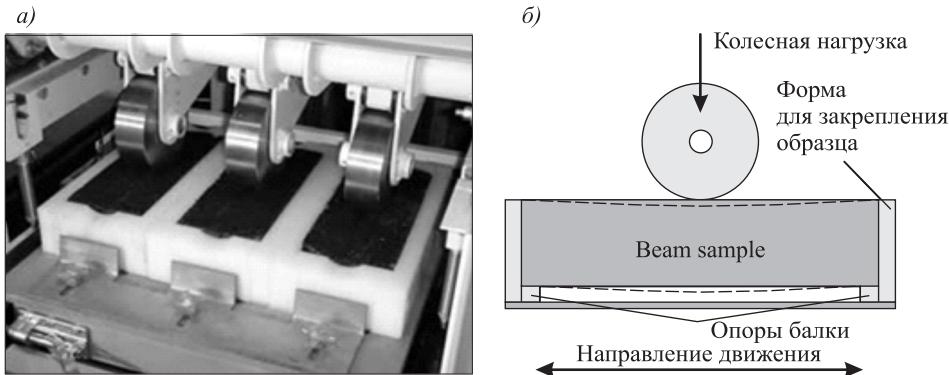


Рис. 2. Испытание на усталость с использованием анализатора асфальтового покрытия
а – общий вид установки; б – схема приложения нагрузки

С целью оценки устойчивости сероасфальтобетона к температурному деформированию при охлаждении покрытия проводили испытание по методу, представленному в ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний». Сущность метода заключается в определении нагрузки, необходимой для раскалывания цилиндрического образца по образующей. Перед испытанием образцы термостатировались при температуре 0 °С.

Для испытаний были подобраны составы сероасфальтобетона (таблица) с 20; 30 и 40%-м содержанием серного модификатора – добавки, состоящей из технической серы (не менее 90 % по массе) и веществ, нейтрализующих токсичные газы при производстве и укладке сероасфальтобетонных смесей [7–9]. Зерновой состав минеральной части сероасфальтобетона оставался таким же, как и у контрольного состава, в качестве которого использовался асфальтобетон вида ЩМА-20. Необходимо отметить, что сероасфальтобетонные смеси готовили при температуре 145 °С, что на 10 °С ниже, чем при изготовлении базового состава.

Составы сероасфальтобетонов

Компонент смеси, %	Содержание серного модификатора в серобитумном вяжущем			
	0 (ЩМА-20)	20	30	40
Щебень габро-диабазовый фракции 5–20 мм	77	77	77	77
Отсев гранита фракции 0,315–5 мм	11	11	11	11
Минеральный порошок МП-1	12	12	12	12
Viatop-66*	0,35	–	–	–
Битум*	5,5	4,87	4,49	4,05
Серный модификатор*	–	1,37	2,21	3,18

* Сверх 100 % минеральной части.

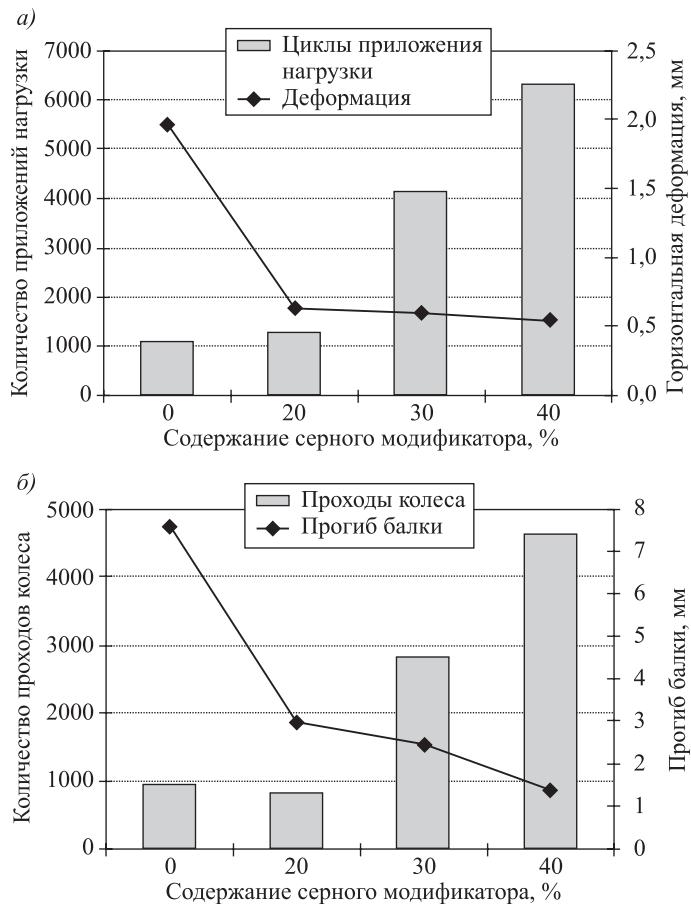


Рис. 3. Зависимость усталостной долговечности от количества нагрузений и содержания серного модификатора
а – метод EN 12697-24; б – метод Pavement Technology

Экспериментальные данные представлены на рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований, полученные испытаниями по методу EN 12697-24, свидетельствуют, что усталостная долговечность сероасфальтобетона возрастает с увеличением содержания серного модификатора от 20 до 40 %. Так, количество циклов нагружения до появления вертикальной трещины на образцах сероасфальтобетона с 30%-м содержанием серного модификатора в 4,1 раза, а при 40%-м содержании – в 6,0 раз выше, чем у контрольного состава. Одновременно с увеличением содержания серного модификатора наблюдается снижение деформативности сероасфальтобетона (рис. 4). Обычно менее деформативные асфальтобетоны более склонны к хрупкому разрушению, но для сероасфальтобетона наблюдается другое поведение. Трещиностойкость сероасфальтобетона с содержанием серного модификатора 20–40 % (рис. 4) осталась на том же уровне, что и у контрольного состава: пределы прочности на растяжение при расколе при 0 °C контрольного состава и сероасфальтобетонов с 0, 20, 30 и 40%-м содержанием серного модификатора равны 3,2; 3,9; 3,8 и 3,7 МПа соответственно (определение трещиностойкости проводилось согласно методу ГОСТ 12801–98).

Анализ экспериментальных данных, полученных испытаниями по методу Pavement Technology, показал, что введение 20 % серного модификатора не приводит к изменению усталостной долговечности асфальтобетона. Однако при содержании серного модификатора 30 и 40 % наблюдается значительное возрастание усталостной долговечности по сравнению с контрольным составом.

Увеличение содержания серного модификатора приводит к снижению прогиба образца-балки, таким образом, получаемые результаты согласуются с данными, полученными согласно методу EN 12697-24, т.е. сероасфальтобетоны с большим содержанием серного модификатора обладают меньшей деформативностью. Поэтому с целью пресечения образования отраженных трещин на поверхности покрытия из сероасфальтобетона должны предъявляться повышенные требования к качеству дорожного основания.

Таким образом, исследования усталостной долговечности сероасфальтобетона, проведенные по методу EN 12697-24, показали, что показатель усталости сероасфальтобетона с 30 и 40%-м содержанием серного модификатора в 4,1 и 6,0 раз выше, чем у традиционного асфальтобетона, а согласно методу Pavement Technology при том же содержании серного модификатора – в 3 и 5 раз соответственно. При этом несмотря на то, что сероасфальтобетон обладает меньшей деформативностью по сравнению с базовым составом, его трещиностойкость не снижается. Отсюда очевидна перспективность применения сероасфальтобетона для повышения качества дорожных покрытий.

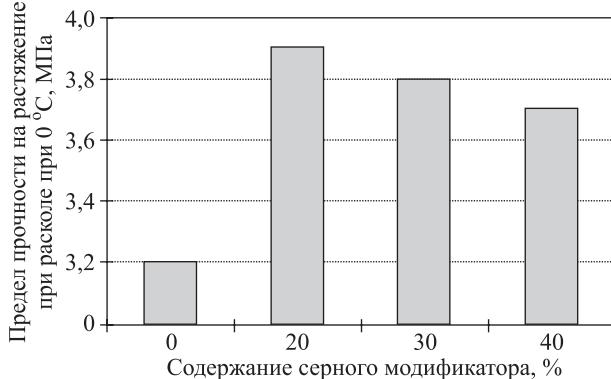


Рис. 4. Зависимость предела прочности на растяжение при расколе сероасфальтобетона при 0 °C от содержания серного модификатора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Леонович И.И., Мельникова И.С. Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях и критерии их трещиностойкости // Строительная наука и техника. 2011. № 4. С. 37–41.
- Бахрах Г.С. Модель оценки срока службы дорожной одежды нежесткого типа // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. № 2. С. 17–21.
- Кравченко С.Е. Новые подходы к оценке структурной прочности асфальтобетона // Автомобильные дороги и мосты. 2008. № 2. С. 49–52.
- Радовский Б.С. Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США // Дорожная техника. СПб., 2006. С. 108–119.
- Радовский Б.С. Методы проектирования состава асфальтобетонных смесей в США // Дорожная техника. СПб., 2006. С. 68–81.
- Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М.: Транспорт, 1992. 255 с.

7. Гладких В.А., Королев Е.В., Хусид Д.Л. Асфальтобетоны, модифицированные комплексной добавкой на основе технической серы и нейтрализаторов эмиссии токсичных газов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2015. № 3 (194). С. 30–33.
8. Гладких В.А., Королев Е.В. Снижение эмиссии сероводорода и диоксида серы из серобитумных материалов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политехническая. 2014. Вып. 2(33). Ст. 3. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
9. Gladkikh V.A. & Korolev E.V. 2014. Suppressing the hydrogen sulfide and sulfur dioxide emission from sulfur-bituminous concrete. *Advanced Materials Research*, 1040: 387–392.

Гладких Виталий Александрович, канд. техн. наук; E-mail: gladkich_87@mail.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Королев Евгений Валерьевич, д-р техн. наук, проф.;
E-mail: korolev@nocsnt.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 22.02.17

Gladkikh Vitaliy Aleksandrovich, PhD; E-mail: gladkich_87@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Korolev Evgeniy Valeryevich, DSc, Professor; E-mail: korolev@nocsnt.ru

Moscow State University of Civil Engineering, Russia

THE FATIGUE LIFE OF SULFUR EXTENDED ASPHALT

With the use of modern testing methods studied fatigue life of sulfur extended asphalt with different sulfur content. It is found that the fatigue life of sulfur extended asphalt modify with 30 and 40 % of the sulfur is significantly higher than conventional asphalt concrete. Since fatigue index of sulfur extended asphalt comprising 30 and 40% sulfur modifier determined according to method EN 12697-24, and 6,0 to 4,1 times higher than that of a conventional asphalt concrete according to the method as Pavement Technology 3 and 5 times, respectively.

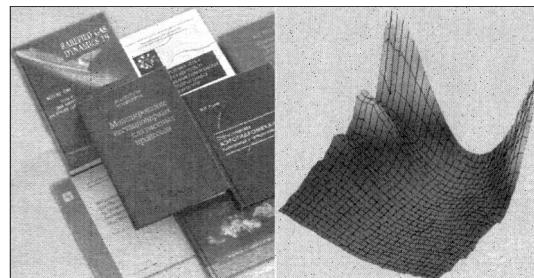
К e y w o r d s: asphalt concrete, sulfur extended asphalt, road pavement, fatigue life, sulfur modifier, dynamic testing system Dynapave 130, asphalt pavement analyzer.

REFERENCES

1. Leonovich I.I., Mel'nikova I.S. Analiz prichin vozniknoveniya treshchin v dorozhnykh pokrytiyakh i kriterii ikh treshchinostoykosti [Analysis of the causes of cracks in road surfaces and the criteria for their crack resistance]. Stroitel'naya nauka i tekhnika [Construction Science and Technology]. 2011. No. 4. Pp. 37–41. (in Russian)
2. Bachrach G.S. Model' otsenki sroka sluzhby dorozhnoy odezhdy nezhestkogo tipa [Model evaluation service life of the pavement non-rigid type]. Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrassli [Science and technology in the road sector]. 2002. No. 2. Pp. 17–21. (in Russian)
3. Kравченко С.Е. Novye podkhody k otsenke strukturnoy prochnosti asfal'tobetona [New approaches to the evaluation of the structural strength of asphalt concrete]. Avtomobil'nye dorogi i mosty [Roads and bridges]. 2008. No. 2. Pp. 49–52. (in Russian)
4. Radovskiy B.S. Problema povysheniya dolgovechnosti dorozhnykh odezhdi metody ee resheniya v SShA [The problem of increasing the durability of pavements

- and methods of its solutions in the US]. Dorozhnaya tekhnika [Road Construction Equipment]. Saint-Petersburg, 2006. Pp. 108–119. (in Russian)
5. Radovskiy B.S. Metody proektirovaniya sostava asfal'tobetonnykh smesey v SShA [Methods of designing the US composition of asphalt concrete mixtures]. Dorozhnaya tekhnika [Road Construction Equipment]. Saint-Petersburg, 2006. Pp. 68–81. (in Russian)
6. Rudenskiy A.V. Dorozhnye asfal'tobetonnye pokrytiya [Road asphalt coating]. Moscow, Transport, 1992. 255 p. (in Russian)
7. Gladkikh V.A., Korolev E.V., Hushid D.L. Asfal'tobetony, modifitsirovannye kompleksnoy dobavkoj na osnove tekhnicheskoy sery i neytralizatorov emissii toksichnykh gazov [Asphalt-modified complex additive on the basis of technical sulfur and converters emission of toxic gases]. Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka [Building materials, equipment, technologies of XXI century]. 2015. No. 3 (194). Pp. 30–33. (in Russian)
8. Gladkikh V.A., Korolev E.V. Snizhenie emissii serovodoroda i dioksida sery iz serobitumnykh materialov [Reducing the emission of hydrogen sulfide and sulfur dioxide from serobitumnyh materials]. Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya [Internet messenger VolgGASU. Ser.: Polythematic]. 2014. No. 2(33). (in Russian)
9. Gladkikh V.A. & Korolev E.V. 2014. Suppressing the hydrogen sulfide and sulfur dioxide emission from sulfur-bituminous concrete. Advanced Materials Research, 1040: 387–392.

