

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК 2016 № 3

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК 2016 № 3

ЗАСНАВАЛЬНІК – НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

Часопіс выдаецца са студзеня 1956 г.

Выходзіць чатыры разы ў год

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Витязь П. А., Сеньюк В. Т., Хейфец М. Л.** Синтез поликристаллических сверхтвердых материалов из модифицированных наноалмазов. 5
- Канюков Е. Ю., Белоногов Е. К., Якимчук Д. В., Козловский А. Л., Кадыржанов К. К., Арзуманян Г. М., Демьянов С. Е.** Особенности формирования медного осадка в порах диоксида кремния. 11
- Ярмолич М. В., Каланда Н. А.** Низкотемпературное магнитное упорядочение в наноразмерных зернах $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ 16
- Зубко В. И., Зубко Д. В., Сицко Г. Н.** Импедансный метод контроля и диагностики качества электроизоляционных материалов, используемых в электротехнической промышленности. 21

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Прушак В. Я., Данилов В. А., Кондратчик Н. Ю.** Анализ схем обработки арочных формирующих элементов валков вальцпресов. 28
- Кончак В. С., Назаренко А. А.** Верификация компьютерных моделей механических конструкций с использованием результатов эксперимента. 35
- Каленчукова О. В., Нагула П. К., Третинников Д. Л.** Некоторые особенности физико-химических процессов, протекающих при электролитно-плазменной обработке нержавеющей сталей. 46
- Камлюк А. Н., Ширко А. В., Грачулин А. В.** Численное моделирование движения пены по горизонтальному цилиндрическому каналу методом конечных объемов. 53

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Кот В. А. Граничные характеристики в задачах теплопроводности. Анализ точности и сходимости решений	60
Акулич П. В. Тепломассоперенос в цилиндрических пористых телах с учетом нестационарности параметров на углубляющейся границе испарения.	71
Ахрамович А. П., Войтов И. В., Колос В. П. О работоспособности реактора с микротвэлами. Анализ организации теплосъема в активных зонах	77
Серебряный Г. З., Жемжуров М. Л., Жмура Г. М., Рудович Д. О. Двумерная модель для обоснования безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов	87

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Кужель Н. С., Константинова Е. Э., Чижик С. А., Нгуен Ти Май Хуонг, Нгуен Тронг Тин. Атомно-силовая микроскопия биологических объектов.	93
Салем М. М., Нематов М. Г., Уддин А., Подгорная С. В., Панина Л. В., Морченко А. Т. Использование аморфных ферромагнитных микропроводов в качестве встроенных сенсоров механических напряжений в функциональных материалах	98
Жуковский А. И., Моги К., Кутень С. А. Измерение радиоактивности почв методом <i>in situ</i>	105

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Липницкий С. Ф. Алгоритмы рубрикации текстовых документов и кратких сообщений в системе информационного интернет-мониторинга	111
--	-----

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Лиштван И. И., Ляхевич Г. Д., Ляхевич А. Г., Дударчик В. М., Крайко В. М., Звонник С. А. Экспериментальные исследования и эффективность использования золы бурых углей и горючих сланцев в асфальто-бетонных смесях.	118
--	-----

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

Петр Александрович Витязь (К 80-летию со дня рождения).	125
Правила для авторов	127

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ 2016 № 3

Серия физико-технических наук

На русском и белорусском языках

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 391 от 18.05.2009

Компьютерная верстка Н. И. К а ш у б а

Здадзена ў набор 29.08.2016. Падпісана да друку 22.09.2016. Выхад у свет 29.09.2016. Фармац 60 × 84¹/₈. Папера афсетная.

Друк лічбавы. Ум. друк. арк. 14,88. Ул.-выд. арк. 16,4. Тыраж 86 экз. Заказ 189.

Кошт нумару: індывідуальная падпіска – 10,28 руб.; ведамасная падпіска – 25,11 руб.

Выдавец і паліграфічнае выкананне:

Рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства «Выдавецкі дом «Беларуская навука». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/18 ад 02.08.2013.

ЛП 02330/455 ад 30.12.2013. Вул. Ф. Скарыны, 40, 220141, г. Мінск.

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICO-TECHNICAL SERIES 2016 N 3

FOUNDED BY THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

The Journal has been published since January 1956

Issued four times a year

CONTENTS

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

- Vityaz P. A., Senyut V. T., Kheifetz M. L.** Synthesis of polycrystalline superhard materials from modified nano-diamonds. 5
- Kaniukov E. Yu., Belonogov E. K., Yakimchuk D. V., Kozlovskiy A. L., Kadyrzhanov K. K., Arzumanyan G. M., Demyanov S. E.** Features of forming of copper deposit in pores of silicon oxide. 11
- Yarmolich M. V., Kalanda N. A.** Low-temperature magnetic ordering in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-d}$ nano-sized grains 16
- Zubko V. I., Zubko D. V., Sitsko G. N.** Impedance method of monitoring and diagnostics of quality of insulation materials, used in electrotechnical industry 21

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

- Prushak V. Ya., Danilov V. A., Kondratchik N. Yu.** Analysis of processing of arched forming elements of rollers of rolling presses. 28
- Konchak V. S., Nazarenko A. A.** Verification of computer models of mechanical structures using experimental results 35
- Kalenchukova O. V., Nagula P. K., Tretinnikov D. L.** Some features of physical and chemical processes occurring during electrolytic-plasma processing of stainless steels 46
- Kamluk A. N., Shirko A. V., Grachulin A. V.** Numerical simulation of motion of foam in a horizontal cylindrical channel by finite volume method. 53

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Kot V. A.** Boundary characteristics in heat-conduction problems. Analysis of accuracy and convergence of solutions 60
- Akulich P. V.** Heat and mass transfer in cylindrical porous bodies with account of nonstationarity of parameters of deepening evaporation boundary. 71
- Akhramovich A. P., Voitov I. V., Kolos V. P.** On the performance of a reactor with micro fuel. Analysis of heat removal organization in active zones. 77
- Serebryanyi G. Z., Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Durovich D. O.** Two-dimensional model for safety analysis of points of burial place of radioactive wastes 87

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

- Kuzhal N. S., Konstantinova E. E., Chizhik S. A., Nguyen Thi May Huong, Nguyen Trong Tinh.** Atomic force microscopy of biological subjects. 93
- Salem M. M., Nematov M. G., Uddin A., Podgornaya S. V., Panina L. V., Morchenko A. T.** Magnetic amorphous microwires as embedded stress sensors in functional materials 98
- Zhukouski A. I., Mogi K., Kutsen S. A.** In situ soil radioactivity measurement. 105

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Lipnitsky S. F. Algorithms of categorization of text documents and summaries in a system of informational Internet-monitoring	111
--	-----

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

Lishtvan I. I., Ljakchevich G. D., Ljakchevich A. G., Dudarchyk V. M., Kraiko V. M., Zvonnik S. A. Experimental research and efficiency of use of brown coal ash and oil shale in asphalt mixes	118
--	-----

SCIENTISTS OF BELARUS

Pyotr Aleksandrovich Vityaz (On his 80 th birthday)	125
Instructions for authors.	127

ОТ РЕДАКЦИИ

Уважаемые авторы и читатели журнала!

Спасибо, что вы с нами и что высокий научный уровень ваших публикаций делает наше издание интересным и востребованным.

Со своей стороны редакция также стремится не останавливаться на достигнутом и предпринимает все возможное, чтобы журнал, который в этом году отмечает свое 60-летие, развивался и был современным.

Вы уже знаете, что «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук» входят в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований».

В 2015 г. журнал был включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Теперь вы имеете возможность с помощью инструментов и сервисов, доступных для вас на платформе eLIBRARY. RU (раздел «Личный кабинет»), самостоятельно корректировать список своих публикаций и цитирований в РИНЦ, следить за анализом своей публикационной активности и т. д.

В этом году нами предприняты шаги по включению журнала в глобальный индекс цитирования Scopus, что расширит возможности представления исследований белорусских ученых для мировой научной общественности и повысит показатели цитируемости наших авторов. В связи с этим изменяются требования к оформлению статей, которые направляются для опубликования. С новыми «Правилами для авторов» вы можете ознакомиться либо в конце журнала, либо на сайте belnauka. by.

Надеемся на плодотворное сотрудничество!

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.762:536.75

П. А. ВИТЯЗЬ¹, В. Т. СЕНЮТЬ¹, М. Л. ХЕЙФЕЦ²

**СИНТЕЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ
ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОАЛМАЗОВ**

¹*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: vsenyut@tut.by,*

²*ОАО «НПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: mlk-z@mail.ru*

Изучено влияние модифицирующего отжига и технологических режимов спекания под давлением на структуру и фазовый состав поликристаллических сверхтвердых материалов на основе наноалмазов и алмазосодержащей смеси детонационного синтеза. Показано, что атмосфера, в которой осуществляется отжиг, влияет на содержание алмазной фазы и размер кристаллитов наноалмазов после спекания под давлением. В результате модифицирования наноалмазов кремнием в сочетании с вакуумным отжигом синтезирован композиционный нанопорошок алмаз–SiC, который служит основой для спекания алмазных наноструктурных компактов увеличенного диаметра.

Ключевые слова: наноалмазы, модифицирование, высокое давление и температура, спекание, нанопорошок алмаз–SiC.

P. A. VITYAZ¹, V. T. SENYUT¹, M. L. KHEIFETZ²

SYNTHESIS OF POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIALS FROM MODIFIED NANODIAMONDS

¹*The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: vsenyut@tut.by,*

²*Open joint stock company “NPO “Center” of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: mlk-z@mail.ru*

The influence of modifying annealing and technological modes of sintering under pressure on the structure and phase composition of polycrystalline superhard materials on the basis of nanodiamonds and diamond blend of detonation synthesis was studied. It is shown that the atmosphere in which the annealing is occurred affects the content of the diamond phase and the crystallite size of nanodiamonds after sintering under pressure. As a result of the modification of nanodiamonds by silicon in combination with vacuum annealing the composite nanopowder diamond-SiC was synthesized, which provides a basis for sintering of diamond nanostructured compacts of increased diameter.

Keywords: nanodiamonds, modification, high pressure and temperature, sintering, diamond–SiC nanopowder.

Введение. Физико-механические свойства поликристаллических алмазных материалов наряду с их фазовым составом определяются зеренной структурой. Это непосредственно вытекает из экспериментально установленной зависимости твердости и предела текучести от размера зерна, выражающейся соотношением Холла–Петча [1]. Следовательно, для получения поликристаллического материала с плотной, однородной, мелкозернистой структурой особо перспективно использование алмазных нанопорошков. В нанодисперсном поликристалле, синтезированном при соответствующих условиях, возможна реализация уникального комплекса свойств, сочетающих высокую твердость с трещиностойкостью. Поэтому актуальной становится разработка методов получения наноструктурных алмазных поликристаллических материалов на основе композиций, включающих в себя алмазные нано- и микropорошки. В качестве исходного материала перспективно применение наноалмазов детонационного синтеза с размерами кристаллитов 4–10 нм [2].

Неудовлетворительная пресуемость нанопорошков и их активная собирательная рекристаллизация при спекании в условиях высоких температур предполагают поиск новых технологических решений, которые позволят наряду с высокой плотностью поликристаллов сохранить их наноструктуру, так как традиционные подходы, разработанные при спекании алмазных микропорошков, для получения наноструктурной сверхтвердой керамики оказались малоэффективными [3, 4].

Цель работы – обоснование и выбор различных рациональных вариантов технологии создания в условиях высоких давлений и температур поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза с использованием модифицированных алмазных порошков детонационного синтеза. Для этого изучалось влияние условий отжига в восстановительной, окислительной атмосфере, вакууме и химико-термического модифицирования кремнием исходных наноалмазов и алмазосодержащей детонационной шихты, а также режимов термобарического спекания на структуру и фазовый состав поликристаллических алмазов с наноразмерной структурой.

Исходные материалы, аппаратура и методики исследований. В качестве исходных материалов использовались порошки наноалмазов детонационного синтеза, прошедшие очистку от примесей и неалмазных форм углерода, алмазосодержащая детонационная шихта и модифицированные наноалмазы. Модифицирование заключалось в отжиге наноалмазов и детонационной алмазосодержащей шихты в восстановительной, окислительной и углеводородной атмосферах. Кроме того, методом химико-термической обработки проводили модифицирование очищенных порошков наноалмазов кремнием, являющимся карбидообразующим элементом и использующимся в качестве активной добавки при получении алмазных поликристаллических материалов [5].

Термобарическую обработку наноалмазов осуществляли в аппарате высокого давления типа «наковальня с лункой» в диапазоне давлений 1,0–4,2 ГПа и температур до 1500 °С, соответствующих области термодинамической стабильности как графита, так и алмаза.

Структурные исследования исходных порошков и продуктов спекания осуществляли на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия). Дополнительно микроструктуру поликристаллических алмазов изучали на атомно-силовом микроскопе ND 206. Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометре общего назначения ADVANCE 8 фирмы Bruker в CuK_α -монохроматизированном излучении. Продукты спекания механически измельчали в планетарной мельнице АГО-2 в течение 3 мин.

Результаты и их обсуждение. *Получение поликристаллических алмазов с наноразмерной структурой из алмазосодержащей детонационной шихты и наноалмазов после отжига в защитной атмосфере.* Перед спеканием в условиях

высоких статических давлений проводили отжиг алмазосодержащей шихты и порошков очищенных наноалмазов в восстановительной (диссаммиак) и углеводородной (метан) атмосфере при 800°С в течение 2 ч. Порошки спекали при давлениях до 4,2 ГПа в течение 15–120 с.

На основе алмазосодержащей детонационной шихты после ее отжига в диссаммиаке, спекания в аппарате высокого давления и диспергирования получен порошковый материал, состоящий из мелких ограниченных алмазоподобных кристаллитов размером 100–250 нм (рис. 1).

С увеличением времени спекания от 90 до 120 с в продуктах размола преобладают в основном пластинки, имеющие форму шестигранников, идентифицируемые как графит. Результаты определения степени кристалличности и размеров кристаллитов графитовой фазы после отжига и термобарической обработки образцов представлены в табл. 1.

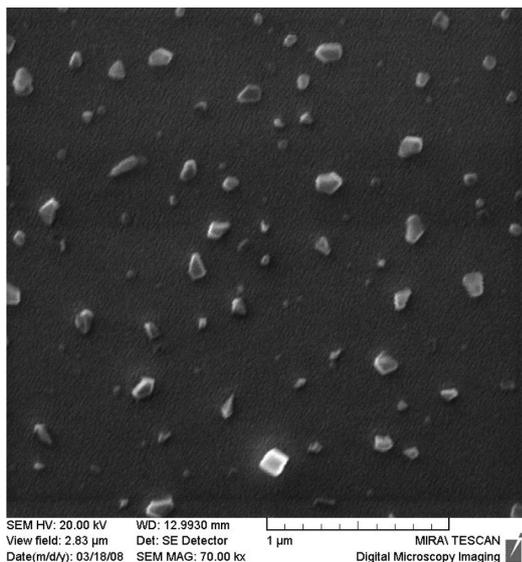


Рис. 1 Порошковый материал после спекания алмазосодержащей шихты после отжига в диссаммиаке, термобарической обработки и размола

Т а б л и ц а 1. Степень кристалличности и размер кристаллитов графита после отжига алмазосодержащей детонационной шихты в диссаммиаке и термобарического спекания

Давление (P , ГПа) и время (t , с) обработки		Размер кристаллитов $D_{\text{эф}}$, Å		Степень кристалличности графита, %
P , ГПа	t , с	Кристаллическая фаза графита	Аморфная фаза графита	
1,0	15	$55 \pm 1,1$	$26 \pm 1,1$	45,9
1,0	30	$105 \pm 1,1$	$67 \pm 1,1$	50,0
1,0	60	$107 \pm 1,1$	$78 \pm 1,1$	75,2
1,5	60	$105 \pm 1,1$	$76 \pm 1,1$	72,9
1,5	120	$109 \pm 4,0$	$56 \pm 4,0$	85

Очевидно, что размер кристаллитов и степень кристалличности графита при различных давлениях увеличиваются с ростом времени спекания. Изучали влияние атмосферы предварительного отжига и режимов спекания под давлением на структуру и фазовый состав материала на основе наноалмазов, очищенных от неалмазных форм углерода.

Рентгеноструктурные исследования показали, что после отжига наноалмазов в восстановительной атмосфере диссаммиака и последующего спекания при давлении 1,5 ГПа в течение 15–60 с также образуется графит, размеры кристаллитов и степень кристалличности которого возрастают с увеличением времени спекания.

Отжиг наноалмазов в водородной и углеводородной атмосферах способствует улучшению их спекаемости в условиях высоких давлений и позволяет увеличить температуры спекания материала без его графитизации [2, 6, 7].

Сравнительный рентгеноструктурный анализ проводили для спеченных при давлении 1,5 ГПа образцов из наноалмазов после отжига в атмосфере диссаммиака и углеводородной атмосфере, что соответствует условиям термодинамической стабильности графита. Установлено, что размер кристаллитов алмазной фазы как в первом, так и во втором случаях составляет порядка 4–8 нм, но при этом интенсивность линии (002) графита ниже у материала на основе очищенных наноалмазов после отжига в углеводородной атмосфере. Последнее свидетельствует о целесообразности введения дополнительной технологической операции отжига наноалмазов в углеводородной атмосфере для их спекания при низких давлениях.

Структура излома спека из очищенных наноалмазов после отжига в углеводородной атмосфере и спекания под давлением 1,5 ГПа и поликристаллические частицы, полученные после диспергирования спека, представлены на рис. 2, а, б.

Проведенные дополнительный отжиг наноалмазов в CO_2 -атмосфере и последующее спекание под давлением в аналогичных условиях также способствуют подавлению процессов графитизации наноалмазов и рекристаллизации графита, что проявляется в уменьшении его содержания,

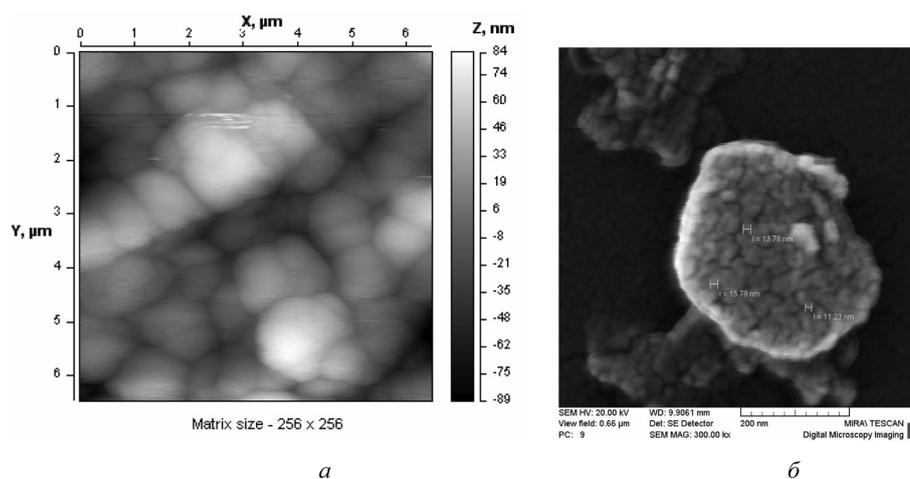


Рис. 2 Структура спека (а) и отдельная поликристаллическая частица (б) из очищенных наноалмазов после отжига в углеводородной атмосфере и спекания под давлением 1,5 ГПа (состоит из кристаллитов наноалмазов размерами 10–15 нм)

снижении размеров графитовых частиц и степени кристалличности. Повышение длительности термобарического спекания до 60 с не ведет к увеличению степени кристалличности графита.

Результаты определения степени кристалличности и размеров кристаллитов графитовой фазы после отжига в CO_2 -атмосфере и термобарической обработки очищенных наноалмазов приведены в табл. 2, а внешний вид и структура продуктов размола образцов – на рис. 3, а, б. Из проведенных структурных исследований образцов видно, что размер кристаллитов алмаза в данном случае существенно выше (30–40 нм), чем в образцах на основе наноалмазов и алмазо-содержащей детонационной шихты, спеченных после отжига в диссаммиаке и углеводородной атмосфере (5–15 нм).

Т а б л и ц а 2. Степень кристалличности и размер кристаллитов графита после отжига очищенных наноалмазов в диссаммиаке и CO_2 -атмосфере и термобарического спекания

Давление (P , ГПа) и время (t , с) обработки		Размер кристаллитов $D_{\text{эф}}$, Å		Степень кристалличности графита, %
P , ГПа	t , с	Кристаллическая фаза графита	Аморфная фаза графита	
1,5	15	$65 \pm 1,1$	$42 \pm 1,1$	51,4
1,5	30	$93 \pm 1,1$	$46 \pm 1,1$	53,5
1,5	60	$98 \pm 1,1$	$58 \pm 1,1$	61,7
2,5	30	$54 \pm 4,0$	$25 \pm 4,0$	26,0
2,5	60	$59 \pm 4,0$	$37 \pm 4,0$	35,8

Одним из основных факторов, способствующих графитизации наноалмазов при их спекании, является кислород, а термообработка наноалмазов в условиях вакуума позволяет удалить поверхностные кислородсодержащие соединения [7]. Перед термобарической обработкой порошок наноалмазов предварительно подвергали вакуумному отжигу при 900 °С для удаления адсорбированных поверхностных соединений и модифицирования поверхности наноалмазов тонким (порядка 1 нм) слоем графита. После этого проводили дополнительный отжиг порошка в атмосфере метана и термобарическую обработку при давлении 2,0 ГПа и температурах до 1500 °С при выдержке 15–30 с. В результате получен материал, состоящий из частиц размером 0,3–0,5 мкм со сформированными гранями, имеющими поликристаллическую структуру.

Результаты исследования фазового состава композитов на основе наноалмазов, подвергнутых предварительному отжигу в вакууме, углеводородной атмосфере (метане) и спеканию в области стабильности графита, показали, что основной фазой в полученных образцах является алмаз, содержание которого после размола образцов и химического травления графита составило

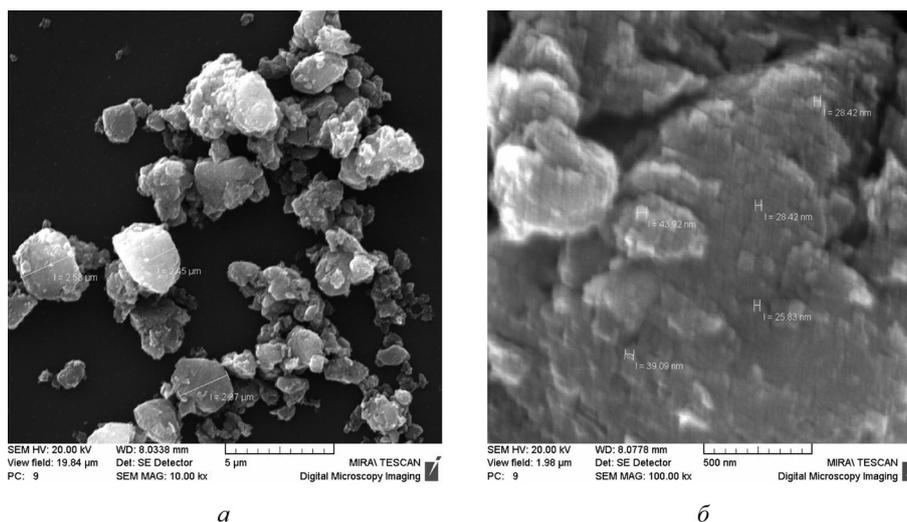


Рис. 3 Структура продуктов размола компакта на основе наноалмазов после отжига в атмосфере диссаммиака и CO_2 -атмосфере, термобарической обработки: а – общий вид; б – структура частиц (с обозначенными размерами кристаллитов алмаза)

50–60 мас. %. При этом установлено, что в диапазоне давлений спекания до 4,2 ГПа сохраняется нанофазная структура материала с размерами кристаллитов алмаза в пределах 4–15 нм.

Результаты определения степени кристалличности и размеров кристаллитов алмазной и графитовой фаз после отжига очищенных наноалмазов в вакууме и в атмосфере метана с последующей термобарической обработкой порошка приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Степень кристалличности и размер кристаллитов графита в продуктах спекания очищенных наноалмазов после их отжига в вакууме, атмосфере метана и спекания под давлением

Давление спекания P , ГПа	Состав фазы	Размер кристаллитов $D_{эф}$, Å		Степень кристалличности, %
		Кристаллическая фаза	Аморфная фаза	
1,5	Графит	90±7,0	72±7,1	–
	Алмаз	25±6,0	25±6,0	45,0
4,2	Графит	75±11,8	77±11,8	–
	Алмаз	30±6,0	30±6,0	78,3

Получение поликристаллических алмазов с наноразмерной структурой из наноалмазов после химико-термического модифицирования кремнием в восстановительной атмосфере и вакуумного отжига. Влияние комплексного модифицирования очищенных от неалмазных форм углерода наноалмазов на получение алмазных наноструктурных материалов исследовали с помощью процесса химико-термического осаждения при модифицировании порошков наноалмазов карбидообразующими элементами – кремнием, бором и титаном [2, 7]. Спекание композиционных наноалмазных порошков при давлении от 2,5 до 7,0 ГПа позволило получить алмазные поликристаллические материалы, обладающие многоуровневой иерархической структурой кристаллит – поликристаллическая частица (зерно) – плотноупакованный агрегат частиц с размером первичных кристаллитов наноалмазов 15–30 нм.

Модифицирование позволяет стабилизировать наноструктуру материала, а также препятствует графитизации алмаза и рекристаллизации графита. Дополнительный вакуумный отжиг после химико-термического модифицирования кремнием влияет на структуру материала, полученного при более низком уровне давлений, что позволяет увеличить линейный размер (диаметр) спеченных образцов от 5–10 до 20–25 мм.

Установлено, что после вакуумного отжига при 900 °С на модифицированных нанопорошках алмазов формируется покрытие из наноструктурного карбида кремния (α -SiC), которое способствует защите алмазных частиц от графитизации в условиях низких давлений [8]. Поэтому последующее спекание композиционного наноструктурного порошка алмаз – SiC проводили в аппарате высокого давления большого объема при низком уровне давлений 1,0–1,5 ГПа, что в свою очередь позволило использовать матрицы из быстрорежущей стали Р6М5 вместо твердосплавных вставок.

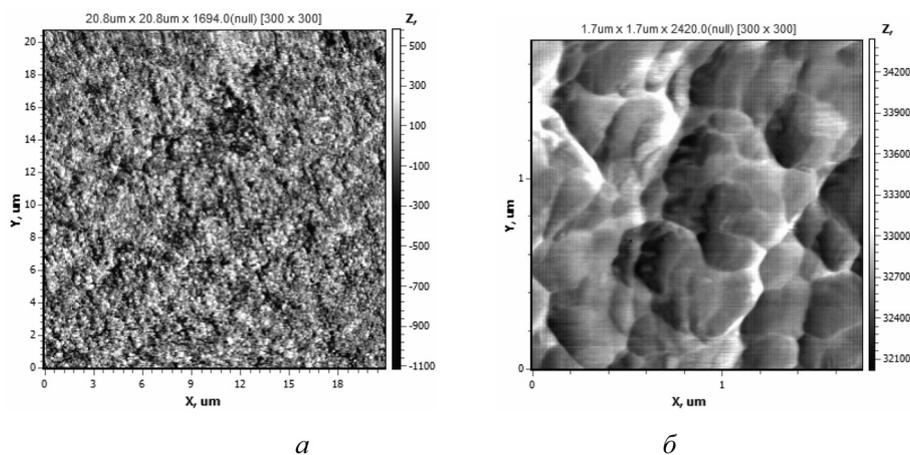


Рис. 4 Изображение излома поликристаллического алмазного материала после химико-термического модифицирования кремнием, вакуумного отжига и спекания под давлением 1,5 ГПа: а– общий вид; б– структура поликристаллических алмазных зерен с прослойками SiC

Структура поликристаллического материала из наноалмазов после отжига в восстановительной атмосфере, модифицирования кремнием, вакуумной термообработки и спекания под давлением в течение 15 с показана на рис. 4. Полученный материал представляет собой спек на основе поликристаллических зерен алмаза величиной 0,2–0,5 мкм с хорошо сформированными большеугловыми границами, состоящих из дисперсных алмазных кристаллитов размером 50–100 нм. По границам поликристаллических алмазных зерен можно наблюдать включения карбида кремния в виде прослоек толщиной до 100 нм. Включений графита по данным рентгенофазового анализа в полученном материале не обнаружено.

Таким образом, в результате модифицирования наноалмазов кремнием в сочетании с высокотемпературным вакуумным отжигом синтезирован композиционный нанопорошок алмаз – SiC, отличающийся более высокой стойкостью к графитизации, что обеспечивает снижение давления при его спекании до 1,0–1,5 ГПа и позволяет получать наноструктурные алмазные компактные образцы увеличенных размеров.

Заключение. Термообработка алмазосодержащей детонационной шихты в восстановительной атмосфере и последующее спекание в аппарате высокого давления приводят к формированию материала на основе кристаллитов размером 50–200 нм с алмазной структурой. При этом размер кристаллитов и степень кристалличности графита увеличиваются с ростом времени спекания.

Отжиг в углеводородной атмосфере очищенных наноалмазов по сравнению с отжигом в восстановительной атмосфере при одних и тех же параметрах спекания под давлением подавляет процесс графитизации наноалмазов.

Дополнительная термообработка наноалмазов в CO₂-атмосфере приводит к существенному (в 3–5 раз) росту кристаллитов алмаза после спекания под давлением по сравнению со спеканием после отжига в восстановительной и углеводородной атмосфере образцов на основе наноалмазов и алмазосодержащей детонационной шихты

Модифицирование порошка наноалмазов кремнием в сочетании с высокотемпературным отжигом в вакууме позволяет получать композиционный наноструктурный порошок алмаз – SiC, отличающийся более высокой стойкостью к графитизации, что в результате обеспечивает спекание при давлениях в 1,0–1,5 ГПа компактных образцов с линейными размерами до 25 мм. Спеченный материал состоит из поликристаллических зерен алмаза величиной 0,2–0,5 мкм, включающих в себя более дисперсные алмазные кристаллиты размером 50–100 нм.

Авторы выражают благодарность С. А. Ковалевой (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси) за проведение атомно-силовой микроскопии образцов и Т. В. Гамзелевой (Институт порошковой металлургии НАН Беларуси) за проведение сканирующей электронной микроскопии.

Исследования выполнены при поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии», задание 2.50 и гранта БРФФИ T16P-176.

Список использованной литературы

1. Андриевский, Р. А. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. II. Механические и физические свойства / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Физика металлов и металловедение. – 2000. – № 1. – С. 91–112.
2. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2011.
3. Витязь, П. А. Производство инструментов из наноструктурных сверхтвердых материалов для лезвийной и абразивной обработки / П. А. Витязь, В. Т. Сенюць, М. Л. Хейфец // Инструментальний світ.–2012. – № 3–4 (55–56). – С. 9–13.
4. Синтез алмазных наноструктурных материалов на основе наноалмазов / П. А. Витязь [др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 6. – С.87–91.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов: под ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014.
6. Синтез и спекание алмазов взрывом / В. В. Даниленко.– М.: Энергоатомиздат, 2003.
7. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2013.
8. Ковалевский, В. Н. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния / В. Н. Ковалевский [др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 5. – С. 8–14.

Поступила в редакцию 11.08.2016

УДК 541.138/546.56-121:539.2

Е. Ю. КАНИУКОВ¹, Е. К. БЕЛОНОГОВ², Д. В. ЯКИМЧУК¹, А. Л. КОЗЛОВСКИЙ^{3,4},
К. К. КАДЫРЖАНОВ³, Г. М. АРЗУМАНЯН⁵, С. Е. ДЕМЬЯНОВ¹

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНОГО ОСАДКА В ПОРАХ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь,
e-mails: ka.egor@mail.ru, dim2yakim@gmail.com, demyanov@physics.by,

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, e-mail: ekbelonogov@mail.ru,

³Институт ядерной физики Республики Казахстан, Алматы, Казахстан,
e-mails: artem88sddt@mail.ru, kadyrzhanov1945@gmail.com,

⁴Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

⁵Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия, e-mail: arzuman@jinr.ru

С использованием SiO₂-пористых шаблонов на кремниевой подложке электрохимическим методом синтезированы наноструктуры Si/SiO₂(Cu). Проведено их всестороннее изучение посредством электронной сканирующей, электронной просвечивающей, атомно-силовой микроскопии и дифракционных методов анализа. Определены морфологические особенности и латеральные размеры металлического осадка в порах. Показана тенденция к образованию агломератов меди дендритной формы, что указывает на перспективность использования таких структур при катализе и в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света.

Ключевые слова: наноструктуры, шаблонный синтез, ионно-трековая технология, медь, дендриты.

E. Yu. KANIUKOV¹, E. K. BELONOGOV², D. V. YAKIMCHUK¹, A. L. KOZLOVSKIY^{3,4},
K. K. KADYRZHANOV³, G. M. ARZUMANYAN⁵, S. E. DEMYANOV¹

FEATURES OF FORMING OF COPPER DEPOSIT IN PORES OF SILICON OXIDE

¹The Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mails: ka.egor@mail.ru, dim2yakim@gmail.com, demyanov@physics.by,

²Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: ekbelonogov@mail.ru,

³Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,

e-mails: artem88sddt@mail.ru, kadyrzhanov1945@gmail.com,

⁴L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

⁵Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia, e-mail: arzuman@jinr.ru

Using the SiO₂ porous templates on silicon substrate, Si/SiO₂(Cu) nanostructures have been synthesized by electrochemical method. A comprehensive study by means of scanning electron, transmission electron, atomic force microscopy and diffraction analysis techniques have been conducted. The morphological features and the lateral dimensions of metal nanostructures, deposited in the pores, have been defined. A tendency to form copper agglomerates with dendritic shape have been shown. This structures are promising for using as catalyst or substrates for SERS.

Keywords: nanostructures, template synthesis, ion-track technology, copper, dendrites.