НАУЧНО- МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 621.926.001.24

В.С. БОГДАНОВ, Н.Э. БОГДАНОВ, А.Ю. ГАВРУНОВ,
М.Ю. ЕЛЬЦОВ, К.И. КАРАГОДИНА

КИНЕМАТИКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Приведены методика и уравнения для расчета кинетики процесса измельчения частиц материала в вибрационной мельнице. Уравнения учитывают размер и физико-механические свойства измельчаемого материала, количество энергии, необходимой для эффективного разрушения частиц, и характер вибрационного измельчения, присущий данному классу машин. Способность материалов измельчаться следует из их физико-механических свойств. Совокупное влияние прочности, твердости и хрупкости определяет размалываемость материала, которая характеризуется такими значениями, как начальный и средний коэффициент размалываемости. Предложенные в статье кинетические зависимости подтверждаются опытными данными и могут быть использованы для прогнозирования дисперсности продуктов помола материалов в вибровращательных мельницах.

Ключевые слова: вибрационная мельница, кинетика измельчения, частица материала, энергия разрушения, абразивный износ, истирание.

Измельчаемость материалов определяется их физико-механическими свойствами и, прежде всего, их прочностью, твердостью (абразивностью) и хрупкостью. Совместное влияние прочности, твердости и хрупкости определяет размалываемость материала, которая характеризуется коэффициентом размалываемости K_p [1, 2]

$$K_p = \frac{\Delta m}{\Delta \mathcal{E}}, \quad (1)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – энергия, затраченная на измельчение массы Δm , Дж/кг или кВт · ч/т.

Размалываемость материала снижается с ростом его дисперсности, поэтому следует различать начальный коэффициент размалываемости

$$K_p^0 = \frac{dm}{dS} \quad (2)$$

и средний коэффициент размалываемости, величина которого обратна удельным энергозатратам на измельчение. Размалываемость оценивает-

© Богданов В.С., Богданов Н.Э., Гаврунов А.Ю., Ельцов М.Ю., Карагодина К.И.,
2017

ся по удельной производительности лабораторной вибровращательной мельницы.

Основным механизмом измельчения в вибровращательной мельнице при высоких степенях заполнения помольной камеры является истирание, другими словами, абразивный износ частиц. При истирании выход массы продукта измельчения Δm с одного зерна материала за время Δt равен [3]

$$\Delta m = K_p N_3 \Delta t, \quad (3)$$

где N_3 – подводимая к зерну материала энергия в виде затрачиваемой мощности

$$N_3 = F_{tp} \vartheta_{\text{отн}} = p S_3 f_m \vartheta_{\text{отн}}, \quad (4)$$

здесь F_{tp} – сила трения, Н;

p – давление внутри измельчаемого материала;

S_3 – поверхность зерна;

f_m – коэффициент трения;

$\vartheta_{\text{отн}}$ – средняя относительная скорость движения зерна, м/с.

Выход продукта измельчения с одного зерна за единицу времени равен

$$Q_3 = \frac{\Delta m}{\Delta t} = K_p N_3. \quad (5)$$

Пусть измельчаемый материал занимает V_m . Тогда число зерен материала будет равно

$$n_3 \approx \frac{V_m}{d_3^3}, \quad (6)$$

где d_3 – средний размер зерна, м.

Умножив обе части соотношения (5) на n_3 , получим выражение для производительности мельницы по количеству зерен

$$Q = n_3 Q_3 = K_p N_1, \quad (7)$$

где $N_1 = n_3 N_3$ – общая мощность, затрачиваемая на движение смеси, Вт.

Выражение (7) дает возможность определить коэффициент размалываемости материалов экспериментально путем измельчения материала в лабораторной вибровращательной мельнице и последующего расчета коэффициента по затраченной энергии на измельчение [4]. При известном коэффициенте размалываемости формула (7) позволяет по известной мощности прогнозировать производительность вибровращательных мельниц.

Моделирование кинетики вибрационного измельчения в данном исследовании основывалось на положении, согласно которому разрушение зерна измельчаемого материала происходит лишь при создании в нем в результате деформации предельного напряжения $\sigma_{\text{пр}}$. Необходимая для создания $\sigma_{\text{пр}}$ энергия определяется формулой [5]

$$\Theta = \frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E} V_3, \quad (8)$$

где V_3 – объем зерна, м^3 ;

E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа.

Изменение энергии, необходимой для разрушения зерна, согласно закону Риттингера, пропорционально изменению его объема [6]

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E} \Delta V_3. \quad (9)$$

Из тождества $S = V_3 S^v$ следует

$$\Delta S = \Delta V_3 S^v + V_3 \Delta S^v. \quad (10)$$

Экспериментально установлено [3, 7], что в условиях вибрационного измельчения удельная поверхность материала изменяется достаточно медленно, поэтому вторым слагаемым в формуле (10) можно пренебречь

$$\Delta S \approx \Delta V_3 S^v. \quad (11)$$

Сопоставляя уравнения (9) и (11), получим

$$\frac{d\mathcal{E}}{dS} = \frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2ES^v}. \quad (12)$$

Разделив обе части уравнения (12) на массу измельчаемого материала в виде ρV , получим

$$\frac{d\mathcal{E}}{dS^v} = \frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E\rho S^v}. \quad (13)$$

Поскольку подводимая к материалу энергия расходуется не только на его измельчение, но и на абразивный износ поверхностей мелющих тел и помольной камеры, преодоление сил трения и т.п., правую часть уравнения (13) следует умножить на корректирующий коэффициент $k_k > 1$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dS^v} = k_k \frac{\sigma_{\text{пр}}^2}{2E\rho S^v}. \quad (14)$$

Уравнение (14) можно переписать в виде

$$\frac{dS^m}{d\mathcal{E}} = \frac{2E\rho}{k_k \sigma_{\text{пр}}^2} S^m, \quad (15)$$

где S^m – удельная поверхность материала по массе, $\text{м}^2/\text{кг}$;

\mathcal{E} – удельные энергозатраты, $\text{kВт} \cdot \text{ч}$, а комплекс $\frac{2E\rho}{\sigma_{\text{пр}}^2} = K_p$ представляет собой коэффициент размалываемости.

Для вывода кинетической зависимости $S(\mathcal{E})$ необходимо установить вид функции $\sigma_{\text{пр}}(S)$. При этом будем учитывать экспериментально установленные особенности кинетических кривых: замедление роста S с увеличением \mathcal{E} , асимптотическое стремление величины S к некоторому предельному значению $S_{\text{пр}}$, выпуклость вверх кинетических кривых [2]. Отсюда следуют условия:

$$\frac{S}{\sigma_{\text{пр}}^2} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad S \rightarrow S_{\text{пр}}, \quad (16)$$

$$\frac{d}{dS} \left(\frac{S}{\sigma_{\text{пр}}^2} \right) < 0. \quad (17)$$

Предельное напряжение, при котором происходит разрушение частиц материала, может быть оценено по формуле [2]

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{EW}{\lg}}, \quad (18)$$

где $E \approx 7 \cdot 10^4$ – модуль упругости материала, МПа;

$W \approx 1$ – удельная поверхностная энергия, Дж/м²;

$\lg \sim d$ – характерный размер дефекта структуры частиц материала, м.

Начальный предел прочности минерального сырья составляет $\sigma_{\text{пр}0} \approx \approx 20$ МПа.

Из условия (17) при $d \rightarrow 0$ следует, что $\sigma_{\text{пр}} \rightarrow \infty$, тогда с уменьшением размера частиц их прочность возрастает

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{d}}. \quad (19)$$

Принимая во внимание эмпирическую зависимость $S \approx \frac{1}{d}$, получим оценочное значение предельного напряжения [8, 9]

$$\sigma_{\text{пр}} \approx \sqrt{S}. \quad (20)$$

Подставив выражение (20) в уравнение (15), получим линейную зависимость удельной поверхности от энергозатрат, что соответствует лишь незначительному начальному участку кинетических кривых. В связи с этим зависимость (20) представим в уточняющем виде, используя начальное значение предельного напряжения $\sigma_{\text{пр}0}$ путем введения корректирующего множителя

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}0} \sqrt{\frac{S}{S_0} \left(1 - \frac{S_0}{S_{\text{пр}}} \right)^{\frac{n}{2}}}. \quad (21)$$

Зависимость (21) удовлетворяет условиям (16) и (17), а при $S \ll S_{\text{пр}}$ переходит в зависимость (20)

$$\sigma_{\text{пр}} \approx \sqrt{S} \left(1 - \frac{S}{S_{\text{пр}}} \right)^{\frac{n}{2}} \approx \sqrt{S} \left(1 + \frac{n}{2} \frac{S}{S_{\text{пр}}} + \dots \right) \approx \sqrt{S} + \frac{n}{2} \frac{S}{S_{\text{пр}}} + \dots \quad (22)$$

Подставив выражение (21) в уравнение (22), получим

$$\frac{dS}{S^{\frac{n}{2}}} = K S_0 \left(1 - \frac{S}{S_{\text{пр}}} \right)^{\frac{n}{2}}, \quad (23)$$

где $K = \frac{K_{\text{пр}0}}{K_{\text{пп}}}$, $K_{\text{пр}0} = \frac{2E\rho}{\sigma_{\text{пр}0}^2}$ – начальное значение коэффициента размалыва-
мости.

Решение уравнения (23) имеет вид

$$\Theta = \frac{S_{\text{пп}} - S_0}{KS_0(n-1)} \left(\left(1 - \frac{S_0}{S_{\text{пп}}} \right) \left/ \left(1 - \frac{S}{S_{\text{пп}}} \right) \right)^{n-1} - 1 \right), \quad (24)$$

но имеет физический смысл лишь при $n \geq 1$, так как лишь в этом случае при $S \rightarrow S_{\text{пп}}$, $\Theta \rightarrow \infty$.

Выразив из соотношения (24) S через Θ , получим уравнение кинетической кривой вибрационного измельчения

$$S = S_{\text{пп}} - \frac{S_{\text{пп}} - S_0}{\left(1 + \frac{K(n-1)S_0}{S_{\text{пп}} - S_0} \Theta \right)^{\frac{1}{n-1}}}. \quad (25)$$

Из формулы (25) следует, что при $\Theta = 0$, $S = S_0$, а при $\Theta \rightarrow \infty$, $S \rightarrow S_{\text{пп}}$. Решение (25) имеет общий характер, оно включает в себя экспоненциальное решение в виде частного случая. Так, при $n \rightarrow 1$, раскрывая неопределенность и заменяя Θ на $N_1 t$ из (25), получим

$$S = S_{\text{пп}} - (S_{\text{пп}} - S_0) \exp \left(-\frac{S_0 K N_1}{S_{\text{пп}} - S_0} t \right), \quad (26)$$

при этом раскрывается значение параметра a

$$a = \frac{K_p S_0 N_1}{K_n (S_{\text{пп}} - S_0)}. \quad (27)$$

Разложив правую часть соотношения (24) в ряд по степеням $\frac{S}{S_{\text{пп}}} < 1$, после преобразований получим

$$K \approx \frac{S}{S_0 \Theta} + n \frac{S^2}{S_{\text{пп}} S_0 \Theta}. \quad (28)$$

Соотношение (28) можно использовать для определения параметров K и n . Пренебрегая вторым слагаемым формулы (28), получим

$$K = \frac{S}{S_0 \Theta}. \quad (29)$$

С помощью этой формулы по первой опытной точке $M_1(\Theta_1, S_1)$ начального линейного участка кинетической кривой находим коэффициент K

$$K = \frac{S_1}{S_0 \Theta_1}. \quad (30)$$

Подставив эту формулу в уравнение (28), получим выражение для вычисления параметра n по оставшимся опытным точкам M_i , $i = 2, 3$ и k

$$n_i = \left(\frac{S_1}{\Theta_1} - \frac{S_i}{\Theta_i} \right) \frac{S_{\text{пп}} \Theta_i}{S_i^2}. \quad (31)$$

Для параметра n следует брать среднее значение чисел n_i

$$n = \frac{\sum_{i=2}^k n_i}{k-1}, \quad (32)$$

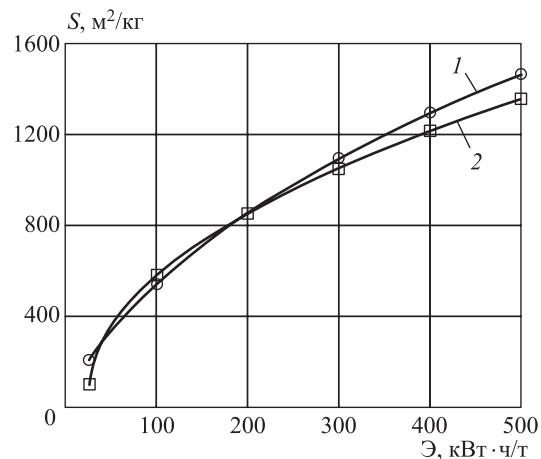
где k – число опытных точек.

Более точно параметры k и n могут быть найдены по всей совокупности опытных точек методом наименьших квадратов [10]. Для первого грубого приближения кинетической кривой можно использовать зависимость (31), соответствующую $n = 1$.

В качестве примера рассмотрим опытную зависимость удельной поверхности измельченного в вибрационной мельнице кварцевого песка от удельных энергозатрат в таблице на примере [3].

Удельная поверхность продукта измельчения кварцевого песка в зависимости от энергозатрат на измельчение

\mathcal{E} , кВт · ч/т	$S_{\mathcal{E}}$, м ² /кг	S , м ² /кг
23	180	167
55	360	362
100	560	577
200	900	890
300	1100	1071
400	1280	1180
500	1370	1249



Расчетная и экспериментальная кинетические кривые приведены на рисунке.

В рассматриваемом эксперименте А.Д. Лесина: масса

стальных шаров 740 кг, $M_d = 175$ кг·см; $S_0 = 12,5$ м²/кг; $S_{\text{пр}} = 1400$ м²/кг. По первой опытной точке $M_1(23; 1800)$ находим $K = 0,626$ кВт · ч/т.

По формулам (31) и (32) определяем параметр $n = 1,21$. Значения удельной поверхности, рассчитанные по формуле (25), приведены в таблице. Среднее квадратичное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет 8,8 %.

Таким образом, предложенная выше кинетическая зависимость (25) подтверждается опытными данными и может быть использована для прогнозирования дисперсности продуктов помола материалов в вибровращательных мельницах.

Зависимость удельной поверхности от энергозатрат при измельчении 40 кг кварцевого песка
1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кинетическая кривая

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов и изделий. Белгород: Везелица, 2007. 512 с.
- Тюпиков В.Г. Моделирование и оптимизация процессов измельчения в вибрационных мельницах: дис. ...канд. техн. наук. М.: РХТУ, 2000. 219 с.

3. Лесин А.Д. Элементы теории и методика расчета основных параметров вибромельниц // Вибрационное измельчение материалов: Науч. сообщ. № 25. М.: ВНИИТНСМ, 1957. 114 с.
4. Богданов В.С., Гаврунов А.Ю., Шаптала В.Г. Кинематика движения загрузки в вибровращательной мельнице // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 100–102.
5. Степанов Г.В. Упругопластичное деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наук. думка, 1991. 288 с.
6. Андреев С.Е., Товаров В.В. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959. 427 с.
7. Лесин А.Д. Вибрационные машины в химической технологии. М.: ЦИНТИ-Химнефтемаш, 1968. 80 с.
8. Yekeler M., Ozkan A., Austin L. Kinetics of fine wet grinding in a laboratory ball mill // Powder Technology. 2001. Vol. 114, Iss. 1–3, 15 January. P. 224–228.
9. Austin L., Yekeler M., Dumm T.F., Hogg R. The kinetics and shape factors of ultrafine dry grinding in a laboratory tumbling ball mill // Particle & Particle Systems Characterization. 1990. Vol. 7, Iss. 1–4. P. 242–247.
10. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учеб. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008. 640 с.

Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Богданов Никита Эдуардович, студ.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Гаврунов Алексей Юрьевич, канд. техн. наук

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Ельцов Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Карагодина Карина Игоревна, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 14.02.17

Bogdanov Vasiliy Stepanovich, DSc, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Bogdanov Nikita Eduardovich, Student

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Gavrunov Alexey Yurievich, PhD

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Yel'tsov Mikhail Yurievich, PhD, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Karagodina Karina Igorevna, Post-graduate Student

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

KINEMATICS OF MILLING THE MATERIAL IN A VIBRATION MILL

In this article, presented a procedure and equations for calculating the kinetics of the process of grinding material particles in a vibratory mill. The equations take into account the size and physic-mechanical properties of the material to be crushed, the amount of energy necessary to effectively destroy the particles, and the nature of the vibratory grinding inherent in this class of machines. The ability of materials to grind is derived from their physic-mechanical properties. The cumulative effect of strength, toughness and brittleness determines the grindability of the material, which is characterized by such values as the

initial and average grinding factor. The kinetic dependencies proposed in the article are confirmed by experimental data and can be used to predict the dispersion of the grinding products of materials in vibratory grinding mills.

Keywords: vibrating mill, kinetics of grinding, a particle of material, energy of destruction, abrasive wear, abrasion.

REFERENCES

1. Bogdanov V.S., Il'in A.S., Semikopenko I.A. Protsessy v proizvodstve stroitel'nykh materialov i izdeliy [Processes in the production of building materials and products]. Belgorod, 2007. 512 p. (in Russian)
2. Tupyikov V.G. Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov izmel'cheniya v vibratsionnykh mel'nitsakh: dis. kandidata tekhnicheskikh nauk [Modeling and optimization of grinding processes in vibrating mills]. Moscow, 2000. 219 p. (in Russian)
3. Lesin A.D. Elementy teorii i metodika rascheta osnovnykh parametrov vibromel'nits [Elements of the theory and methodology for calculating the basic parameters of vibrating mills]. Vibratsionnoe izmel'chenie materialov: nauchnoe soobshchenie N 25 [Vibrational milling of materials: Scientific Communication No. 25]. Moscow, 1957. 114 p. (in Russian)
4. Bogdanov V.S., Gavrunov A.Yu., Shapitala V.G. Kinematika dvizheniya zagruzki v vibrovrashchatel'noy mel'nitse [Kinematics of the motion of the load in a vibrating mill]. Vestnik BGTU [Bulletin of BSTU]. 2012. No. 4. Pp. 100–102. (in Russian)
5. Stepanov G.V. Uprugoplastichnoe deformirovaniye i razrushenie materialov pri impul'snom nagruzhenii [Elastoplastic deformation and destruction of materials under impulse loading]. Kiev, Naukova Dumka, 1991. 288 p. (in Russian)
6. Andreev S.E., Tovarov V.V. Zakonomernosti izmel'cheniya i ischisleniya kharakteristik granulometricheskogo sostava [The law of grinding and calculating the characteristics of the granulometric composition]. Moscow, Metallurgizdat, 1959. 427 p. (in Russian)
7. Lesin A.D. Vibratsionnye mashiny v khimicheskoy tekhnologii [Vibration machines in chemical technology]. Moscow, 1968. 80 p. (in Russian)
8. Yekeler M., Ozkan A., Austin L. Kinetics of fine wet grinding in a laboratory ball mill. Powder Technology. 2001. Vol. 114, Iss. 1–3, 15 January. Pp. 224–228.
9. Austin L., Yekeler M., Dumm T.F., Hogg R. The kinetics and shape factors of ultrafine dry grinding in a laboratory tumbling ball mill. Particle & Particle Systems Characterization. 1990. Vol. 7, Iss. 1–4. Pp. 242–247.
10. Bakhalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. Chislennye metody: uchebnik [Numerical methods. Textbook]. Moscow, 2008. 640 p. (in Russian)

УДК 697.44.002.23

А.М. МУКАШЕВ, С.И. АБРАМЧУК, А.В. ПУГОВКИН, А.В. БОЙЧЕНКО,
С.В. КУПРЕКОВ, Д.В. АБУШКИН

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УЧЕТА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрен метод учета потребляемой тепловой энергии с использованием уравнения Ньютона–Рихмана. Предложен способ нахождения коэффициента теплоотдачи, учитывающий индивидуальные особенности отопительных приборов. Спроектирована структурная схема и описан программный комплекс системы учета тепловой энергии. Произведен выбор элементов системы. Данная система была экспериментально исследована в условиях эксплуатации в многоквартирном жилом доме и полностью доказала свою работоспособность.

Ключевые слова: энергосбережение, учет тепловой энергии, коэффициент теплоотдачи, система.

Целью данной работы является разработка аппаратно-программного комплекса учета тепловой энергии и испытание ее в реальных условиях эксплуатации. Актуальность исследований заключается в том, что учет потребляемой тепловой энергии является важнейшей составляющей энергосбережения и стимулирует конечных потребителей к экономии энергоресурсов [1–3].

В системах теплоснабжения объектов основную долю (95 %) составляют системы с вертикальной разводкой. Поквартирный учет потребляемой тепловой энергии в таких системах не нашел массового применения из-за сложности реализации известными методами. Для систем теплоснабжения с горизонтальной разводкой есть приемлемые решения, однако они не применимы для вертикальной разводки в силу малых перепадов температур и необходимости измерения расхода теплоносителя. Это приводит к низкой точности измерений и высокой стоимости оборудования и эксплуатации. Известны частные решения для систем с вертикальной разводкой (фирмы «Данфос», «Де Прима», «Thechem» и др.), работающих по технологии распределителей стоимости потребленного тепла, однако они обладают низкой точностью измерений в связи с тем, что не учитывают индивидуальный характер теплового режима отдельного помещения и индивидуальных характеристик отопительных приборов. Эти системы не нашли широкого применения в России и странах СНГ.

Решение поставленной задачи можно разделить на несколько этапов:

- разработка структурной схемы системы;
- выбор необходимых элементов системы для ее полноценной работы;
- разработка программного обеспечения;
- испытание системы в реальных условиях.

© Мукашев А.М., Абрамчук С.И., Пуговкин А.В., Бойченко А.В., Купреков С.В.,
Абушкин Д.В., 2017

Нами предложен метод измерения, основанный на уравнении Ньютона–Рихмана. При этом основной задачей является нахождение коэффициента теплоотдачи. Он вычисляется экспериментально с учетом двух физических процессов теплообмена: конвекция и радиация.

$$P_{\text{тепл}} = G_{\text{ист}} (T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{тепл}}$ – тепловая мощность, отдаваемая отопительным прибором;

$G_{\text{ист}}$ – коэффициент теплоотдачи отопительного прибора;

$T_{\text{ист}}$ – средняя температура поверхности отопительного прибора;

$T_{\text{возд}}$ – средняя температура воздуха в помещении;

$T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}$ – температурный напор.

Обычно коэффициент теплоотдачи находится из справочной литературы или путем измерения в специализированных лабораториях [4]. Нами разработан метод измерения коэффициента теплоотдачи [5]. В динамическом режиме (например, прекращение подачи тепловой энергии) из нестационарного уравнения теплового баланса получим

$$G_{\text{ист}} = \frac{C_{\text{ист}} \frac{dT_{\text{ист}}}{dT_{\text{возд}}}}{T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}}, \text{ Вт/}^{\circ}\text{С}, \quad (2)$$

где $C_{\text{ист}}$ – теплоемкость отопительного прибора;

$\frac{dT_{\text{ист}}}{dT_{\text{возд}}}$ – скорость изменения температуры.

Экспериментальные данныечитываются с температурных датчиков, подсоединенных к отопительному прибору, с определенным времененным интервалом, заносятся в память и обрабатываются в соответствии с выражением (2). Теплоемкость отопительного прибора вычисляется путем суммирования теплоемкости корпуса металлического прибора и воды. Данный метод повышает точность измерений тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором с учетом его индивидуальных особенностей, и существенно сокращает время измерения коэффициента теплоотдачи. На рис. 1 приведена структурная схема системы учета тепловой энергии.

Сбор и передача данных осуществляется на базе следующих элементов:

– радиомодем, который считывает показания с датчиков и передает их по радиоканалу (далее – Ведомый);

– радиомодем, который принимает данные по радиоканалу и передает их серверу (далее – Ведущий);

– сервер, который устанавливает параметры обмена, принимает, хранит и обрабатывает данные.

Различие между Ведущим и Ведомым состоит только в программном обеспечении для микроконтроллеров. В остальном данные платы радиомодемов имеют схожую структуру.

К термодатчику были выдвинуты следующие требования: точность $\pm 0,5^{\circ}\text{С}$, низкий ток потребления, компактное исполнение, отсутствие дополнительного оборудования (АЦП уже встроен), отсутствие необходимости

калибровки датчика, невысокая стоимость. Нами анализировались два типа термодатчиков, наиболее соответствующие этим требованиям: ADT7410 (AnalogDevices) и DS18B20 (Dallas Semiconductor). Выбран датчик DS18B20, который за счет использования интерфейса 1wire имеет всего 3 вывода, вместо 4 (у ADT7410).

К микроконтроллеру предъявляются следующие требования: низкое энергопотребление, наличие спящего режима с поддержкой часов реального времени, наличие интерфейса UART, напряжение питания от 2,5 до 3,6 В, рабочая частота не менее 2 МГц. Всем этим требованиям удовлетворяют микроконтроллеры компании ST: STM32. Они обладают более низкой ценой и высокой мощностью по сравнению с микроконтроллерами других производителей. Также эти микроконтроллеры имеют удобный интерфейс для программирования, требующий всего 3 вывода и программатор ST-LINK, который достаточно дешев.