Введение. В настоящее время большой интерес проявляется к низкоразмерным объектам за счет наличия у них ряда уникальных свойств [1, 2]. При этом наноструктуры уже сегодня находят свое применение в биомедицине, химии, физике, электронике и материаловедении, область которого постоянно расширяется [3, 4]. Однако широкого практического применения наноструктуры пока не получили ввиду отсутствия надежных методик массового производства. С этой точки зрения весьма перспективным является метод шаблонного синтеза, подразумевающий использование пористых матриц как основы для массового получения наноструктур с заданными

формой и размерами [5, 6]. В данном случае нанопоры служат шаблоном, в котором реализуются естественные условия для самоорганизации наноразмерных объектов.

Одним из способов создания пористых матриц является облучение быстрыми тяжелыми ионами диэлектрических слоев, в результате чего в них образуются протяженные области радиационного повреждения (латентные треки) [7, 8]. **Селективное травление латентных треков** приводит к формированию стохастически распределенных пор, форма и размеры которых задаются выбором параметров облучения и травления [9, 10]. После заполнения нанопор необходимыми материалами или их композициями формируются структуры с требуемыми характеристиками, что обуславливает широкий спектр их возможного применения [11–13].

За счет дешевизны, простоты синтеза и высоких эксплуатационных качеств перспективным материалом для получения нанообъектов является медь. В настоящее время существует большое количество методик [14, 15], позволяющих синтезировать Cu-наноструктуры с различной морфологией (кубики [16], наностержни [17], нанодиски [18], нанопроволоки [19] и др.). **К сожалению, описанные в [14–19] методы не позволяют надежно получать Cu-микро- и наноструктуры с заданными параметрами, что является основным сдерживающим фактором для практического применения.** Для решения данной проблемы в настоящей работе предлагается методика шаблонного синтеза медных наноструктур с заданными параметрами и характеризуются их структурные и морфологические особенности.

Методика эксперимента. В качестве подложек для создания структур использовались выращенные по методу Чохральского промышленно выпускаемые пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-4.5 (электронный тип проводимости, легирование фосфором с концентрацией донорной примеси $N_D = 8,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, сопротивление $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$) ориентацией (100). Слой SiO_2 на поверхности пластин *n*-Si создавался путем термического (пирогенного) окисления, включающего в себя последовательность операций: сухое окисление, отжиг в атмосфере хлорсодержащих компонентов (HCl), окисление в смеси газов ($\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{HCl}$), отжиг в атмосфере азота. Такой способ получения SiO_2 позволил создать его слой толщиной $(1,0 \pm 0,1) \text{ мкм}$, имеющий аморфную структуру с минимальными механическими напряжениями на границе раздела с полупроводником.

Создание латентных ионных треков в слое SiO_2 при облучении ионами высоких энергий проводилось в Центре им. Гельмгольца по облучению материалов тяжелыми ионами (GSI, Дармштадт, Германия). Слой оксида в структуре Si/SiO₂ подвергался воздействию ионов $^{197}\text{Au}^{26+}$ и $^{131}\text{Xe}^{17+}$ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-2}$ с созданием латентных треков. Разброс энергий облучающего пучка ионов не превышал 1 % по площади мишени, а отклонение от задаваемого флюенса облучения было в пределах 5 %.

Последующая обработка латентных треков в плавиковой кислоте (HF) концентрацией 1,35 мас. % при температуре $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ приводила к формированию в слое SiO_2 пор в виде усеченных конусов с диаметрами 250 нм на поверхности диэлектрика, с диаметром 150 нм – на границе Si/SiO₂ при толщине оксида после травления 400 нм.

Поры заполняли медью методом электрохимического осаждения. Рабочим электродом при этом служила подложка *n*-кремния. Для получения равномерного распределения потенциала по ее поверхности с тыльной стороны наносилась In–Ga-эвтектика, которая защищалась от воздействия электролита при помощи химически стойкого лака. Подготовленные таким образом образцы помещались в стандартную трехэлектродную стеклянную ячейку с разделенными электродными пространствами, где происходило осаждение металла.

Для электрохимического осаждения Cu в нанопоры применялся электролит на основе борной кислоты (0,5 моль/л H_3BO_3) и раствора, содержащего сульфат меди (0,01 моль/л CuSO_4) и используемого в качестве источника катионов. Применение таких электролитов способствовало максимальной скорости процесса, а потенциал осаждения минус 1 В приводил к выходу меди по току $(97 \pm 3) \%$ [20]. При осаждении в течение 22 с величина заряда составила $(21 \pm 2) \text{ мкКл/см}^2$, что по расчетам должно соответствовать полному заполнению пор. Погрешность измерений потенциалов при осаждении составляла не более 1 мВ, токов – 25 нА.

Микроструктуру и морфологию поверхности созданных наноструктур Si/SiO₂(Cu) анализировали с применением таких высокоразрешающих методов, как сканирующая электронная

(СЭМ), просвечивающая электронная (ПЭМ), атомно-силовая (АСМ) микроскопии и др. Структуру исследовали методом СЭМ на микроскопе LEO-1455VP при нормальной ориентации пучка электронов и направлении его под углом к поверхности, при этом достигалось 60 000-кратное увеличение с разрешающей способностью порядка 20 нм. С целью определения статистики распределения выростов (углублений) Cu в порах исследование проводили с помощью АСМ на микроскопе Solver P47-PRO с зондами из нитрида кремния, имеющими радиус закругления 10 нм. Благодаря этому достигалось разрешение порядка 10 нм в плоскости образца и порядка 1 нм перпендикулярно ей.

Для детального исследования текстуры и морфологии металлической фазы применяли методы углеродных реплик с «извлечением» и «оттением», заключающиеся в снятии с поверхности исследуемого объекта отпечатка в виде тонкой пленки углерода, коллодия и других материалов, повторяющих рельеф поверхности. Реплики анализировали методами СЭМ на микроскопе 120АК и ПЭМ на микроскопе ПСЭМ-200.

Кристаллическую структуру медного осадка в порах SiO₂ исследовали с помощью электронографии на электронографе ЭГ-100М. В отношении структур, при предварительном изучении которых установлено, что частицы металла выступают над поверхностью SiO₂, использовали метод дифракции быстрых электронов «на отражение». При неполном заполнении пор металлом применяли метод дифракции быстрых электронов «на просвет». Погрешности, связанные с измерениями радиуса дифракционного кольца и aberrациями в линзах, составляли менее 3 %.

Результаты и их обсуждение. Оценку качества поверхности систем Si/SiO₂(Cu) после электрохимического осаждения меди в поры проводили методом СЭМ, характерные изображения которой представлены на рис. 1, а. Видно, что медь осаждается селективно в поры, однако степень заполнения является различной. Одни поры лишь частично заполнены металлом, в других медь вообще отсутствует, хотя их диаметры на поверхности SiO₂ одинаковы. Также на рисунке присутствуют поры, заполненные металлом, с образованием выростов над поверхностью диэлектрика. Для анализа топологии медного осадка над поверхностью SiO₂ проведено исследование методом АСМ (рис. 1, б). Градиентное изображение поверхности SiO₂ отражает изменение ее рельефа и свидетельствует о преимущественном формировании выростов Cu куполообразной формы высотой 70–120 нм (рис. 1, в).

Определение кристаллической структуры медного осадка, проведенное методом рентгенофазового анализа, показало, что кристаллиты меди имеют гранцентрированную кубическую решетку с параметром элементарной ячейки $a = 0,362$ нм (рис. 2). Наличие наиболее характерных рефлексов (220), (200) и (111) свидетельствует об отсутствии текстурирования, что хорошо согласуется с литературными данными [21, 22]. На рентгенограмме отсутствуют пики, характерные для SiO₂, который может образовываться при осаждении.

Анализ морфологии медного осадка, как и определение формы и размеров отдельных кластеров, проводили при ПЭМ-исследовании реплик с «оттением», с «извлечением», а также с изучением картин микродифракции выделенного участка с фрагментом извлечения (рис. 3).

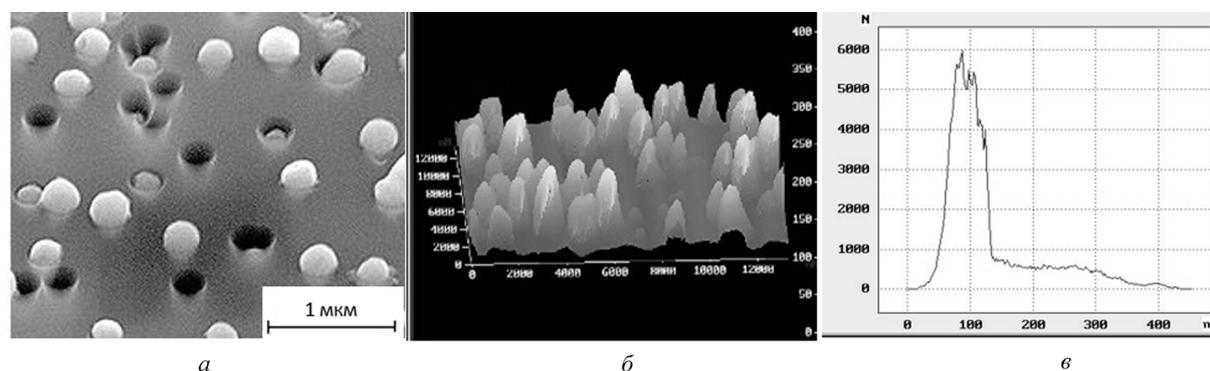


Рис. 1. Топология поверхности Si/SiO₂(Cu): СЭМ-изображение (а); поверхность, сканированная методом АСМ – изометрическое изображение (б) и гистограмма распределения высот выростов меди над поверхностью SiO₂ в пределах сканируемого участка (в)

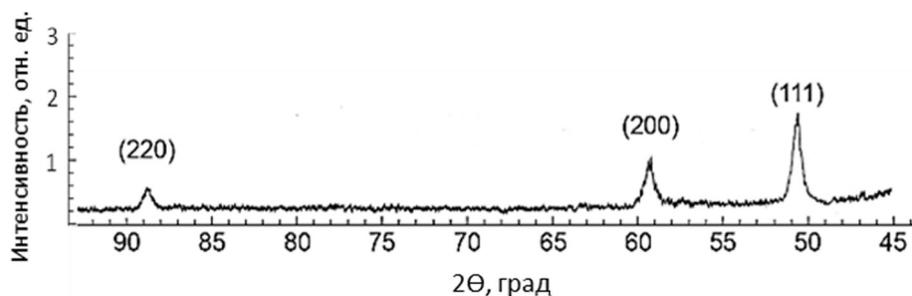


Рис. 2. Рентгенограмма меди, электрохимически осажденной в поры шаблона в слое SiO_2 (CuK_α -излучение, рефлексы кремниевой подложки не указаны)

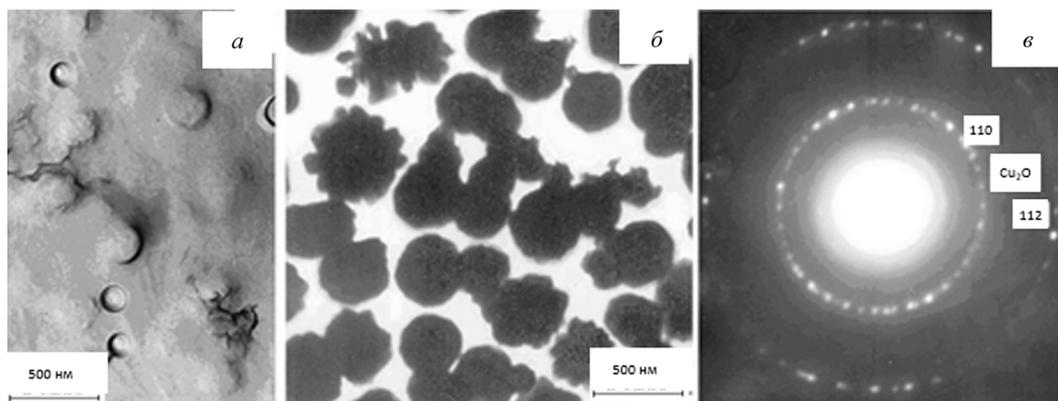


Рис. 3. ПЭМ-изображения структурных элементов системы $\text{Si/SiO}_2(\text{Cu})$: реплика с «оттенением» (а); реплика с «извлечением» (б); картина дифракции от выделенного участка с фрагментами извлечения (в)

Реплика с «оттенением» указывает на высокую дисперсность элементов, формирующих структуру металлического кластера (рис. 3, а). Реплика с «извлечением» показывает, что металл осаждается в поры в виде контактирующих между собой металлических кластеров. При этом, находясь в поре, металлический осадок принимает ее форму, выходя за пределы поры, кластеры меди разрастаются с тенденцией образования агломератов дендритной формы (рис. 3, б).

Электроннограмма является подтверждением поликристаллической структуры исследуемых извлечений (рис. 3, в). Анализ дифракционных максимумов электроннограммы позволяет выявить содержание в части агломератов меди кристаллитов оксида меди (Cu_2O), причем набор дифракционных максимумов указывает на наличие текстуры. Прецизионный расчет электроннограммы показал, что Cu_2O имеет объемно-центрированную кубическую кристаллическую решетку с параметром $a = 0,426$ нм. Присутствие отражений (110) и (112) указывает на формирование аксиальной текстуры типа (111) для кристаллитов Cu_2O , т. е. кристаллографическое направление [111] перпендикулярно плоскости поверхности SiO_2 .

Так как ранее при проведении рентгенографических исследований (рис. 2) определено, что металлические включения не содержат Cu_2O (исследования проводились непосредственно после осаждения), то логично предположить, что образование Cu_2O происходит на поверхности кластеров при окислении меди на воздухе. Причем наличие у оксида меди (I) аксиальной текстуры типа (111) свидетельствует о постепенном проникновении кислорода от находящегося в непосредственном контакте с воздухом металлического осадка к границе Si/SiO_2 . Расчет размеров кристаллитов меди из радиального уширения дифракционного кольца показал, что средний размер отдельного кластера, входящего в состав агломерата меди, составляет 30–50 нм.

Заключение. С использованием метода шаблонного синтеза получены наноструктуры $\text{Si/SiO}_2(\text{Cu})$. На основании изучения морфологии структуры методами СЭМ, ПЭМ, АСМ и дифракционных методов анализа установлено, что при электрохимическом осаждении происходит

селективное заполнение пор диоксида кремния медью с образованием кристаллитов с гранецентрированной кубической структурой и параметром элементарной ячейки $a = 0,362$ нм без проявления какой-либо преимущественной кристаллографической ориентации. Кристаллиты находятся в непосредственном контакте друг с другом и имеют характеристические размеры в пределах 30–50 нм. При этом металлический осадок, находясь внутри поры, принимает ее форму, выходя за пределы ограниченного объема, кластеры меди разрастаются с тенденцией образования агломератов дендритной формы. Необходимо отметить, что склонность к дендритообразованию указывает на возможность использования данных структур при катализе или в качестве усиливающих сигнал поверхностей в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света, где разветвленность структуры (большая удельная поверхность) является критическим параметром.

Данное исследование выполнено при поддержке проекта БРФФИ № Ф15СО-016.

Список использованной литературы

1. *Dave, S. R.* Monodisperse magnetic nanoparticles for biodetection, imaging, and drug delivery: a versatile and evolving technology / S. R. Dave, X. Gao // Wiley Interdiscip. Rev. Nanomedicine Nanobiotechnology. – 2009. – Vol. 1, N 6. – P. 583–609.
2. Nanotechnology, Big things from a Tiny World: a Review / D. Bhattacharyya D. [et al.] // Int. J. of u- and e- Serv., Sci. and Technol. – 2009. – Vol. 2, N 3. – P. 29–37.
3. *Hsiao, J. C.* Making big money from small technology / J. C. Hsiao, K. Fong // Nature. – 2004. – Vol. 428, N 6979. – P. 218–220.
4. *Lu, W.* Nanoelectronics from the bottom up / W. Lu, C. M. Lieber // Nat. Mater. – 2007. V. 6, № 11. – P. 841–850.
5. *Martin, C. R.* Nanomaterials: a membrane-based synthetic approach / C. R. Martin // Science. – 1994. – Vol. 266, N 5193. – P. 1961–1966.
6. *Kawamura, G.* Hard template synthesis of metal nanowires / G. Kawamura, H. Muto, A. Matsuda // Front. Chem. – 2014. – Vol. 17. – P. 1–4.
7. *Fink, D.* Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Fundamentals and Applications / D. Fink. – Berlin–Heidelberg: Springer, 2004. – 406 p.
8. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide / S. E. Demyanov [et al.] // J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. – 2014. – Vol. 8, N 4. – P. 805–813.
9. Nanostructures of Si/SiO₂/metal systems with tracks of fast heavy ions / S. E. Demyanov // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2008. – Vol. 72, N 9. – P. 1193–1195.
10. Nanoporous SiO₂/Si thin layers produced by ion track etching: Dependence on the ion energy and criterion for etchability / A. Dallanora // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 104, N 2. – P. 024307-1–24307-8.
11. Electrochemical deposition of Ni and Cu onto monocrystalline n-Si(100) wafers and into nanopores in Si/SiO₂ template / Y. A. Ivanova [et al.] // J. Mater. Sci. 2007. – Vol. 42, N 22. – P. 9163–9169.
12. Silver nanostructures formation in porous Si/SiO₂ matrix / V. Sivakov [et. al.] // J. Cryst. Growth. – 2014. – Vol. 400. – P. 21–26.
13. Positive magnetoresistance in Si/SiO₂ (Cu/Ni) structures / S. Demyanov // Sensors Actuators A: Phys. – 2014. – Vol. 216. – P. 64–68.
14. *Lisiecki, I.* Synthesis of copper metallic clusters using reverse micelles as microreactors / I. Lisiecki, M. P. Pileni // J. Am. Chem. Soc. – 1993. – Vol. 115, N 10. – P. 3887–3896.
15. Original Anisotropic Growth Mode of Copper Nanorods by Vapor Phase Deposition / H. Prunier [et al.] // Cryst. Growth Des. – 2014. – Vol. 14, N 12. – P. 6350–6356.
16. Is the Anion the Major Parameter in the Shape Control of Nanocrystals? / A. Filankembo [et al.] // J. Phys. Chem. B. – 2003. – Vol. 107, N 30. – P. 7492–7500.
17. Structural investigations of copper nanorods by high-resolution TEM / I. Lisiecki [et al.] // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61, N 7. – P. 4968–4974.
18. Characterization and Growth Process of Copper Nanodisks / C. Salzemann [et al.] // Adv. Funct. Mater. – 2005. – Vol. 15, N 8. – P. 1277–1284.
19. Roussel, J. M. Stability of a Screw Dislocation in a (011) Copper Nanowire / J. M. Roussel, M. Gailhanou // Phys. Rev. Lett. – 2015. – Vol. 115, N 7. – P. 075503–075508.
20. *Hoffmann, P. M.* Growth Kinetics for Copper Deposition on Si(100) from Pyrophosphate Solution / P. M. Hoffmann // J. Electrochem. Soc. – 2000. – Vol. 147, N 7. – P. 2576–2580.
21. Copper nanowires electrodeposited in etched single-ion track templates / I. Engulescu [et al.] // Appl. Phys. A. – 2003. – Vol. 77, N 6. – P. 751–755.
22. Electrochemical copper deposition in etched ion track membranes experimental results and a qualitative kinetic model / I. U. Schuchert [et al.] // J. Electrochem. Soc. – 2003. – Vol. 150, N 4. – P. C189–C194.

Поступила в редакцию 03.01.2016

УДК 537.638.212:538.955:537.9

М. В. ЯРМОЛИЧ, Н. А. КАЛАНДА

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ В НАНОРАЗМЕРНЫХ ЗЕРНАХ $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь,
e-mail: jarmolich@physics.by, kalanda@physics.by*

Однофазные наноразмерные порошки $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ синтезированы цитрат-гель-методом при pH = 4, 6, 9 с различной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} ($P = 65\%$ для pH = 4, $P = 51\%$ для pH = 6 и $P = 20\%$ для pH = 9). Интервал значений размера зерен для всех порошков составляет 200–600 нм, причем наибольшее количество зерен, имеющих размер примерно 550 нм, характерно для порошков с pH = 9, а примерно 230 нм для pH = 4. Установлено уменьшение величины P с ростом pH, что указывает на увеличение числа кластеров $-\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{2+}-$ с антипараллельным распределением спинов железа, приводящее к снижению суммарного магнитного момента и значений температур Кюри. В порошках, синтезированных при pH = 4, количество низкоразмерных зерен значительно больше, чем в порошках при pH = 6, 9, что обусловило их большую намагниченность при $T = 4,2-19$ К.

Ключевые слова: ферромолибдат стронция, цитрат-гель-метод, сверхструктурное упорядочение, намагниченность, суперпарамагнитное состояние.

M. V. YARMOLICH, N. A. KALANDA

LOW-TEMPERATURE MAGNETIC ORDERING IN $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ NANO-SIZED GRAINS

*The Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: jarmolich@physics.by, kalanda@physics.by*

Single-phase nanosized $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ powders were synthesized by the citrate-gel-method at pH = 4, 6, 9, with various degrees of superstructural ordering of Fe^{3+} and Mo^{5+} ($P = 65\%$ for pH = 4, $P = 51\%$ for pH = 6 and $P = 20\%$ for pH = 9). Grain size of the powders are in the range of 200–600 nm. With that, the largest number of grains having a size of 550 nm was characteristic for powders with pH = 9 and 230 nm for pH = 4. It was established that the value of P decreases with increasing pH, which indicates an increase in the number of $-\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{2+}-$ clusters with antiparallel distribution of iron spins which leads to a decrease in the total magnetic moment and the Curie temperature. In powders with pH = 4 the number of low dimensional grain is significantly larger than in powders with pH = 6 and 9, which led to their large magnetization value at $T = 4,2-19$ K.

Keywords: strontium ferromolybdate, citrate-gel-method, superstructural ordering, magnetization, superparamagnetic state.

Введение. В полуметаллических ферримагнетиках $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ наблюдается многообразие магнитных состояний и физических свойств, обусловленное взаимосвязью орбитальных, зарядовых, спиновых и решеточных степеней свободы [1]. Ферримагнитная структура формируется упорядочением спинов электронов железа и молибдена под углом 120° . При отсутствии точечных дефектов идеальная структура имеет длинноцепочечное сверхструктурное упорядочение (P) катионов $-\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Mo}^{5+}-$ со значениями намагниченности насыщения ($M_{\text{нас}}$), приближающимися к теоретическим величинам $4,0\mu_B/\text{ф. е.}$ Уменьшение $M_{\text{нас}}$ обусловлено наличием антиструктурных дефектов типа Fe_{Mo} и Mo_{Fe} и антифазных границ в структуре $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ [2]. При этом между одновалентными катионами железа могут возникнуть антиферромагнитное упорядочение в цепочках $\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}$ и парамагнитное упорядочение в цепочках $\text{Mo}-\text{O}-\text{Mo}$ [3].

При рассмотрении магнитных свойств наноразмерных зерен двойного перовскита установлены их корреляция с размером, формой, а также влияние на них взаимодействия зерен с окружающими частицами. Данное утверждение обусловлено тем, что при уменьшении размера частиц до наноразмерного масштаба возрастает количество атомов, находящихся на поверхности зерен. В результате из-за различного влияния внутрикристаллического поля на поверхностные

и объемные атомы наблюдается увеличение роли поверхностной магнитной анизотропии, приводящей к росту коэрцитивной силы и как результат – к увеличению ширины петли гистерезиса. Наноразмерность зерен при их объеме меньше некоторого критического значения ($V < V_{кр}$) часто приводит к переходу от многодоменного к однодоменному состоянию и появлению в них суперпарамагнетизма [4].

Кроме того, размерность зерен $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ влияет и на значения температуры Кюри (T_K), которые, согласно литературным источникам, могут существенно отличаться [5]. Таким образом, магнитные свойства наночастиц обусловлены их взаимодействием с окружающими частицами, их размерами, формой, морфологией, структурными дефектами, что позволяет регулированием режимов синтеза воздействовать на их магнитное состояние.

Методика эксперимента. Для синтеза цитрат-гель-методом наноразмерного соединения $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ использовались исходные реагенты: $Sr(NO_3)_2$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ и моногидрат лимонной кислоты $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ марки ОСЧ. Для получения коллоидного золя производили смешивание водных растворов нитратов стронция $Sr(NO_3)_2$ и железа $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ в мольном отношении (2Sr):(Fe). Лимонная кислота добавлена к раствору в мольном отношении: 6,5 (лимонная кислота):(Fe). После этого готовый водный раствор с $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ смешивали с общим раствором с нитратами стронция и железа в мольном отношении (Mo):(Fe). Затем при постоянном перемешивании с помощью магнитной мешалки IKA C-MAG HS 7 добавляли этилендиамин до тех пор, пока значения pH раствора не становились равными 4, 6, 9. После этого производили упаривание вещества при 352 К. Полученное вещество затем помещалось в печь при 370 К. Нагрев консистенции осуществляли со скоростью 0,4 К/мин до 470 К с последующей выдержкой при этой температуре в течение 18 ч. Затем вещество охлаждали в режиме выключенной термоустановки. Полученную твердую пену размельчали и отжигали при 770 К и $p(O_2) = 0,21 \cdot 10^5$ Па в течение 10 ч. Серии отжигаемых порошков обозначены в зависимости от значения pH исходных растворов: pH = 4 (SFMO-4), pH = 6 (SFMO-6) и pH = 9 (SFMO-9). Отжиг серий SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 осуществляли в восстановительной среде смеси газов 5% H_2/Ar в несколько этапов при окончательном отжиге при $T = 1220$ К в течение 4 ч. Параметр P катионов железа и молибдена рассчитывали с помощью уравнения $P = (2 \text{ SOF} - 1) 100\%$, где SOF – фактор заселенности кристаллографических позиций с использованием программного обеспечения PowderCell и FullProf на основании данных рентгеновской дифракции, полученных на установке ДРОН-3 в CuK_α -излучении при комнатной температуре со скоростью съемки 60 град/ч.

Распределение частиц по размерам получено методом динамического рассеяния света (ДРС) при использовании прибора Zetasizer Nanoparticles analyzer (Malvern Nano ZS90, UK).

Магнитные свойства образцов изучали на универсальной установке фирмы Cryogenic Limited в температурном диапазоне 4,2–300 К при постоянном магнитном поле до 1 Тл. Температурные зависимости удельной намагниченности $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ измеряли в различных режимах: предварительное охлаждение от 300 до 4,2 К в магнитном поле (FC – field cooling) или без него (ZFC – zero-field cooling) с последующим нагревом до 300 К в различных магнитных полях. Температурные зависимости удельной намагниченности $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ измеряли также пондеромоторным методом в интервале $T = 800–77$ К в магнитном поле ($B = 0,86$ Тл).

Результаты и их обсуждение. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, образцы серий SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 являются однофазными состава $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} ($P = 65\%$ для SFMO-4, $P = 51\%$ для SFMO-6 и $P = 20\%$ для SFMO-9) и характеризуются тетрагональной симметрией элементарной ячейки I4/m (таблица). Дополнительный отжиг SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 в восстановительной среде потока смеси газов 5% H_2/Ar при $T = 1220$ К в течение 4 ч способствует увеличению значений P . Данная температура выбрана так, что при ней не наблюдалось увеличения размера зерен и в то же время происходило изменение параметра P (таблица). На основании полученных данных ДРС установлено, что интервал значений размера зерен для всех порошков составляет 200–600 нм. Установлено, что наибольшее количество зерен, имеющих размер примерно 550 нм, характерно для порошков с pH = 9, а количество зерен, имеющих размер примерно 230 нм, характерно для порошков с pH = 4.

Параметры кристаллической решетки, степени сверхструктурного упорядочения порошков SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9, отожженных при 1220 К в течение 4 ч в непрерывном потоке газовой смеси 5% H_2/Ar

pH	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$	$P, \%$
4	5,5676	7,8911	244,6097	65
6	5,5709	7,9035	245,2845	51
9	5,5774	7,9087	246,0190	20

В связи с наличием антиструктурных дефектов происходит перераспределение электронной плотности с появлением катионов Fe^{2+} и Mo^{6+} . Поскольку в обменных взаимодействиях диамагнитный катион $Mo^{6+}(4d^0)$ не участвует, а между ионами $Fe^{2+}(3d^6)$, имеющими меньший магнитный момент, чем ионы $Fe^{3+}(3d^5)$, возможны только отрицательные обменные взаимодействия, то имеет место реализация сверхобменного взаимодействия по механизму Крамерса–Андерсона [6]. В результате в структуре $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ происходит формирование антипараллельного упорядочения спинов и антиферромагнитных кластеров $-Fe^{2+}-O^{2-}-Fe^{2+}-$.

На основании проведенных исследований установлено уменьшение величины P с ростом pH , что свидетельствует об увеличении числа обменных кластеров $-Fe^{2+}-O^{2-}-Fe^{2+}-$ с антипараллельным распределением спинов катионов железа, приводящим к снижению суммарного магнитного момента, о чем свидетельствуют данные температурных зависимостей намагниченности $M(T)$ порошков SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 (рис. 1).

На основании изучения зависимостей $M(T)$, измеренных в магнитном поле величиной $B = 0,86 \text{ Тл}$, определено, что образцы SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 с различным сверхструктурным упорядочением катионов Fe/Mo являются ферримагнетиками с T_K примерно 424, 413, 406 К соответственно. Значения T_K определяли согласно данным зависимостей $(M/M_0)^2 = f(T)$ (вставка на рис. 1).

Известно, что на магнитное состояние наночастиц влияет их взаимодействие [3, 6]. Наличие агломератов и слипшихся частиц может способствовать формированию магнитного упорядочения дальнего порядка. Тем не менее намагниченность насыщения порошка SFMO-9, для которого характерна агломерация зерен, имеет наименьшие величины. Резкое уменьшение $M_{\text{нас}}$ отражает наличие большего количества ионов Mo^{6+} и Fe^{2+} в SFMO-9 по сравнению с SFMO-4 и SFMO-6, способствующее формированию антиферромагнитных кластеров, блокирующих магнитное упорядочение дальнего порядка.

Низкоразмерные зерна сферической формы находятся в порошках SFMO-9 и SFMO-6 и в большем количестве в SFMO-4, где обменные силы обеспечивают однородную намагниченность и могут способствовать реализации суперпарамагнитного состояния в двойном перовските

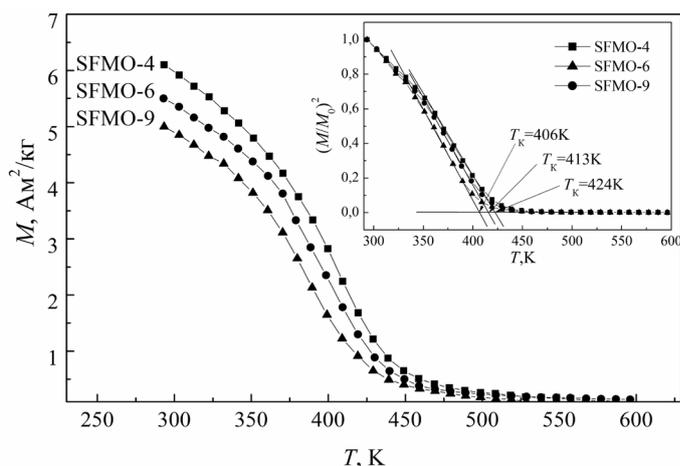


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности порошков SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9, измеренные в магнитном поле с магнитной индукцией $B = 0,86 \text{ Тл}$ (вставка: температурные зависимости квадрата нормированной намагниченности)

$Sr_2FeMoO_{6-\delta}$, на что указывают температурные зависимости, измеренные в ZFC-режиме, в низкотемпературной области при $T = 4,2-19 \text{ К}$ (рис. 2). При включении магнитного поля с индукцией $B = 0,01 \text{ Тл}$ при $T = 4,2 \text{ К}$ после охлаждения порошков с последующим их нагревом до $T = 19 \text{ К}$ на указанных выше зависимостях происходит резкое увеличение намагниченности образцов SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 до критической температуры T_C вследствие перехода низкоразмерных зерен с $V < V_{\text{кр}}$ в суперпарамагнитное состояние. В этом случае T_B – температура блокировки, при которой замораживаются магнитные моменты у частиц максимального размера, T_C – температура, при которой заморажива-

ются магнитные моменты у частиц минимального размера.

При температурах $4,2 < T < T_C$ К в случае ZFC-измерений при $\Delta E/k_B T \geq 1$ наблюдается метастабильное суперпарамагнитное состояние частиц со временем релаксации $\tau = \tau_0 \exp(\Delta E/k_B T)$, где k_B – постоянная Больцмана, T – температура, τ_0 – предэкспоненциальный множитель. При $T = T_C$ система переходит в стабильное суперпарамагнитное состояние и метастабильное ферримагнитное состояние, заблокированное энергией магнитной анизотропии. Из-за неоднородности распределения частиц по дефектам, размерам, формам и соответственно по величинам полей магнитной анизотропии изменение магнитного состояния в порошках SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 происходит в интервале $\Delta T = T_C - T_B$ (рис. 2). Отмечено, что с ростом индукции магнитного поля T_B смещается в сторону низких температур, что указывает на определяющую роль внешнего магнитного поля на процесс формирования магнитного состояния в порошках SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9. В этом случае интервал $\Delta T = T_C - T_B$ сужается, причем величина T_B в большей степени зависит от индукции магнитного поля, чем T_C , что обусловлено асимметрией распределения частиц по размерам. Наименьшие величины $\Delta T = 120$ К наблюдали для порошка SFMO-4, что указывает на большую микроструктурную и магнитную однородность, а также меньшую величину магнитной анизотропии.

Вывод. На основании полученных результатов установлено:

образцы серий SFMO-4, SFMO-6 и SFMO-9 являются однофазными состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} ($P = 65\%$ для SFMO-4, $P = 51\%$ для SFMO-6 и $P = 20\%$ для SFMO-9) и интервал значений размера зерен для всех порошков составляет 200–600 нм. Наибольшее количество зерен, имеющих размер примерно 550 нм, характерно для порошков с рН = 9, а количество зерен, имеющих размер примерно 230 нм, характерно для порошков с рН = 4;

величина P уменьшается с ростом рН, что указывает на появление кластеров $-\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{2+}-$ с антипараллельным упорядочением спинов железа. Последнее приводит к снижению суммарного магнитного момента и значений температур Кюри;

согласно данным температурных зависимостей намагниченностей, выполненных в ZFC- и FC-режимах в порошках ферримагнетика $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, полученных цитрат-гель-методом при различных рН, установлено метастабильное суперпарамагнитное состояние при $T < 19$ К в низкоразмерных зернах с $V < V_{кр}$. При этом в порошках SFMO-4 количество низкоразмерных зерен значительно больше, чем в порошках SFMO-6 и SFMO-9, что обусловило их большую намагниченность при $T = 4,2-19$ К в полях до 0,05 Тл;

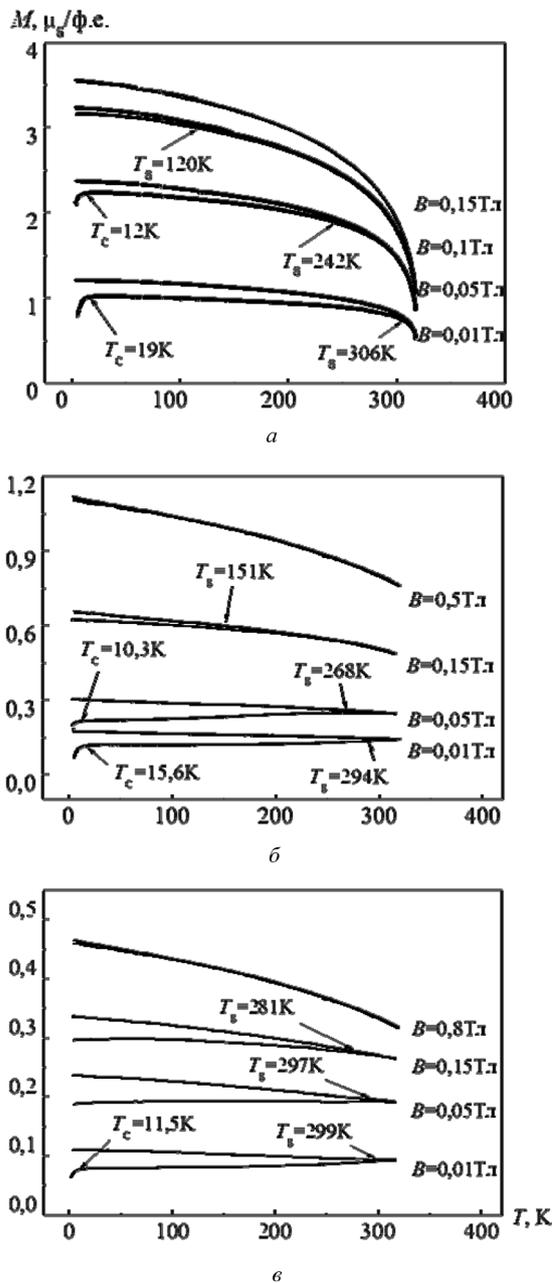


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности порошков SFMO-4 (а), SFMO-6 (б) и SFMO-9 (в), измеренные при различных значениях магнитного поля в ZFC- и FC-режимах

наименьшие величины $\Delta T = T_C - T_B = 120$ К наблюдали для порошка SFMO-4, что указывает на большую микроструктурную и магнитную однородность, а также меньшую величину магнитной анизотропии в нем.

Список использованной литературы

1. Influence of preparation method on SrMoO₄ impurity content and magnetotransport properties of double perovskite Sr₂FeMoO₆ polycrystals / C. L. Yuan [et al.] // Sol. Stat. Comm. – 2004. – N 129(9). – P. 551–554.
2. Interplay between phase formation mechanisms and magnetism in the Sr₂FeMoO₆ metal-oxide compound / N. Kalanda [et al.] // Cryst. Res. Technol. – 2011. – Vol. 6. – N 5. – P. 463–469.
3. Inhomogeneous magnetic state in the Sr₂FeMoO_{6-δ} double perovskite / N. A. Kalanda [et al.] // Science of Advanced Materials. – 2015. – Vol. 7. – P. 446–454.
4. Magnetic properties of fine SFMO particles: Superparamagnetism / T. Suominen [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – Vol. 309. – P. 278–284.
5. Absence of tunnel magnetoresistance in Sr₂FeMoO₆-based magnetic tunnel junctions / T. Fix [et al.] // Chem. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 434. – P. 276–279.
6. Coey, J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials/ J. M. D. Coe. – Cambridge University Press: New York, – 2010. – P. 231–263.

Поступила в редакцию 04.10.2015

УДК 533.08:543.712.08

В. И. ЗУБКО, Д. В. ЗУБКО, Г. Н. СИЦКО

**ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: Zubko@bsu.by*

Разработан импедансный метод контроля и диагностики качества электроизоляционных материалов, используемых в электротехнической промышленности. Созданы электроемкостные измерительные преобразователи, разработана методика, получены формулы, проведены контроль и диагностика диэлектрических показателей электроизоляционных материалов, таких как относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, соответствующих нормам, регламентированным стандартам.

Ключевые слова: электроемкостной преобразователь, импедансный метод, электроизоляционный материал.

V. I. ZUBKO, D. V. ZUBKO, G. N. SITSKO

**IMPEDANCE METHOD OF MONITORING AND DIAGNOSTICS OF QUALITY OF INSULATION MATERIALS,
USED IN ELECTROTECHNICAL INDUSTRY**

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: Zubko@bsu.by

A method of impedance control and diagnostics of quality of insulating materials, used in electrotechnical industry, is proposed. Electric-capacitive transmitters are created. Formulas to make monitoring and diagnostics of dielectric parameters of insulating materials, such as relative permittivity, dielectric loss tangent, and relevant standards are developed.

Keywords: electric-capacity converter, impedance method, insulating material.

Введение. Разработка импедансного метода (ИМ) контроля и диагностики качества электроизоляционных материалов (ЭМ), используемых в электротехнической промышленности, обусловлена необходимостью их тестирования на соответствие комплекса таких диэлектрических показателей, как относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ'), объемное удельное электрическое сопротивление (ρ), тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$), нормам, регламентированным стандартами. Реализация ИМ позволила эффективно использовать диэлектрические показатели для оперативного контроля и диагностики качества ЭМ. Необходимость проведения испытаний ЭМ и жидких диэлектриков на диэлектрические показатели подтверждают ГОСТ 22372–77; 20437–89; 17478–95; 2718–74; 21427–83.

В Республике Беларусь в настоящее время цифровые приборы для контроля и диагностики диэлектрических свойств ЭМ не производятся. Применяемые приборы импортного производства не включены в Государственный реестр приборов Республики Беларусь и не аттестованы в БелГИМе, что вызывает большие трудности с их поверкой.

Цель данной статьи – разработка ИМ, контроль и диагностика качества ЭМ на соответствие их диэлектрических показателей нормам, регламентированным стандартами.

Эквивалентные схемы конденсатора, замещенного диэлектриком с потерями, получение формул, методика определения комплекса диэлектрических показателей электроизоляционных материалов. В идеальном конденсаторе энергия не рассеивается и угол сдвига фаз между током и напряжением (φ) составляет 90° (рис. 1, а). При замещении конденсатора диэлектриком с потерями, когда через него протекает переменный ток, угол φ уменьшается на величину

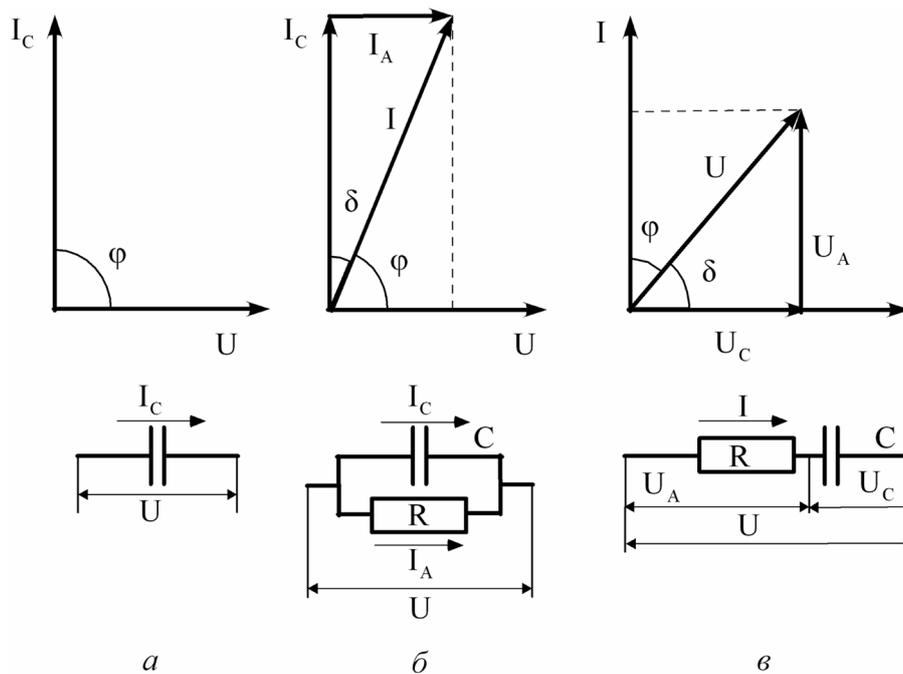


Рис. 1. Параметры эквивалентных схем конденсатора, замещенного диэлектриком с потерями: конденсатор без потерь (а), параллельная (б) и последовательная (в) схемы конденсатора, замещенного ЭМ с потерями

ну угла потерь (δ), который представляет собой угол сдвига фаз между векторами активного и реактивного токов (рис. 1, б).

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями (рис. 1, б), более адекватно отражает реальные диэлектрические свойства материала в сравнении с последовательной эквивалентной схемой (рис. 1, в). В основу разработанного ИМ положено измерение величин полного сопротивления z и ϕ конденсатора, замещенного ЭМ с потерями, при протекании через него переменного электрического тока. Получение формул для вычисления комплекса диэлектрических показателей, таких как ϵ' , ρ и $\text{tg}\delta$, основано на анализе параллельной эквивалентной схемы конденсатора, замещенного ЭМ с потерями.

На рис. 2 представлена параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями. Если конденсатора не заполнен ЭМ, то получим

$$1/z_0^2 = g_0^2 + \omega^2(c_0 + c_{\text{п}})^2, \quad (1)$$

где z_0 – полное сопротивление; g_0 – активная электрическая проводимость ЭМ; ω – круговая (циклическая) частота; c_0 – геометрическая емкость рабочей части конденсатора; $c_{\text{п}}$ – «паразитная» емкость конденсатора вместе со съемными контактами.

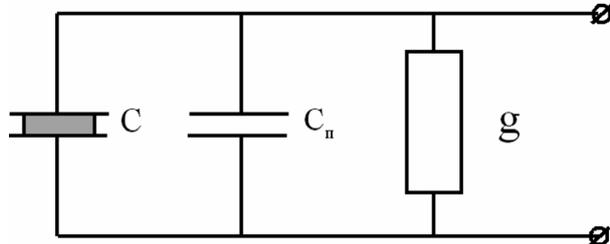


Рис. 2. Параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями: g – активная электрическая проводимость ЭМ; $c_{\text{п}}$ – «паразитная» емкость конденсатора; $c = c_0\epsilon'$ – емкость конденсатора, замещенного ЭМ; c_0 – геометрическая емкость конденсатора; ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость ЭМ

Так как $g_0 \approx 0$, то

$$1/z_0 = \omega(c_0 + c_{\text{п}}). \quad (2)$$

Если измерительное пространство конденсатора заполнено ЭМ с потерями, тогда получим

$$1/z_0^2 = g_0^2 + \omega^2(c_0\epsilon' + c_{\text{п}})^2. \quad (3)$$

Тангенс сдвига между током и напряжением запишем как

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega(c_0\varepsilon' + c_{\Pi})}{g}. \quad (4)$$

Таким образом, получим три уравнения (2), (3), (4) с тремя неизвестными ε' , g , c_{Π} :

$$c_0 + c_{\Pi} = 1/z_0\omega, \quad (5)$$

$$1/z^2 = g^2 + \omega^2(c_0\varepsilon' + c_{\Pi})^2, \quad (6)$$

$$\omega^2(c_0\varepsilon' + c_{\Pi})^2 = g^2 \operatorname{tg}^2\varphi. \quad (7)$$

Из уравнений (6), (7) следует, что

$$1/z^2 = g^2 \operatorname{tg}^2\varphi, \quad (8)$$

или

$$1/z^2 = g^2(1 + \operatorname{tg}^2\varphi). \quad (9)$$

Отсюда

$$g = \frac{1}{z(1 + \operatorname{tg}^2\varphi)}. \quad (10)$$

Если в измерительное пространство конденсатора помещен ЭМ с величинами ε' и ρ , то справедливо следующее соотношение:

$$c\rho = \varepsilon'\varepsilon_0\rho. \quad (11)$$

Здесь c , r – емкость и электросопротивление измерительного пространства конденсатора с ЭМ; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Так как $r = 1/g$, а $c = c_0\varepsilon'$, то

$$c_0/g\varepsilon_0 = \varepsilon'\varepsilon_0\rho. \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что

$$\rho = c_0/g\varepsilon_0, \quad (13)$$

$$g = y \cos|\varphi|, \quad (14)$$

где y – полная электрическая проводимость ЭМ.

При учете, что

$$y = 1/z, \quad (15)$$

получим следующее выражение:

$$g = \frac{\cos|\varphi|}{z}. \quad (16)$$

После подстановки формулы (16) в (13) получим выражение для вычисления удельного электрического сопротивления ЭМ:

$$\rho = \frac{c_0 z}{\varepsilon_0 \cos|\varphi|}. \quad (17)$$

Запишем уравнения (5), (6) в следующем виде:

$$c_0 + c_{\Pi} = 1/z_0\omega, \quad (18)$$

$$c_0\varepsilon' + c_{\Pi} = \frac{\sqrt{1/z^2 - g^2}}{\omega}. \quad (19)$$

Вычтем из выражения (19) уравнение (18) и при учете (16) определим

$$c_0(\varepsilon' - 1) = \frac{\sqrt{1/z^2 - \cos^2 \varphi}}{\omega} - 1/z_0 \omega. \quad (20)$$

После преобразований уравнения (20) имеем

$$c_0(\varepsilon' - 1) = \frac{\sin|\varphi|}{z\omega} - \frac{1}{z_0\omega}. \quad (21)$$

Из уравнения (21) получим формулу для определения величины ε' ЭМ:

$$\varepsilon' = \frac{1}{\omega c_0} \left(\frac{\sin|\varphi|}{z} - \frac{1}{z_0} \right) + 1. \quad (22)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению активного и реактивного токов:

$$\operatorname{tg}\delta = i_a/i_p. \quad (23)$$

Из закона Ома для переменного тока следует

$$i_a = ug, \quad i_p = ub, \quad (24)$$

где b – реактивная проводимость.

В данном случае

$$b = \omega\varepsilon'c_0. \quad (25)$$

Учитывая формулы (23)–(25), определяем

$$\operatorname{tg}\delta = g/\omega\varepsilon'c_0. \quad (26)$$

Подставляя уравнение (16) в (26), получаем формулу для вычисления $\operatorname{tg}\delta$ ЭМ:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\cos|\varphi|}{z\omega\varepsilon'c_0}. \quad (27)$$

В уравнениях (17), (22), (27) геометрическая емкость измерительного пространства конденсатора c_0 входит как известная величина.

Без учета краевых эффектов электродов можно записать

$$c_0 = \frac{\varepsilon'\varepsilon_0 s}{d}, \quad (28)$$

где s – площадь пластины электрода; d – толщина образца.

С учетом краевых эффектов электродов из уравнения (22) получим формулу для определения геометрической емкости измерительного пространства конденсатора

$$c_0 = \frac{1}{\omega(\varepsilon_1 - 1)} \left(\frac{\sin\varphi_1}{z_1} - \frac{1}{z_0} \right). \quad (29)$$

Таким образом, при использовании эталонного материала с известной величиной ε_1 и измерения z_1 и φ_1 можно вычислить значение c_0 , которое в дальнейшем будет применено для определения ε' , ρ и $\operatorname{tg}\delta$ ЭМ.

Материалы и методы проведения исследования. Для диагностического контроля проверено десять образцов ЭМ на диэлектрические показатели. Ранее в [7] описана методика определения комплекса диэлектрических показателей полимерных материалов электротехнического назначения. На рис. 3 представлена малогабаритная импедансная установка диагностического кон-

троля комплекса диэлектрических показателей ЭМ электротехнического назначения в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц. Она включает в себя высокочувствительный электроемкостной преобразователь и малогабаритный цифровой измеритель импеданса с интерфейсом для вывода текущих результатов контроля на монитор экрана персонального компьютера. Конструкция высокочувствительного электроемкостного преобразователя представляет собой микрометрическое устройство со встроенным микровинтом, соединенным с подвижным дисковым электродом, симметрично расположенным с неподвижным электродом, рабочие поверхности которых отшлифованы, отполированы, хромированы и притерты друг к другу [8].



Рис. 3. Малогабаритная импедансная установка диагностического контроля диэлектрических показателей ЭМ электротехнического назначения

Высокочувствительный преобразователь [8] по сравнению с существующими аналогами [9–11] обладают следующими преимуществами:

получение информации о комплексе диэлектрических показателей ЭМ электротехнического назначения в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц;

обеспечение однородного электрического поля в объеме контролируемого ЭМ в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц;

малая величина диэлектрических потерь ($1,8 \cdot 10^{-5}$).

Результаты исследования и их обсуждение. Диагностический контроль показателей относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов ЭМ проводили на частоте 1 МГц, согласно нормам, регламентированным стандартом. В табл. 1 представлены среднестатистические значения диэлектрических показателей образцов ЭМ из пяти параллельных опытов при $(20 \pm 0,1)$ °С. Относительная погрешность определения диэлектрических показателей образцов ЭМ составляет $\pm 1,2\%$.

Т а б л и ц а 1. Значения диэлектрических показателей образцов ЭМ

Диэлектрический показатель	Определяемый показатель	
<i>Электроизоляционный материал ГСП-8</i>		
ϵ'	5,42	По ГОСТ 17478–95 не более 7,0
$\text{tg}\delta$	0,02	не более 0,04
<i>Электроизоляционный материал АГ-4В</i>		
ϵ'	8,65	По ГОСТ 20437–89 не более 7,0
$\text{tg}\delta$	0,05	не более 0,04
<i>Дозирующий стекловолоконный материал ДСВ-20</i>		
ϵ'	6,65	По ГОСТ 17478–89 не более 7,0–8,0
$\text{tg}\delta$	0,020	не более 0,05
<i>Гранулированный стеклотекстолитовый волокнистый материал ГСП-8</i>		
ϵ'	6,60	По ГОСТ 17478–95 не более 7,0–8,0
$\text{tg}\delta$	0,025	не более 0,04

На основе анализа результатов испытаний установлено, что в пяти контролируемых образцах электроизоляционных материалов АГ-4В из одной партии относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь имеют завышенные диэлектрические показатели. Из табл.1 видно, что показатели относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для ЭМ АГ-4В равны 8,65 и 0,5, тогда как, согласно ГОСТ 20437–89, они составляют 7,0 и 0,04, соответственно. В пяти контролируемых образцах ЭМ ГСП-8 из разных партий диэлектрические показатели соответствуют нормам, регламентированным стандартом. Все остальные образцы ЭМ, поставленные для диагностического контроля диэлектрических показателей, соответствуют нормам, регламентированным стандартом.

Проведен диагностический контроль качества образцов полиамидов (ПА6) и поликарбонатов (ПК) на соответствие показателей относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ЭМ нормам, регламентированным стандартом. Диэлектрические показатели материалов определяли по методике в соответствии с ГОСТ 22372–77 «Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь».

В табл. 2, 3 приведены среднестатистические значения диэлектрических показателей образцов полимерных материалов из пяти параллельных опытов при $(20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$.

Т а б л и ц а 2. Диэлектрическая проницаемость полимерных материалов

Полимерный материал	Значение ϵ' при различной частоте электрического поля ν , Гц				
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
ПА 6 (окрашенный образец)	4,1	4,0	3,85	3,75	3,59
ПА 6 (неокрашенный образец)	4,0	3,9	3,74	3,65	3,50
ПК	3,50	3,37	3,23	3,17	3,09

Т а б л и ц а 3. Тангенс угла диэлектрических потерь полимерных материалов

Полимерный материал	Величина $\text{tg}\delta$ при различной частоте электрического поля ν , Гц				
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
ПА 6 (образец черного цвета)	0,068	0,055	0,045	0,036	0,02
ПА 6 (образец белого цвета)	0,061	0,047	0,038	0,028	0,018
ПК	0,0075	0,0070	0,00650	0,0060	0,0050

В результате проведенных испытаний определены показатели относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов ПА6 и ПК. Установлено, что относительная диэлектрическая проницаемость образцов полиамидов ПА 6 на частоте электрического тока 1 МГц находится в интервале 3,50–3,59, а тангенс угла диэлектрических потерь составляет 0,018–0,02, что отвечает требованиям ГОСТ 17648–83, согласно которому данные показатели должны быть не более 4,0 и 0,02 соответственно. Относительная диэлектрическая проницаемость образцов ПК на частоте электрического тока 1 МГц составляет 3,09, а тангенс угла диэлектрических потерь – 0,005, что соответствуют требованию ТУ 2226-003-54887985–2002, согласно которому данные показатели должны быть не более 4,0 и 0,09 соответственно.

Закключение. Таким образом, малогабаритная импедансная установка, которой располагает научно-исследовательская лаборатория диэлектрической спектроскопии гетерогенных систем физического факультета Белорусского государственного университета, в дальнейшем может быть использована для диагностического контроля диэлектрических показателей электроизоляционных материалов на их соответствие нормам, регламентированным стандартом. Это позволяет проводить диагностический контроль и своевременно выявлять соответствие или несоответствие диэлектрических показателей электроизоляционных материалов, применяемых в высоковольтных электрических и радиотехнических устройствах.

Список используемой литературы

1. Оперативный контроль и диагностика электрических свойств полимерных композиций в зависимости от состава для различных частот электрического поля / И. Н. Ахвердов [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 4. – С. 40–44.
2. Влияние дисперсности и концентрации токопроводящей фазы на электрофизические свойства спеченных композиций кремний–стекло / И. Н. Ахвердов [и др.] // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1996. – № 4. – С. 3–7.
3. *Zubko, V. I.* Influence of the composition and temperature of concentrated magnetic fluids on their electrophysical properties for different frequencies of the electric field / V. I. Zubko, A. I. Lesnikovich, D. V. Zubko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2004. – Vol. 77, N 1. – P. 193–198.
4. *Зубко, В. И.* Об учете погрешностей при контроле электрических свойств материалов с большими потерями / В. И. Зубко, А. И. Лесникович, Д. В. Зубко // Техническая электродинамика. – 2008. – № 2. – С. 64–68.
5. <http://giprocement.ru/about/articles.html/p=6>.
6. Электропроводящая полимерная композиция: пат. на изобретение 13803 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. Опубл. 23.10.2008.
7. *Зубко, В. И.* Диэлькометрический метод контроля и диагностики электрических свойств полимерных материалов электротехнического назначения / В. И. Зубко, Д. В. Зубко, Г. Н. Сицко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 28–34.
8. *Зубко, Д. В.* Устройство для измерения электрических свойств полимерных композиций: патент на полезную модель 9001 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. Опубл. от 28.02.2013.
9. *Матис, И. Г.* Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. – Рига: Зинатне, 1982, 302 с.
10. *Бугров, А. В.* Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. – М.: Машиностроение, 1982, 94 с.
11. *Джексон, Р. Г.* Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.

Поступила в редакцию 10.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

УДК 621.833

В. Я. ПРУШАК¹, В. А. ДАНИЛОВ², Н. Ю. КОНДРАТЧИК³

АНАЛИЗ СХЕМ ОБРАБОТКИ АРОЧНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАЛКОВ ВАЛЬЦПРЕССОВ

¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
Солигорск, Беларусь, e-mail: ipr@sipr.by,

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: bnty@bnty.by,

³Барановичский государственный университет», Барановичи, Беларусь, e-mail: BarSU@brest.by

Предложено исполнение формирующих элементов на валках вальцпрессов в виде круговых пазов с вогнутым профилем, образующих арочные выступы. На основе сравнительного анализа обоснован рациональный метод их обработки при профилировании пазов методом копирования и формообразовании их по длине методом касания. Установлены закономерности изменения скоростей движений инструмента и заготовки, обеспечивающие стабилизацию условий резания при обработке арочных выступов специальными концевыми фрезами.

Ключевые слова: вальцпресс, формирующий элемент, фреза, заготовка, спрессованная плитка.

V. Ya. PRUSHAK¹, V. A. DANILOV², N. Yu. KONDRATCHIK³

ANALYSIS OF PROCESSING OF ARCHED FORMING ELEMENTS OF ROLLERS OF ROLLING PRESSES

¹Closed Joint Stock Company «Soligorsk Institute of problems of resources saving with Experienced production»,
Soligorsk, Belarus, e-mail: ipr@sipr.by,

²Belarusian National Technical University, Minsk, e-mail: bnty@bnty.by,

³Baranovichi State University, Baranovichi, Belarus, e-mail: BarSU@brest.by

A version of forming elements for rollers of rolling presses in the form of circumferential slots with a concave profile, forming arched lugs is proposed. On the basis of comparative analysis the authors have proved a rational method of their processing when slots are profiled by the method of copying and they are formed lengthwise by the method of contact. The regularities of speed variations of the instrument and workpiece movements, providing stabilization of cutting conditions when arch lugs processing by special end-milling cutter are established.

Keywords: roll press, forming elements, cutter, blank, pressed tiles.

Введение. Технология производства гранулированных калийных удобрений включает в себя операцию прессования хлористого калия из порошкообразного состояния в плитку (ленту) определенной толщины. После дробления плитки, размалывания и классификации полученного материала его мелкая и крупная фракции возвращаются в производственный процесс, а производственная фракция проходит ряд операций для придания полученным гранулам необходимых потребительских качеств.

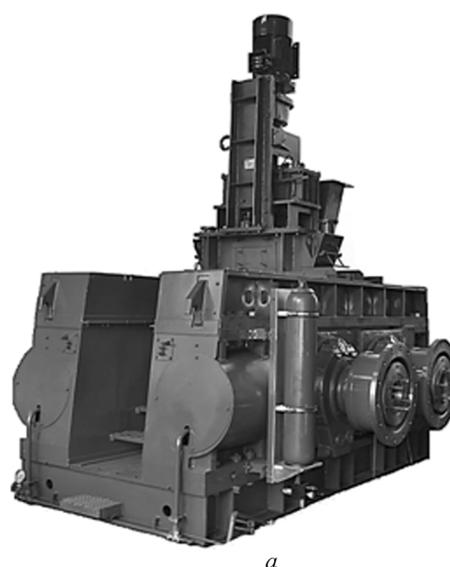
Прессование мелкозернистого калия осуществляется посредством валковых прессов (вальцпрессов), которые являются наиболее простым и дешевым прессовым оборудованием и широко применяются в калийном производстве (рис. 1). В современных вальцпрессах прессуемый материал 1 (рис. 2) подается с применением подпрессовщика через бункер 2 к вращающимся навстречу друг другу валкам 3 и 4, уплотняется ими до получения плитки 5 требуемой толщины и плотности.

Конструкции вальцпрессов постоянно совершенствуются в направлении повышения их производительности и надежности. Эти характеристики вальцпресса существенно зависят от геометрии исполнительных поверхностей валков, в частности расположенных на ней формирующих элементов, поэтому придание последним рациональной формы имеет важное технико-экономическое значение. Следует также отметить актуальность совершенствования технологии изготовления валков в направлении повышения производительности за счет применения рациональных схем формообразования и методов обработки формирующих элементов из-за значительной трудоемкости этой операции. Отмеченные задачи являются предметом анализа в статье.

Геометрия формирующих элементов рабочих органов вальцпрессов. Для повышения долговечности валки снабжают сменными бандажами, изготовленными из материалов с более высокими физико-механическими свойствами. Конструктивно бандаж представляет собой кольцо, наружная поверхность которого может быть гладкой или рифленой, т. е. имеющей формирующие элементы в виде пазов различной формы и размеров [1]. Пазаы могут располагаться параллельно или под углом к оси валка в ряд или в шахматном порядке, иметь форму шеврона. Указанные исполнения формирующих элементов применяются в конструкциях вальцпрессов, разработанных и изготавливаемых ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» для калийной промышленности.

При наличии формирующих элементов рабочая поверхность валков имеет периодически расположенные выступы и впадины (рис. 3, а), что улучшает захватывание валками сыпучего материала и уменьшает их проскальзывание при вращении. В результате повышается производительность вальцпресса. Этому способствует и то, что спрессованная плитка имеет утолщения по форме пазов (рис. 3, б), благодаря чему возрастает ее масса по сравнению с массой гладкой плитки, получаемой при отсутствии на валках формирующих элементов. При соответствующей относительной установке валков выступы одного из них могут располагаться над выступами другого или входить во впадины между ними для увеличения давления прессования.

Геометрия формирующих элементов влияет на условия прессования и отделения плитки от рабочей поверхности валка. Она должна обеспечивать полное заполнение пазов прессуемым материалом, его равномерное сжатие по всей длине пазов, беспрепятственное отделение плитки от валка, максимально полное использование его цилиндрической поверхности [1]. Исходя из требований к технологичности конструкции бандажа и беспрепятственного отделения от него плитки, пазаы должны иметь



а



б

Рис. 1. Пресс валковый для прессования хлористого калия типа ПВП (а) и тот же пресс валковый с приводом, установленный в отделении грануляции СОФ ОАО «Беларуськалий» (б)

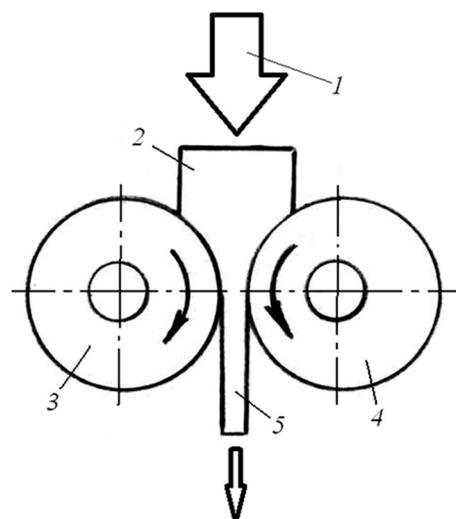


Рис. 2. Схема прессования сыпучего материала на валковом прессе: 1 – прессуемый материал; 2 – бункер; 3, 4 – валки; 5 – плитка

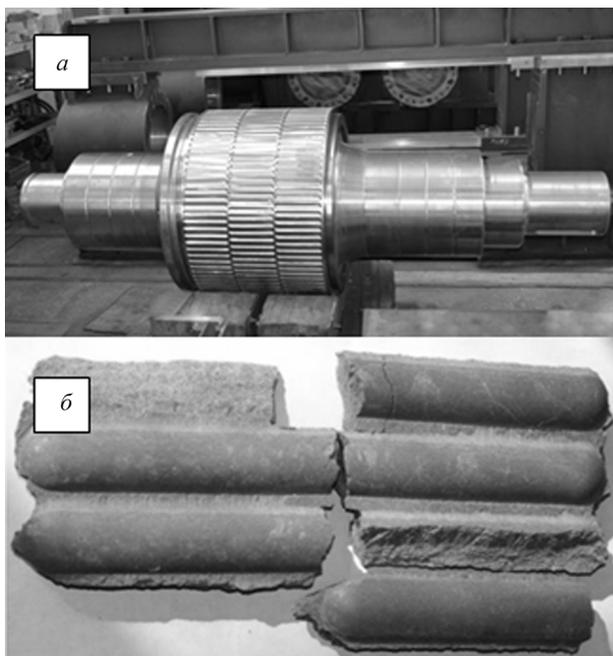


Рис. 3. Валок вальцпресса с формирующими элементами (а) и вид получаемой спрессованной плитки (б)

сти основан на формировании соответствующей геометрической (номинальной) поверхности. В соответствии с известным кинематическим методом анализа схем формирования поверхностей геометрическая поверхность рассматривается как след при относительном движении ее производящих образующей и направляющей линий. Под следом понимается геометрическое место образующей при ее перемещении. Движения, обеспечивающие образование производящих линий и их относительное перемещение, являются движениями формообразования.

При обработке поверхности на станке ее образующая и направляющая линии воспроизводятся относительными движениями инструмента и заготовки и контактирующими с формируемой поверхностью формообразующими (производящими) элементами инструмента, которые могут представлять собой линии (режущие кромки) или точки (вершины режущих лезвий, абразивные частицы). В первом случае производящие линии образуются методами копирования (Кп) или обката (Об), во втором – следа (Сл) или касания (Кс) [3]. Возможные сочетания этих методов определяют множество способов формообразования поверхности. Для упрощения реализации данного процесса важно на основе анализа ее геометрии выбрать из множества возможных комбинаций линий производящие линии простой геометрической формы. Арочные выступы на валке образуются в результате обработки на нем криволинейных пазов, поэтому для упрощения реализации схемы формообразования за образующую обработанной поверхности следует принять профиль паза, а за направляющую – линию, определяющую форму паза по длине. Профиль пазов должен обеспечивать выполнение требований к формирующим элементам валков [1].

Для обработки арочных выступов на валках могут быть использованы технологические методы, применяемые при нарезании круговых зубьев цилиндрических зубчатых колес [2, 4], профилирование которых при окончательной обработке осуществляется достаточно сложным в реализации методом обката. Учитывая, что при работе вальцпресса выступы на валках не контактируют друг с другом, при их обработке можно использовать простой в реализации процесс профилирования методом копирования.

По сравнению с методом обката кроме более простых средств реализации метод копирования обеспечивает существенное повышение производительности обработки, так как, например, при обработке кругового паза концевой (пальцевой) фрезой выступ формируется одновременно по всей высоте, тогда как при обработке пальцевой фрезой арочных зубьев зубчатых колес мето-

минимальное количество углов и граней, позволять вести высокопроизводительную обработку на универсальном станочном оборудовании стандартными режущими инструментами.