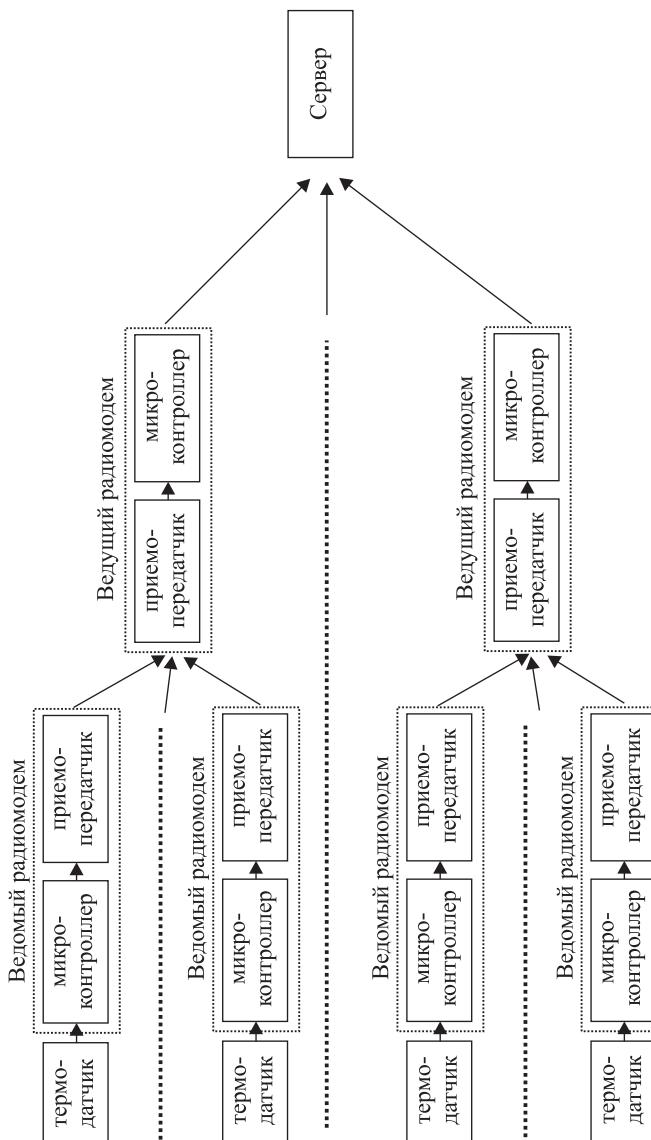


Рис. 1. Структурная схема системы учета тепла

Лидерами в сфере разработки приемопередатчиков любительских диапазонов на данный момент являются фирмы TexasInstruments, Analog-Devices и SemtechInternational. Каждая из них выпускает довольно широкие линейки приемопередатчиков разных частотных диапазонов. Для проектируемой системы сбора и передачи данных был выбран диапазон 868 МГц. Он сравнительно недавно разрешен для использования без лицензии, поэтому на данный момент не так часто используется, как диапазон 433 МГц. Приемопередатчики данного диапазона из-за отсутствия единого стандарта можно настроить на довольно низкое потребление (около 30 мА), большую дальность (порядка 1 км в условиях прямой видимости). Ввиду низкочастотности диапазона он имеет ограничение в возможной скорости, но для реализации данного проекта большие скорости не требуются. Из рассмотренных приемопередатчиков наиболее оптимальным соотношением динамического диапазона и потребляемой мощности обладает CC1120 фирмы TexasInstruments.

В данной системе все параметры работы задаются сервером, которые последний передает Ведущему, тот в свою очередь отправляет Ведомому. Основная задача Ведомого собрать показания температуры с датчика. Частота сбора задается сервером. Основная задача Ведущего передавать Ведомому команды сервера и выдавать серверу принятые данные от Ведомого. Основная задача сервера – осуществление управления и обработка данных.

Программа реализована на языке C++. То, что C++ объектно ориентированный язык во многом облегчает разработку многозадачного приложения. Общая задача была разбита на мелкие подзадачи, выделена основная, которая выполнялась в первую очередь. Основная задача: осуществление сбора данных, реализуется в классе *MainWindow*.

Разработанная нами система экспериментально исследовалась в условиях эксплуатации в многоквартирном жилом доме. Испытания проводились на одном стояке однотрубной системы, который содержал в себе 7 отопительных приборов (чугунные радиаторы МС-140), включенных последовательно с помощью стальных труб (3/4 дюйма). 4 прибора размещались в комнатах жилых квартир, 3 – в подъезде четырехэтажного дома, из них 4 – на прямой подаче, 3 – на обратной подаче. Схема тепловой системы показана на рис. 2, длина отрезков труб, количество звеньев и теплоемкости отопительных приборов приведены в таблице. Трубы прямой и обратной подачи подключались к магистралям общедомовой системы.

В начале эксперимента тепловая система была в режиме эксплуатации. Все тепловые приборы прогреты, помещения находились в обычном тепловом режиме. На отопительных приборах закреплялись терморадиомодули в составе термодатчика и ведомого радиомодема. В одном из помещений располагался сервер (персональный компьютер, ко входу которого был подключен выход ведущего радиомодема). Ведущий радиомодем собирал данные со всех радиомодулей. Температура воздуха измерялась отдельными выносными датчиками. Значения температур по радиоканалу передавались на сервер и записывались в память по мере поступления.

В режиме эксплуатации измерения температур производились раз в час. Данные по температуре передавались на центральный сервер раз в сутки.

Основные показатели тепловой системы

Местоположение	Количество звеньев отопительного прибора	Теплоемкость отопительного прибора, Дж/°С	Длина труб, м
Подъезд, 1-й этаж	4	37 567	4
Кухня, 2-й этаж	8	75 134	5
Кухня	8	75 134	5
Кабинет	8	75 134	2,1
Спальня	8	75 134	2,1
Подъезд, 2-й этаж	7	65 741	5,7
Подъезд, 3-й этаж	8	75 134	5,7



Рис. 2. Схема тепловой системы

В режим калибровки сервер переводился по команде оператора. Одновременно перекрывался вентиль подачи теплоносителя в стояк. Термодатчики передавали информацию о температурах остывающих радиаторов с интервалом 1 мин. Процесс калибровки занимал 3 ч, затем возобновлялась подача теплоносителя, тепловая система переводилась в режим эксплуатации и все измеренные данные передавались на центральный сервер.

После обработки калибровочных данных были получены зависимости коэффициента теплоотдачи отопительного прибора от температурного напора (во время калибровки не опрашивался ведомый модуль в подъезде на 1-м этаже). Графики зависимостей приведены на рис. 3.

Из графиков видно, что у отопительных приборов одинакового типа, установленных в разных помещениях, значения коэффициентов теплоотдачи значительно разнятся. При этом зависимости для радиаторов в кабинете,

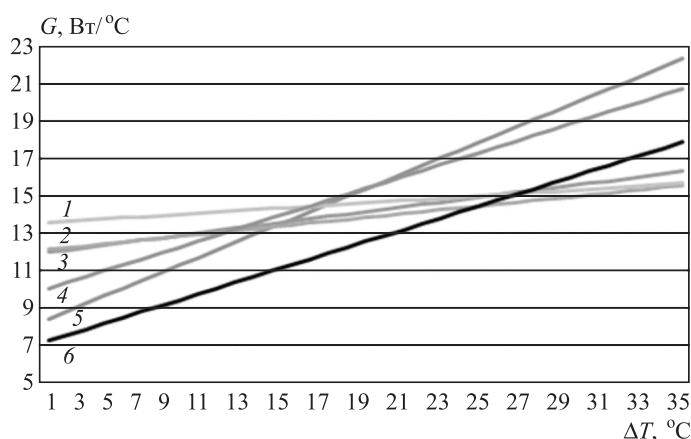


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента теплоотдачи отопительного прибора от температурного напора

1 – кухня; 2 – кабинет; 3 – спальня; 4 – подъезд 3-го этажа; 5 – 2-й этаж; 6 – подъезд 2-го этажа

кухне и спальне лежат близко друг к другу. Полученные результаты можно объяснить нахождением отопительных приборов в разных условиях.

В режиме эксплуатации не работал ведомый модуль в подъезде на 1-м этаже (в дальнейших расчетах его не учитывали). С остальных модулей были получены данные за 4 сут. С использованием коэффициентов теплоотдачи и средних температур радиаторов, а также отдаваемой мощности стояков посчитанная за данный период тепловая энергия составила 387 182 Вт · ч.

На основании экспериментов была проведена сравнительная оценка затрат на потребление тепловой энергии тремя способами:

- по нормативу (69 руб. за 1 м² в месяц) – 500 руб. за 4 сут (56 м²);
- по общедомовому счетчику (43 руб. за 1 м² в месяц) – 313 руб.;
- по разработанному нами методу (тариф: 1507 руб. за 1 Гкал) – 247 руб.

Выводы. 1. Исследования эффективности отопительных приборов позволили разработать структурную схему, выбрать ее элементы и разработать конструкцию терморадиомодуля и программное обеспечение всей системы.

2. Тестовые испытания в жилом здании доказали работоспособность системы при ее настройке и эксплуатации.

3. Сравнительная оценка полученных результатов показывает завышенную плату по нормативу. Расчеты по общедомовому и квартирным (наша разработка) счетчикам близки друг к другу, но персональный учет потребляемой тепловой энергии для жильцов более предпочтителен.

4. Измерения позволили также оценить долю затрат на общедомовые нужды (ОДН), касающиеся подъездов жилого дома. Они составили 6 % от общих затрат на тепловую энергию. Расход тепла на ОДН по подвальному помещению не измерялся и оценен нами в 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин С.М., Калинин А.Э. Энергосбережение: учеб. пособие. Зерноград: АЧГАА, 2009. 256 с.
2. Карпов В.Н. Поквартирный учет расхода тепла в системах отопления. Проблемы внедрения // АВОК. 2012. № 4. С. 50–58.
3. Пуговкин А.В., Купреков С.В., Медведев В.А., Муслимова Н.И., Степной В.С. Динамический метод измерения эффективности нагревательных приборов // Приборы. 2014. № 7. 10 с.
4. Сасин В.И., Бершидский Г.А., Прокопенко Т.Н., Швецов Б.В. Действующая методика испытания отопительных приборов – требуется ли корректировка? // Отопление и горячее водоснабжение. 2007. № 4. С. 49–52.
5. Степной В.С., Абрамчук С.И., Мукашев А.М., Пуговкин А.В. Эквивалентные электрические схемы отопительных приборов // Докл. ТУСУР. 2014. № 1(31). С. 238–241.

Мукашев Алишер Мухтарович, студ.; E-mail: ali_2475@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Абрамчук Станислав Игоревич, асп.; E-mail: zidanes@sibmail.com

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Пуговкин Алексей Викторович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: pugovkinav@ngs.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Бойченко Андрей Викторович, студ.; E-mail: Hero1994@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Купреков Степан Владимирович, асп.; E-mail: kuprekov@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Абушkin Денис Валерьевич, инж.; E-mail: abushkin@ngs.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Получено 03.02.17

Mukashev Alisher Mukhtarovich, Student; E-mail: ali_2475@mail.ru

Tomsk State University of System Controls and Radioelectronics, Russia

Abramchuk Stanislav Igorevich, Post-graduate Student;

E-mail: zidanes@sibmail.com

Tomsk State University of System Controls and Radioelectronics, Russia

Pugovkin Alexey Viktorovich, DSc, Professor; E-mail: pugovkinav@ngs.ru

Tomsk State University of System Controls and Radioelectronics, Russia

Boychenko Andrey Viktorovich, Student; E-mail: Hero1994@mail.ru

Tomsk State University of System Controls and Radioelectronics, Russia

Kuprekov Stepan Vladimirovich, Post-graduate Student;

E-mail: kuprekov@mail.ru

Tomsk State University of System Controls and Radioelectronics, Russia

Abushkin Denis Valерьевич, Engineer; E-mail: abushkin@ngs.ru

Tomsk State University of System Controls and Radioelectronics, Russia

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX

FOR CONSUMING HEAT ENERGY

In this paper, the method of accounting using the Newton-Richman equation is considered. A method is proposed for determining the heat transfer coefficient taking into account the individual features of the heating devices. The structural scheme has been designed and the software package of the thermal energy accounting system has been described. Selection of system elements has been made. This system was experimentally investigated in the conditions of operation in a multi-apartment building and has fully proved its efficiency.

К e y w o r d s: energy saving, heat energy accounting, heat transfer coefficient, system.