В этой связи оптимизация формы пазов для выполнения указанных требований, а также технологии их обработки имеет практическое значение. Требованиям к геометрии формирующих элементов [1] в полной мере отвечает дугообразная форма пазов, при которой выступы на рабочей поверхности валка имеют арочную форму, аналогичную круговым зубьям цилиндрических зубчатых колес [2]. Такая форма выступов является альтернативой менее технологичным шевронным выступам и в большей степени отвечает основным требованиям к формирующим элементам валков вальцпрессов.

Выбор рационального метода формообразования арочных выступов на валках.

Процесс обработки любой реальной поверхно-

дом обката профиль зуба формируется за множество циклов (строчек) [4], что и обуславливает низкую производительность формообразования.

При профилировании методом копирования каждый выступ на валке обрабатывается последовательно инструментом, производящий элемент 1 которого (рис. 4) по форме и протяженности совпадает с профилем пазов 2, равномерно расположенных на наружной поверхности валка 3. Поэтому необходимо только движение врезания для перемещения производящего элемента из исходного в конечное положение. Материальным носителем формы профиля паза в данном случае является инструмент, что упрощает кинематическую схему обработки и позволяет использовать для этого более простые станки.

Формирование арочных выступов по длине возможно методами следа и касания. При методе следа обработанная поверхность представляет собой множество линий, каждая из которых является траекторией точки, принадлежащей режущей кромке инструмента и не отрывающейся при движении от заготовки [3]. При обработке круговых выступов данная траектория представляет собой окружность, поэтому они могут быть обработаны вращающейся резцовой головкой с расположенными на ее торце резцами по аналогии с нарезанием круговых зубьев конических и цилиндрических зубчатых колес [2].

Следует отметить, что такой режущий инструмент не является универсальным, так как радиус окружности, по которой расположены резцы в головке, должен быть равен радиусу окружности, по которой формируются круговые выступы. Из-за этого резцовая головка для обработки выступов на валках должна иметь значительный диаметр, что обуславливает повышенные требования к жесткости шпиндельного узла станка. Обработка круговых выступов на валках резцовой головкой связана с применением специального станка, аналогичного станку для обработки зубчатых колес с круговыми зубьями. Недостаток этого метода формообразования – возможность обработки только открытых пазов, тогда как пазы на валках вальцпрессов обычно закрытые.

Производящая линия образуется методом касания как касательная к множеству дополнительных линий (траекторий производящей точки), что имеет место, в частности, при обработке поверхности вращающимся инструментом – фрезерованием или шлифованием. Данный метод осуществляется двумя движениями формообразования, одно из которых служит для создания дополнительных линий, а другое – для их относительного перемещения. Материальным носителем образуемой линии является кинематика станка.

Применительно к рассматриваемой задаче боковые поверхности выступов на валке, формируемые по длине методом касания, могут быть обработаны дисковыми и концевыми фрезами. Эти способы обработки неравнозначны по сложности реализации.

При обработке паза дисковой фрезой плоскость ее вращения должна быть сориентирована вдоль паза, поэтому при обработке круговых пазов ось вращения фрезы должна непрерывно изменять свое положение в системе координат станка, что усложняет реализацию способа обработки. Поэтому с точки зрения простоты реализации предпочтителен метод обработки круговых пазов концевой фрезой, который может быть реализован на фрезерно-расточном многооперационном станке с ЧПУ, имеющим поворотный стол (управляемая координата). При этом возможна обработка как открытых, так и закрытых пазов, что задается управляющей программой.

Из изложенного следует, что обработку арочных выступов на валках вальцпрессов целесообразно производить специальной концевой (пальцевой) фрезой, профиль инструментальной поверхности которой идентичен профилю пазов, сообщая ей движение подачи по окружности соответствующего радиуса.

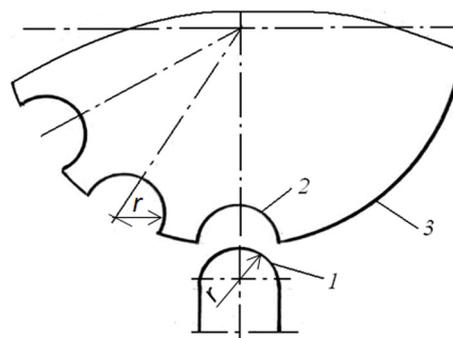


Рис. 4. Форма производящего элемента инструмента при профилировании пазов на валке методом копирования: 1 – производящий элемент инструмента; 2 – паз; 3 – валок

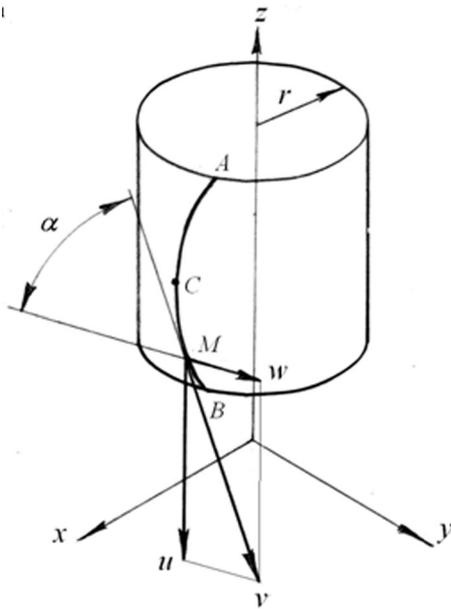


Рис. 5. Кинематика формирования винтовой линии переменного шага и направления

Анализ схемы формообразования арочных выступов концевой фрезой. Криволинейные пазы, формирующие на валке арочные выступы, можно рассматривать как винтовые канавки переменного шага на цилиндрических изделиях и поэтому обрабатывать их можно традиционными методами (в частности, специальными концевыми фрезами). Формируемая боковая поверхность паза представляет множество винтовых линий переменного шага и направления, образование одной из которых показано на рис. 5. Она имеет два участка AC и CB с точкой перегиба C в середине между ними. На участке AC шаг H винтовой линии уменьшается от начального (максимального) значения H_0 до нуля, а на участке CB возрастает от нуля до H_0 .

Нестабильные параметры поверхностей винтовых канавок переменного шага обуславливают необходимость синтеза рациональных схем их формообразования как при проектировании специальных станков для обработки круговых пазов на валках, так и при разработке управляющих программ для соответствующих станков с ЧПУ.

Параметрические уравнения множества винтовых линий, образующих винтовую канавку переменного шага, имеют вид

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi, \\ y = r \sin \varphi, \\ z = z_0 + P\varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где r – радиус цилиндра, на котором расположена рассматриваемая винтовая линия (рис. 5); φ – угловой параметр точки в винтовом движении; P – параметр винтового движения, $P = H/2\pi$; $z_0 = f(r)$ – начальное значение координаты z ($z_0 = 0$ при расположении точки B в координатной плоскости XOY).

В общем случае

$$H = H_0 + H(\varphi), \quad (2)$$

где $H(\varphi)$ – функция изменения шага в соответствии с формой паза.

Каждая из множества винтовых линий образуется как траектория соответствующей производящей точки M характеристического образа инструмента, совершающей относительно оси z изделия винтовое движение, т. е. поступательное перемещение со скоростью $u = dz/dt$ и вращение с угловой скоростью $\omega = d\varphi/dt$ или частотой n (рис. 5). Поэтому линейная скорость движения производящей точки вдоль винтовой линии (скорость движения формообразования) v составляет

$$v = \sqrt{w^2 + u^2} \quad (3)$$

или

$$v = 2\pi\sqrt{(rn)^2 + (Pn)^2}, \quad (4)$$

где $w = 2\pi rn$ – окружная скорость производящей точки M ; $u = 2\pi Pn$ – скорость ее поступательного перемещения.

Поэтому

$$H = u/n. \quad (5)$$

Следовательно, изменение шага формируемой винтовой линии в общем случае возможно тремя способами:

регулированием частоты n вращения производящей точки при постоянной скорости u ее поступательного перемещения;
 регулированием скорости u поступательного перемещения производящей точки при постоянной частоте ее вращения n ;
 одновременным регулированием скоростей обоих движений.

Соответственно указанным способам изменения шага винтовой линии структура формообразующего движения Φ , образованного согласованными элементарными движениями (вращательным V и поступательным Π) при обработке винтовой канавки переменного шага, имеет вид: $\Phi(\tilde{V}_1 \Pi_2)$, $\Phi(V_1 \tilde{\Pi}_2)$, $\Phi(\tilde{V}_1 \tilde{\Pi}_2)$, где V_1 (\tilde{V}_1) – вращательное движение производящей точки соответственно с постоянной (переменной) угловой скоростью, Π_1 ($\tilde{\Pi}_2$) – поступательное движение производящей точки с постоянной (переменной) линейной скоростью.

Возможны различные варианты распределения указанных элементарных движений между инструментом и заготовкой и соответствующие им кинематические схемы обработки. Например, поступательное движение Π может сообщаться инструменту или заготовке в соответствии с компоновкой и кинематикой станка.

Для формирования винтовой линии переменного шага скорости элементарных движений V_1 и Π_2 должны быть функционально связаны со скоростью v образуемого ими винтового движения следующими зависимостями:

$$u = v \sin \alpha, \quad w = v \cos \alpha, \quad (6)$$

где $\alpha = \arctg(P/r)$ – угол наклона винтовой линии к плоскости вращательного движения заготовки.

При учете, что скорость относительного перемещения инструмента и заготовки при фрезеровании равна величине результирующей подачи, для обеспечения оптимальных режимов резания важно постоянство ее значения.

На практике применяются две схемы формообразования винтовых канавок переменного шага. При первой схеме инструменту сообщают поступательное движение с постоянной скоростью u , а заготовке – вращение с переменной частотой n [5]. При второй схеме, наоборот, частота вращения заготовки постоянная, а величина скорости поступательного движения инструмента относительно заготовки регулируется в соответствии с изменением шага обрабатываемой канавки. При учете, что для рассматриваемых изделий траектория движения формообразования имеет точку перегиба, вторая схема неприемлема для обработки криволинейных пазов на валках, так как при прохождении точки перегиба вращение заготовки должно изменяться на противоположное и поэтому не может осуществляться с постоянной скоростью в цикле обработки паза по всей длине.

Таким образом, из рассмотренных двух схем формообразования винтовых канавок переменного шага для обработки пазов на валках может быть применена только первая схема. Следует отметить, что в соответствии с зависимостью (3) скорость движения формообразования v и, следовательно, технологическая производительность непрерывно изменяются, что не позволяет оптимизировать процесс обработки.

Определим диапазон изменения скорости движения формообразования v при постоянной скорости поступательного перемещения u . Как следует из уравнений (6), скорость движения формообразования $v = u/\sin\alpha$, поэтому при постоянном значении скорости поступательного движения u диапазон R_v изменения скорости движения формообразования равен диапазону $R_{\sin\alpha}$ изменения на длине паза величины $\sin \alpha$. Например, при изменении угла α в диапазоне $30^\circ-0^\circ$ диапазон изменения скорости $R_v = 2$, т. е. скорость движения формообразования за время обработки участка AC паза изменяется в два раза – ее значение максимально в начале и в конце паза и минимально в середине паза. Такое существенное изменение скорости движения инструмента относительно заготовки не позволяет оптимизировать режимы резания, что отрицательно влияет на его стойкость и производительность обработки. Отмеченный недостаток обусловлен тем, что изменение шага винтовой канавки достигается регулированием только одного из элементарных движений, создающих движение формообразования. Предпочтительной является универсаль-

ная схема обработки круговых выступов на валках, основанная на одновременном регулировании скоростей поступательного и вращательного элементарных движений, образующих исполнительное движение формообразования [6].

Постоянство значения ν при $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ достигается при одновременном регулировании скоростей u и w в соответствии с зависимостями (6). Это позволяет оптимизировать режимы резания для интенсификации процесса обработки и повышения стойкости инструмента. Кроме того, для заданного диапазона изменения шага требуется значительно меньший диапазон регулирования скорости каждого из элементарных движений, создающих винтовое движение формообразования, что повышает точность обработки.

Для обработки концевыми фрезами криволинейных пазов на валках вальцпрессов рациональной является схема формообразования, основанная на одновременном управлении скоростями вращательного и поступательного движений, создающих винтовое движение подачи. Данная схема обработки наиболее просто реализуется на фрезерных станках с ЧПУ, имеющих управляемую круговую координату – вращение стола с заготовкой.

Заключение. Альтернативой применяемым в конструкциях валков вальцпрессов формирующим элементам являются пазы и выступы круговой формы. Рациональной для них является схема обработки, основанная на профилировании методом копирования и формировании по длине методом касания дисковыми или концевыми фрезами. Более простой в реализации и универсальной является схема обработки формирующих элементов концевой фрезой при сообщении ей перемещения по окружности за счет согласованных вращательного и поступательного перемещений исполнительных органов станка. Данная схема позволяет обрабатывать на валках как открытые, так и закрытые пазы. Стабилизация условия резания обеспечивается в этом случае управлением скоростями указанных движений по установленным зависимостям исходя из постоянства скорости движения формообразования.

Список использованной литературы

1. Грузглина С. Н. Исследование и совершенствование формующих элементов вальцовых брикетных прессов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 «Технология машиностроения» / С. Н. Грузглина; Днепропетровский горный институт им. Артема. – Днепропетровск, 1973. – 24 с.
2. Беляев А. И. Геометрический расчет и технология нарезания колес с арочными зубьями / А. И. Беляев, А. И. Сирицин, Д. А. Сирицин // Вестник машиностроения. – 1999. – № 1 – С. 3–8.
3. Федотенок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
4. Плахтин В. Д. Изготовление зубчатых колес с арочными зубьями с применением пальцевых фрез / В. Д. Плахтин, А. П. Давыдов, А. Н. Паршин // Технология машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 12–15.
5. Дружинский И. А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: справочник / И. А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.
6. Данилов В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.

Поступила в редакцию 05.07.2016

УДК 629.33.021:004.94

В. С. КОНЧАК¹, А. А. НАЗАРЕНКО²

ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

*¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: bats@ncpmn.bas-net.by,*

*²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: nazaruiip@gmail.com*

Разработаны методы верификации компьютерных моделей механических конструкций на основе результатов обработки экспериментальной информации. Рассмотрены два подхода к построению математических моделей: метод «черного ящика» и аналитический на основе дифференциальных уравнений. Все теоретические положения продемонстрированы на примере верификации элементов длинноходовой подвески.

Ключевые слова: модели механических конструкций, идентификация, верификация, линеаризация модели, гармоническая аппроксимация.

V. S. KONCHAK¹, A. A. NAZARENKO²

VERIFICATION OF COMPUTER MODELS OF MECHANICAL STRUCTURES USING EXPERIMENTAL RESULTS

*¹The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: bats@ncpmn.bas-net.by,*

*²The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: nazaruiip@gmail.com*

Verification methods of computer models of mechanical structures were developed on the basis of processing of the results of experimental data. Two approaches to construction of mathematical models were considered: the method of «black box» and the analytical method based on differential equations. All theoretical points were demonstrated on the example of long-stroke suspension elements verification.

Keywords: mechanical structures models, identification, verification, model linearization, harmonic approximation.

Введение. Применение компьютерных технологий в задачах проектирования изделий машиностроительной техники связано с разработкой динамических моделей, которые в виртуальном пространстве способны воспроизводить режимы их функционирования, близкие к реальным. Последнее позволяет проводить исследование на моделях таких свойств проектируемого изделия, как вибронагруженность, устойчивость функционирования, управляемость в режиме динамического нагружения, тем самым оценить его соответствие техническому заданию до изготовления опытного образца. Чтобы разрабатываемая модель была пригодна для исследования свойств проектируемого изделия, ее математическое представление должно адекватно отображать физические процессы, которые протекают в механической конструкции в режиме реального функционирования. Ввиду этого при разработке компьютерной модели используется математическое описание, отображающее физические и механические свойства объекта, определяющие кинематику и динамику моделируемой конструкции.

Всякая модель содержит ряд параметров, которые и отображают физические и механические свойства проектируемого изделия. Их можно получить либо расчетным путем, либо по результатам эксперимента. Основным источником информации для получения таких характеристик динамических систем, как собственная частота колебаний, коэффициент демпфирования, ам-

плитудные спектры входа, выхода и передаточной функции, фазовый спектр, коэффициенты жесткости и сопротивления перемещению, являются стендовые либо натурные испытания реальной конструкции.

Цель настоящей статьи – разработка методов классификации математических моделей колебательных систем, их идентификации, а также получения параметров для их математического представления по результатам измеренной экспериментальной информации, которые в конечном счете используются при верификации разработанной компьютерной модели.

1. Основные термины теории верификации. Понятие верификации широко используется в различных направлениях науки, техники и службах контроля качества выпускаемой продукции. В соответствии с требованиями международного стандарта к системе менеджмента качества ИСО 9000, на основании которого был разработан российский стандарт ГОСТ Р ИСО 9000–2008, верификация определяется как «подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что установленные требования выполнены».

В дополнение к данному термину введено понятие валидации, которое по определению того же стандарта означает «подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены».

Понятия верификации и валидации используются для проверки качества широкого класса объектов. Нами поставлена задача использования возможностей теории верификации для разработки компьютерных моделей механических конструкций, адекватных реальным объектам. Верифицировать модель, значит, задать такие параметры математического описания объекта, чтобы результат сравнительных испытаний находился в пределах заданной точности.

Валидация в соответствии с определением осуществляет проверку с помощью верифицированной модели того, что использование данного изделия в проектируемом объекте обеспечит выполнение требований технического задания. Таким образом, валидация обеспечивает только предположение о возможности использования данной комплектующей в проектируемом объекте. Окончательный вывод можно сделать только после сравнения результатов виртуальных испытаний модели собранной конструкции с реальной проверкой ее функционирования, т. е. после ее верификации.

Следует различать понятия верификации и идентификации. Идентификация – разработка математического аппарата для построения модели динамической системы по измеренным данным. Так как математическая модель отображает динамику поведения системы с учетом кинематики и физических процессов, протекающих при взаимодействии ее элементов, то идентификация уточняет описание ее структуры и параметров путем анализа входных и выходных данных.

Отметим, что модель является некоторым приближением реального объекта и о ее адекватности можно судить после проведения сравнительных испытаний, в результате которых оценки параметров и процессов в контролируемых точках совпадут в пределах заданной точности. Следовательно, модель адекватна реальному объекту лишь после ее верификации.

2. Классификация математических моделей колебательных систем. Анализ динамики колебаний линейных механических систем, работающих в условиях переменных нагрузок, основан на решении совместных систем дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода и алгебраических уравнений связи, а в простейшем случае – на втором законе Ньютона, отражающем равновесие приложенных сил. Система, работающая в условиях свободных колебаний, описывается уравнением

$$m\ddot{y} = -r\dot{y} - cy, \quad (1)$$

где y – функция перемещения, m – поддрессоренная масса, r – коэффициент сопротивления перемещению, c – коэффициент жесткости, $m\ddot{y}$ – инерционная сила, $r\dot{y}$ – сила сопротивления перемещению, cy – упругая сила. Решением данного уравнения будет функция $y = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \alpha)$, где A_0 – амплитуда, задающая максимально возможное отклонение колеблющейся массы от статического состояния, $\beta = r/(2m)$ – коэффициент демпфирования, характеризующий скорость затухания колебаний, $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – собственная частота.

Вызвать свободные колебания в реальной конструкции не всегда возможно. Поэтому на практике чаще всего используют режим вынужденных колебаний, уравнение динамического равновесия сил при котором имеет вид

$$m\ddot{y} + r\dot{y} + cy = f \sin \omega t. \quad (2)$$

Решением данного уравнения будет функция

$$y = A \sin(\omega t + \alpha), \quad (3)$$

где A – амплитуда вынужденных колебаний, ω – частота, f – амплитуда вынуждающей силы.

Для построения модели в виде уравнения (2) необходимо по результатам измерения экспериментальной информации получить коэффициенты c и r , которые, как показано в [1], могут быть вычислены таким образом:

$$c = \frac{f(\omega_k) \cos \alpha}{A(\omega_k)}, \quad r = \frac{f(\omega_k) \sin \alpha}{A(\omega_k)}, \quad (4)$$

где $f(\omega_k)$ – амплитуда входного силового возбуждения, $A(\omega_k)$ – амплитуда выходного процесса перемещения элементов конструкции под воздействием приложенной силы, α – фазовое смещение, отражающее время реакции исследуемой системы.

Перечисленные выше характеристики рассчитывались по коэффициентам разложения в ряд Фурье процессов $x(t)$ и $y(t)$ с использованием следующих формул:

$$A(\omega_k) = \sqrt{a_k^2(y) + b_k^2(y)}, \quad f(\omega_k) = \sqrt{a_k^2(x) + b_k^2(x)}. \quad (5)$$

$$\alpha = \alpha_y - \alpha_x, \quad \alpha_y = \arctg(b_y / a_y), \quad \alpha_x = \arctg(b_x / a_x). \quad (6)$$

Таким образом, для идентификации параметров уравнения (2) достаточно в процессе эксперимента измерить входную и выходную функции и по амплитудным и фазовым характеристикам, полученным из соотношений (5) и (6), вычислить с помощью формулы (4) значения жесткости и сопротивления.

В соответствии с методикой проведения экспериментальных исследований динамических систем [2] на вход объекта испытания в режиме вынужденных колебаний подаются гармонические функции. При этом выходная функция (3) в режиме установившихся колебаний будет также гармонической. Если фаза $\alpha(\omega_k)$ будет константой, а зависимость упругой силы от перемещения – прямой, проходящей через начало координат под углом α для всех частот в полосе исследования $0 \leq \omega_k \leq \omega_{\text{высш}}$, то объект моделирования будет линейным, не зависящим от частоты. При этом коэффициенты уравнения (2) будут постоянными, а его решение – линейной функцией

$$y(t) = \text{tg } \alpha x(t), \quad (7)$$

задающей зависимость ординат выходной последовательности от входной. Следовательно, для частотно-независимых линейных систем по результатам обработки экспериментальной информации можно построить аналитическую модель с использованием уравнения (2) или модель с применением метода «черного ящика» – уравнение (7).

Если же в результате тестирования объекта в режиме экспериментальных исследований выходная функция будет гармонической, а фазовая характеристика будет зависеть от частоты, то в соответствии с уравнениями (4) коэффициенты жесткости и сопротивления также будут функциями частоты. Тогда уравнение (2) преобразуется к виду

$$m\ddot{y} + r(\omega_k)\dot{y} + c(\omega_k)y = f \sin \omega_k t, \quad (8)$$

т. е. будет линейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами. Системы такого типа называют частотно-зависимыми или обладающими памятью. Рабочие диаграммы такой системы для каждой частоты ω_k – прямые линии, а для всего частотного диапазона –

пучок прямых, проходящих через начало координат. Угловой коэффициент каждой из них будет равным $\operatorname{tg}\alpha(\omega_k)$. При этом в отличие от частотно-независимых систем, где имеет место линейная связь между упругой силой и функцией перемещения, у систем с памятью такая связь существует между амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) выходной $y(t)$ и входной $x(t)$ функций.

Во временной области связь между $y(t)$ и $x(t)$ задается в виде интегрального уравнения типа свертки

$$y(t) = \int_0^T h(t + \tau) x(\tau) d\tau, \quad (9)$$

для которого в качестве весовой функции используется импульсная переходная характеристика (ИПХ) $h(t)$.

В частотной области уравнение (9) будет иметь вид

$$S_y(j\omega_k) = S_h(j\omega_k) S_x(j\omega_k), \quad (10)$$

где S_x, S_y – коэффициенты преобразования Фурье входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ функций, а S_h – коэффициенты импульсной переходной характеристики $h(t)$. Частотная зависимость в таких системах возникает из-за отставания или опережения движения при взаимодействии силы инерции и сопротивления, что приводит к ускорению или замедлению движения. В результате на определенных частотах возникает явление резонанса, которое у частотно-независимых линейных систем отсутствует. Оно связано с понятием частоты собственных колебаний, при возникновении которой АЧХ принимает максимальное значение, а фазочастотная характеристика (ФЧХ) терпит разрыв, изменяясь с $-\pi/2$ на $\pi/2$ [3].

Коэффициенты преобразования Фурье ИПХ могут быть получены из соотношения (10) как

$$S_h(j\omega_k) = a_h(\omega_k) + jb_h(\omega_k) = \frac{S_y(j\omega_k)}{S_x(j\omega_k)} = \frac{S_y(j\omega_k) S_x^*(j\omega_k)}{|S_x(j\omega_k)|^2} = \frac{S_{yx}(j\omega_k)}{|S_x(j\omega_k)|^2}, \quad (11)$$

а дискретное представление оператора модели во временной области

$$|h_r(i\Delta t)| = F^{-1} \operatorname{diag} |S_h(j\omega_k)| F, \quad (12)$$

где $h_r(i\Delta t)$ – циклическая матрица дискретной ИПХ, F – матрица преобразования Фурье, $\operatorname{diag} |S_h(j\omega_k)|$ – матрица комплексного спектра ИПХ. Соответственно выходной процесс

$$\overline{y(n\Delta t)} = |h_r(i\Delta t)| \overline{x(i\Delta t)}. \quad (13)$$

Таким образом, частотно-зависимые линейные системы имеют линейную аналитическую зависимость (10) между коэффициентами преобразования Фурье входа и выхода. Аналитической моделью таких систем являются дифференциальные уравнения (8) с переменными коэффициентами, а моделью типа «черный ящик» – матричное соотношение (13), для которого оператор вычисляется в соответствии с формулой (12).

Рассмотренным выше системам свойственно отображать гармоническую функцию входного воздействия в гармоническую реакцию. Однако существуют реальные колебательные системы, которые преобразуют гармонический сигнал в периодический, но не гармонический. В таких случаях принято считать, что система обладает свойством нелинейного искажения входного воздействия.

Источником нелинейности в колебательных системах являются силы сопротивления движению, которые служат причиной неравномерного затухания колебаний и являются функциями от скорости перемещения элементов конструкции (возникают в демпферах и называются диссипативными). Зависимость силы трения от скорости наиболее часто представляют [4] в одной из следующих форм:

$$F(\dot{y}) = -r\dot{y} \quad (14)$$

как силу линейного трения;

$$F(\dot{y}) = -r \operatorname{sign} \dot{y} \quad (15)$$

как кулонову силу трения;

$$F(\dot{y}) = -r(\dot{y})^n \operatorname{sign} \dot{y} \quad (16)$$

как силу нелинейного вязкого трения и

$$F(\dot{y}) = -b_1 \dot{y} - b_2 \dot{y}^2 - \dots - b_k \dot{y}^k \dots \quad (17)$$

как обобщенную силу сопротивления перемещению частотно-независимых нелинейных систем.

Реакция на вход в нелинейных системах кроме частоты гармоник входного сигнала содержит и дополнительные частоты размножившихся гармонических компонент. Для реализаций $y_{i,k}$ выходного процесса коэффициент нелинейности Δ определяется как отношение мощности его части, содержащей только гармоник размножившихся частот, к мощности основной гармоники. Если величина Δ не превосходит значения допустимой погрешности, то в этом случае система может быть описана с использованием метода гармонической линеаризации, суть которого состоит в фильтрации гармоник размножившихся частот. Процесс линеаризации преобразует исследуемую систему в линейную и ее анализ сведется к методам, описанным выше для линейных систем.

У систем с высокой степенью нелинейности, когда значение Δ больше допустимой погрешности, необходимо провести анализ на частотную зависимость. Для этого формально выполняется линеаризация выходного процесса и строятся рабочие диаграммы. Если фаза $\alpha(\omega_k)$ для всего диапазона частот постоянная, то исходная система частотно-независимая нелинейная и ее модель будет описана уравнением (17).

При применении модели типа «черный ящик» необходимо для всех ω_k построить поле рассеяния точек характеристики. При использовании последних по методу наименьших квадратов строится полином, являющийся аппроксимацией характеристики исследуемого объекта. Полученный полином описывает зависимость силы сопротивления от скорости перемещения, т. е.

$$F[\dot{y}(t)] = P[f(t)] \dot{y}(t). \quad (18)$$

Аналитическое представление модели для частотно-независимых нелинейных систем будет в этом случае иметь вид

$$m\ddot{y} + P[f(t)] \dot{y}(t) + cy = f \sin \omega t. \quad (19)$$

Используя аналитическое представление полинома $P[\dot{y}(t)]$, вычисляем полином, дающий зависимость скорости $\dot{y}(t)$ от силы $F(t)$:

$$\dot{y}(t) = P^{-1}[f(t)].$$

Тогда решением уравнения (17) будет функция

$$y(t) = \int P^{-1}[f(t)] dt. \quad (20)$$

Следовательно, для частотно-независимых нелинейных систем может применяться аналитическая модель (19) либо модель типа «черный ящик» (20).

Системы, у которых коэффициент нелинейности Δ превосходит допустимую погрешность, а фазовая характеристика $\alpha(\omega_k) \neq \text{const}$, называют частотно-зависимыми нелинейными или обладающими памятью. Нелинейную зависимость сил сопротивления от скорости перемещения определяют [4] как

$$F[\dot{y}(t)] = -r\dot{y}(t)^{n-1} \dot{y}(t).$$

С учетом этого дифференциальное уравнение (1) равновесия сил примет вид

$$m\ddot{y} + r\dot{y}(t)^n + cy = f\sin\omega t. \quad (21)$$

Решение данного уравнения можно получить, применяя метод энергетического баланса, предположив, что его решением будет функция [4]

$$y(t) = A(t)\sin\omega t, \quad (22)$$

у которой $A(t)$ – медленно меняющаяся амплитуда колебаний, а частота постоянная.

В настоящей работе поставлена задача построения модели при использовании цифровой информации, полученной из эксперимента. Для решения данной задачи предложено применить метод гармонической аппроксимации.

Пусть X – матрица реализаций входного процесса, заданного в виде гармонических функций с дискретностью по частоте $\Delta f = 4f_{\text{высш}}/N$ и по времени $\Delta t = T_{\text{высш}}/4$, где $f_{\text{высш}}$ – граничная частота, $T_{\text{высш}}$ – период гармоники высшей частоты, $T_1 = \Delta t N$ – период полученной цифровой реализации, N – число дискретных отсчетов в одной реализации.

Зависимость выхода от входа запишем как

$$Y = XH, \quad (23)$$

где Y – ансамбль функций выходного процесса (реакция системы), H – матричный оператор, задающий характер нелинейного преобразования входных гармоник X . Так как по определению классификационных признаков нелинейной системы строки матриц X и Y входного и выходного ансамблей являются периодическими функциями, то они могут быть разложены в ряд Фурье. Для этого умножим матричное уравнение (23) справа на матрицу преобразования Фурье, а матрицу X – справа на единичную матрицу $E=FF^{-1}$. Тогда уравнение (23) преобразуется к виду

$$YF = XFF^{-1}HF. \quad (24)$$

Поскольку YF – матрица коэффициентов преобразования Фурье ансамбля выходных функций $y_{i,k}$, XFF^{-1} – диагональная матрица коэффициентов гармонических функций, а $F^{-1}HF$ – двумерное преобразование ординат неизвестного оператора H , то матричное уравнение (24) можно записать как

$$|S_y(j\omega_k)| = \text{diag}|S_x(j\omega_k)||S_h(j\omega_k)|. \quad (25)$$

Чтобы вычислить комплексный спектр оператора H , умножим слева уравнение (25) на матрицу, обратную диагональной. Тогда

$$|S_h(j\omega_k)| = \text{diag}|S_x^{-1}(j\omega_k)||S_y(j\omega_k)|,$$

а оператор H исследуемой нелинейной системы – результат обратного двумерного преобразования Фурье матрицы $|S_h(j\omega_k)|$:

$$H = F|S_h(j\omega_k)|F^{-1}. \quad (26)$$

Таким образом, для частотно-зависимых систем, обладающих высокой степенью нелинейности, в качестве аналитической модели может быть использовано дифференциальное уравнение (21), а в качестве модели типа «черный ящик» – матричное уравнение (23), для которого оператор H вычисляется с помощью соотношения (26).

3. Методика подготовки и проведения эксперимента. Как уже отмечено в настоящей работе, эксперимент является основным объективным источником информации, обеспечивающей возможность построения адекватных моделей деталей, узлов, систем и основных сборочных единиц проектируемого изделия. Для механических конструкций эксперимент является способом исследования их поведения в условиях динамического нагружения.

По своему назначению испытания подразделяют на эксплуатационные и стендовые, натурные и виртуальные, доводочные и приемочные, ресурсные и исследовательские. По характеру подготовки и методам осуществления испытания, проводимые с целью получения экспериментальной информации, на основании которой будут разработаны динамические модели механических конструкций, можно отнести к исследовательским. Они позволяют на основе измеренной информации выполнить классификацию исследуемого объекта, получить параметры, характеризующие его механические свойства и математическое описание механических процессов, преобразующих вынужденные механические колебания в реакцию системы. Методика проведения испытаний изложена в [2], где показано, что на вход динамического объекта в процессе эксперимента следует подавать силовое нагружение в виде гармонических функций. Это позволяет исключить взаимное влияние частот при построении оператора нелинейных систем (соотношения (23)–(26)).

Процесс планирования эксперимента включает в себя разработку схемы стендовых испытаний, на основании которой изготавливается оснастка для крепления объекта испытаний, осуществляется выбор нагружающих устройств и режимов испытаний. Все перечисленные мероприятия являются основой для разработки схемы установки датчиков и разработки алгоритмов обработки экспериментальной информации.

Испытания проводятся в соответствии с программой и методикой, основой которой являются методы, изложенные в отраслевых и государственных стандартах на испытания исследуемого объекта, а также конструкторская документация, кинематическая схема и схема нагружения.

Ввиду того, что стенд, являясь динамической системой, искажает управляющий сигнал, поданный на его исполнительные органы с помощью устройства связи с объектом, то для исключения этого влияния на результат вычисления оператора используется реальная функция нагружения, измеренная дополнительным специально установленным датчиком.

С целью поддержания высокой степени достоверности измерительного процесса следует соблюдать всю технологию подготовки и проведения стендовых испытаний, выполнять поверку цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей и тарировку датчиков.