REFERENCES

1. Voronin S.M., Kalinin A.E. Energosberezenie: ucheb. posobie [Energy Saving: training manual]. Zernograd, 2009. 256 p. (in Russian)
2. Karpov V.N. Pokvartirnyy uchet raskhoda tepla v sistemakh otopeniya. Problemy vnedreniya [The every apartment keeping heat consumption in heating systems. Problems of implementation]. AVOK. 2012. No. 4. Pp. 50–58. (in Russian)
3. Pugovkin A.V., Kuprekov S.V., Medvedev V.A., Muslimova N.I., Stepnoy V.S. Dinamicheskiy metod izmereniya effektivnosti nagrevatel'nykh priborov [Dynamic method of measuring the efficiency of heating appliances]. Pribory [Devices]. 2014. No. 7. 10 p. (in Russian)
4. Sasin V.I., Bershidskiy G.A., Prokopenko T.N., Shvetsov B.V. Deystvuyushchaya metodika ispytaniya otopitel'nykh priborov – trebuetsya li korrektirovka? [The current method of testing of heating appliances – whether the adjustment?]. Otoplenie i goryachee vodosnabzhenie [Heating and hot water supply]. 2007. No. 4. Pp. 49–52. (in Russian)
5. Stepnoy V.S., Abramchuk S.I., Mukashhev A.M., Pugovkin A.V. Ekvivalentnye elektricheskie skhemy otopitel'nykh priborov [Equivalent electric circuit heaters]. Doklady TUSUR [Reports TUSUR]. 2014. No. 1(31). Pp. 238–241. (in Russian)

УДК 629.7.015.4 : 620.178.3

В.А. ФРОЛОВА, Л.А. АДЕГОВА, Г.А. РАЕВСКАЯ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Выполнено исследование влияния процесса формообразования с использованием импульсного тока на статическую прочность и усталостную долговечность образца из сплава Д16ЧАТ. На основании статистической обработки результатов испытаний получены кривые усталости образцов (для двух направлений вырезки: вдоль и поперек прокатки) в исходном состоянии и образцов, деформированных методом заневоливания при нормальной температуре с воздействием импульсного электрического тока различной длительности. Экспериментально показано, что воздействие импульсного электрического тока (ИЭТ) перед формообразованием повышает сопротивление усталости образцов в зависимости от длительности действия тока и направления прокатки образца. На статическую прочность воздействие ИЭТ значимого влияния не оказывало. Для расчетной оценки долговечности с использованием пакета конечно-элементного анализа создана конечно-элементная модель образца и проведен анализ выносливости для заданного блока программы нагружения. С помощью традиционной методики расчета долговечности получены результаты, показывающие, что при вырезке в направлении вдоль и поперек прокатки предварительное воздействие ИЭТ приводит к увеличению долговечности образца в зависимости от его длительности.

Ключевые слова: формообразование, интенсификация технологического процесса, импульсный электрический ток, усталостная долговечность, прогнозирование долговечности, метод конечных элементов.

Как показал опыт исследований и разработки технологии формообразования монолитных панелей в режимах ползучести, процесс деформирования можно совместить с режимом искусственного старения для таких сплавов, как АК4-1, В95, без значимого влияния на требуемые конечные прочностные характеристики. Надо отметить, что температура искусственного старения, при которой происходит формообразование в режиме ползучести, не может обеспечить полной релаксации напряжений, создаваемых при нагружении деталей, а остаточные напряжения ведут к упругой отдаче, которую необходимо учитывать в процессе формообразования.

Чтобы снизить эффект пружинения либо избежать его, но без увеличения допускаемых температур, надо научиться интенсифицировать процесс деформирования, т. е. облегчить релаксацию напряжений. Особенно это важно при формообразовании деталей из сплавов типа Д16, 1163, Д19, как правило, применяемых на конструкциях в естественно состаренном состоянии. Формообразование деталей из этих сплавов требует новых подходов, и на сегодняшний день является актуальным поиск новых режимов, не связанных с высокотемпературным нагревом.

Осуществить это можно наложением дополнительных силовых полей типа вибрационного, ультразвукового, магнитно-импульсного или электрического воздействия на материал, что позволяет за счет кратковременного нагрева повысить пластичность, облегчая тем самым релаксацию напряжений в местах их опасной концентрации, и обеспечить более высокую точность изготовления деталей, исключив факторы, порождающие геометрическую нелинейность и монтажные напряжения [1, 2].

Представлены результаты исследования влияния воздействия импульсного электрического тока при формообразовании тонкостенных деталей из сплава Д16ЧАТ на усталостную долговечность. Изучено влияние предварительной электростимуляции силой тока $I = 10$ кА с результирующей температурой разогрева заготовки $T = 60\text{--}70$ °С для двух вариантов воздействия импульсом:

- продолжительностью $\tau = 30$ с;
- $\tau = 120$ с.

Были проведены исследования влияния процесса формообразования с использованием импульсного тока на усталостную долговечность образцов сплава Д16ЧАТ (рис. 1). Усталостные испытания образцов осуществлены на трех уровнях циклического растяжения $\sigma_{\max} = 200, 180, 160$ МПа, асимметрия $R = 0,1$, частота нагружения $f = 20$ Гц. На каждом режиме нагружения испытывали по 5–7 образцов.

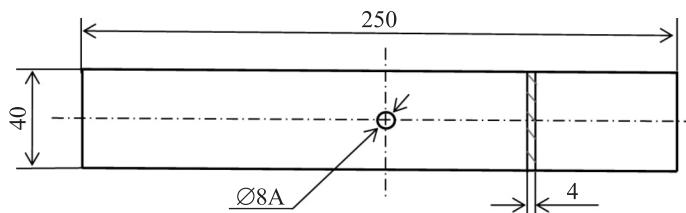


Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Статистическая обработка результатов испытаний произведена в соответствии с основными положениями, приведенными в справочнике [3]. Поскольку значения усталостной долговечности подчиняются логарифмически нормальному закону распределения, были рассчитаны средние значения логарифмов долговечности $\lg N_{\text{ср}}$ выборок и средние квадратические отклонения логарифмов долговечности S . Кривые усталости построены по среднелогарифмическим значениям N_{\lg} долговечностей.

На рис. 2 и в табл. 1 приведены результаты усталостных испытаний образцов с центральным отверстием, изготовленных из заготовок (двух направлений вырезки: вдоль и поперек прокатки) в исходном состоянии, и из заготовок, деформированных методом заневоливания при нормальной температуре в течение 2 ч с воздействием импульсного электрического тока различной длительности до получения остаточной деформации $\varepsilon_{\text{ост}} \approx 1,5$ %.

Показано, что воздействие импульсного электрического тока перед формообразованием повышает сопротивление усталости образцов на исследуемых уровнях напряжения. Так, предварительное воздействие ИЭТ длительностью $\tau = 120$ с в направлении прокатки повышает усталостную долговеч-

Таблица 1. Усталостная долговечность образцов с круговым отверстием ($K_t = 2,5$), сплав Д16ЧАТ (лист 4 мм $R = 0,1$; $f = 20$ Гц)

Варианты обработки	σ_{\max} , МПа	N_{lg} , цикл	$\lg N_{lg}$	S_{Nlg}	$\varepsilon_{890\%}$
<i>Вырезка в направлении прокатки</i>					
Исходное состояние	180	51 280	4,709	0,054	0,085
	160	64 680	4,810	0,133	0,211
После воздействия ИЭТ $\tau = 120$ с; $T = 60$ °C	180	80 890	4,908	0,114	0,140
	160	125 520	5,098	0,081	0,101
После воздействия ИЭТ $\tau = 30$ с; $T = 60\text{--}70$ °C	180	72 840	4,862	0,092	0,114
	160	107 950	5,033	0,036	0,044
<i>Вырезка поперек прокатки</i>					
Исходное состояние	180	46 070	4,660	0,070	0,110
	160	68 240	4,834	0,042	0,066
После воздействия ИЭТ $\tau = 120$ с; $T = 60$ °C	200	48 880	4,689	0,036	0,056
	160	92 130	4,964	0,042	0,066
После воздействия ИЭТ $\tau = 30$ с; $T = 60\text{--}70$ °C	200	39 390	4,595	0,009	0,024
	180	53 900	4,731	0,027	0,067
	160	81 000	4,908	0,033	0,082

ность образцов, вырезанных вдоль прокатки, в 1,5–1,9 раза по сравнению с усталостной долговечностью подобных образцов в исходном состоянии и в 1,4–1,7 раза – при $\tau = 30$ с.

Воздействие ИЭТ, направленного перпендикулярно к прокатке, длительностью $\tau = 120$ с повышает усталостную долговечность образцов, вырезанных поперек прокатки, в 1,1–1,35 раза и в 1,1–1,2 % при длительности воздействия $\tau = 30$ с по отношению к долговечности аналогичных образцов в исходном состоянии. На статическую прочность ИЭТ значимого влияния не оказал.

Для расчетной оценки долговечности для образца с отверстием (см. рис. 1) была разработана конечно-элементная модель (рис. 3). Анализ

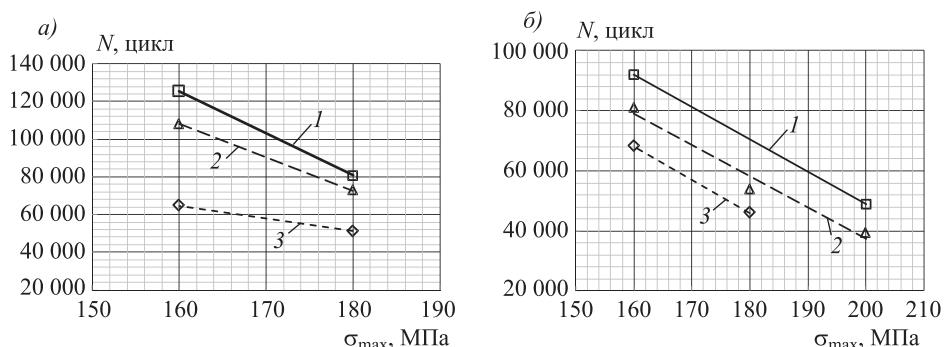


Рис. 2. Кривые усталости образцов с отверстием ($K_t = 2,5$), изготовленных из листа сплава Д16ЧАТ (вырезка в направлении прокатки (a), поперек прокатки (б)), лист 4 мм, деформированного ($\varepsilon \approx 1,5$ %) при нормальной температуре после воздействия ИЭТ ($f = 20$ Гц; $R = 0,1$)

1 – после воздействия ИЭТ $\tau = 120$ с, $T = 60$ °C; 2 – после воздействия ИЭТ $\tau = 30$ с, $T = 60\text{--}70$ °C;
3 – исходное состояние

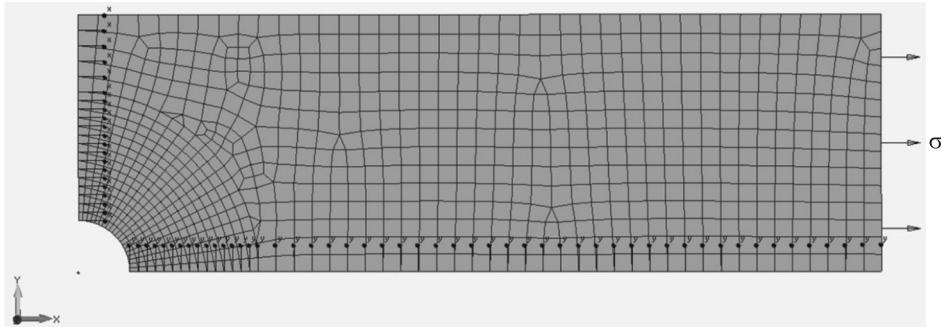


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца, условия нагружения и закрепления

проводился для четверти образца с наложением условий симметрии для перемещений узлов, лежащих на плоскости симметрии. Для моделирования образца использовались двумерные элементы типа *PLATE*, в общем случае учитывающие мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные внутренние силовые факторы. Расчетный блок программы нагружения включал три ступени: $\sigma = 150, 130$ и 110 МПа. Самая высокая единичная нагрузка блока программы нагружения $\sigma = 150$ МПа повторялась через каждые 120 000 циклов, включающих 20 000 циклов $\sigma = 130$ МПа и 100 000 циклов $\sigma = 110$ МПа. Нагружение проводилось по торцам модели при равномерном распределении нагрузки по всей площади поперечного сечения.

На рис. 4 представлено распределение максимальных главных напряжений для различных уровней нагружения.

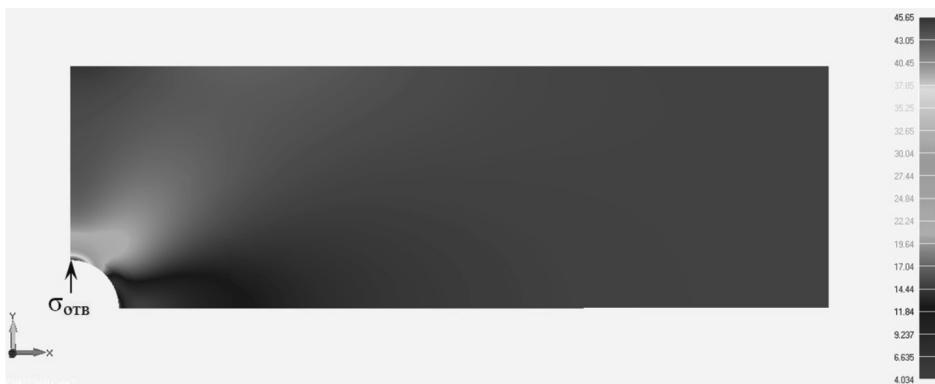


Рис. 4. Распределение максимальных главных напряжений при напряжении по кромке отверстия $\sigma = 150$ МПа – $\sigma_{\text{отв}} = 450$ МПа; $\sigma = 130$ МПа – $\sigma_{\text{отв}} = 390$ МПа; $\sigma = 110$ МПа – $\sigma_{\text{отв}} = 330$ МПа

Расчетная оценка долговечности проведена с использованием традиционной методики [4–6]. Уравнения кривых усталости и значения долговечности для образцов приведены в табл. 2.