Таким образом, в процессе эксперимента достаточно измерить входные последовательности в виде гармонической функции в заданной полосе частот ($0; \omega_{\text{высш}}$) и ансамбль реализаций реакции системы на входные воздействия. Обработку полученной цифровой информации наиболее целесообразно проводить, используя частотные методы, что на порядок ускорит вычисление результатов за счет применения «быстрого преобразования Фурье». При использовании результатов обработки экспериментальной информации АЧХ и ФЧХ исследуемая система может быть отнесена к одному из классов, что и дает возможность построения математической модели.

4. Исследование адекватности отображения модели реальному объекту. Проверка адекватности модели осуществляется в режиме сравнительных испытаний. Для их организации необходимо разработать модели виртуальных стендов, которые с учетом принципа максимального правдоподобия должны соответствовать схеме эксперимента, разработанной для стендовых испытаний.

Рассмотрим основные принципы проведения таких испытаний на примере исследования колебаний стойки длинноходовой рычажной подвески, у которой в качестве упругого и демпфирующего элемента используются пружина и амортизатор, допускающие возможность перемещения ступицы колеса в пределах ± 250 мм.

Техническое оснащение стендовых испытаний выполнено с использованием оборудования испытательного комплекса фирмы SHENK (Германия). Процесс управления экспериментом осуществляется цифровым многоканальным управляющим комплексом. Оцифровка информации с датчиков и подача управляющих процессов на исполнительные органы стенда выполнены многоканальными синхронными аналого-цифровыми и цифроаналоговыми преобразователями.

Испытания проводились в режиме вынужденных колебаний. Поэтому исследуемый объект (амортизатор, пружина, стойка подвески) устанавливался в замкнутый контур оснастки, колебания в котором выполнял гидравлический цилиндр. Процессы управления колебаниями и изме-

рения возникающего силового нагружения синхронизированы, что позволило с высокой точностью определить фазовые характеристики.

В режиме виртуальных испытаний динамических моделей должны соблюдаться все перечисленные условия. Поэтому динамические модели стенов, разработанные в пакете ADAMS [5] в соответствии со схемой эксперимента, полностью повторяют кинематические и динамические свойства процесса проведения реальных испытаний.

В режиме виртуальных испытаний функции перемещения формировались сплайнами третьего и четвертого порядков при учете кинематических законов движения элементов объекта испытания.

В процессе разработки моделей исследуемых объектов по результатам стендовых испытаний получены:

рабочая диаграмма пружины (рис. 1, а) для перемещения поршня стенов в пределах $\pm 0,25$ м на частотах колебаний 2,91; 3,36; 4,0; 5,38 Гц;

рабочая диаграмма амортизатора (рис. 1, б) для перемещения поршня стенов в пределах $\pm 0,25$ м на частотах колебаний от 0,24 до 1,7 Гц;

характеристика амортизатора, график которой построен на максимальных скоростях перемещений (рис. 1, в);

характеристика стойки подвески в сборе (рис. 1, г).

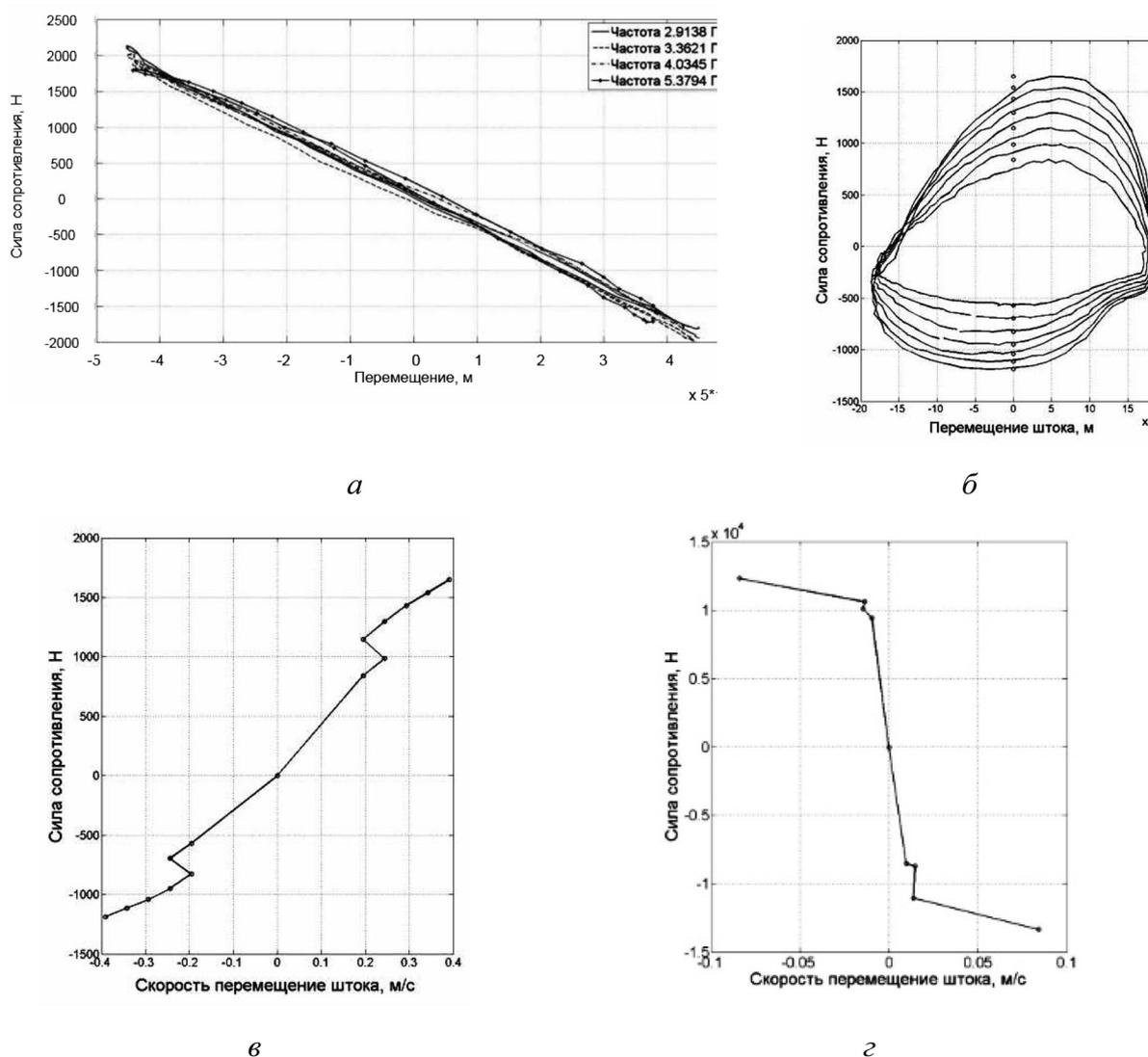


Рис. 1. Функциональные зависимости упругой силы пружины от величины перемещения (а); рабочая диаграмма амортизатора (б); характеристика амортизатора (в); характеристика стойки подвески в сборе (г)

Как следует из рис. 1, *в*, *г*, угол наклона характеристики стойки подвески на 45 град больше, чем у амортизатора. Это связано с очень высокой жесткостью пружины, у которой наклон рабочей диаграммы более 130 град.

В процессе выполнения сравнительных испытаний вычислены:

импульсная переходная характеристика пружины;

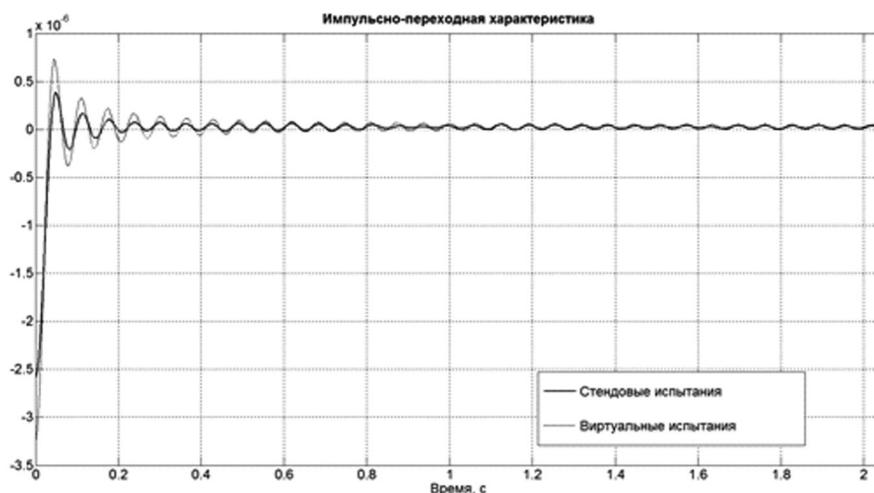
импульсная переходная характеристика амортизатора;

импульсная переходная характеристика стойки подвески в сборе при статическом нагружении 4,5 т;

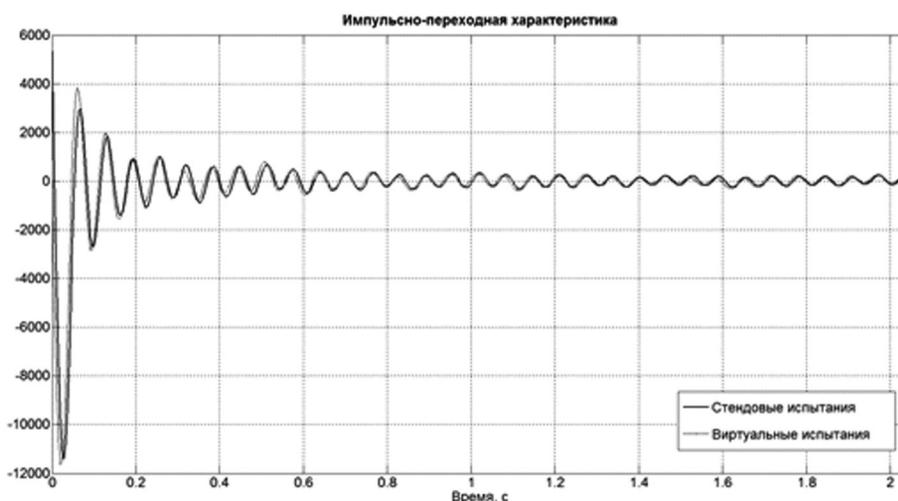
импульсная переходная характеристика стойки подвески в сборе при статическом нагружении 2,15 т.

Вычисленные по результатам виртуальных испытаний характеристики моделей исследуемых объектов использованы при моделировании перечисленных выше объектов. Результаты сравнения приведены на графиках (рис. 2, 3), из которых следует, что характеристики, полученные по результатам стендовых и виртуальных испытаний, хорошо совпадают как по частотам, так и по характеру затухания колебаний.

Численные результаты сравнительного анализа сведены в таблицу, где приведены как сами значения параметров, так и величины погрешностей их вычисления. Максимальная величина

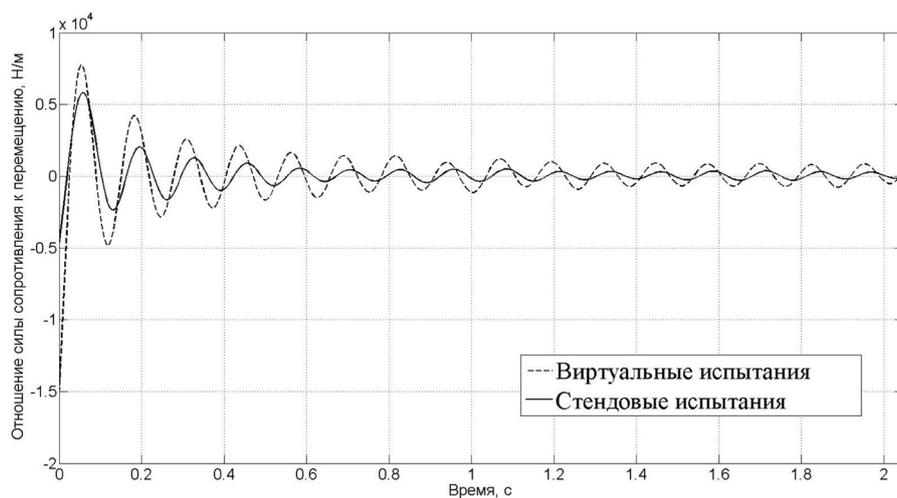


а

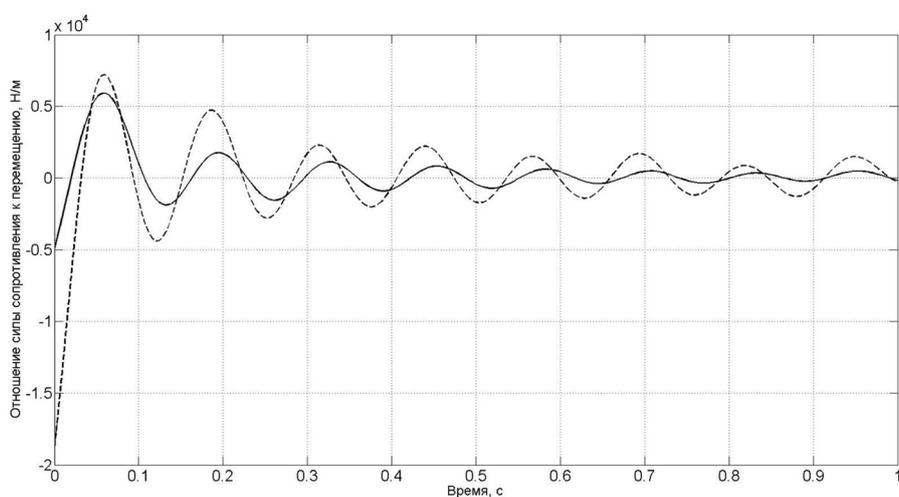


б

Рис. 2. Импульсные переходные характеристики элементов подвески: *а* – пружина; *б* – амортизатор



а



б

Рис. 3. Импульсная переходная характеристика стойки подвески: а, б – при статическом нагружении 2,15 и 4 т соответственно

погрешности не превосходит 9%. Исследуемая модель нелинейная. Для построения импульсных переходных характеристик она линеаризована и, как видно из таблицы, в результате линеаризации получены приемлемые модели.

На рис. 4 приведена аппроксимация по методу наименьших квадратов нелинейной характеристики амортизатора, полученной по результатам нагружения гармоническими функциями во

Сравнительный анализ результатов стендовых и виртуальных испытаний

Элемент подвески	T_0, c		Погрешность, %	$\omega_0, \text{рад/с}$		Погрешность, %	λ		Погрешность, %	β, c^{-1}		Погрешность, %
	стенд.	вирт.		стенд.	вирт.		стенд.	вирт.		стенд.	вирт.	
Пружина	0,058	0,0587	1,192	108,33	107,1	1,135	0,0976	0,0913	6,455	1,683	1,555	7,605
Амортизатор	0,0643	0,0587	8,709	97,666	107,1	8,808	0,0949	0,0917	3,372	1,476	1,563	5,566
Подвеска в сборе (статика 4,5 т)	0,128	0,127	0,781	49,1	49,5	0,808	0,45	0,42	6,667	3,516	3,307	5,944
Подвеска в сборе (статика 2,15 т)	0,129	0,127	1,551	48,8	49,5	1,414	0,38	0,3	7,895	2,946	2,756	6,449

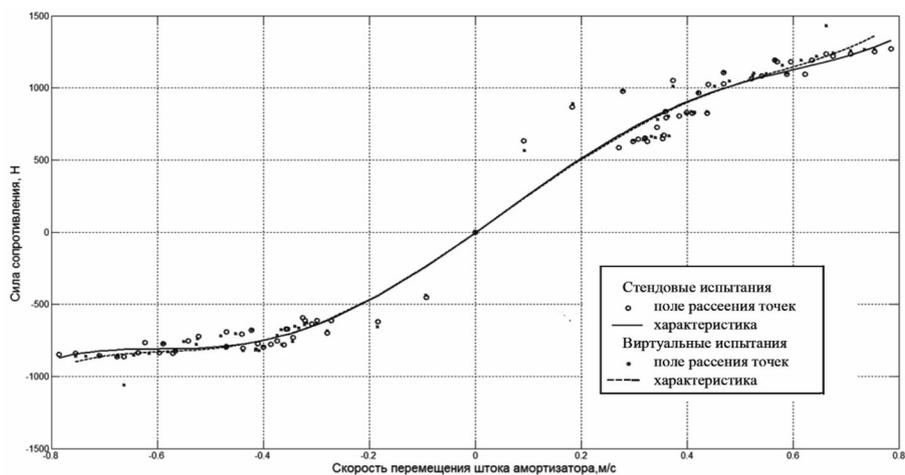


Рис. 4. Характеристики амортизатора, полученные по результатам стендовых и виртуальных испытаний

всем диапазоне частот от 0,6 до 14 Гц с помощью полинома четвертой степени. Как видно из рисунка, точность приближения результатов виртуальных испытаний к стендовым очень высокая.

Заключение. В работе изложены основные положения теории верификации математических моделей машиностроительных конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок. Показано, что на практике в качестве математической модели используется аналитическое представление механических и физических свойств моделируемых объектов, которое, как правило, использует для описания динамики дифференциальные уравнения. Выполнена классификация колебательных систем в соответствии с их механическими свойствами, полученными в результате эксперимента. Приведено теоретическое обоснование моделей колебательных систем как при классическом их описании, так и с использованием метода «черного ящика».

Предложены методы и алгоритмы, позволяющие по результатам эксперимента вычислить параметры математического представления аналитических моделей и операторы системы, связывающие ее вход и выход. Показано, что использование частотных методов анализа позволяет достаточно эффективно исследовать системы с памятью, что в итоге однозначно формирует математическое представление их моделей. Получено теоретическое обоснование математического описания нелинейных систем с памятью. На примере исследования длинноходовой подвески продемонстрировано использование полученных результатов на практике.

Список использованной литературы

1. Методы определения динамических характеристик упругих элементов подвески по экспериментальным данным / В. С. Кончак [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 2. – С. 20–25.
2. Методика подготовки исходных данных для разработки динамических моделей автомобильных конструкций / В. С. Кончак, С. В. Хитриков, С. П. Лазакович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 1. – С. 60–68.
3. Определение параметров одномассовых колебательных систем по результатам экспериментальных исследований / В. С. Кончак // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 2. – С. 76–82.
4. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – М., 1991. – 255 с.
5. Верификация компьютерных моделей элементов рычажной длинноходовой подвески по результатам стендовых испытаний / В. С. Кончак [и др.] // Информатика. – 2013. – № 3. – С. 115–125.

Поступила в редакцию 20.12.2015

УДК 621.719.048.4

О. В. КАЛЕНЧУКОВА, П. К. НАГУЛА, Д. Л. ТРЕТИННИКОВ

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ,
ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ
НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: kalenchukova@gmail.com*

Приводятся результаты исследований процессов электролитно-плазменной полировки (ЭПП) при помощи анализа 3–6 %-ного электролита водного раствора сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и твердого осадка при электролитно-плазменной обработке (ЭПО) нержавеющей сталей 12X18H10T (AISI 321) и 03X16H15M3 (AISI 316L). Приведены экспериментально полученные вольт-амперные и вольт-температурные характеристики анода при ЭПП. Предпринята попытка с помощью физико-химических моделей и закономерностей объяснить процессы, происходящие в парогазовой оболочке при ЭПП. Проведенные исследования химического состава электролита и осадка подтвердили физико-химическую природу съема материала при ЭПП.

Ключевые слова: обработка, анодный нагрев, полировка, электролитно-плазменная полировка, шероховатость поверхности, химический анализ.

O. V. KALENCHUKOVA, P. K. NAGULA, D. L. TRETINNIKOV

**SOME FEATURES OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OCCURRING DURING
ELECTROLYTIC-PLASMA PROCESSING OF STAINLESS STEELS**

*The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: kalenchukova@gmail.com*

The results of research of the processes of electrolytic-plasma polishing using analysis of 3–6% of the electrolyte aqueous solution of ammonium sulfate $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and the solid residue in the EPO of stainless steels AISI 321 and AISI 316L are presented. Based on research and experience, a model analyzes the origin, development of vapor-gas shell in time, formation of a solid precipitate and changing of the chemical composition of the electrolyte. The results of studies of the chemical composition of the electrolyte and sludge confirm the physicochemical nature of material removal at electrolytic-plasma polishing.

Keywords: processing, anode heating, polishing, electrolytic-plasma polishing, surface roughness, chemical analysis.

Введение. Одним из самых распространенных способов обработки поверхностей деталей является полировка. Данный способ придает изделиям декоративный блеск, а также используется при подготовке поверхностей для нанесения покрытий.

Известные способы поверхностной обработки металлов можно разделить на три группы: механическая, химическая и электрохимическая. Среди электрохимических методов обработки поверхности особо выделяют ЭПО [1]. В настоящее время технология процесса обработки деталей этим методом до конца не изучена и находится на стадии исследований.

В [1] рассмотрены явления катодного и анодного нагрева токопроводящих материалов в водных растворах электролитов, процессы локального вскипания электролитов в окрестности электрода с малой поверхностью, формирования сплошной и устойчивой парогазовой оболочки, ее электрическая проводимость, теплофизические и электрохимические аспекты анодного варианта нагрева.

В [2–4] изучены явления катодного нагрева металлических деталей для удаления с их поверхностей различных видов загрязнений и смазочных веществ для дальнейшего упрочнения

поверхностей деталей и нанесения разного рода металлических покрытий (Zn, Ni, Zn–Ni, Ni–Cu и т. д.). В [5, 6] обобщены результаты исследований, проведенных за последние годы в области ЭПО металлов и сплавов. Приводятся основные особенности технологии ЭПП и представлены новые научные и практические результаты по исследованию обработки различных материалов данным методом.

Несмотря на неоспоримый прогресс в этой области, исследователи еще не имеют четкого представления о механизме удаления микрошероховатости с металлической поверхности детали в процессе ЭПП, а также нет точного представления, что же является «рабочим инструментом», за счет чего проявляется эффект сглаживания металлической поверхности.

В Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси проводится комплекс исследований в теоретической и экспериментальной областях по изучению физическо-химического воздействия слабых водных растворов электролитов на металлы и сплавы под действием постоянного электрического напряжения.

В данной статье приводятся результаты исследований процессов ЭПП при анализе 3–6 %-ного электролита водного раствора сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и твердого осадка при ЭПО нержавеющей стали 12X18H10T и 03X16H15M3. На основе результатов исследований [1–7] анализируются модели развития паровой оболочки во времени, образования твердого осадка и изменения химического состава электролита.

Описание процесса электролитно-плазменного полирования. Суть метода ЭПП заключается в том, что к погруженному в водный раствор электролита обрабатываемому металлическому изделию прикладывается положительный полюс источника тока повышенного напряжения, а отрицательный полюс – к металлической ванне, в которой находится электролит. Вокруг изделия, погруженного в электролит, образуется тонкая парогазовая подушка, а величина напряженности электрического поля резко возрастает до уровня, когда химические, ковалентные, металлические и другие связи разрушаются и возникают знакопеременные окислительно-восстановительные процессы, которые переводят элементы, находящиеся в поверхностном слое, в соединения, легко отделяющиеся от поверхности [6].

Зависимость плотности тока от приложенного напряжения приводится на рис. 1, а [1, 7]. При небольших напряжениях прохождение тока в объеме раствора описывается законом Ома, а процессы на электродах – законами Фарадея (участок *AB*) без каких-либо оптических или акустических эффектов. Рост величины напряжения приводит к разогреву электролита преимущественно в прианодной зоне. На участке *BC* имеет место режим прерываний тока. Прохождение тока приобретает неустойчивый характер из-за того, что слой пара, окружающий анод, периодически конденсируется или выходит вдоль анода на поверхность и снова образуется. Причиной разрушения оболочки является электрический пробой пара, вызывающий ее взрывное расширение и последующую конденсацию. Искровые разряды создают прерывистое свечение, возникновение и исчезновение оболочки сопровождаются шумом. В точке *C* парогазовая оболочка становится устойчивой, через нее проходит постоянный ток с небольшими пульсациями. Температура анода резко возрастает. Участок *CD* представляет собой режим высокотемпературного нагрева. С повышением напряжения плотность тока падает, поскольку толщина парогазовой оболочки увеличивается, следовательно, ее электросопротивление возрастает. На участке *DE*

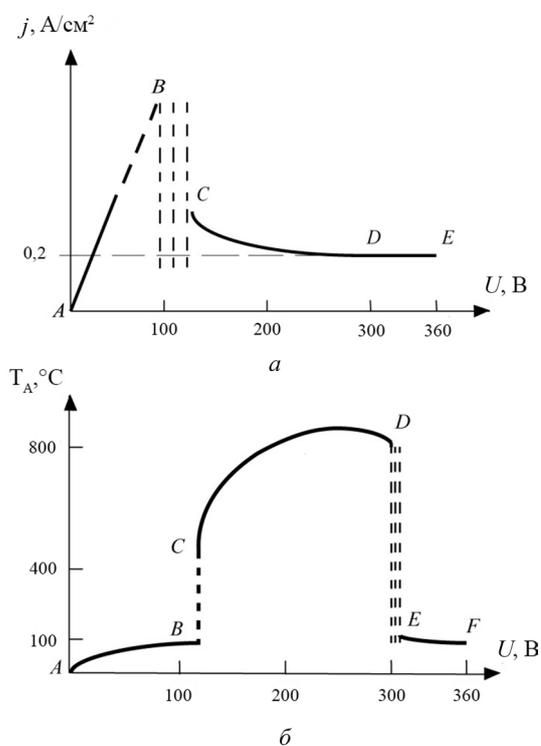


Рис. 1. Вольт-амперная (а) и вольт-температурная (б) характеристики процесса ЭПП на аноде

происходит стабилизация плотности тока и начинается процесс ЭПП. При этом значение плотности тока находится в интервале от 0,2 до 0,5 А/см², в процессе обработки деталей эта величина постепенно уменьшается.

Зависимость температуры на аноде от напряжения (вольт-температурная характеристика) имеет максимум при напряжениях 260–280 В (рис. 1, б). При меньших значениях напряжения возрастание температуры анода объясняется увеличением мощности, выделяемой в парогазовой оболочке. В точке *D* температура анода резко снижается. На участке *EF* происходит уменьшение температуры, выравнивание ее значения, которое стремится к температуре электролита, возникает устойчивый режим полировки изделия, следовательно, сильного разогрева обрабатываемых образцов в процессе ЭПО не происходит.

Химико-физическая модель паровой оболочки. Авторы [2, 7] попытались объяснить процессы, происходящие в парогазовой оболочке при ЭПП. Ими разработана модель паровой оболочки, которая в свою очередь позволяет выявить необходимые параметры оболочки, с помощью которых можно управлять процессом. Чтобы в процессе ЭПО происходило снижение шероховатости путем съема микровыступов с поверхности детали, на аноде должен поддерживаться пленочный тип кипения электролита [7].

Авторы [2,7] предполагают, что в процессе нагрева электролита, когда происходит существенное увеличение температуры поверхности анода возможно оплавление поверхностного слоя. Исследования, проводимые в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси, не выявили оплавления поверхности в процессе ЭПП.

Согласно микроскопическому исследованию поверхности обработанных образцов [8], с их поверхности происходит съем поверхностного слоя материала с удалением α - и α' -фаз, в результате этого увеличивается количество γ -фаз в объеме материала. Напряженность электрического тока на микровыступах максимальная (рис. 2). При прохождении тока через электролит у поверхности анода образуется жидкий слой из продуктов анодного растворения, имеющий повышенную вязкость и большое электрическое сопротивление. Толщина вязкой жидкой пленки неодинакова на различных участках шероховатой поверхности: в углублениях она больше (h_1), чем на выступах (h_2).

Вследствие того что поверхность твердого тела на микроуровне является неровной, в процессе полировки происходят постоянные изменения напряженности, следовательно, и распределе-

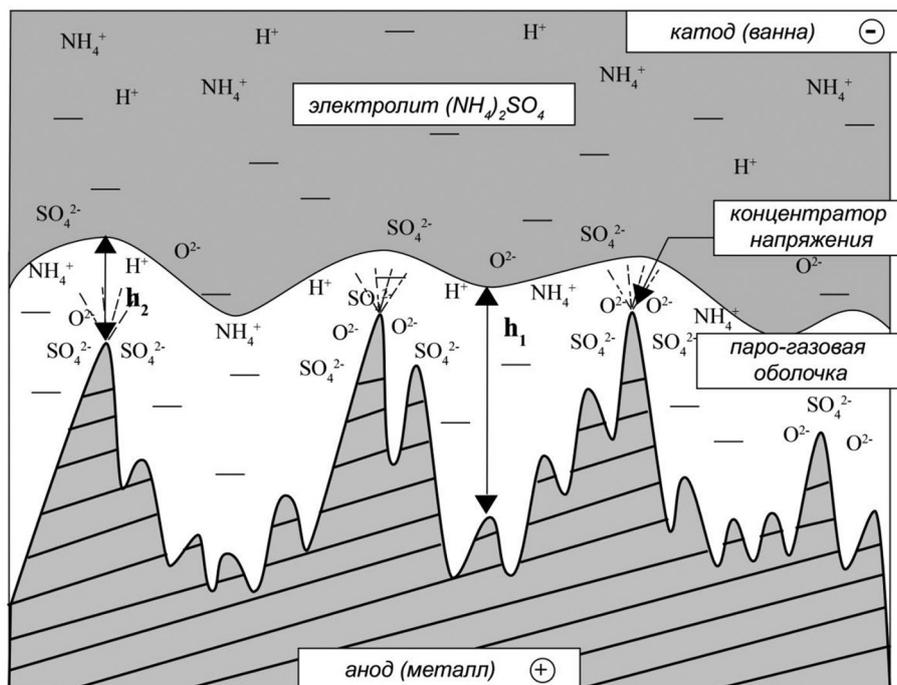


Рис. 2. Механизм ЭПП

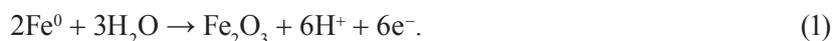
ние электрического тока на поверхности неравномерно. На выступах устанавливается более высокая плотность тока, чем на впадинах. Поэтому выступы растворяются более интенсивно, что в конечном счете ведет к выравниванию шероховатой поверхности.

Исследования [9] показывают, что процесс ЭПП имеет место, когда скорость формирования оксидной пленки можно сопоставить со скоростью ее разрушения за счет сложных гидрогазодинамических процессов, происходящих в приповерхностном слое образца. Наименьшая шероховатость поверхности детали достигается при минимальной толщине оксидной пленки, которая должна быть достаточной для предотвращения травящего действия электролита.

Физико-химические процессы, происходящие при образовании твердого осадка. Присутствующие на поверхности металла дефекты (свободные узлы решетки, которые должны быть заняты атомами железа; узлы, принадлежащие атомам кислорода, занятые атомами железа) облегчают диффузионную подвижность атомов железа, которые могут перемещаться к поверхности, создавать новые оксиды и ускорять процесс окисления [1, 7].

Если рассматривать состав оксидного слоя, образующегося в процессе полирования, то он весьма неодинаков по толщине. Оксид железа от внешнего слоя к внутреннему состоит из оксидов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , а у поверхности металла – из закиси FeO [10].

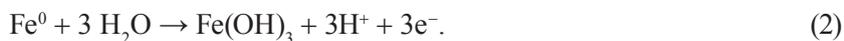
Окисление железа может проходить по следующей реакции:



Железо с поверхности анода растворяется с образованием как Fe^{2+} , так и Fe^{3+} :



Предпочтительным является механизм растворения с образованием Fe^{2+} как промежуточной стадии, так как этому процессу отвечает меньшее значение электрохимического потенциала. Поскольку ионов железа Fe^{2+} в растворе не обнаружено, то необходимо учитывать одновременное протекание нескольких электрохимических реакций. В общей форме реакция растворения стального анода может быть записана таким образом:



Здесь $Fe(OH)_3$ – идеализированная запись множественных форм $Fe_2O_3(H_2O)_x$ и $FeOOH(H_2O)_x$. Образование ионов водорода в реакциях (1), (2) может служить основанием обнаруженного подкисления электролита [1].

Аналогичные реакции окисления можно записать для Ni^{2+} и Cr^{3+} . Окисление хрома может протекать по следующей реакции:



Хром с поверхности анода может растворяться с образованием как Cr^{2+} , так и Cr^{3+} . Наиболее устойчивым при высоких температурах является Cr^{3+} , т. е. в осадок выпадает оксид хрома (III) – Cr_2O_3 .

Окисление никеля протекает по следующей реакции:



Никель в процессе ЭПП чаще всего окисляется до Ni^{2+} . Оксид никеля (III) Ni_2O_3 является сильным окислителем и в кислой среде электролита существовать не может.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Метод ЭПО влияет на поверхность обрабатываемого материала, модифицирует ее и придает другие свойства. В результате обработки материал изменяет свою микроструктуру в приповерхностном слое, параметры шероховатости и микротвердости.

В настоящей работе обработке подвергались образцы, выполненные из коррозионно-стойких сталей 12X18H10T и 03X16H15M3 (ГОСТ 5632–72), химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сталей 12Х18Н10Т, 03Х16Н15М3

Элемент	Массовая доля элементов, %	
	12Х18Н10Т	03Х16Н15М3
Fe	67	64
Cr	17,0–19,0	15,0–17,0
Ni	8,0–9,5	14,0–16,0
Mn	Не более 2,0	Не более 0,8
Si	Не более 0,8	Не более 0,6
Cu	Не более 0,3	–
Ti	5·С–0,8	–
S	0,02	Не более 0,015
F	0,035	Не более 0,020
Mo	–	2,5–3,0
Nb	–	0,25–0,50

В процессе ЭПП, согласно приведенной выше модели, происходит съем верхнего слоя, следовательно, в раствор переходят ионы металлов. Поскольку основными компонентами сталей 12Х18Н10Т и 03Х16Н15М3 являются Fe, Cr, Ni, то в отработанном растворе и твердом осадке следует ожидать данные элементы и их соединения. При этом суммарное содержание пропорционально количеству этих элементов в стали. Исследование элементного состава твердого осадка и отработанного раствора позволило проверить достоверность предполагаемых физико-химических процессов, происходящих при ЭПП.

Перед обработкой образцов методом ЭПП и после нее измерялись значения шероховатости с помощью профилометра TR200. В результате ЭПО шероховатость Ra поверхности уменьшается с 0,2–0,3 до 0,05–0,06 мкм.