Расчетным методом исследования при данной схеме нагружения при вырезке в направлении прокатки предварительное воздействие ИЭТ длительностью $\tau = 120$ с увеличивает сопротивление усталости в 2,7 раза, а при $\tau = 30$ с – в 2,1 раза. При направлении вырезки поперек прокатки предварительное

Оценка влияния процессов деформирования на усталостную долговечность...

Таблица 2. Влияние вариантов обработки на усталостную долговечность образцов с круговым отверстием ($K_t = 2,5$); сплав Д16ЧАТ, лист 4 мм

Вариант обработки	Уравнение кривой усталости*	Расчетные значения долговечности N_p , циклов
<i>Вырезка в направлении прокатки</i>		
Исходное состояние	$N\sigma_{0p}^{1,97} = 9,9276 \cdot 10^7$	95 829
После воздействия ИЭТ $\tau = 120$ с; $T = 60$ °C	$N\sigma_{0p}^{3,72} = 1,0068 \cdot 10^{13}$	259 442
После воздействия ИЭТ $\tau = 30$ с; $T = 60\text{--}70$ °C	$N\sigma_{0p}^{3,33} = 1,2845 \cdot 10^{12}$	207 420
<i>Вырезка поперек прокатки</i>		
Исходное состояние	$N\sigma_{0p}^{3,33} = 8,1246 \cdot 10^{11}$	131 188
После воздействия ИЭТ $\tau = 120$ с; $T = 60$ °C	$N\sigma_{0p}^{2,84} = 9,9698 \cdot 10^{10}$	161 305
После воздействия ИЭТ $\tau = 30$ с; $T = 60\text{--}70$ °C	$N\sigma_{0p}^{3,23} = 5,9074 \cdot 10^{11}$	152 683

* σ_{0p} – напряжение образца в сечении брута.

воздействие ИЭТ длительностью $\tau = 120$ с повышает долговечность в 1,2 раза, а при $\tau = 30$ с – в 1,1 раза.

Воздействие импульсного электрического тока перед операцией деформирования сплава Д16ЧАТ позволяет улучшить характеристики сопротивления усталости, что, видимо, связано со снижением остаточных напряжений и эффектом «залечивания» [1] дефектов в металле.

Для выбора параметров технологического процесса формообразования сплавов с применением электростимуляции, требующего в каждом конкретном случае уточнения критериев оптимизации и достаточного объема исходной информации, необходимо дальнейшее продолжение исследований. При этом могут быть решены основные задачи обеспечения технологичности, высокой экономической эффективности, конструктивной прочности и долговечности изделий (совершенствование технологии формообразования и поиска путей интенсификации процессов, выявление оптимального сочетания основных, определяющих параметров операций деформирования и интенсифицирующих факторов и факторов, способствующих повышению долговечности, живучести и весовой отдачи, и т.д.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия, 1977. 358 с.
- Шестериков С.А., Локощенко А.М., Раевская Г.А. Предельные деформационные характеристики сплава В95 при импульсном воздействии электрического тока // Прикладная механика и техническая физика. 1995. № 4. С. 55–59.
- Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справ. М.: Машиностроение, 2005. 344 с.
- Рудзей Г.Ф., Адегова Л.А. Прогнозирование расчетной усталостной долговечности элементов конструкций с применением модифицированных кривых усталости // Изв. Транссиба. 2014. № 2 (18). С. 86–94.

5. Белов В.К., Рудзей Г.Ф., Адегова Л.А. Сравнительный анализ прогнозирования усталостной долговечности на основе различных методик численного исследования // Полет. 2008. № 14. С. 24–30.
6. Адегова Л.А. Анализ расчетных методов исследования усталостной долговечности элементов конструкций летательных аппаратов // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения. 2015. № 1. С. 49–53.

Фролова Вера Александровна, ст. науч. сотр.; E-mail: fvasibnia@mail.ru
Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, г. Новосибирск

Адегова Людмила Алексеевна, канд. техн. наук; E-mail: adegova@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Раевская Галина Апсаттаровна, канд. техн. наук; E-mail: polsutchest@mail.ru
Новосибирский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства

Получено после доработки 06.02.17

Frolova Vera Aleksandrovna, Senior Researcher; E-mail: fvasibnia@mail.ru
Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia
Adegova Ludmila Alexeevna, PhD; E-mail: adegova@mail.ru
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Rayevskaya Galina Apsattarovna, PhD; E-mail: polsutchest@mail.ru
Novosibirsk Research Institution of Aviation Technology and Production Organization, Russia

INFLUENCE DURING DEFORMATION FATIGUE LIFE OF ALUMINUM ALLOYS

We study the influence of the forming process using a pulsed current on the static strength and fatigue life of the specimen of alloy Д16ЧАТ. On the basis of statistical processing of test results were obtained curves of the samples (for the two directions of cutting along and across the rolling) in the initial state and the specimens deformed by the method of zanemarivanja at normal temperature with a pulsed electric current of different duration. It is experimentally shown that pulsed electric current (IEP) before the operation of shaping increases the fatigue resistance of the samples depending on the duration of the current and the direction of rolling of the sample. On the static strength of the impact of the IEP of significant effect is not exerted. To estimate the durability using the finite element analysis was created a finite element model of the sample and the analysis of endurance for a given block of loading. Using traditional methods of calculation of durability of the obtained results show that when cutting in the direction and across the rolling prior exposure to IET leads to an increase in durability of the sample depending on the duration of the current.

К e y w o r d s: shaping, technical process intensification, pulsed electric current, fatigue life, durability prediction, finite element method.

REFERENCES

1. Finkel V.M. Fizicheskie osnovy tormozheniya razrusheniya [Physical bases brake failure]. Moscow, 1977. 358 p. (in Russian)
2. Shesterikov S.A., Loshchenko A.M., Rayevskaya G.A. Predel'nye deformatsionnye kharakteristiki splava V95 pri impul'snom vozdeystviyu elektricheskogo toka [Limit the deformation characteristics of the alloy V95 with pulse action of

- electrical current]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1995. No. 4. Pp. 55–59. (in Russian)
3. Stepnov M.N., Shavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik [Statistical methods for processing the results of mechanical tests: Directory]. Moscow, 2005. 344 p. (in Russian)
4. Rudezey G.F., Degova L.A. Prognozirovaniye raschetnoy ustalostnoy dolgovechnosti elementov konstruktsiy s primeneniem modifitsirovannykh krivykh ustalosti [Forecasting the estimated fatigue life of structural elements using a modified fatigue curves]. Izvestiya Transsiba [Proceedings of Transsib]. 2014. No. 2 (18). Pp. 86–94. (in Russian)
5. Belov V.K., Rudezey G.F., Degova L.A. Sravnitel'nyy analiz prognozirovaniya ustalostnoy dolgovechnosti na osnove razlichnykh metodik chislennogo issledovaniya [Comparative analysis of the fatigue life prediction based on various numerical investigation techniques]. Polyot [Scientific-Technical Journal “Polyot” (Flight)]. 2008. No. 14. Pp. 24–30. (in Russian)
6. Degova L.A. Analiz raschetnykh metodov issledovaniya ustalostnoy dolgovechnosti elementov konstruktsiy letatel'nykh apparatov [Analysis of computational methods for studying the fatigue life of structural elements of aircrafts]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport]. 2015. No. 1. Pp. 49–53. (in Russian)
-

УДК 697.34 : 628.147.22

Д.Б. ЧАПАЕВ, Т.А. РАФАЛЬСКАЯ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
РАСТВОРИМОСТИ МАГНЕТИТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
И ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕПЛОСЕТЕВОЙ ВОДЫ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАСЧЕТЕ ИНТЕНСИВНОСТИ
ВНУТРЕННЕГО КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА**

Описаны процессы внутреннего коррозионного износа трубопроводов тепловых сетей. Рассмотрен один из ключевых факторов в частной методике расчета интенсивности коррозионного износа – равновесная концентрация (растворимость) магнетита, являющаяся движущей силой продуктов коррозии от металлической стенки трубы через поры оксида в ядро потока. В литературе представлены найденные опытным путем дискретные значения растворимости магнетита, зависящие от температуры и водородного показателя теплосетевой воды. Так как для реализации расчета интенсивности внутреннего коррозионного износа на ПЭВМ растворимость магнетита должна быть непрерывной величиной, найдено ее уравнение поверхности как функции от двух факторов (температуры и водородного показателя). Даны результаты расчета интенсивности износа по предложенной методике с использованием полученного уравнения растворимости.

Ключевые слова: аппроксимирующая функция от двух переменных в Excel, внутренний коррозионный износ, растворимость магнетита, тепловые сети, тепло- снабжение.

В связи с применением герметично изолированных с наружной стороны тепlopроводов типа «труба в трубе» с наружным слоем теплоизоляционной конструкции из пластика все большую роль в общей коррозии трубопроводов начинает играть внутренний коррозионный износ (ВКИ) стенки трубы в потоке теплоносителя. Средняя удельная повреждаемость теплосетей по городам России из-за внутренней коррозии составляет не менее $0,125 \text{ (км} \cdot \text{год)}^{-1}$ при максимальной для одного объекта $0,94 \text{ (км} \cdot \text{год)}^{-1}$. Ситуация усугубляется снижением пропускной способности трубопроводов по причине внутренней коррозии и увеличением их гидравлического сопротивления, что сказывается на повышении затрат на перекачку теплоносителя в ходе эксплуатации [1]. Величина непроизводительных затрат и ущерба в городском трубопроводном транспорте, в том числе по причине внутренней коррозии, составляет до 200 тыс. руб. на 1 км трассы в год [2].

Результаты исследований процессов внутренней коррозии в системах теплоснабжения разных городов, промышленный опыт антикоррозионных мероприятий в России и за рубежом, способы контроля коррозии освещены в работах докторов технических наук Ю.В. Балабан-Ирменина, В.И. Шарапова (например, [3, 4] и др.).

В настоящее время нет подробной теории ВКИ теплосетевых труб из-за сложности процессов, протекающих на поверхности корродирующего металла, в образующейся на поверхности пленке из продуктов коррозии и на границе «оксидная пленка – окружающая среда». В целом результаты этих процессов зависят от множества параметров, имеющих большую зону неопределенности из-за значительной протяженности систем транспорта тепла. Сложность задачи связана с флуктуацией концентрации химических реагентов коррозии, электрических токов, химического состава материала труб и т.д. Учет многих параметров в теории затруднителен, но можно построить несколько частных моделей, которые в дальнейшем могут быть объединены в систему, позволяющую получить численные данные о коррозионном износе.

В работах [5] (приведен механизм ВКИ, когда коррозия протекает с кислородной деполяризацией, при транспортировке по теплопроводам однофазного теплоносителя воды) и [6] (методика оценки интенсивности износа) описано решение частной задачи: исследовались аварийные по причине внутренней коррозии участки теплопроводов из конструкционной углеродистой стали 20 в пределах одного (Центрального) теплосетевого района Новокузнецка, и сделана попытка оценить скорость ВКИ для данного частного случая. К тому же расчетная методика основывалась на ряде допущений (например, отсутствие действия сульфат- и хлорид-ионов, углекислоты, проскоков кислорода в теплообменном оборудовании и т.д.). Поэтому выводы работ [5, 6] нельзя обобщать на другие системы теплоснабжения без проведения соответствующих исследований.

В результате внутренней коррозии в потоке теплоносителя на поверхности металла труб образуется два слоя магнетита Fe_3O_4 :

- 1) внутренний, прочный и плотный на металле (составляющий долю χ от продуктов внутренней коррозии);
- 2) наружный, рыхлый и пористый, состоящий из отдельных кристаллов гидроизакисей железа.

Внутренний слой магнетита является защитным, препятствующим проникновению коррозионных агентов к поверхности металла из теплоносителя. Однако этот слой имеет некоторую пористость θ . Поэтому на анодных участках поверхности металла через него происходит диффузия ионов железа Fe^{2+} к теплоносителю. На катодных участках развивается встречная диффузия электронов, превращающих молекулу O_2 и 2 молекулы H_2O в 4 иона OH^- (кислородная деполяризация). Ионы Fe^{2+} , проникающие к теплоносителю, соединяются с ионами OH^- и образуют рыхлый наружный слой водонасыщенного магнетита $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}(\text{OH}_2)$, часть которого уносится потоком теплоносителя. При концентрациях кислорода в теплоносителе, заметно превышающих норматив для теплосетей, этот рыхлый внешний слой магнетита может преобразоваться в гематит Fe_2O_3 [7].

ВКИ сталей в теплосетевой воде является совокупностью процессов:

- 1) начальная реакция чистого железа с окислителем;
- 2) отток доли $(1 - \chi)$ железосодержащих веществ путем диффузии от поверхности стали к теплоносителю;
- 3) массоперенос доли $(1 - \chi)$ железосодержащих веществ в поток теплоносителя.