Исследование химического состава отработанного раствора сульфата аммония. Анализ элементного состава образца отработанного раствора сульфата аммония после ЭПП проведен в Испытательном центре Института порошковой металлургии НАН Беларуси. Элементный состав данного раствора после ЭПП исследовали на аттестованном атомно-эмиссионном спектрометре с индукционно связанной плазмой «ACTIVA M» (Франция) (свидетельство о поверке от 20.09.2014 № 29348–50). Погрешность метода составляет 3–5%. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание элементов в отработанном растворе сульфата аммония после ЭПП

Элемент	Концентрация, мг/л
Ni	209
Cr	70
Ca	40
Si	31
Mn	26
Fe	13
K	9
Cu	4
Co	3
Zn	Менее 1

Анализ данных, полученных в результате исследования элементного состава отработанного раствора сульфата аммония после ЭПП, показывает, что в большом количестве в растворе присутствуют ионы Ni, Cr, Fe и Mn, которые поступают в него с поверхностного слоя обрабатываемого материала. Поскольку отработанный раствор имеет кислую среду ($pH = 2,2$), то, исходя из констант диссоциации ионов Fe^{3+} и Cr^{3+} , почти все ионы Fe^{3+} и частично ионы Cr^{3+} связываются с оксидом и выпадают в осадок. Константа диссоциации для Ni^{2+} значительно выше, поэтому ионы Ni в основном остаются в растворе в виде гидросокомплексов.

Исследование химического состава осадка. Анализ элементного и фазового составов твердого осадка, образующегося после ЭПП, проведен в Испытательном центре Института порошковой металлургии НАН Беларуси. Исследование элементного состава проводилось на аттестованном рентгенофлуоресцентном спектрометре ED 2000 (свидетельство о калибровке ВУ 01 № 451-50К БелГИМ от 26.12.2012 г.), а фазового состава – на дифрактометре рентгеновском ДРОН-3 в CuK_α -излучении.

Таблица 3. Химический состав пробы твердого осадка, образующегося после ЭПП

Элемент	Массовая доля, %	Относительная погрешность, %	
Переходящий в раствор и осадок из сталей	Fe	66,18	0,12
	Cr	11,38	0,19
	Ni	0,9	0,02
	S	18,1	0,24
	Si	0,93	0,07
	Cu	0,26	0,01
	Ti	0,58	0,02
	Mn	0,08	0,03
	Mo	1,04	0,01
Являющийся примесью к воде, сульфату аммония и т. п.	V	0,09	0,01
	P	0,23	0,05
	Ca	0,13	0,01
	Zn	0,09	0,01
	As	0,014	$1,66 \cdot 10^{-3}$
	Nb	0,014	$2,51 \cdot 10^{-3}$

В табл. 3 приведены результаты анализа химического состава осадка. При анализе данных таблицы следует отметить, что часть элементов (Fe, Cr, S, Ni, Ti, Cu, Mo, Si, Mn) переходит в раствор, следовательно, и в осадок посредством съема верхнего слоя стали в процессе ЭПП. Согласно [8], при изменении концентрации электролита (4, 6, 8%) при постоянной температуре 80 °С происходят незначительные изменения структуры и фазового состава со съемом поверхностного слоя материала от 10 до 30 мкм, глубина разупрочненного слоя 100 мкм. При увеличении температуры от 40 до 98 °С при постоянной концентрации электролита 4% происходит уменьшение количества α - и α' -фаз с увеличением глубины поверхностного разупрочненного слоя от 60 до 120 мкм. Следует также отметить, что в результате анализа выявлен ряд примесей (V, P, Ca, Zn,

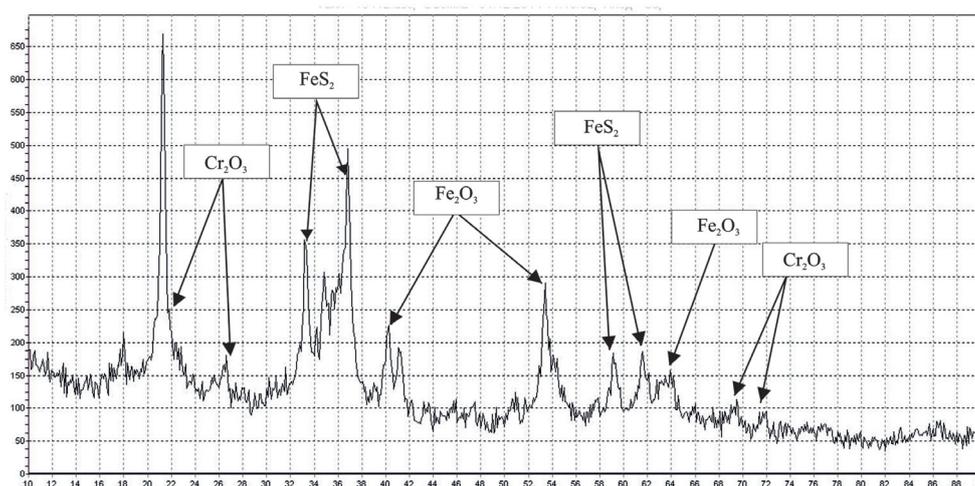


Рис. 3. Рентгенограмма исследуемого образца сухого осадка после ЭПП: начальный угол перемещения детектора 10°, конечный угол 90°; шаг перемещения детектора при ступенчатом режиме 0,1; скорость вращения детектора 16 град/мин; основная аппаратная погрешность измерения скорости счета импульсов рентгеновского излучения не более 0,5%

As, Nb), попадающих в раствор из воды, соли сульфата аммония и другими способами. Погрешность метода определения составила 8–10 %.

На рис. 3 приведена рентгенограмма исследуемого образца сухого осадка после ЭПП, где обозначены наиболее интенсивные пики Cr_2O_3 , FeS_2 и Fe_2O_3 . В результате анализа элементного и фазового составов твердого осадка, образующегося после ЭПП, проведенного на рентгенофлуоресцентном спектрометре ED 2000 и дифрактометре рентгеновском ДРОН-3 в CuK_α -излучении, выявлено, что в осадок в основном выпадают Fe и Cr в связанных формах (оксид, сульфид), а также в незначительных количествах имеются Ni, Ti, Cu, Mo, Si, Mn, присутствующие в осадке в виде оксидов, сульфидов и других соединений.

Закключение. Приводятся данные о распределении основных элементов, переходящих в раствор в процессе ЭПП, между фильтратом и осадком. Найдено, что Fe^{3+} находится в основном в осадке, а Mn, Cr^{3+} распределяются между осадком и фильтратом, что свидетельствует об их большей растворимости вследствие возможного образования анионных форм. Особенно это характерно для Cr^{3+} , содержание которого в фильтрате в 20–30 раз больше, чем в осадке. Подобное явление может быть вызвано образованием коллоидов. Никель Ni^{2+} в основном находится в растворе в виде ионных форм, также возможно образование гидроксокомплексов. Результаты исследований химического состава электролита и осадка подтвердили физико-химическую природу съема материала при электролитно-плазменной полировке.

Список использованной литературы

1. Суминов, И. В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И. В. Суминов. – М.: Техносфера, 2011. – Т. I.
2. Electrolytic plasma technology: Science and engineering / P. Gupta [et al.] // *An overview, Surface & Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 201. – P. 8746–8760.
3. Plasma electrolysis for surface engineering / A. L. Yerokhin [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. – 1999. – Vol. 122. – P. 73–93.
4. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel / E. I. Meletis [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 150. – P. 246–256.
5. Куликов, И. С. Особенности электро-импульсного полирования металлов в электролитной плазме / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, В. И. Василевский // *Весті НАН Беларусі*. – 1995. – № 4. – С. 93–98.
6. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 231с.
7. Смыслов, А. М. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности / А. М. Смыслов, Н. В. Плотников, Д. Р. Таминдаров // *Сб. ст.* – Уфа: УГАТУ, 2013. – Т. 17. – № 4 (57). – С. 90–95.
8. Исследование влияния различных температур и концентраций электролита при электролитно-плазменной обработке на состав, структуру и свойства нержавеющей стали 12X18H9 / А. Ф. Ильющенко [и др.] // *Весті НАН Беларусі*. – 2009. – № 3. – С. 14–19.
9. Грилихес, С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С. Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1983. – 101 с.
10. Пяндрина, Т. Н. Электрохимическая обработка металлов / Т. Н. Пяндрина. – Л.: Машгиз, 1961. – 70 с.

Поступила в редакцию 15.10.2015

УДК 614.842.615+52-17

А. Н. КАМЛЮК¹, А. В. ШИРКО², А. В. ГРАЧУЛИН¹

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЕНЫ
ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМУ КАНАЛУ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ**

¹*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь,*

²*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: kan@kii.gov.by, a.shirko103@gmail.com, Grachulin_A@mail.ru*

Методом конечных объемов описано движение пены по рукавной линии пеногенерирующей системы со сжатым воздухом. Определена расчетная область и сформулированы граничные условия численного моделирования. Дана оценка числа Рейнольдса для этого потока и выбрана модель турбулентности. Определены и проанализированы характеристики потока газожидкостной смеси в каждом поперечном сечении канала. Установлены частные выражения для расчета потерь давления, а также изменения величин плотности и скорости газожидкостной смеси по длине канала.

Ключевые слова: пеногенерирующие системы со сжатым воздухом, движение газожидкостной смеси, численное моделирование, метод конечных объемов, потери давления.

A. N. KAMLUK¹, A. V. SHIRKO², A. V. GRACHULIN¹

**NUMERICAL SIMULATION OF MOTION OF FOAM IN
A HORIZONTAL CYLINDRICAL CHANNEL BY FINITE VOLUME METHOD**

¹*The Institute for Command Engineers of the Ministry of Emergencies, Minsk, Belarus,*

²*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,
e-mail: kan@kii.gov.by, a.shirko103@gmail.com, Grachulin_A@mail.ru*

A description of motion of foam in hose line of compressed air foam system by finite volume method is presented. Computational domain and formulated boundary conditions of numerical simulation is determined. We assessed the Reynolds number for the flow and selected a turbulence model. The flow characteristics of the gas-liquid mixture in each cross section of the channel are determined and analyzed. Expression to calculate the pressure loss, as well as changes of values of density and velocity of the gas-liquid mixture along the channel is determined.

Keywords: compressed air foam system, motion of gas-liquid mixture, numerical simulation, finite volume method, pressure drop.

Введение. Вода – основное огнетушащее вещество, используемое при ликвидации пожаров на территории Республики Беларусь. Наряду с такими преимуществами ее применения в целях пожаротушения, как низкая стоимость и экологическая безвредность, существует и ряд недостатков. Из-за высокого поверхностного натяжения вода обладает низкой смачивающей способностью, вследствие чего быстро стекает с горящих объектов, и значительная часть ее не участвует в процессе тушения. В связи с этим приходится увеличивать интенсивность подачи и расход воды. Как следствие, возрастает экономическая составляющая ущерба, связанная с порчей материальных ценностей, вызванной излишним проливом воды.

Значительно увеличить огнетушащую эффективность воды возможно путем повышения смачивающей способности посредством использования пенообразователей (ПО) на основе поверхностно-активных веществ. Растворы ПО при смешении с водой и воздухом позволяют получить устойчивую пену различной кратности. Пены широко используются при тушении пожаров на промышленных предприятиях, складах нефти и ее производных. К достоинствам пен следует

отнести сокращение расхода воды и возможность тушения больших площадей (пена растекается по поверхности горючего материала) [1].

В настоящее время для получения воздушно-механической пены низкой кратности и подачи ее на тушение пожара используются воздушно-пенные стволы, стволы высокого давления с пенными насадками, стволы многофункциональные ручные, лафетные стволы с соответствующими характеристиками. В автоматических установках пенного пожаротушения с той же целью используются генераторы пены низкой кратности и пенные оросители.

Альтернативным способом получения пены низкой кратности является использование пеногенерирующих систем со сжатым воздухом (ПССВ). Принцип действия ПССВ заключается в принудительном введении воздуха в поток раствора воды и ПО с помощью компрессора (получение компрессионной пены). Далее пена по рукавной линии подается непосредственно на тушение пожара. За рубежом подобные системы называются compressed air foam system (CAFS).

Основными компонентами ПССВ являются центробежный насос, источник воды (цистерна), источник ПО (бак для ПО), воздушный компрессор, система дозирования с прямым впрыском ПО на выходе из центробежного насоса, смесительная камера и устройство контроля смешивания ПО, воды и воздуха в требуемых пропорциях. В отличие от стандартных насосных установок в ПССВ по рукавной линии подается газожидкостная смесь (пена). Применение данной системы при тушении пожаров имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными технологиями: экономичность, многофункциональность, высокая эффективность [2–5].

Однако для эффективного применения ПССВ требуется методика расчета потерь давления в насосно-рукавной системе при подаче пены. Она должна опираться на математические модели, описывающие движение пены по этой системе, которые позволят определять характеристики потока с учетом многообразия факторов, влияющих на взаимодействие жидкой и газообразной фаз.

Двухфазные потоки имеют поверхность раздела между фазами, которая изменяется в пространстве и во времени. Для их описания используется классификация всех типов поверхности раздела по структурам с визуально-похожими формами границы раздела. На основании визуальных наблюдений обнаружено множество различных структур потока и предложено соответствующее количество наименований. В [6] авторы различают ряд основных структур: пузырьковую, расслоенную с гладкой или волновой поверхностью раздела, пробковую, кольцевую (серповидную), дисперсную. Обозначение смешанных структур, характерных для переходных областей, состоит из наименования двух смежных структур: пробко-дисперсная, пузырьково-пробковая и т. д. Кроме перечисленных структур указывается на существование снарядной, эмульсионной, распыленной и вспененной структур [6], которые в силу невысокой распространенности практически не изучены.

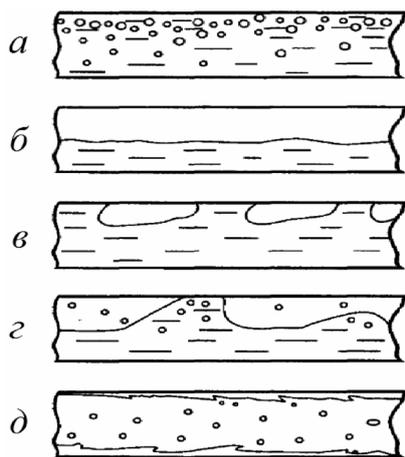


Рис. 1. Структуры газожидкостного потока в горизонтальных каналах: а – пузырьковая; б – расслоенная (волновая); в – снарядная (пробковая); г – гребневая (пробко-дисперсная); д – капельно-пленочная (дисперсно-кольцевая)

В [7] приведена несколько другая классификация структур горизонтального газожидкостного потока: пузырьковая, расслоенная, снарядная, гребневая и капельно-пленочная. Стоит отметить, что в этой же работе для газожидкостного подъемного течения (вертикального канала) выделяется вспененная структура потока, которая не рассмотрена для вертикальных опускных и горизонтальных течений.

Анализируя данные различных литературных источников [6–9], выделяем основные структуры газожидкостного потока в горизонтальных каналах (рис. 1). Появление той либо иной структуры потока в канале зависит от расходных и геометрических параметров потока, а также от физико-химических свойств компонентов газожидкостной смеси. Во время проведения предварительных экспериментальных исследований [10] визуально обнаружено, что газожидкостный поток в насосно-рукавной системе ПССВ имеет вспененную структуру. Это свидетельствует об интенсивном перемешивании жидкой и газовой фаз, что в свою очередь косвенно говорит о турбу-

лентном режиме течения газожидкостной смеси. Необходимо отметить, что поток приобретает пробковую структуру при достижении некоторого минимального значения концентрации ПО (в рамках эксперимента использовали состав огнетушащий пенообразующий ОПС-0.4) в рассматриваемом потоке при тех же расходных и геометрических параметрах. Это говорит о том, что снижение поверхностного натяжения воды (например, посредством использования ПО на основе ПАВ) является одним из необходимых условий для создания вспененной структуры газожидкостного потока. Таким образом, можно говорить о том, что в насосно-рукавной системе ПССВ он имеет вспененную структуру, характеристики которой (давление, скорость, расход, плотность, газосодержание) в каждом поперечном сечении канала не изучены из-за слабой распространенности данной структуры в технологических процессах.



Рис. 2. Расчетная схема экспериментальной установки

Постановка задачи. Задача моделирования заключается в численном описании движения пены по насосно-рукавной системе ПССВ при заданных (исходных) расходах компонентов газожидкостной смеси, геометрических размерах канала и избыточном давлении потока перед пожарным стволом (рис. 2). Модель должна обеспечить определение характеристик потока (давления, скорости и расхода, плотности и газосодержания) в каждом поперечном сечении канала. Необходимо уточнить, что задача рассматривается для прямолинейного горизонтального расположения канала.

Для возможности дальнейшей оценки результатов численного моделирования расходные и геометрические параметры потока, а также избыточное давление перед пожарным стволом принимаем в соответствии с данными предварительных экспериментальных исследований (таблица).

Характеристики предварительных экспериментальных исследований

Параметр	Значение
Объемный расход воды $Q_{\text{вод}}$, л/с	2,97
Массовый расход воды $G_{\text{вод}}$, кг/с	2,967
Объемный расход пенообразователя $Q_{\text{по}}$, л/с	0,03
Массовый расход пенообразователя $G_{\text{по}}$, кг/с	0,031
Объемный расход воздуха при атмосферном давлении $Q_{\text{возд. атм}}$, л/с	20
Массовый расход воздуха $G_{\text{возд}}$, кг/с	0,024
Избыточное давление перед пожарным стволом $p_{\text{ств}}$, кПа	152
Длина канала $l_{\text{кан}}$, м	100
Диаметр канала $d_{\text{кан}}$, м	0,051

С целью подтверждения турбулентного режима течения газожидкостной смеси при принятых расходных и геометрических параметрах потока, а также избыточном давлении перед пожарным стволом оценим число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{см}} U_{\text{см}} d_{\Gamma}}{\mu_{\text{см}}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность газожидкостной смеси, кг/м³; $U_{\text{см}}$ – средняя скорость потока газожидкостной смеси, м/с; d_{Γ} – гидравлический диаметр трубы, м; $\mu_{\text{см}}$ – динамическая вязкость газожидкостной смеси, Па·с.

Для определения плотности газожидкостной смеси в канале используем выражение

$$\rho_{\text{см}} = \frac{G_{\text{см}}}{Q_{\text{см}}} = \frac{Q_{\text{вод}} \rho_{\text{вод}} + Q_{\text{ПО}} \rho_{\text{ПО}} + Q_{\text{возд. атм}} \rho_{\text{возд. атм}}}{Q_{\text{вод}} + Q_{\text{ПО}} + Q_{\text{возд. кан}}}. \quad (2)$$

Здесь $G_{см}$ – массовый расход газожидкостной смеси, кг/с; $Q_{см}$ – объемный расход газожидкостной смеси, м³/с; $\rho_{вод}$ – плотность воды, 998 кг/м³; $\rho_{ПО}$ – плотность ПО, 1035 кг/м³; $\rho_{возд. атм}$ – плотность воздуха, 1,204 кг/м³; $Q_{возд. кан}$ – объемный расход воздуха внутри канала, м³/с.

Учитывая постоянство массового расхода воздуха и рассматривая воздух как баротропную среду, определяем объемный расход воздуха в канале

$$Q_{возд. кан} = \frac{G_{возд}}{\rho_{возд. кан}} = \frac{Q_{возд. атм} \rho_{возд. атм}}{\rho_{возд. кан}} = \frac{Q_{возд. атм} \rho_{возд. атм}}{\rho_{возд. кан}} = \frac{Q_{возд. атм} \rho_{возд. атм}}{\rho_{возд. атм} + p_{ств}}, \quad (3)$$

равный 8 л/с. Следовательно, при учете объемных расходов воды и ПО объемный расход газожидкостной смеси равен 11 л/с. Подставим полученное значение в выражение (2) и определим, что плотность газожидкостной смеси в канале равна 275 кг/м³.

Среднюю скорость потока газожидкостной смеси находим из соотношения

$$U_{см} = \frac{Q_{см}}{S_{кан}} = \frac{4Q_{см}}{\pi d_{кан}^2} = 5,4 \text{ м/с}. \quad (4)$$

Так как величина динамической вязкости газожидкостной смеси нам не известна, то для оценки числа Рейнольдса принимаем значение динамической вязкости воды $\mu_{см} = \mu_{вод} = 1,002 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Исходя из приведенных допущений и результатов расчетов по формулам (2)–(4), по (1) определяем $Re = 75584$. На основании этого делаем вывод, что режим течения газожидкостной смеси при принятых расходных и геометрических параметрах потока, а также избыточном давлении перед пожарным стволом является развитым турбулентным.

Определение расчетной области численного моделирования. Для описания пристеночного слоя используются стандартные пристеночные функции. Для пристыковки пристеночных функций турбулентности по выбранному в зависимости от характера течения пристеночному параметру y^+ рассчитываем размер пристеночной ячейки. Значение пристеночного параметра y^+ определяем по формуле

$$y^+ = \frac{\rho_{см} y U_{\tau}}{\mu_{см}}, \quad (5)$$

где U_{τ} – скорость сдвига.

Для определения скорости сдвига необходимо найти коэффициент трения

$$C_f = 0,079 Re^{-0,25} = 0,079 \cdot 75584^{-0,25} = 0,0048,$$

сдвиговое напряжение у стенки

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho_{см} U_{см}^2 = \frac{1}{2} 0,0048 \cdot 275 \cdot 5,4^2 = 19,2 \text{ Па}.$$

Тогда получим, что скорость сдвига

$$U_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_{см}}} = \sqrt{\frac{19,2}{275}} = 0,26 \text{ м/с}.$$

Приняв значение y^+ равным 1, найдем

$$y = \frac{y^+ \mu_{см}}{U_{\tau} \rho_{см}} = \frac{1 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{0,26 \cdot 275} = 0,014 \text{ мм}.$$

По рассчитанному размеру первой ячейки строится структурированная гексагональная сетка конечных элементов.

Модель турбулентности и граничные условия. Методом конечных объемов в Ansys Fluent для каждой фазы (жидкая – раствор воды с ПО, газовая – воздух) численно решаются базовые уравнения гидродинамики, в состав которых входят [10]

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (6)$$

уравнение движения

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (7)$$

где p – давление; τ_{ij} – компоненты тензора сдвиговых напряжений; ρg_i – компонента вектора гравитации, F_i – внешние поверхностные силы.

Помимо уравнений (6) и (7) из-за сжимаемости газожидкостной смеси рассматривается уравнение состояния вида

$$p = \rho R_{уд} T, \quad (8)$$

где $R_{уд}$ – удельная газовая постоянная, T – температура.

Как было отмечено выше, принимаем, что рассматриваемое движение газожидкостной смеси по горизонтальному каналу является турбулентным. Для описания турбулентного движения используем модель на основе осреднения по Рейнольдсу (Reynolds-averaged Navier-Stokes–RANS). Исходные уравнения (6) и (7) осредняют по всему спектру пульсаций в соответствии с определением

$$\bar{u}_j = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_j(t) dt.$$

После осреднения уравнений (6), (7) в них появляются неизвестные корреляции пульсирующих величин, так называемые рейнольдсовы (турбулентные) напряжения, без определения которых осредненные уравнения не могут быть решены.

Задачей модели турбулентности является определение рейнольдсовых напряжений. Для моделирования турбулентного течения газожидкостной смеси в горизонтальном цилиндрическом канале используем модель SST (Shear Stress Transport model) [11], которая, как показала практика, приводит к лучшему согласию с результатами экспериментальных исследований на данном классе течений. Она основана на линейной комбинации модели $k-\omega$ Вилкокса в пристеночных областях и модели $k-\epsilon$ вдали от стенок [12]. Данная модель хорошо зарекомендовала себя в расчетах отрывных течений с небольшой зоной отрыва.

Однако стоит отметить, что предлагаемая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, имеющую бесконечное множество решений. Чтобы получить искомое решение системы, соответствующее рассматриваемому физическому процессу, необходимо задать дополнительные условия, включающие в себя граничные условия.

На левой границе расчетной области приняты массовые расходы компонентов газожидкостной смеси (таблица), так как их значения неизменны в каждом поперечном сечении канала. Значения объемных расходов возрастают по мере расширения газового компонента (воздуха) в потоке. На правой границе принято значение избыточного давления перед пожарным стволом (таблица), так как при заданных массовых расходах оно остается неизменным. Исходя из вычислительных возможностей используемого оборудования и относительно небольшого диаметра канала, считаем, что длины канала 10 м будет достаточно для получения полной картины процесса течения газожидкостной смеси в канале.

Результаты моделирования. При решении уравнений (6)–(8) получим, что потери давления на единицу длины канала составили

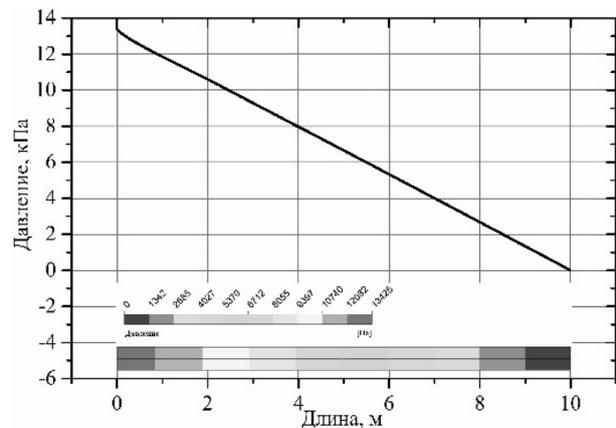


Рис. 3. Потери давления по длине канала при движении газожидкостной смеси

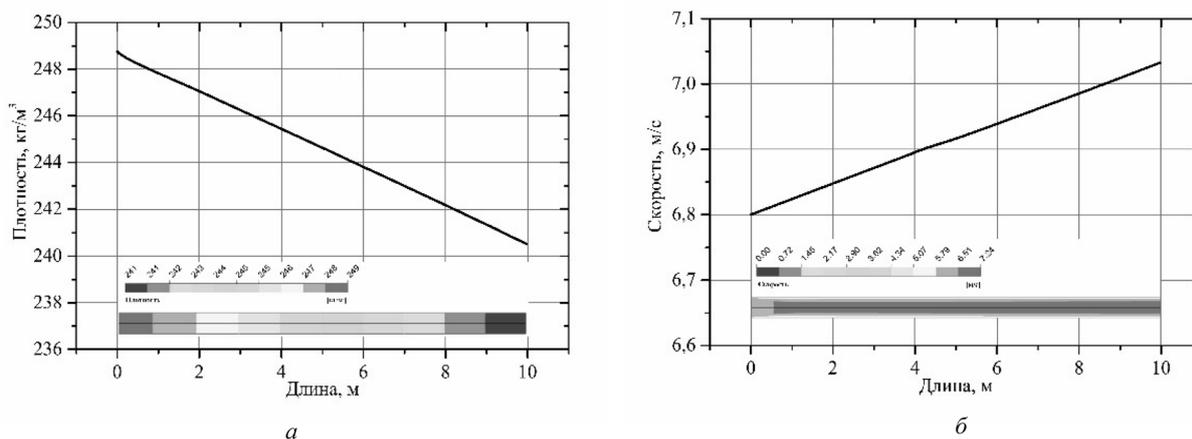


Рис. 4. Изменение плотности (а) и скорости (б) газожидкостной смеси по длине канала

$\Delta p_{\text{расч}} = 1342,5 \text{ Па/м}$ (рис. 3). Стоит отметить, что по результатам предварительных экспериментальных испытаний удельные потери составили 1420 Па/м . Таким образом, отличие результатов численного моделирования от экспериментальных данных составило $5,8\%$, что свидетельствует об адекватности модели с учетом принятых допущений.

Величина потерь давления при движении воды оказываются ниже, чем при движении газожидкостной смеси с таким же объемным расходом по воде, на $52,5\%$ [13]. Это можно объяснить тем, что по мере движения газожидкостной смеси в канале происходит падение давления, что приводит к расширению находящегося в потоке воздуха. Как следствие, уменьшается плотность газожидкостной смеси и возрастает скорость движения потока. Это подтверждается численными расчетами (рис. 4). Из рис. 4, а видно, что значение плотности газожидкостной смеси линейно уменьшается на $0,8 \text{ кг/м}^3$ на одном метре канала. В свою очередь на рис. 4, б показано изменение значения средней по сечению скорости потока газожидкостной смеси, которое имеет также линейный вид, причем скорость возрастает от $6,8$ до $7,04 \text{ м/с}$ на 10 м канала. Следовательно, средняя скорость газожидкостной смеси на одном метре канала увеличивается на $0,024 \text{ м/с}$.

В силу линейной зависимости исследуемых параметров по длине канала не трудно получить выражения вида $\Delta p = f(l)$, $\Delta \rho_{\text{см}} = f(l)$ и $\Delta U_{\text{см}} = f(l)$ для расчета насосно-рукавных систем ПССВ. На основании данных рис. 3, 4 получим

$$\Delta p = p_0 - 1342,5l,$$

$$\Delta \rho_{\text{см}} = \rho_{\text{см}0} - 0,8l,$$

$$\Delta U_{\text{см}} = U_{\text{см}0} + 0,024l,$$

где p_0 , $\rho_{\text{см}0}$, $U_{\text{см}0}$ – значения давления (Па), плотности смеси (кг/м^3) и средней скорости смеси (м/с) на входе в канал соответственно, l – длина канала, м.

Заключение. Таким образом, поток пены в насосно-рукавной системе ПССВ имеет вспененную структуру, которая переходит в пробковую при достижении некоторого минимального значения концентрации ПО в рассматриваемом потоке при тех же расходных и геометрических параметрах. Наличие вспененной структуры потока, а также оценка числа Рейнольдса указывают на турбулентный режим течения газожидкостной смеси в канале при заданных граничных условиях.

В результате численных расчетов получено:

потери давления на единице длины канала составили $1342,5 \text{ Па/м}$, что отличается от результатов предварительных экспериментальных испытаний на $5,8\%$;

плотность газожидкостной смеси на одном метре канала уменьшается на $0,8 \text{ кг/м}^3$;

средняя скорость смеси на одном метре канала увеличивается на $0,024 \text{ м/с}$.

Изменение плотности и средней скорости газожидкостной смеси является следствием расширения находящегося в потоке воздуха по мере уменьшения давления в канале. Следует отметить, что потери давления по длине канала имеют линейную зависимость, несмотря на возрастание скорости потока и уменьшение плотности газожидкостной смеси по длине канала. Установлены частные выражения для расчета потерь давления, а также изменения величин плотности и скорости газожидкостной смеси по длине канала.

Таким образом, предлагаемая модель хорошо согласуется с результатами предварительных экспериментальных исследований при данных граничных условиях. Однако использование этой модели в методике расчета потерь давления в насосно-рукавной системе ПССВ требует большого количества дополнительных расчетов для различных граничных условий и их сопоставления с результатами экспериментальных исследований.

Список использованной литературы

1. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: в 2 книгах; кн. 1 / А. Н. Баратов [и др.]. – М.: Химия, 1990. – 496 с.
2. *Colletti, D. J.* Compressed-air foam mechanics / D. J. Colletti // Fire Engineering. – 1994, March. – 147 p.
3. *Taylor, R. G.* Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / R. G. Taylor. – Morristown Fire Bureau – Morristown, New Jersey, 1998. – P. 75–112.
4. Описание технологии NATISK. [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access: <http://www.specialauto.ru/natisk/1106.html> – Date of access: 05.11.2015.
5. *Бурдин, А. М.* Установки пожаротушения с использованием компрессионной пены. Технологические особенности и преимущества / А. М. Бурдин // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 25-летию МЧС России. В 3 ч. Ч. 2. – М.: ВНИИПО, 2015. – С. 274–286.
6. *Гриценко, А. И.* Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А. И. Гриценко, О. В. Клапчук, Ю. А. Харченко. – М.: Недра, 1994. – 238 с.
7. *Островский, Г. М.* Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 1. / Г. М. Островский. – СПб.: АНО НПО Профессионал, 2004. – 848 с.
8. *Кутателадзе, С. С.* Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
9. Гидродинамика газо-жидкостных смесей в трубах / В. А. Мамаев [и др.]. – М.: Недра, 1969. – 208 с.
10. *Белов, И. А.* Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. – 108 с.
11. *Menter, F. R.* Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows / F. R. Menter // Proc. 24th Fluid Dynamics Conference. – Florida, 1993. – P. 1993–2006.
12. *Ильина, Е. Е.* Применимость различных дифференциальных моделей турбулентности при численном расчете сверхзвуковых неизобарических струй / Е. Е. Ильина, Т. Е. Ильина, П. В. Денисенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 3(97). – С. 509–516.
13. *Пармон, В. В.* Описание экспериментальной установки для исследования движения пены в горизонтальном цилиндрическом канале / В. В. Пармон [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 1(21). – С. 47–53.

Поступила в редакцию 21.01.2016

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

УДК 536.2(075)46

В. А. КОТ

ГРАНИЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЙ

*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: valery.kot@hmti.ac.by*

Представлены результаты численного анализа точности и сходимости решений на основе интегрального метода граничных характеристик. На примере рассмотрения полуограниченного пространства с граничным условием первого рода показано, что построенные решения, по существу, являются точными, поскольку погрешность для широкой области значений параметров составляет сотые – десятитысячные доли процента.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, приближенный метод, интегральные тождества, фронт возмущения.

V. A. KOT

BOUNDARY CHARACTERISTICS IN HEAT-CONDUCTION PROBLEMS. ANALYSIS OF ACCURACY AND CONVERGENCE OF SOLUTIONS

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: valery.kot@hmti.ac.by*

Results of numerical analysis of accuracy and convergence of solutions on the basis of the integral method of boundary characteristics are presented. It is shown by the example of consideration of a semi-bounded space with the first-kind boundary conditions that the solutions constructed are exact in essence because their error for parameters changing within a wide range comprises hundredth–ten-thousandth fractions of a percent.

Keywords: heat conduction equation, approximate method, integral identities, front of a disturbance.