Перечисленные выше процессы определяют интенсивность равномерного по поверхности трубы ВКИ. Для Центрального теплосетевого района Новокузнецка на основе анализа результатов натурных исследований в работе [6] предложено оценивать глубинный показатель равномерного ВКИ стенки трубопровода по формуле

$$\Pi = 3,6 \cdot 10^6 \cdot q \frac{\tau_p}{\rho_m} \cdot \frac{\theta C_{Fe}}{\frac{1}{k} + (1-\chi) \left(\frac{h}{D} + \frac{1}{h_D} \right)}, \text{ мм/год}, \quad (1)$$

где q – поправочный коэффициент, безразмерная величина;

τ_p – время эксплуатации трубы, ч;

ρ_m – плотность металла трубы, кг/м³;

θ – пористость пленки магнетита, безразмерная величина;

C_{Fe} – равновесная концентрация (растворимость) магнетита Fe₃O₄, кг/м³;

k – константа скорости реакции коррозии на границе «металл–оксид», определяемая по формуле Аррениуса, м/с;

χ – доля магнетита в продуктах коррозии (для нормируемой концентрации кислорода в теплоносителе обычно $\chi = 0,5$), безразмерная величина;

h – толщина плотного слоя магнетита, м (в среднем $h = 1 \cdot 10^{-5}$ м);

D – коэффициент диффузии соединений железа в порах оксида с границы «металл–оксид» на границу «оксид–теплоноситель», м²/с;

h_D – коэффициент массопереноса соединений железа с границы «оксид–теплоноситель» в однофазный поток теплоносителя при турбулентном течении, м/с.

В числителе формулы (1) в качестве движущей силы продуктов коррозии в порах оксида задана разность концентраций продуктов коррозии между равновесной C_{Fe} на границе «металл–оксид» и практически нулевой их концентрацией в ядре потока теплоносителя. В знаменателе формулы (1) представлена сумма сопротивлений ВКИ:

$1/k$ – сопротивление начальной реакции чистого железа с окислителем;

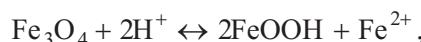
h/D – сопротивление диффузии продуктов коррозии в порах оксида;

$1/h_D$ – сопротивление массопереносу продуктов коррозии в поток теплоносителя.

Методика расчета значений q , θ , k , D , h_D изложена в [6].

В данной статье рассмотрим входящую в формулу (1) равновесную концентрацию (растворимость) магнетита C_{Fe} в теплосетевой воде.

Магнетит – это оксид, термодинамически равновесно существующий на поверхности углеродистой стали, обладающий защитным действием. Химическая устойчивость магнетита в зависимости от окислительно-восстановительных и кислотно-основных условий, а также от температуры среды является важной характеристикой и в известной мере определяет коррозионное состояние металла. Между твердой фазой магнетита и контактирующей с ним водной средой устанавливаются следующие равновесия:





Растворимость магнетита C_{Fe}

$$C_{\text{Fe}} = [\text{Fe}_{\text{cymm}}] = [\text{Fe}^{2+}] + [\text{FeOH}^+] + [\text{Fe(OH)}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$$

зависит от температуры t и водородного показателя pH теплоносителя.

В [8] для некоторых дискретных значений pH в диапазоне $8 \leq \text{pH} \leq 10$ представлены графики функций $C_{\text{Fe}}(t)$ для температур $40^\circ\text{C} \leq t \leq 300^\circ\text{C}$ без их математического описания, найденные опытным путем. Для реализации на ПЭВМ расчета по формуле (1) необходимо, чтобы в расчетном алгоритме растворимость магнетита C_{Fe} была непрерывной величиной от обоих параметров t и pH. Данная задача решена в программе Microsoft Excel путем аппроксимации опытных точек растворимости из [8] в уравнение поверхности $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$.

Опытные значения растворимости при $\text{pH} \leq 9,25$ с достаточной для инженерных расчетов точностью аппроксимируют полиномы второй степени (рис. 1). Опытная функция $C_{\text{Fe}}(t)$ имеет максимум при $t = 150^\circ\text{C}$ и различную крутизну наклона с обеих его сторон, поэтому ее аппроксимация по всей области определения полиномом второй или более высокой степени дает неадекватные результаты. В этом случае значения точек на линии тренда и расчеты по уравнению линии тренда не совпадают между собой. Данная проблема легко решается разбиением области определения функции $C_{\text{Fe}}(t)$ на две подобласти ($40^\circ\text{C} \leq t \leq 150^\circ\text{C}$ и $150^\circ\text{C} < t \leq 300^\circ\text{C}$) и ее трендированием в каждой из подобластей полиномами второй степени.

Полученная таким образом поверхность $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$ в диапазоне температур $40^\circ\text{C} \leq t \leq 300^\circ\text{C}$ и значениях водородного показателя $8 \leq \text{pH} \leq 9,25$ представляет собой два соединенных друг с другом ограниченных вертикальными секущими плоскостями эллиптических параболоида, а ее уравнение имеет вид

$$C_{\text{Fe}}(t, \text{pH}) = \rho(m t^2 - nt + p) 10^{-9}, \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (2)$$

где ρ – плотность теплоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$;

t – температура теплоносителя, $^\circ\text{C}$;

множитель $(10^{-9} \cdot \rho)$ переводит мкг магнетита / кг воды (результат, получаемый в скобках) в $\text{кг}/\text{м}^3$;

m, n, p – коэффициенты, определяемые по формулам:

– при $40^\circ\text{C} \leq t \leq 150^\circ\text{C}$:

$$m = 0,00823 \text{pH}^2 - 0,157 \text{pH} + 0,748, \quad (3)$$

$$n = 1,129 \text{pH}^2 - 21,53 \text{pH} + 102,5, \quad (4)$$

$$p = 140,4 \text{pH}^2 - 2675 \text{pH} + 12730; \quad (5)$$

– при $150^{\circ}\text{C} < t \leq 300^{\circ}\text{C}$:

$$m = 0,004253\text{pH}^2 - 0,0806\text{pH} + 0,3815, \quad (6)$$

$$n = 2,8672\text{pH}^2 - 54,495\text{pH} + 258,68, \quad (7)$$

$$p = 477,38\text{pH}^2 - 9101,6\text{pH} + 43344. \quad (8)$$

В диапазоне температур $40^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$ и значениях водородного показателя $\text{pH} > 9,25$ поверхность $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$ является плоскостью и описывается уравнением

$$C_{\text{Fe}}(t, \text{pH}) = \rho (0,0099\text{pH}t - 0,103t - 8,357\text{pH} + 84,84)10^{-9}, \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (9)$$

Плотность $\rho(t)$ теплосетевой воды в формулах (2), (9) в вычислительном алгоритме нами предлагается определять по уравнению, аппроксимирующему принятые из [9] опытные точки

$$\rho(t) = 1001,3 - 0,0026t^2 - 0,1569t, \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (10)$$

где t – температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчета $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$ представлены на рис. 1. Поверхность $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$ переведена на плоскость с изолиниями для удобства считывания значений. На графике маркерами показаны опытные данные по растворимости из [8], сплошными линиями – расчетные значения $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$, найденные по формулам (2), (9).

Из рис. 1 видно, что при температуре теплоносителя 150°C меняется знак температурного коэффициента растворимости магнетита, что связано

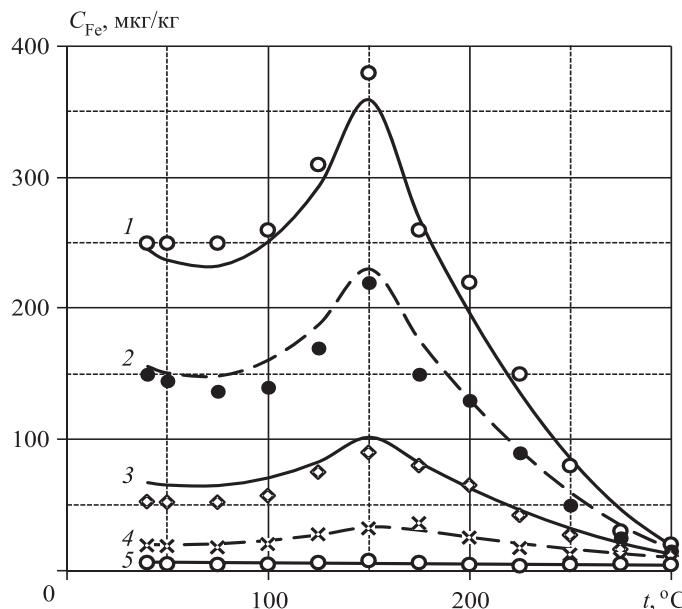


Рис. 1. Растворимость магнетита в воде тепловых сетей
1 – pH 8; 2 – pH 8,3; 3 – pH 8,7; 4 – pH 9; 5 – pH 9,4

с перестройкой его кристаллической структуры. При $\text{pH} > 9,25$ значения $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$ почти не зависят от температуры теплоносителя.

С помощью найденного уравнения поверхности $C_{\text{Fe}}(t, \text{pH})$ в программе Microsoft Excel выполнен расчет по методике [6] глубинного показателя равномерного ВКИ трубопроводов теплосетей Центрального теплосетевого района Новокузнецка для следующих исходных данных: прямолинейный участок трубопровода $57 \times 3,5$ мм (внутренний диаметр $d_{\text{в}} = 50$ мм), $\tau_p = 8760$ ч (один год эксплуатации); $\rho_m = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$; расход воды в труbe $G = 2 \cdot 10^4 \text{ кг}/\text{ч}$.

Результаты расчета для характерных в системе теплоснабжения значений pH представлены на рис. 2.

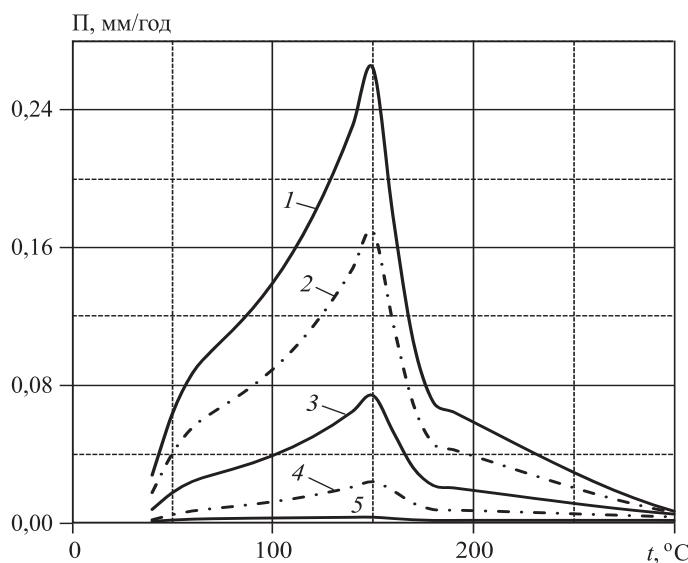


Рис. 2. Глубинный показатель равномерного внутреннего коррозионного износа
1 – pH 8; 2 – pH 8,3; 3 – pH 8,7; 4 – pH 9; 5 – pH 9,4

Из рис. 2 видно, что в диапазоне температур $40\text{--}150$ °C наблюдается экспоненциальный характер зависимости $\Pi(t)$ для значений $\text{pH} \leq 9,25$. Скорость равномерного ВКИ в этом диапазоне температур определяется скоростью реакции коррозии на границе «металл–оксид». Резкое снижение значения $\Pi(t)$ при дальнейшем повышении температуры до 180 °C (степенная зависимость) связано со сменой знака температурного коэффициента растворимости C_{Fe} и усилением диффузионного контроля. При увеличении температуры выше 180 °C износ протекает с диффузионным контролем. При $\text{pH} > 9,25$ скорость износа минимальна и почти не зависит от температуры.

При увеличении диаметра трубопровода и, таким образом, снижении скорости потока (при постоянстве расхода) повреждаемость теплопровода от ВКИ должна уменьшаться, что обусловлено зависимостью ВКИ от гидродинамики потока (согласно [2], при увеличении диаметра от 50 до 200 мм повреждаемость по причине ВКИ снижается в 5–6 раз). Однако расчет по

формуле (1) показывает слабую зависимость $\Pi(d_b)$ при $G = \text{const}$, что говорит о необходимости проведения дополнительных экспериментальных исследований ВКИ как в лабораторных, так и в реальных условиях эксплуатации теплосетей при различных водно-химических и гидродинамических режимах.

Также рис. 2 показывает целесообразность применения в теплосетях теплоносителя с температурой не более 100 °C, что является предпочтительным и с эксергетической точки зрения [10].

Для характерных для Центрального теплосетевого района Новокузнецка среднегодовых значениях pH = 8,7 и температуры теплоносителя в подающей магистрали 75 °C (учитывая описанную в [11] проблемную ситуацию с обеспечением проектных температурных графиков) рассчитанное по формуле (1) значение Π равно 0,03 мм/год, что соответствует скорости равномерного ВКИ, полученной по результатам натурных исследований в данном районе для труб диаметром от 50 до 100 мм (от 0,02 до 0,03 мм/год).

Выводы. Равновесная концентрация (растворимость) магнетита в теплосетевой воде – один из существенных факторов в расчете внутреннего коррозионного износа трубопроводов тепловых сетей, являющийся движущей силой продуктов коррозии от металлической стенки трубы через поры оксида в ядро потока. При построении расчетных программ на ПЭВМ целесообразно задать опытные данные по растворимости в виде функции, в данном случае от температуры и водородного показателя среды. Эта функция в диапазоне температур $40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и значениях водородного показателя $8 \leq \text{pH} \leq 9,25$ представляет собой два соединенных друг с другом ограниченных вертикальными секущими плоскостями эллиптических параболоида и описывается полиномами второй степени, а в диапазоне $40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\text{pH} > 9,25$ является плоскостью.

Выполнен расчет интенсивности внутреннего коррозионного износа с использованием полученных уравнений растворимости магнетита. Для уточнения методики, применительно к конкретным условиям района теплоснабжения, требуется проведение дополнительных экспериментов.

Применение разработанной методики расчета интенсивности внутреннего коррозионного износа позволит спрогнозировать возможные аварии [12], тем самым повысить надежность теплоснабжения и сократить время ремонтных работ в теплосетях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А н ц и ф е р о в С.А., Ф и л е н к о в В.М. Апробация экспериментального стенда для определения гидравлического сопротивления шероховатой трубы // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 10–15.
2. А н ц и ф е р о в С.А., У с м а н о в а Е.А. Анализ влияния внутренней коррозии на эксплуатацию трубопроводов // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 5–10.
3. Б а л а б а н - И р м е н и н Ю.В., Л и п о в с к и х В.М., Р у б а ш о в А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей. М.: Новости теплоснабжения, 2008. 288 с.

4. Шарапов В.И., Ямлеева Э.У. Защита воды в системах теплоснабжения от вторичного насыщения коррозионно-агрессивными газами. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 187 с.
5. Чапаев Д.Б., Басин А.С. Методика расчета внутреннего коррозионного износа теплопроводов // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 2. С. 83–87.
6. Чапаев Д.Б., Оленников А.А. Расчет скорости внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей из углеродистых сталей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 33–36.
7. Иванова Н.В. Анализ эффективности образования пассивирующей пленки на поверхности углеродистой стали в гидразиносодержащей и кислородсодержащей средах // Теплоэнергетика. 2001. № 8. С. 38–41.
8. Оле Кристенсен, Свен Андерсен. Новые датские стандарты водоподготовки // Водоочистка. 2008. № 6. С. 56–60.
9. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.
10. Баймачев Е.Э., Манзарханова Л.М., Туфанова М.В., Левицкий А.И. Оптимизация температурного графика централизованного теплоснабжения по критерию минимума затрат эксергии // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 6. С. 68–72.
11. Рафальская Т.А., Мансуров Р.Ш., Ефимов Д.И., Косова Е.Ю. Проблемы энергетической эффективности систем централизованного теплоснабжения // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 10–11. С. 32–48.
12. Detroja K.P., Guidi R.D., Patwardhan S.C. Plant-wide detection and diagnosis using correspondence analysis // Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15, Iss. 12. P. 1468–1483.

Чапаев Денис Борисович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: db.chapaev@gmail.com
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Рафальская Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: rafalskaya.ta@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 02.02.17

Chapaev Denis Borisovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: db.chapaev@gmail.com
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Rafalskaya Tat'yana Anatol'evna, PhD, Ass. Professor;
E-mail: rafalskaya.ta@yandex.ru

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

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE DEPENDENCE OF MAGNETITE SOLUBILITY ON TEMPERATURE AND THE HYDROGEN INDEX OF HEAT NETWORK WATER FOR USE IN CALCULATING THE INTENSITY OF INTERNAL CORROSIVE WEAR

The processes of internal corrosive wear of pipelines of heat networks are described. One of the key factors in the private method for calculating the intensity of corrosive wear is considered – the equilibrium concentration (solubility) of magnetite, which is the driving

force of corrosion products from the metal wall of the pipe through the pores of the oxide into the core of the stream. Present time the literature gives discrete values of solubility of magnetite found experimentally, which depend on the temperature and the hydrogen index of the heat network water. Since to the calculation of the intensity of internal corrosive wear on the PC, the solubility of magnetite must be a continuous quantity, its equation of surface as a function of two factors (temperature and hydrogen index) is found. The results of calculating the wear rate according to the proposed method are given using the found solubility equation.

K e y w o r d s: approximating function of two variables in Excel, internal corrosive wear, solubility of magnetite, heat networks, heat supply.

REFERENCES

1. A n t s i f e r o v S.A., F i l e n k o v V.M. Aprobatsiya eksperimental'nogo stenda dlya opredeleniya gidravlicheskogo soprotivleniya sherokhovatoy truby [Approbation of the experimental stand for the determination of the hydraulic resistance of a rough pipe]. Vestnik NGIEI [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Institute of Engineering and Economics]. 2015. No. 6 (49). Pp. 10–15. (in Russian)
2. A n t s i f e r o v S.A., U s m a n o v a Ye.A. Analiz vliyaniya vnutrenney korrozii na ekspluatatsiyu truboprovodov [Analysis of the effect of internal corrosion on the operation of pipelines]. Vestnik NGIEI [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Institute of Engineering and Economics]. 2015. No. 6 (49). Pp. 5–10. (in Russian)
3. B a l a b a n - I r m e n i n Yu.V., L i p o v s k i h V.M., R u b a s h o v A.M. Zashchita ot vnutrenney korrozii truboprovodov vodyanykh teplovyykh setey [Protection against internal corrosion of pipelines of water heat networks]. Moscow, 2008. 288 p. (in Russian)
4. S h a r a p o v V.I., Y a m l e y e v a E.U. Zashchita vody v sistemakh teplosnabzheniya ot vtorichnogo nasyshcheniya korrozionno-agressivnymi gazami [Water protection in heat supply systems from secondary saturation with corrosive gases]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2004. 187 p. (in Russian)
5. C h a p a e v D.B., B a s i n A.S. Metodika rascheta vnutrennego korrozionnogo iznosa teploprovodov [Methods of calculation of inner corrosion wear of heatlines]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2004. No. 2. Pp. 83–87. (in Russian)
6. C h a p a e v D.B., O l e n n i k o v A.A. Raschet skorosti vnutrenney korrozii truboprovodov vodyanykh teplovyykh setey iz uglerodistykh staley [Calculating the rate of internal corrosion of water heating network from carbon steels]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [News of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy]. 2012. No. 4. Pp. 33–36. (in Russian)
7. I v a n o v a N.V. Analiz effektivnosti obrazovaniya passiviruyushchey plenki na poverkhnosti uglerodistoy stali v gidrazinosoderzhashchey i kislorsodsoderzhashchey sredakh [Analysis of the efficiency of formation of a passivating film on the surface of carbon steel in hydrazine-containing and oxygen-containing media]. Teploenergetika [Thermal Engineering]. 2001. No. 8. Pp. 38–41. (in Russian)
8. O l e K r i s t e n s e n, S v e n A n d e r s e n. Novye datskie standarty vodopodgotovki [New Danish water treatment standards]. Vodoochistka [Water Treatment]. 2008. No. 6. Pp. 56–60. (in Russian)
9. R i v k i n S.L., A l e k s a n d r o v A.A. Teplofizicheskie svoystva vody i vodyanogo para [Thermophysical properties of water and water steam]. Moscow, Energiya, 1980. 424 p. (in Russian)

10. Baymachev Ye.E., Manzarkhanova L.M., Tufanova M.V., Levitskiy A.I. Optimizatsiya temperaturnogo grafika tsentralizovannogo teplosnabzheniya po kriteriyu minimuma zatrata eksergii [Optimization of the temperature graph of centralized heat supply based on the criterion of minimum exergy costs]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2015. No. 6. Pp. 68–72. (in Russian)
11. Rafalskaya T.A., Mansurov R.Sh., Efimov D.I., Kosova E.Yu. Problemy energeticheskoy effektivnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Problems of power efficiency of systems of the centralized heat supply]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 10–11. Pp. 32–48. (in Russian)
12. Detroja K.P., Gudi R.D., Patwardhan S.C. Plant-wide detection and diagnosis using correspondence analysis. Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15. Iss. 12. Pp. 1468–1483.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ И УСТРОЙСТВА ФУНДАМЕНТОВ

В НГАСУ (Сибстрин) разработана новая технология и оборудование для уплотнения грунтов и устройства фундаментов. Высокая эффективность технологии подтверждается ускорением процесса устройства фундаментов и их удешевлением. Принцип работы грунтоуплотняющего агрегата состоит в том, что сначала рабочим органом выштампывается котлован (скважина), который может быть использован для устройства в нем бетонного или железобетонного фундамента. Котлован может заполняться грунтом или другим материалом (песком, щебнем и т. д.) и уплотняться (утрамбовываться) тем же агрегатом. Внутри металлической оболочки агрегата, имеющей форму будущего котлована, находится мощный гидропневмомолот. Через специальное устройство ударник молота передает ударные импульсы на торцевую часть оболочки. Под действием этих импульсов оболочка и весь рабочий орган погружаются в грунт, образуя котлован и создавая вокруг него сильно уплотненную зону в грунте.

Техническая характеристика агрегата

Базовая машина – гидравлический экскаватор ЭО-5124:

- рабочий орган – энергия удара 30–100 кДж;
- рабочая частота – до 20 ударов в минуту;
- форма образуемого котлована – конус усеченный;
- малый диаметр – 200 мм;
- большой диаметр – 500 мм;
- глубина – 3000 мм.

Преимущества предложения

Предлагаемая технология с успехом заменяет свайные фундаменты. Стоимость их устройства при этом уменьшается в 3–4 раза и значительно сокращаются сроки выполнения работ (погружение рабочего органа на глубину 2,9 м в грунте II категории и его извлечение составляет 5–7 мин). При выштамповке котлованов для уплотнения грунтов производительность достигает 30–40 котлованов за смену. Эта технология может с успехом применяться для устройства фундаментов под здания и сооружения, опоры линий электропередач и контактных сетей для железнодорожного и городского транспорта; создания надежных грунтовых оснований под фундаменты, под покрытия дорог, взлетно-посадочных полос аэропортов; улучшения механических свойств насыпных и «слабых» грунтов.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: ntio-ngasu@yandex.ru

Internet: www.sibstrin.ru/innovation

Тел. +7 (383) 266 42 81

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется в редакцию на *русском языке*. Зарубежные авторы могут присыпать статьи на *английском языке*. Возможна публикация статьи одновременно в двух вариантах — на русском и английском языках. В этом случае оформляются два текста статьи — на русском языке и точный перевод на английский. Вместе с рукописью представляются:

- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;
- *рекомендация* соответствующего академического (кафедры) или научного подразделения (заверенная выписка из протокола заседания подразделения);
- *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись.

Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от Word 97 до Word 10; от Windows XP до Windows 10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Сг размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу посередине. Объем рукописи — до 12 страниц А4, включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

3. Состав рукописи статьи, правила и образец оформления см. на Internet-сайте журнала <http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/>

a) русскоязычная часть:

- индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
- инициалы, фамилии авторов;
- название статьи;
- аннотация объемом до 1/3 страницы текста (не менее 80 слов);
- ключевые слова (не менее 5);
- текст статьи:
 - следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
 - аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом использовании;
 - ф о р м у л ы набираются шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, в статье должен быть необходимый минимум формул; все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента);
 - русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом; латинские буквы — курсивом;
 - во избежание смещения сходных изображений прописных и строчных букв *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и др., а также трудноразличимых букв и символов *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
 - и л л и о с т р а ц и и представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 дпі, с расширением cdr (предпочтительно) или .doc, фотографии — TIFF или JPEG; надписи и цифры набирать шрифтом Times New Roman, иллюстрации, в том числе фотографии, должны иметь хорошую проработку деталей и должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки);
 - иллюстрации распечатываются в двух экземплярах, с подписями к ним, размер иллюстрации — не более 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4;
 - т а б л и ц ы печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
 - б и б l o g r a f i c h e s k i y c p i s o k (не менее 8 ссылок) составляется по следующим правилам: в список включаются только опубликованные работы, в порядке упоминания в статье, ссылки на них в тексте статьи даются арабскими цифрами в квадратных скобках, в списке не должно быть нормативных документов (ГОСТов, СНиПов, технических регламентов, правовых актов и т.п. неавторизованных источников) — ссылки на них даются в тексте статьи в развернутом виде или в форме подстрочных сносок, библиографический список следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (примеры см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibliographieskogo_list/), ссылки на интернет- сайты не допускаются;
 - для статей из зарегистрированных электронных журналов указываются фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта журнала и дата обращения к электронному ресурсу;
- с в е д е н i я о б а в т о р а х: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), учченая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

б) англоязычная часть:

- сведения об авторах — последовательно для каждого:
 - фамилия, имя, отчество полностью, транслитерированные в латинские символы по системе BGN (использовать таблицу «правила транслитерации» см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN_PCGN_romanization/);

(Окончание правил)

- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления), ученые звания (Professor, Ass. Professor, Academician of..., Corr. Member of... — профессор, доцент, академик ...), член-корреспондент ...), другое — Senior Lecturer (ст. преподаватель), Engineer (инженер), Post-graduate Student (аспирант), Student (студент);
 - официальное англоязычное название организации (учреждения), города (если не упоминается в наименовании организации), страны;
 - название статьи;
 - аннотация;
 - ключевые слова (Keywords);
 - библиографический список:
 - для зарубежных источников на латинице — с сохранением оригинального описания;
 - для ссылок на русскоязычные источники — транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов и название статьи; затем в квадратных скобках — название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, —, // и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pp., в конце — (in Russian).
4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).
5. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению; авторы могут сообщить редакции данные о специалистах по профилю статьи. Доработанную после рецензии статью присыпать в электронном виде.
6. Корректура статьи может предоставляться по запросу автора.
7. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.
8. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики: фамилия, имя, отчество полностью, звания и контактная информация. Электронная версия обязательна.
9. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высыпаются.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический раздел
В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

На 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3900 р.

цена отдельного номера — 650 р.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 3 (699) 2017

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*