Введение. Настоящая статья является логическим продолжением работы [1], в которой рассмотрен в общих чертах *интегральный метод граничных характеристик* (ИМГХ). Он относится к достаточно широкому классу интегральных методов, включающих в себя идею Т. Гудмена [2], связанную с введением в рассмотрение *фронта температурного возмущения* $\delta(t)$. Предложенный Т. Гудменом интегральный метод теплового баланса (Heat Balance Integral Method – HBIM) предусматривает три последовательных шага:

рассматривается область, ограниченная фронтом температурного возмущения $\delta(t)$, за пределами которого тело сохраняет первоначальную температуру,

температурный профиль в пределах возмущенной области $0 \leq x \leq \delta(t)$ представляется полиномом с переменными во времени коэффициентами, которые подлежат определению,

интегрируется уравнение теплопроводности по области $x \in [0, \delta(t)]$, что приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно $\delta(t)$.

Рассмотрим ИМГХ в приложении полубесконечной среды с граничным условием первого рода, т. е. ограничимся рассмотрением одного из основных и наиболее важных случаев. Отметим, что именно данная постановка рассматривается в большинстве публикаций (например, [3–5]).

Параметры оценки точности и сходимости решений. Оценку точности аппроксимационных решений, получаемых ИМГХ и другими приближенными интегральными методами, проведем с помощью параметров

$$\begin{aligned} \varepsilon_T &= T_{appr} - T_{ex}, \quad E = |T_{appr} - T_{ex}|, \quad E_{\max} = |T_{appr} - T_{ex}|_{\max}, \\ \|E_L^N\| &= \frac{1}{\delta(t)} \sqrt{\int_a^{\delta(t)} (T_{appr} - T_{ex})^2 dx}, \quad E_Q = |Q_{appr} - Q_{ex}|, \quad \varepsilon_Q = \left| \frac{Q_{appr} - Q_{ex}}{Q_{ex}} \right| 100\%, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_{appr} , T_{ex} – приближенное и точное значения температуры соответственно, $\|E_L^N\|$ – модифицированная норма Лангфорда для полинома степени N ; E и E_{\max} – модуль погрешности (отклонения) и модуль максимальной абсолютной погрешности; E_Q , ε_Q – абсолютная и относительная ошибки расчета плотности теплового потока $(Q(t) = \partial T(x, t) / \partial x|_{x=0})$ на поверхности полупространства соответственно.

Сходимость решений охарактеризуем параметрами

$$\begin{aligned} p_E^1 &= \ln \frac{\|E_L^{N=v}\|}{\|E_L^{N=v+3}\|} \left(\ln \frac{v+3}{v} \right)^{-1}, \quad p_E^2 = \ln \frac{\|E_L^{N=5}\|}{\|E_L^{N=5+3k}\|} \left(\ln \frac{5+3k}{5} \right)^{-1}, \\ p_Q^1 &= \ln \frac{\varepsilon_Q^{N=v}}{\varepsilon_Q^{N=v+3}} \left(\ln \frac{v+3}{v} \right)^{-1} = \ln \frac{E_Q^{N=v}}{E_Q^{N=v+3}} \left(\ln \frac{v+3}{v} \right)^{-1}, \\ p_Q^2 &= \ln \frac{\varepsilon_Q^{N=5}}{\varepsilon_Q^{N=5+3k}} \left(\ln \frac{5+3k}{5} \right)^{-1} = \ln \frac{E_Q^{N=5}}{E_Q^{N=5+3k}} \left(\ln \frac{5+3k}{5} \right)^{-1}, \quad v=5, 8, \dots; k=1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\|E_L^{N=v}\|$, $\|E_L^{N=v+3}\|$, $\|E_L^{N=5}\|$, $\|E_L^{N=5+3k}\|$ – модифицированная норма (по Лангфорду) при полиномах степени $N=v$, $N=v+3$, $N=5$, $N=5+3k$ соответственно; $E_Q^{N=v}$, $E_Q^{N=v+3}$, $E_Q^{N=5}$, $E_Q^{N=5+3k}$, $\varepsilon_Q^{N=v}$, $\varepsilon_Q^{N=v+3}$, $\varepsilon_Q^{N=5}$, $\varepsilon_Q^{N=5+3k}$ – абсолютная и относительная (%) ошибки расчета теплового потока при $N=v$, $v+3$, 5 , $5+3k$ соответственно.

Постановка задачи и метод решения. Для полубесконечной среды с условием первого рода на поверхности задача представляется в безразмерной форме:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad 0 < x < \delta(t), \quad (3)$$

$$T(x, 0) = 0, \quad (4)$$

$$T(0, t) = h(t), \quad (5)$$

$$T(\delta(t), t); \quad \frac{\partial T}{\partial x}(\delta(t), t) = 0, \quad (6)$$

$$T(x, t)|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (7)$$

где $T = (\bar{T} - \bar{T}_0) / \Delta T$ – относительная избыточная температура; \bar{T} – температура, \bar{T}_0 – начальная температура, ΔT – температурный масштаб, $t = \bar{t} / \tau$, $\tau = L^2 / \kappa$, $\rho = y / L$ – безразмерная координата, \bar{t} – время, κ – коэффициент теплопроводности, L – пространственный масштаб, y – пространственная координата. Решение задачи (3)–(5), (7) известно [6]:

$$T = \frac{x}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{h(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(t-\tau)}\right) d\tau. \quad (8)$$

При $h(t)=1$ из (8) имеем $T = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{t}}$.

В соответствии с граничным условием (6) и общей концепцией методов, использующих понятие «фронт возмущения», представим температурный профиль полиномом

$$T = h(t) + \sum_{j=1}^N a_j(t) \left(\frac{x}{\delta(t)}\right)^j. \quad (9)$$

В [1] введена в рассмотрение последовательность из интегральных граничных характеристик $\Gamma_n(t)$ ($n \in \mathbb{Z}_+$), которая для рассматриваемой задачи предстанет как

$$\left\{ \Gamma_n(t) = \int_0^t dt \dots \int_0^t h(t) dt \right\}, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (10)$$

Для первой стадии процесса в [1] доказано существование последовательности из тождественных равенств, образуемых граничными характеристиками n -го порядка и соответствующими $2n$ -кратными интегралами от искомой температурной функции для области $x \in [0, \delta(t)]$:

$$\{\mathcal{L}_n\{T\} \equiv \Gamma_n(t)\}, \quad n \in \mathbb{Z}_+, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_n T &= \underbrace{\int_0^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x dx^2}_{\mathcal{L}_1} \dots \underbrace{\int_0^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x dx^2}_{\mathcal{L}_1^x} \underbrace{\int_0^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x T(x,t) dx^2}_{\mathcal{L}_1^x} = \int_0^0 \dots \int_0^0 T(x,t) dx^{2n}, \\ \mathcal{L}_n T &= \underbrace{\mathcal{L}_1 \mathcal{L}_1^x \dots \mathcal{L}_1^x \mathcal{L}_1^x}_{n} T, \quad \mathcal{L}_1^x = \int_0^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2, \quad \mathcal{L}_1 = \int_0^0 \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Если обозначить $\Gamma_0(t) = h(t)$, а производную n -го порядка от функции $h(t)$ записать как

$$\frac{d^k h(t)}{dt^k} \equiv D_k h(t) = \Gamma_{-k}(t), \quad k \in \mathbb{Z}_+, \quad (13)$$

т. е. как интегральную граничную характеристику порядка минус k , то в этом случае для функции $h(t)$ граничного условия (6) можно составить последовательность из n -х интегральных характеристик:

$$\dots \Gamma_{-2}(t), \Gamma_{-1}(t), \Gamma_0(t), \Gamma_1(t), \Gamma_2(t) \dots, \quad (14)$$

или $\{\Gamma_n(t)\}_n$, $n \in \mathbb{Z}$.

Как показано в ряде работ (например, [7–10]), в виде дополнительных граничных условий могут быть приняты условия

$$\left. \frac{d^{2k} T}{dx^{2k}} \right|_{x=0} = \frac{d^k T(0,t)}{dt^k} = \frac{d^k h(t)}{dt^k}, \quad k \in \mathbb{Z}_+. \quad (15)$$

В таком случае из (11)–(16) приходим к двойной последовательности для граничных характеристик

$$\{\Gamma_{-k}(t)\} \cup \{\Gamma_n(t)\}_n, \quad k \in \mathbb{Z}_+, \quad n \in \mathbb{Z}_\geq. \quad (16)$$

Такой формальный подход позволяет распространить интегральные операторы (12) на область отрицательного порядка:

$$\mathcal{L}_{-k} T = \underbrace{\frac{\mathcal{L}_{-1}}{\partial x^2} \dots \frac{\mathcal{L}_{-1}}{\partial x^2} \frac{\mathcal{L}_{-1}}{\partial x^2}}_k T(0, t) = \frac{\partial^{2k} T}{\partial x^{2k}} \Big|_{x=0}, \quad \mathcal{L}_{-k} T = \underbrace{\mathcal{L}_{-1} \dots \mathcal{L}_{-1} \mathcal{L}_{-1}}_k T, \quad \mathcal{L}_{-1} T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x=0}. \quad (17)$$

Отсюда вместо последовательности (17) запишем ее новое представление:

$$\{\mathcal{L}_{-k} T = \Gamma_{-k}(t)\}, \quad k \in \mathbb{Z}_+. \quad (18)$$

Объединив (11) и (18), получим двойную последовательность из тождественных равенств

$$\{\mathcal{L}_{-k} T \equiv \Gamma_{-k}(t)\} \cup \{\mathcal{L}_n T \equiv \Gamma_n(t)\}, \quad n \in \mathbb{Z}_\geq, \quad k \in \mathbb{Z}_+. \quad (19)$$

Если исходить из описания температурного профиля полиномом (9), то для нахождения коэффициентов $a_j(t)$, $j = \overline{1, N}$, достаточно применить два граничных условия на фронте (6) и $(N-2)$ -уравнений из двойного ряда (19). Если в качестве первого приближения принять полином степени $N = 5$, чему отвечают три тождественных равенства $\{\mathcal{L}_n T \equiv \Gamma_n(t)\}_{n=1}^3$, а последующие приближения определить как $\{N\}_n = 5 + 3(n-1) = 3n + 2$ ($n = 1, 2, \dots$), то из (16) приходим к двойному множеству для граничных характеристик

$$\{\Gamma_{-k}(t)\}_{k=0}^K \cup \{\Gamma_n(t)\}_{n=1}^{N-K-2}, \quad k = \overline{0, K}, \quad n = \overline{1, N-K-2}, \quad K = 0, 1, 2, \dots \quad (20)$$

Объединив дискретные переменные n и k посредством равенства $k = n - 1$, что вытекает из (19), преобразуем множество (20):

$$\{\Gamma_{-k}(t)\}_{k=0}^K \cup \{\Gamma_{k+1}(t)\}_{k=0}^{2K+3}, \quad k = \overline{0, K}, \quad K \in \mathbb{Z}_\geq, \quad (21)$$

или в раскрытом виде

$$\xrightarrow[k=0]{K=0} \begin{pmatrix} \Gamma_3(t) \\ \Gamma_2(t) \\ \Gamma_1(t) \\ \Gamma_0(t) \end{pmatrix} \xrightarrow[k=0,1]{K=1} \begin{pmatrix} \Gamma_5(t) \\ \Gamma_4(t) \\ \Gamma_3(t) \\ \Gamma_2(t) \\ \Gamma_1(t) \\ \Gamma_0(t) \\ \Gamma_{-1}(t) \end{pmatrix} \xrightarrow[k=0,1,2]{K=2} \begin{pmatrix} \Gamma_7(t) \\ \dots \\ \Gamma_2(t) \\ \Gamma_1(t) \\ \Gamma_0(t) \\ \Gamma_{-1}(t) \\ \Gamma_{-2}(t) \end{pmatrix} \xrightarrow[k=0,1,2,3]{K=3} \dots \xrightarrow[k=0,K]{K} \begin{pmatrix} \Gamma_{2K+3}(t) \\ \dots \\ \Gamma_1(t) \\ \Gamma_0(t) \\ \Gamma_{-1}(t) \\ \dots \\ \Gamma_{-K}(t) \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Тогда из (19)–(21) следует двойное множество из тождественных равенств

$$\{\mathcal{L}_{k+1} T \equiv \Gamma_{k+1}(t)\}_{k=0}^{2K+3} \cup \{\mathcal{L}_{-2k} T \equiv \Gamma_{-2k}(t)\}_{k=0}^K, \quad k = \overline{0, K}, \quad K \in \mathbb{Z}_\geq. \quad (23)$$

Используя равенство $k = n - 1$, имеем

$$\{\mathcal{L}_n T \equiv \Gamma_n(t)\}_{n=1}^{2K+3} \cup \{\mathcal{L}_{-(n-1)} T \equiv \Gamma_{-(n-1)}(t)\}_{n=1}^K, \quad n = \overline{1, K}, \quad K \in \mathbb{Z}_\geq. \quad (24)$$

Отсюда приходим к следующей схеме определения полиномиальных коэффициентов:

$$\xrightarrow[N=5+3K]{K=0,1,2,\dots} \left\langle \begin{array}{l} \{\mathcal{L}_n T \equiv \Gamma_n(t)\}_{n=1}^{2K+3} \cup \{\mathcal{L}_{-(n-1)} T \equiv \Gamma_{-(n-1)}(t)\}_{n=1}^K \\ T(\delta(t), t) = \frac{\partial T}{\partial x}(\delta(t), t) = 0 \end{array} \right\rangle \rightarrow \{a_j(t)\}_{j=1}^N. \quad (25)$$

Фронт $\delta(t)$ определим на основе интеграла теплового баланса [2]

$$\frac{d}{dt} \int_0^{\delta(t)} T(x, t) dx = -\frac{\partial T(0, t)}{\partial x}. \quad (26)$$

Подставив в (29) полином (9), получим дифференциальное уравнение с начальным условием $\delta(0) = 0$:

$$\delta(t) \frac{d}{dt} \left[\delta(t) \left(h(t) + \sum_{j=1}^N \frac{a_j(t)}{j+1} \right) \right] + a_1(t) = 0. \quad (27)$$

Анализ точности и сходимости решений. Найдем решение задачи (3)–(6) для $K = \overline{0, 5}$ ($N_0 = 3$). Из соотношения $N = N_0 + 2 + 3K$ имеем $N = 5, 8, \dots, 20$. Тогда для нулевого приближения ($K = 0, N = 5$) из схемы (25) получаем систему линейных алгебраических уравнений (в матричной форме)

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2/3 & 1/2 & 2/5 & 1/3 & 2/7 \\ 4/5 & 2/3 & 4/7 & 1/2 & 4/9 \\ 6/7 & 3/4 & 2/3 & 3/5 & 6/11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 2t/\sigma(t) - 1 \\ 12(t/\sigma(t))^2 - 1 \\ 120(t/\sigma(t))^3 - 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь $\sigma(t) = \delta(t)^2$. Отсюда находим

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{175}{16} + 86625 \frac{t^3}{\sigma^3} - \frac{19845}{2} \frac{t^2}{\sigma^2} + \frac{3675}{8} \frac{t}{\sigma}, & a_2 &= 40 - 554400 \frac{t^3}{\sigma^3} + 60480 \frac{t^2}{\sigma^2} - 2520 \frac{t}{\sigma}, \\ a_3 &= -\frac{525}{8} + 1212750 \frac{t^3}{\sigma^3} - 127575 \frac{t^2}{\sigma^2} + \frac{19845}{4} \frac{t}{\sigma}, & a_4 &= 50 - 1108800 \frac{t^3}{\sigma^3} + 113400 \frac{t^2}{\sigma^2} - 4200 \frac{t}{\sigma}, \\ a_5 &= -\frac{231}{16} + 363825 \frac{t^3}{\sigma^3} - \frac{72765}{2} \frac{t^2}{\sigma^2} + \frac{10395}{8} \frac{t}{\sigma}. \end{aligned}$$

Функцию $\sigma(t)$ определим из (26), откуда приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} \left(1 + \sum_{j=1}^N \frac{a_j(t)}{j+1} \right) + \sigma(t) \sum_{j=1}^N \frac{2}{j+1} \frac{da_j(t)}{dt} + 2a_1(t) = 0. \quad (28)$$

Подстановка в (28) коэффициентов $a_j(t), j = \overline{1, 5}$, дает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = 168 \frac{19800 t^3 - 1872 t^2 \sigma(t) + 69 t \sigma(t)^2 - \sigma(t)^3}{55440 t^3 - 4536 t^2 \sigma(t) + 126 t \sigma(t)^2 - \sigma(t)^3} \quad (29)$$

с начальным условием $\sigma(0) = 0$. Решение (29) имеем простой вид: $\sigma(t) = \alpha t$, где $\alpha \approx 24,10645$ – корень алгебраического уравнения

$$3326400 - 369936 \alpha + 16128 \alpha^2 - 294 \alpha^3 + \alpha^4 = 0.$$

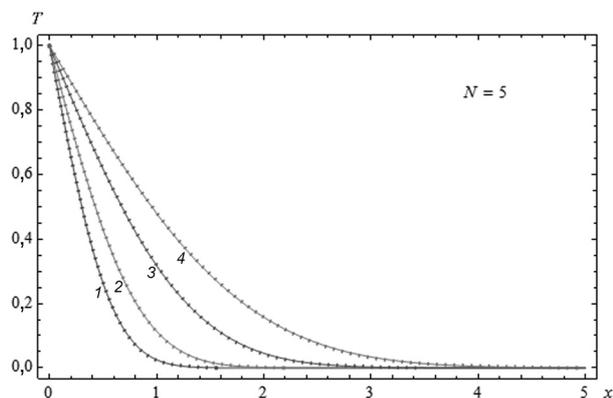


Рис. 1. Приближенные температурные профили, рассчитанные по формуле (30) (пунктир) в сравнении с точным решением (сплошные линии) в моменты времени $t = 0,1$ (1); $0,2$ (2); $0,5$ (3); 1 (4)

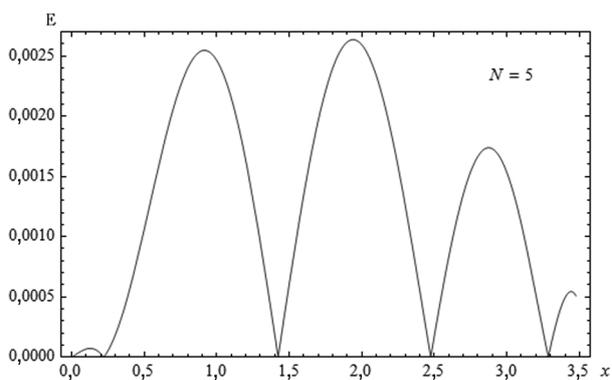


Рис. 2. Абсолютное отклонение приближенного температурного профиля, рассчитанного по формуле (30) в момент времени $t = 0,5$, от точного решения

Подстановка $a_j(t)$ и $\delta(t)$ в (9) дает решение

$$T(x,t) = \left(1 - 0,20367 \frac{x}{\sqrt{t}}\right)^2 \left(1 - 0,15734 \frac{x}{\sqrt{t}} - 0,10710 \frac{x^2}{t} + 0,02389 \frac{x^3}{t^{3/2}}\right). \quad (30)$$

Температурные профили, рассчитанные ИМГХ, практически совпадают с кривыми для точного решения (рис. 1). Абсолютное отклонение приближенного решения от точного для фиксированного момента времени ($t_1 = 0,5$) отражает рис. 2.

Сравнительный анализ параметра E для ряда интегральных методов и ИМГХ (рис. 3, а) свидетельствует о более высокой аппроксимирующей точности последнего. По сравнению с решениями на основе полинома степени $n(t)$ [3] погрешность в ИМГХ снижается более чем на порядок. По сравнению с СИМ [11], РИМ [12,13] и НВИМ [14, 15] при сложном профиле с логарифмической функцией [16]

$$T(x,t) = \left[h(t) + \phi(t) \ln \left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right) \right] \left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)^{n(t)}, \quad 0 \leq x \leq \delta(t), \quad (31)$$

а также с методом дополнительных граничных условий (АВСИМ) [9, 10] при степенном полиноме (9) ошибка снижается многократно. Это подтверждают данные табл. 1, 2, в которых представлены методы НВИМ, РИМ, СИМ, АВСИМ и ИМГХ. Отметим, что температурные профили для ИМГХ и АВСИМ заданы полином (9) с одинаковой степенью N (рис. 3, а, табл. 2).

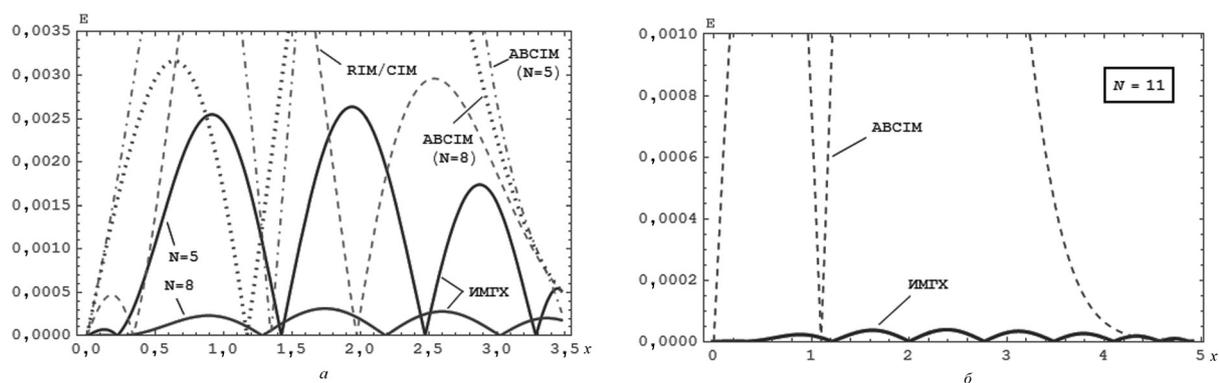


Рис. 3. Абсолютная погрешность температурных профилей в момент времени $t = 0,5$ для интегральных методов: а – НВИМ ($n = 5,2895$, профиль (18)), РИМ ($n = 5,5212$, профиль (18)), АВСИМ ($N = 5, 8$), ИМГХ ($N = 5, 8$); б – сравнение методов АВСИМ и ИМГХ

Таблица 1. Параметры оценки точности аппроксимации $E_{\max}, \|E_L^N\|$ ($t_1 = 1$)

Метод расчета	[14]	[15]		[16]		ИМГХ	
	НВИМ	НВИМ	RIM	RIM	СИМ	(5)	(8)
$n(N)$	2,121	2,008	2,074	5,5215	5,5132	(5)	(8)
Профиль	$\left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)^n$			$\left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)^n \left[1 + \phi(t) \ln\left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)\right]$		$1 + \sum_{j=1}^N a_j \left(\frac{x}{\delta(t)}\right)^j$	
E_{\max}	0,0351	0,0330	0,0298	0,00715	0,00721	0,00263	0,00031
$\ E_L\ $	0,0224	0,0223	0,0197	0,00312	0,00315	0,00147	0,000143

Таблица 2. Параметры $E_{\max}, \|E_L^N\|$ для АВСИМ и ИМГХ в зависимости от N

Метод расчета	Параметр	Степень полинома N				
		5	8	11	14	20
АВСИМ	E_{\max}	0,01035	0,00734	0,00575	0,00474	0,00351
ИМГХ		0,00263	0,000314	0,000036	$4,32 \times 10^{-6}$	$1,85 \times 10^{-7}$
АВСИМ	$\ E_L\ $	0,005977	0,003576	0,002481	0,001853	0,001175
ИМГХ		0,001481	$1,434 \times 10^{-4}$	$1,599 \times 10^{-5}$	$1,884 \times 10^{-6}$	$5,765 \times 10^{-8}$

Решение задачи (3)–(6) в первом приближении ($K = 1, N = 8$) приводит к аналогичной (по форме) системе уравнений, дающей коэффициенты $a_j(t), j = \overline{1,8}$ (с целью сокращения коэффициенты опускаем). Из (27) получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = \frac{\left(10585935360 t^5 - 1023422400 t^4 \sigma(t) + 43243200 t^3 \sigma(t)^2 - \right.}{220540320 t^5 - 21621600 t^4 \sigma(t) + 900900 t^3 \sigma(t)^2 - 19800 t^2 \sigma(t)^3 + 225 t \sigma(t)^4 - \sigma(t)^5}, \left. -1009800 t^2 \sigma(t)^3 + 13200 t \sigma(t)^4 - 78 \sigma(t)^5\right)$$

откуда находим $\sigma(t) = \alpha t$, где $\alpha \approx 36,20416$ – корень алгебраического уравнения

$$10585935360 - 1243962720\alpha + 64864800\alpha^2 - 1910700\alpha^3 + 33000\alpha^4 - 303\alpha^5 + \alpha^6 = 0.$$

Для фронта возмущения получаем $\delta(t) = \sqrt{36,20416} t$, тогда решение принимает вид

$$T(x,t) = 1 - 0,5642193729 \frac{x}{\sqrt{t}} + 0,0467173026 \frac{x^3}{t^{3/2}} + 0,0023128157 \frac{x^4}{t^2} - 0,0066570621 \frac{x^5}{t^{5/2}} + 0,0017065643 \frac{x^6}{t^3} - 0,000181089 \frac{x^7}{t^{7/2}} + 7,22436525 \cdot 10^{-6} \frac{x^8}{t^4}. \quad (32)$$

Коэффициенты в решении (32) быстро убывают: $a_{j+1}/a_j \approx 10^{-1}$.

В [16] аналогичная задача решена с помощью представления температурного профиля комбинированным полиномом (31) на основе интегральных методов НВИМ, RIM и СИМ. Для RIM и СИМ соответственно получено $n = 5,5215$ и $5,5132$, т. е. $n > 5$. Расчеты показали, что ИМГХ ($N = 8$) превосходит по точности методы НВИМ, RIM и СИМ на два порядка и выше, а с комбинированным профилем (31) – примерно в 20 раз выше (рис. 3, а, табл. 2). Анализ решений, согласно АВСИМ ($N = 8$) и ИМГХ ($N = 8$), дает следующие значения параметров E_{\max} и $\|E_L\|$: $E_{\max}|_{\text{АВСИМ}} = 0,00734$, $E_{\max}|_{\text{ИМГХ}} = 0,000314$, $\|E_L\|_{\text{АВСИМ}} = 0,003576$, $\|E_L\|_{\text{ИМГХ}} = 1,434 \cdot 10^{-4}$. Для $N = 8$ точность решения ИМГХ более чем в 20 раз превосходит точность решения согласно АВСИМ.

Для второго ($K = 2, N = 11$) и третьего ($K = 3, N = 14$) приближений значения коэффициентов $a_j (j = 1, \bar{N})$ температурного профиля (5) приведены в табл. 3. В соответствии с ИМГХ из (28) для $N = 11$ и $N = 14$ находим $\delta(t) = \sqrt{48,3438266 t}$ и $\delta(t) = \sqrt{60,6889316 t}$ соответственно. В таком случае для $\delta(t)$ при разных приближениях ($K = 0, 1, 2, \dots$) приходим к последовательности

$$\{\delta(t)\}_K = \sqrt{24,10645 t}, \sqrt{36,20416 t}, \sqrt{48,3438266 t}, \sqrt{60,6889316 t}, \dots \quad (K = 0, 1, \dots).$$

Т а б л и ц а 3. Полиномиальные коэффициенты a_j для формулы (9)

$j = 0, 1, 2$		a_0	a_1	a_2
N	11	1	-0,564191515	0
	14	1	-0,564189637	0
$j = 3, 4, 5$		a_3	a_4	a_5
N	11	0,046994665	0	-0,003211522
	14	0,047007190	0	-0,003498003
$j = 6, 7, 8$		a_6	a_7	a_8
N	11	0,0005634	0,0006307	-0,00321152
	14	0	0,0001493	0,00007095
$j = 9, 10, 11$		a_9	a_{10}	a_{11}
N	11	0,00002022	-0,000001298	$3/427153 \cdot 10^{-8}$
	14	-0,00004946	0,000012216	-0,00000166
$j = 12, 13, 14$		a_{12}	a_{13}	a_{14}
N	14	$1,325642 \cdot 10^{-7}$	$-5,866628 \cdot 10^{-9}$	$1,1173503 \cdot 10^{-10}$

Охарактеризуем точность приближенных решений на основе применения полиномов высокого порядка. На рис. 3, б представлены значения параметра E для методов АВСИМ и ИМГХ при степени полинома $N = 11$. Представленные графики наглядно отражают совершенную несопоставимость сравниваемых интегральных методов по точности получения аппроксимационных решений. Параметры E_{\max} и $\|E_L\|$ для АВСИМ и ИМГХ соответственно равны: $E_{\max}|_{\text{АВСИМ}} = 0,00575$, $E_{\max}|_{\text{ИМГХ}} = 0,000036$, $\|E_L\|_{\text{АВСИМ}} = 0,002481$, $\|E_L\|_{\text{ИМГХ}} = 1,599 \cdot 10^{-5}$. В данном случае ($N = 11$) ИМГХ превосходит по точности решений АВСИМ примерно в 150 раз. Графики отклонения (ε_T) для $t = 0,5$ при $N = 14$ и 20 приведены на рис. 4. При степени полинома $N = 20$ имеем $E_{\max} = 1,85 \cdot 10^{-7}$, $\|E_L\| = 5,765 \cdot 10^{-8}$, что дает основание считать полученное решение, по существу, точным. При $N = 14$ получаем следующее отношение ошибок:

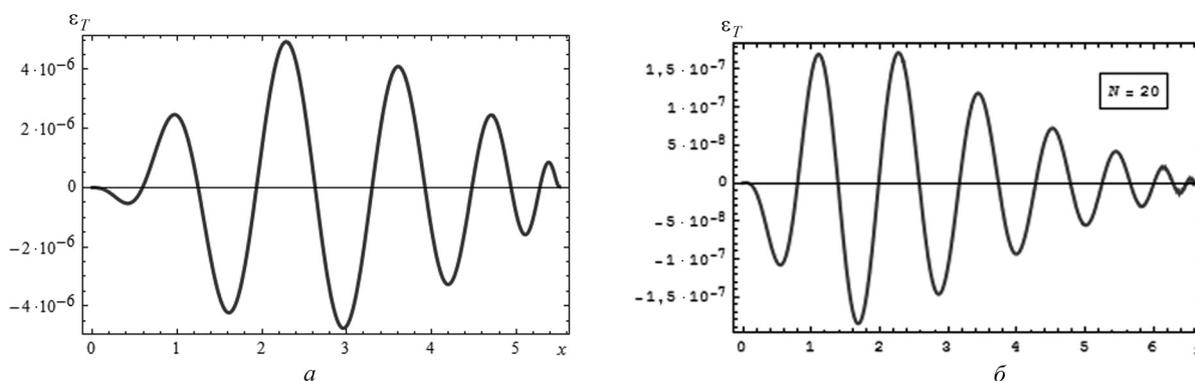


Рис. 4. Отклонение приближенного решения на основе ИМГХ от точного решения в момент времени $t_1 = 0,5$ при $N = 14$ (а) и 20 (б)

$(E_{\max}|_{\text{АВСІМ}})/(E_{\max}|_{\text{ІМГХ}})=1,097 \cdot 10^3$ (три порядка). Для степени полинома $N = 20$ получаем $(E_{\max}|_{\text{АВСІМ}}^{N=20})/(E_{\max}|_{\text{ІМГХ}}^{N=20})=1,90 \cdot 10^4$ (четыре порядка).

Представляет интерес определение плотности теплового потока Q на поверхности. Подобного рода задачи имеют важное прикладное значение [17]. При $h(t) = 1$ плотность теплового потока в момент времени $t = 1$ составляет $Q|_{t=1} = 1/(\pi t) = 1/\pi$. Определим для данного момента времени тепловой поток известными приближенными методами, а также ИМГХ и затем сравним расчетные данные с точным значением. В табл. 4 представлены полученные значения для методов НВІМ, СІМ и АВСІМ. Как видим, из рассмотренных известных методов наилучшую точность ($\approx 0,5\%$) дают RIM в случае усложненного полинома (31). Однако отметим, что ИМГХ с простым степенным полиномом обеспечивает более высокую точность расчета плотности теплового потока (табл. 4). При $N = 5$ и 8 относительная ошибка (ε_Q) для ИМГХ составляет 0,0884 и 0,0053% соответственно. По сравнению с методами, использующими комбинированный профиль [16], ИМГХ ($N = 8$) дает точность расчета Q на два порядка выше.

Таблица 4. Сравнительные данные расчета плотности теплового потока и ε_Q (%)

Метод расчета	[14]	[15]		[16]		ИМГХ	
	НВІМ	НВІМ	RIM	RIM	СІМ	$N = 5$	$N = 8$
$n (N)$	2,121	2,008	2,074	5,5215	5,5132	$N = 5$	$N = 8$
Профиль	$\left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)^n$	$\left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)^n \left[1 + \phi(t) \ln\left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)\right]$			$1 + \sum_{j=1}^N a_j \left(\frac{x}{\delta(t)}\right)^j$		
Q_{appr}	0,58292	0,57773	0,58601	0,56707	0,56692	0,5646886	0,564219
$\varepsilon_Q, \%$	3,320	2,401	3,877	0,510	0,483	0,0884	0,0053

Примечание. $Q_{ex} = 1/\sqrt{\pi} \approx 0,5641896$.

В табл. 5 представлены сравнительные данные плотности теплового потока и параметры E_Q , ε_Q для методов АВСІМ и ИМГХ в зависимости от величины N . Для АВСІМ увеличение степени полинома N от 5 до 14 приводит к уменьшению ошибки ε_Q с 0,9168% ($N = 5$) до 0,6752% ($N = 14$), т. е. совершенно незначительно. Отметим также, что для $N = 5$ и 8 плотность теплового потока сохраняет одно и то же значение $Q_{appr} = 0,5590170$ при ошибке $\varepsilon_Q = 0,9168\%$, т. е. в методе АВСІМ увеличение степени полинома от 5 до 8 не дало никакого эффекта. Иная картина наблюдается при использовании ИМГХ: точность расчета теплового потока Q на несколько порядков превышает его точность в АВСІМ. При $N = 14$ имеем $(\varepsilon_Q|_{\text{АВСІМ}}^{N=14})/(\varepsilon_Q|_{\text{ІМГХ}}^{N=14}) \approx 0,704 \cdot 10^5$ (около пяти порядков).

Таблица 5. Тепловой поток Q_{appr} и параметры E_Q , ε_Q (%) в зависимости от N

Метод расчета	Параметр	Степень полинома N			
		5	8	11	14
АВСІМ	Q_{appr}	0,5590170	0,5590170	0,5597444	0,5603801
ІМГХ		0,5646886	0,5642193	0,5641915	0,5641896
АВСІМ	E_Q	0,0051726	0,0051726	0,0044452	0,0038095
ІМГХ		$4,9901 \cdot 10^{-4}$	$2,9716 \cdot 10^{-5}$	$1,9165 \cdot 10^{-6}$	$5,4092 \cdot 10^{-8}$
АВСІМ	$\varepsilon_Q, (\%)$	0,9168	0,9168	0,7879	0,6752
ІМГХ		0,0884	0,0053	$3,42 \cdot 10^{-4}$	$9,587 \cdot 10^{-6}$

Примечание. $Q_{ex} = 1/\sqrt{\pi} \approx 0,564189583$.

Представленные в табл. 2, 5 данные свидетельствуют о высокой скорости сходимости решений на основе ИМГХ, что в равной мере относится к температурной функции $T(x, t)$ и ее производной $\partial T / \partial x|_{x=0}$. Например, для E_{\max} и E_Q имеем $(E_{\max}^{N=5}) / (E_{\max}^{N=14}) \approx 1,40 \cdot 10^4$, $(E_{\max}^{N=5}) / (E_{\max}^{N=20}) \approx 1,42 \cdot 10^5$, $(E_Q^{N=5}) / (E_Q^{N=14}) \approx 0,92 \cdot 10^5$. Отмечаем, что каждые три степени полинома N дают уменьшение ошибки решения примерно на порядок. Для оценки скорости сходимости использованы параметры p_E^1 , p_E^2 , p_Q^1 и p_Q^2 из (12). Результаты расчета приведены в табл. 6. Как известно, значение параметра $p = 2$ характеризует хорошую сходимость решений. Полученные для ИМГХ значения $p_L^{1,2} \gg 2$ и $p_Q^{1,2} \gg 2$ при $N = \overline{5, 20}$ отражают очень высокую сходимость.

Таблица 6. Параметры сходимости $p_E^{1,2}$ и $p_Q^{1,2}$ в зависимости от N

Метод расчета	Параметр	Степень полинома N			
		8	11	14	20
АВСИМ	p_L^1	1,093	1,148	1,212	1,272
ИМГХ		4,967	6,887	8,869	
АВСИМ	p_L^2	1,093	1,115	1,138	1,173
ИМГХ		4,967	5,745	6,475	7,324
АВСИМ	p_Q^1	0	0,48	0,64	
ИМГХ		6,00	8,59	14,79	
АВСИМ	p_Q^2	0	0,19	0,30	
ИМГХ		6,00	7,05	8,87	

Заключение. Для решения широкого класса краевых задач эволюционного типа, описываемых дифференциальным уравнением теплопроводности, предложен интегральный метод граничных характеристик (ИМГХ), использующий идею фронта возмущения $R(t)$ и основанный на последовательности из граничных характеристик $\{\Gamma_n(t)\}, \forall n \in \mathbb{Z}$. В рассмотренном случае полупространства с граничным условием первого рода $T(0, t) = h(t)$ функция $h(t)$ представляется граничной характеристикой нулевого порядка $h(t) = \Gamma_0(t)$. Система линейных алгебраических уравнений, составленная на основе интегральных тождеств $\{\mathcal{L}_n\{T\} \equiv \Gamma_n(t)\}_{n=1}^{2K+3}$ и $\{\mathcal{L}_{-(n-1)}\{T\} \equiv \Gamma_{-(n-1)}(t)\}_{n=1}^K, n = \overline{1, K}, K \in \mathbb{Z}_{\geq}$, а также на основе двух условий на фронте температурного возмущения, позволяет определить полиномиальные коэффициенты $a_j(t), j = \overline{1, N}$, причем $N = N_0 + 2 + 3K$ ($N_0 = 3$). Применение полиномов высокого порядка дает практически точные решения. Так, при $N = 14$ и 20 ошибка составляет $\|E_L^{N=14}\| = 1,88 \cdot 10^{-5}$ и $\|E_L^{N=20}\| = 5,765 \cdot 10^{-8}$ соответственно. При $N = 20$ точность решений ИМГХ превосходит точность решений на основе известного метода дополнительных граничных условий более чем на четыре порядка. Установлена высокая сходимость решений: каждые три степени полинома снижают ошибку примерно на порядок.

Список использованной литературы

1. *Kot, B. A.* Метод граничных характеристик в задачах теплопроводности на основе интеграла теплового баланса / В. А. Кот // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016, – № 2. – С. 54–65.
2. *Goodman, T. R.* Application of integral methods to transient nonlinear heat transfer / T. R. Goodman // Adv. Heat Transfer. – New York: Academic Press, 1964. – Vol. 1. – P. 51–122.
3. *Myers, T. G.* Optimizing the exponent in the heat balance and refined integral methods / T. G. Myers // Int. Commun. Heat Mass Transfer. – 2009. – Vol. 36, N 2. – P. 143–147.
4. *Langford, D.* The heat balance integral method / D. Langford // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1973. – Vol. 16, N 12. – P. 2424–2428.
5. *Wood, A. S.* A new look at the heat balance integral method / A. S. Wood // Appl. Math. Model. – 2001. – Vol. 25, N 10. – P. 815–824.
6. *Лыков, А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 600 с.

7. *Goodman, T. R.* The heat-balance integral – further considerations and refinements / T. R. Goodman // Transactions of ASME, ser. C. – 1961. – №. 1. – P. 83–93.
8. *Федоров, Ф. М.* Граничный метод решения прикладных задач математической физики / Ф. М. Федоров. – Новосибирск: Наука, 2000. – 220 с.
9. *Кудинов, В. А.* Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях / В. А. Кудинов, Б. В. Авенин, Е. В. Стефанюк. – М.: Высшая школа, 2008. – 305 с.
10. *Стефанюк, Е. В.* Дополнительные граничные условия в нестационарных задачах теплопроводности / Е. В. Стефанюк, В. А. Кудинов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 269–282.
11. *Myers, T. G.* Application of the combined integral method to Stefan problems / T. G. Myers, S. L. Mitchell // Appl. Math. Model. – 2011. – Vol. 35, N 9. – P. 4281–4294.
12. *Sadoun, N.* On the refined integral method for the one-phase Stefan problem with time-dependent boundary conditions / N. Sadoun, E. K. Si-Ahmed, P. Colinet // Appl. Math. Model. – 2006. – Vol. 30, N 6. – P. 531–544.
13. *Mitchell, S. L.* Application of standard and refined heat balance integral methods to one-dimensional Stefan problems / S. L. Mitchell, T. G. Myers // SIAM Rev. – 2010. – Vol. 52, N 1. – P. 57–86.
14. *Hristov, J. Y.* The heat-balance integral: 2. Parabolic profile with a variable exponent: The concept, analysis and numerical experiments / J. Y. Hristov // C. R. Mecanique. – 2012. – Vol. 340, N 7. – P. 493–500.
15. *Mitchell S. L.* Application of heat balance integral methods to one-dimensional phase change problems / S. L. Mitchell, T. G. Myers // Int. J. Diff. Eq. – 2012. – Vol. 2012. Article ID 187902. 22 p. doi:10.1155/2012/187902.
16. *Mitchell, S. L.* Improving the accuracy of heat balance integral methods applied to thermal problems with time dependent boundary conditions / S. L. Mitchell, T. G. Myers // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, N 17. – P. 3540–3551.
17. *Zien, T. F.* Approximate calculation of transient heat conduction / T. F. Zien // AIAA J. – 1976. – Vol. 14, N 3. – P. 401–406.

Поступила в редакцию 19.06.2015

УДК 66.047

П. В. АКУЛИЧ

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ
С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ
НА УГЛУБЛЯЮЩЕЙСЯ ГРАНИЦЕ ИСПАРЕНИЯ**

*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: akul@hmti.ac.by*

Предложен приближенный метод расчета тепломассопереноса в цилиндрических пористых телах при углублении границы испарения с учетом переменной температуры и давления пара на ней. Установлены зависимости углубления границы испарения и кинетики процесса сушки от параметров пористой среды и внешнего теплового воздействия.

Ключевые слова: тепломассоперенос, кинетика сушки, сушка

P. V. AKULICH

**HEAT AND MASS TRANSFER IN CYLINDRICAL POROUS BODIES WITH ACCOUNT
OF NONSTATIONARITY OF PARAMETERS OF DEEPENING EVAPORATION BOUNDARY**

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: akul@hmti.ac.by*

An approximate method is suggested for calculating heat and mass transfer in cylindrical porous bodies with deepening of the evaporation boundary with account of the variability of vapor temperature and pressure on it. Dependences of evaporation boundary deepening and kinetics of drying on the parameters of porous medium and external thermal effect have been found.

Keywords: heat and mass transfer, the drying kinetics, drying

Введение. Тепломассоперенос в капиллярно-пористых телах нередко сопровождается углублением зоны испарения. Данное явление наблюдается, если отвод пара настолько интенсивен, что капиллярный механизм переноса не обеспечивает подпитку жидкостью осушаемых пор. Математическое описание такого процесса основывается на задаче типа Стефана. Следует отметить, что в общем случае испарение происходит не только на движущемся фронте, но и в некоторой зоне. Это обусловлено, в частности, различными формами связи влаги с материалом.

Исследованию процессов тепломассопереноса с подвижной зоной или границей фазового превращения посвящено значительное количество работ [1–10]. В [1] получена система уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса. Для рассматриваемого процесса записываются общие уравнения для сухой и влажной зон, а критерий фазового превращения представляется в виде разрывной функции. Следует отметить, что критерий фазового превращения зависит от параметров процесса и такой подход достаточно сложен в реализации.

Существующие наиболее простые и удобные для практики модели (например, [3–7]) не учитывают фильтрационного движения пара в сухой зоне или температура на границе испарения, как правило, принимается постоянной величиной. В данной работе приводится приближенный метод расчета процессов тепломассопереноса в цилиндрических капиллярно-пористых телах в предположении углубления зоны испарения. Полагается, что к границе испарения теплота подводится за счет теплопроводности сухого слоя материала и расходуется на испарение влаги. Внутри капиллярно-пористого тела возникает избыточное давление пара, вызывающее его

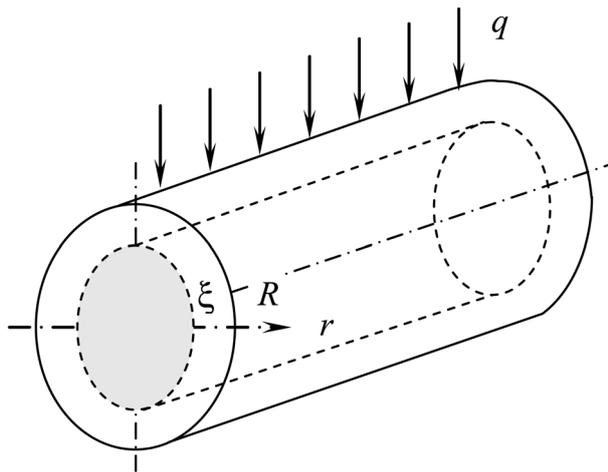


Рис. 1. К постановке задачи: цилиндрический образец с углубляющейся границей испарения

параметры насыщенного пара уравнением Клапейрона–Клаузиуса. С учетом принятых допущений уравнение для скорости углубления границы испарения при граничном условии III рода на поверхности $q = \alpha(T_\infty - T_R)$ можно записать

$$\left[c_c \rho_c (T_R - T_\xi) + (c_c \rho_c + c_{\text{вл}} u_V) (T_\xi - T_0) + u_V r_n \right] \xi \frac{d\xi}{d\tau} = - \frac{T_\infty - T_\xi}{\frac{1}{\alpha R} + \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{R}{\xi} \right)} \quad (1)$$

при начальном условии: $\tau = 0$, $\xi = R$; $\tau > 0$, $0 < \xi < R$. Здесь c_c , $c_{\text{вл}}$ – теплоемкость сухого тела, влаги (воды), Дж/(кг·К); r_n – удельная теплота парообразования, Дж/кг; τ – время, с; T_R , T_0 , T_ξ , T_∞ – соответственно температура поверхности тела, начальная температура тела, температура на границе испарения, температура окружающей среды, К; u_V – начальное влагосодержание тела, кг/м³; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); λ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ξ – текущая координата границы испарения, м; ρ_c – плотность сухого тела, кг/м³.

Исходя из того, что теплота от поверхности материала передается в глубь тела теплопроводностью, следует

$$\alpha(T_\infty - T_R) = \frac{T_R - T_\xi}{\frac{R}{\lambda} \ln \left(\frac{R}{\xi} \right)}, \quad (2)$$

откуда

$$T_R = \frac{T_\xi + T_\infty \gamma}{1 + \gamma}, \quad (3)$$

где $\gamma = (\alpha R / \lambda) \ln(R / \xi)$.

После подстановки (3) в (1) и несложных преобразований получаем

$$\frac{d\xi}{d\tau} = - \frac{T_\infty - T_\xi}{\xi (T_\infty - T_\xi) \frac{1}{a} \ln \frac{R}{\xi} + \xi \left(\frac{1}{\alpha R} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{\xi} \right) [c_m (T_\xi - T_0) + u_V r_n]}, \quad (4)$$

где $a = \lambda / c_c \rho_c$; $c_m = c_c \rho_c + c_{\text{вл}} u_V$.

Изменение влагосодержания тела связано с перемещением зоны испарения зависимостью

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{2\xi u_V}{R^2 \rho_c} \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (5)$$

фильтрацию от границы испарения к поверхности. В результате скорость переноса влаги определяется термическим и фильтрационным сопротивлениями. Отметим, что такой подход использовался нами для описания тепломассопереноса в плоских капиллярно-пористых телах [11].

Математическая модель. Рассмотрим бесконечное цилиндрическое капиллярно-пористое тело, на поверхность которого воздействует тепловой поток (рис. 1). Длина тела намного больше его диаметра. Пренебрегается градиентами переноса во влажной зоне. Допускается квазистационарное распределение температуры в сухой зоне. Температура и давление на границе испарения связаны, как

После интегрирования уравнения (4) можно определить время заглобления зоны испарения, т. е. время сушки.

Массовый поток пара на единицу длины тела в сухой зоне от границы испарения к поверхности можно представить таким образом:

$$j_{\Pi} = -\frac{2\pi}{\ln(R/\xi)} \frac{\rho_{\Pi} k_{\Pi}}{\mu_{\Pi}} (p_R - p_{\xi}). \quad (6)$$

Здесь k_{Π} – коэффициент проницаемости, m^2 ; p_R , p_{ξ} , p_{∞} – соответственно давление пара на поверхности тела, границе испарения, в окружающей среде, Па; μ_{Π} – коэффициент динамической вязкости пара, Па·с; ρ_{Π} – плотность пара, kg/m^3 .

Тогда

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{1}{u_V \xi \ln(R/\xi)} \frac{\rho_{\Pi} k_{\Pi}}{\mu_{\Pi}} (p_R - p_{\xi}). \quad (7)$$

Для потока пара на поверхности тела можно записать

$$-\frac{D}{\ln(R/\xi)} (p_R - p_{\xi}) = \beta R (p_R - p_{\infty}), \quad (8)$$

откуда

$$p_R = \frac{p_{\infty} + p_{\xi} D^*}{1 + D^*} \quad (9)$$

(β – коэффициент массообмена, $kg/(m^2 \cdot c \cdot Pa)$; $D^* = D/[\beta R \ln(R/\xi)]$; $D = \rho_{\Pi} k_{\Pi} / \mu_{\Pi}$).

При $\xi = R$ $p_R = p_{\xi}$. Подставив (9) в (7), имеем

$$\frac{d\xi}{d\tau} = -\frac{p_{\xi} - p_{\infty}}{u_V \xi \left[\frac{1}{D} \ln\left(\frac{R}{\xi}\right) + \frac{1}{\beta R} \right]}. \quad (10)$$

Давление насыщенного пара на границе испарения в зависимости от температуры определяется по уравнению Клапейрона–Клаузиуса

$$\frac{1}{p_{\xi}} \frac{dp_{\xi}}{dT_{\xi}} = \frac{r_{\Pi}(T_{\xi})}{R_{\Pi} T_{\xi}^2}. \quad (11)$$

Здесь R_{Π} – газовая постоянная пара, Дж/(кг·К).

Для случая, когда можно допустить $r_{\Pi}(T_{\xi}) = \text{const}$, имеем

$$p_{\xi} = p^* \exp(-T^*/T_{\xi}), \quad (12)$$

где $p^* = 6,4072 \cdot 10^{10}$ Па, $T^* = 4996$ К.

Из полученной системы уравнений (4), (10) и (12) можно определить температуру T_{ξ} на границе испарения в зависимости от ее координаты ξ . Для этого приравняем правые части уравнений (4), (10) и, подставив (12), после преобразований запишем

$$T_{\xi} = -T^* \ln^{-1} \left\{ \frac{C(T_{\infty} - T_{\xi})}{\left(\xi p^* / a \right) \ln(R/\xi) (T_{\infty} - T_{\xi}) + E p^* [c_m (T_{\xi} - T_0) + u_V r_{\Pi}]} + \frac{p_{\infty}}{p^*} \right\}, \quad (13)$$

где $C = u_V \xi \left[\frac{1}{D} \ln\left(\frac{R}{\xi}\right) + \frac{1}{\beta R} \right]$, $E = \xi \left(\frac{1}{\alpha R} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{\xi} \right)$.

Трансцендентное уравнение (13) представлено в виде $T_{\xi} = \varphi(T_{\xi})$ и решается методом последовательных приближений. Достаточные условия сходимости последовательности итераций

к корню уравнения следующие: в некоторой окрестности корня функция $\varphi(T_\xi)$ непрерывна и удовлетворяет условию «сжатия» $|\varphi'(T_\xi)| < 1$. Можно показать, что в исследуемой области параметров условие $|\varphi'(T_\xi)| < 1$ выполняется.

Далее рассмотрим решение задачи при граничном условии I рода на поверхности тела $T_R = \text{const}$. В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$\xi \ln\left(\frac{R}{\xi}\right) \frac{d\xi}{d\tau} = - \frac{\lambda(T_R - T_\xi)}{c_c \rho_c (T_R - T_\xi) + (c_c \rho_c + c_{\text{вл}} u_V) (T_\xi - T_0) + u_V r_{\text{п}}}. \quad (14)$$

Решим данное уравнение при условии, когда можно допустить, что температура на границе испарения $T_\xi = \text{const}$. Тогда время перемещения границы испарения или время сушки можно определить по выражению

$$\tau = \frac{c_c \rho_c (T_R - T_\xi) + c_m (T_\xi - T_0) + u_V r_{\text{п}}}{2\lambda(T_R - T_\xi)} \left[\frac{R^2}{2} - \xi^2 \left(\ln \frac{R}{\xi} + \frac{1}{2} \right) \right], \quad 0 < \xi \leq R. \quad (15)$$

Влагосодержание тела определяется по формуле

$$u = \frac{\xi^2 u_V}{R^2 \rho_c}, \quad (16)$$

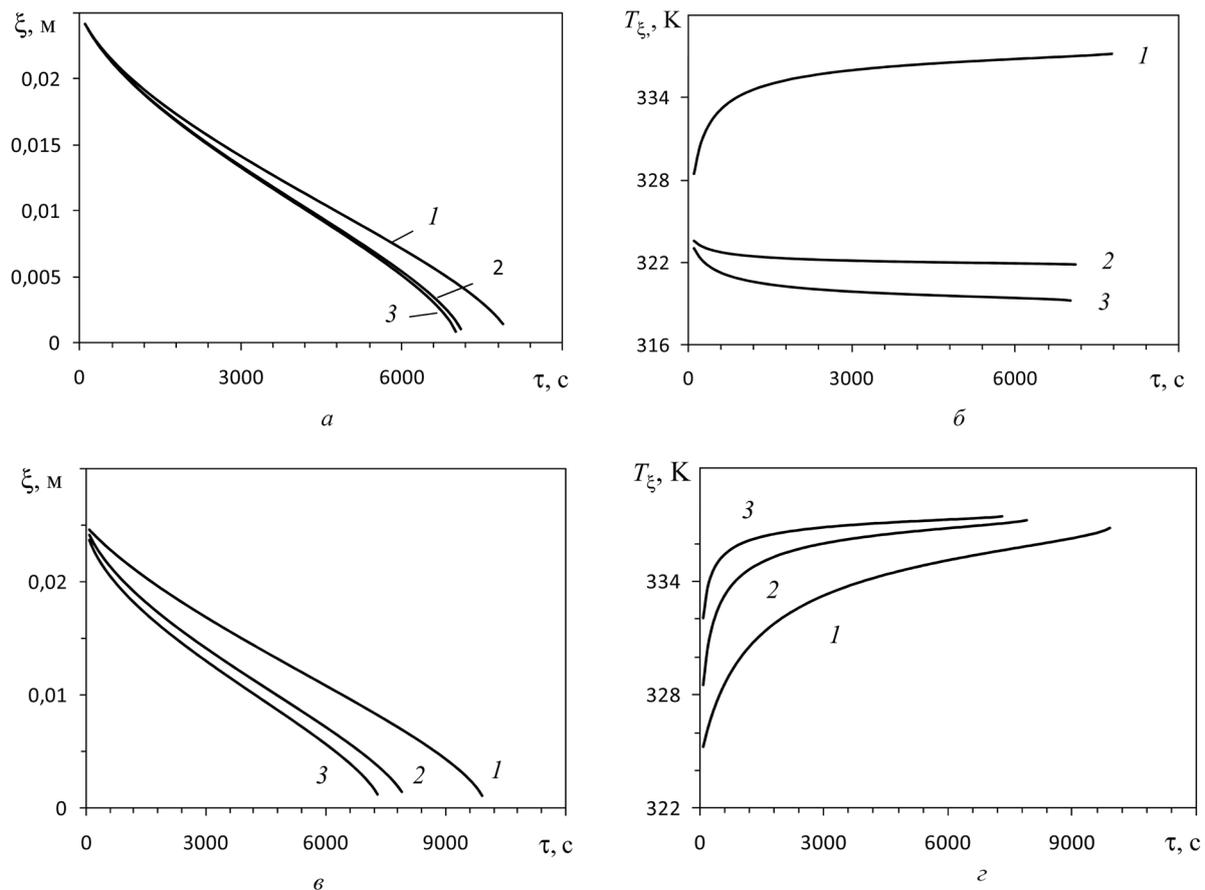


Рис. 2. Зависимости координаты границы испарения (а, в) и температуры (б, г) от времени: а, б – $\alpha = 50$ Вт/(м²·К), $\beta = 1 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с·Па); 1 – $k_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-14}$ м²; 2 – $k_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-13}$ м²; 3 – $k_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-12}$ м²; в, г – $k_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-14}$ м²; 1 – $\alpha = 20$ Вт/(м²·К), $\beta = 0,4 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с·Па); 2 – $\alpha = 50$ Вт/(м²·К), $\beta = 1 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с·Па); 3 – $\alpha = 100$ Вт/(м²·К), $\beta = 2 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с·Па)

а средняя его температура

$$\bar{T} = \frac{c_c \rho_c T_c (R^2 - \xi^2) + c_m T_\xi \xi^2}{c_c \rho_c (R^2 - \xi^2) + c_m \xi^2}. \quad (17)$$

Результаты расчетов и их обсуждение. Уравнения (4) и (13) решались при следующих теплофизических параметрах пористой среды (например, цилиндрических образцов термомодифицированной древесины); $u_V = 300$ кг влаги/м³ тела; $\rho_c = 600$ кг/м³; $c_{вл} = 4190$ Дж/(кг·К); $c_c = 1900$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,16$ Вт/(м·К); $T_0 = 293$ К; $r_n = 2380$ кДж/кг; $\mu_n = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $\rho_n = 0,6$ кг/м³; $p_\infty = 10$ кПа; $T_\infty = 473$ К; $R = 0,025$ м.

В результате численного решения получены зависимости влияния проницаемости пористого тела и коэффициентов теплообмена на скорость углубления границы испарения и ее температуру (рис. 2). Установлено, что с уменьшением проницаемости тела скорость углубления границы испарения замедляется. Это обусловлено повышением сопротивления движению пара в сухой зоне. Если при $k_n = 1 \cdot 10^{-14}$ м² и прочих равных условиях температура пара на границе испарения с ее углублением возрастает, то при $k_n = 1 \cdot 10^{-13}$ и $1 \cdot 10^{-12}$ м² она незначительно снижается. Необходимо отметить, что при низкой пористости среды (следовательно, малой проницаемости) возможно значительное возрастание температуры насыщения пара, вызываемое повышением его давления (рис. 2 б, кривая 1). Увеличение значения теплопроводности тела повышает величину теплового потока к границе испарения и вызывает ускорение ее углубления, при этом температура возрастает. Интенсификация внешнего тепло- и массообмена ускоряет перемещение границы испарения. Однако, как и следовало ожидать, с ростом коэффициентов теплообмена ее скорость замедляется вследствие возрастания влияния термического и фильтрационного сопротивлений сухого слоя (рис. 2, в). При этом температура на границе испарения возрастает (рис. 2, г). Отметим, что повышение температуры окружающей среды приводит как к интенсификации массопереноса, так и к росту температуры на испаряющейся поверхности. О снижении скорости сушки с уменьшением проницаемости среды свидетельствуют кинетические зависимости на рис. 3. Следует отметить, что данная модель учитывает влияние парциального давления пара и температуры в окружающей среде и может быть использована для оценки воздействий внешних условий на интенсивность внутреннего теплообмена.

Заключение. На основе предложенной модели получены аналитические выражения для расчета скорости углубления границы испарения и кинетики сушки с учетом зависимости температуры и давления на границе испарения от параметров процесса. Показано, что теплофизические параметры пористой среды и режим теплообмена оказывают существенное влияние на значения температуры на углубляющейся поверхности испарения и скорости ее перемещения, что следует принимать во внимание в расчетах процессов теплообмена.

Список использованной литературы

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Хейфец, Л. И. Многофазные процессы в пористых средах / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
3. Кумер, И. Дж. Приближенное решение обобщенной задачи Стефана для пористой среды с переменными теплофизическими свойствами / И. Дж. Кумер, Л. Н. Гупта // Теплообмен-V: Материалы V Всесоюз. конф. по теплообмену. – Минск, 1976. – Т.5. – С. 187–197.
4. Шубин, Г. С. Расчет процессов теплообмена, сопровождаемых движением границы фазовых превращений / Г. С. Шубин // Теплообмен-V: Материалы V Всесоюз. конф. по теплообмену. – Минск, 1976. – Т. 5. – С. 207–217.

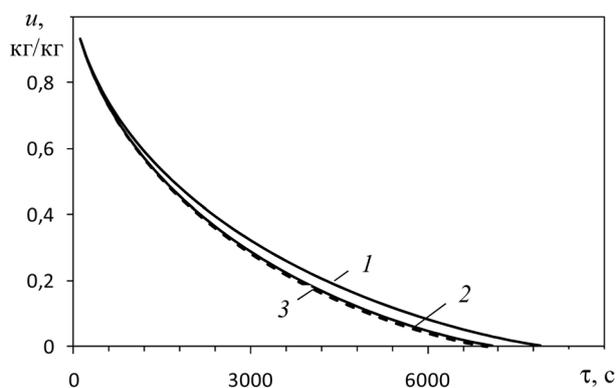


Рис. 3. Кинетические зависимости влагосодержания образца при различной его проницаемости: $\alpha = 50$ Вт/(м²·К), $\beta = 1 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с·Па); 1 – $k_n = 1 \cdot 10^{-14}$ м²; 2 – $k_n = 1 \cdot 10^{-13}$ м²; 3 – $k_n = 1 \cdot 10^{-12}$ м²

5. Рубинштейн, Л. И. Проблема Стефана / Л. И. Рубинштейн. – Рига: Звайгзне, 1967. – 457 с.
6. Кафаров, В. В. Моделирование и оптимизация процессов сушки / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов // Итоги науки и техники: процессы и аппараты химической технологии. – М., 1987. – Т. 15. – С. 3–84.
7. Фролов, В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В. Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
8. Бабенко, В. Е. Квазистационарный режим сушки сферической частицы / В. Е. Бабенко, Ю. А. Бувич, Н. М. Шепшук // ТОХТ.– 1975. – № 2. – С. 247–277.
9. Расчет процессов сушки, сопровождаемых перемещением зоны испарения / П. В. Акулич [и др.] // Тепло- и массоперенос: модели, теоретические и экспериментальные исследования: сб. науч. тр. АНК ИТМО НАН Беларуси. – Минск, 1993. – С. 26–29.
10. Акулич, П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки / П. В. Акулич. – Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2002. – 268 с.
11. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 443 с.

Поступила в редакцию 21.04.2016

УДК 621.039.577-182.3

А. П. АХРАМОВИЧ¹, И. В. ВОЙТОВ², В. П. КОЛОС¹

**О РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕАКТОРА С МИКРОТВЭЛАМИ.
АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕПЛОСЪЕМА В АКТИВНЫХ ЗОНАХ**

*¹Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: ahr@bas-net.by,*

*²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: rektor@belstu.by*

Проанализирован теплосъем в ядерных реакторах с микротвэлами. Определена область устойчивой фильтрации теплоносителя в топливном слое. Установлено, что стабильность теплосъема не зависит от величины объемного энерговыделения в активной зоне, на нее влияют соотношения термодинамических параметров теплоносителя на входе и выходе из топливного слоя и уровень турбулизации потока в нем. Показано, что в ТВС насыпного типа гармонично сочетаются все достоинства топлива в виде микротвэлов и бокового подвода теплоносителя к слою.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка (ТВС), микротвэл, устойчивость теплосъема, энергонапряженность.

A. P. AKHRAMOVICH¹, I. V. VOITOV², V. P. KOLOS¹

**ON THE PERFORMANCE OF A REACTOR WITH MICRO FUEL.
ANALYSIS OF HEAT REMOVAL ORGANIZATION IN ACTIVE ZONES**

*¹The Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: ahr@bas-net.by,*

*²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,
e-mail: rektor@belstu.by*

Heat removal in nuclear reactors with micro fuel has been analyzed. The area of heat transfer fluid sustainable filtration in the fuel bed has been defined. It appears that heat removal stability does not depend on the size of the core power density. It is influenced by the ratio of thermodynamic parameters of coolant inlet and outlet of the fuel bed and by the level of flow turbulence. It shows that the bulk fuel assembly harmoniously combines all the advantages of micro fuel and the side inlet of coolant in the bed.

Keywords: fuel assembly, micro fuel, heat removal stability, power density.

Введение. Повышение безопасности ядерных реакторов в настоящее время является одной из самых острых проблем энергетики. Аварии с радиоактивными выбросами наносят ощутимый вред окружающей среде, здоровью человека, а свертывание строительства атомных станций отрицательно отражается на энерговооруженности народного хозяйства. К тому же ядерная энергетика совместно с солнечной могут сыграть важную роль в борьбе с «парниковым» эффектом [1–3] и достойной альтернативы им пока не существует. Следует ожидать, что они заметно потеснят на мировом рынке традиционную углеводородную энергетическую, но только в том случае, если технологии переработки топлива и захоронения радиоактивных отходов будут экологически безвредными, а реакторы безопасными.

Различные материалы (в первую очередь, топливо), находящиеся в активной зоне действующей установки, являются главным источником опасности. Поэтому снижение количества ядерного горючего в активной зоне и уменьшение ее объема при переходе на высокоэнергонапряженные реакторы позволят не только сохранить прежний уровень потенциальной угрозы при увеличении суммарной мощности ядерных установок, но дадут возможность даже снизить ее. Кроме того, реакторы с величинами удельной мощности и нейтронного потока на порядок выше, чем

у ныне существующих, будут активно способствовать развитию биотехнологии, медицины, материаловедения, ядерных силовых установок, оборонной, ракетной и космической техники.

К настоящему времени ядерные реакторы со стержневыми твэлами достигли своего предела по удельной мощности 0,2–0,5 МВт/дм³, нейтронному потоку $5 \cdot 10^{15}$ нейтрон/(см²·с). При разработке первых энергетических ядерных реакторов специалисты понимали, что стержневые твэлы не самая удачная конструкция. По сравнению с ней топливо в виде шариков диаметром порядка миллиметра с защитной оболочкой для удержания радиоактивных продуктов деления, получивших название «микротвэлы», обладает весомыми положительными свойствами – сыпучестью, огромной удельной поверхностью и необычайной стойкостью, которые дают следующие преимущества.

1. Очень большая удельная поверхность теплосъема позволяет иметь в реакторах существенно более высокую удельную мощность и температуру теплоносителя по сравнению с реализованными на практике. Это важно как для снижения массогабаритных характеристик (в том числе и количества топлива в активной зоне), так и для получения высокопотенциального тепла (например, для нужд металлургии) и больших нейтронных потоков для технологических и исследовательских целей.

2. Малые температурные перепады в микротвэлах вызывают незначительные температурные напряжения. Топливо в активной зоне не несет конструкционных нагрузок, механическое воздействие на него также минимально. Все эти факторы способствуют надежной эксплуатации реактора.

3. Изменение конфигурации микротвэлов вследствие радиационного распухания топлива незначительно влияет на гидродинамику и теплообмен в активной зоне, что позволяет достичь более глубокого выгорания делящегося вещества. Это положительно сказывается на экономике топливного цикла и экологии окружающей среды.

4. Наличие возможности распределения потока теплоносителя как по радиусу, так и по высоте активной зоны способствует более рациональной организации теплосъема, при которой можно избежать «горячих пятен», сильно ограничивающих энергонапряженность.

5. Сыпучесть микротвэлов позволяет использовать пневмо- или гидротранспорт. Его применение резко сокращает время и затраты на перегрузку реактора и дает возможность выйти на более высокий уровень автоматизации производства и переработки топлива и приблизиться к тому, что остеклованные отходы по биологической вредности становятся сравнимыми с природным ураном. Изготовление микротвэлов с использованием технологии «кипящего слоя» значительно проще и на 40 % дешевле производства стержневых твэлов [4].

6. Микротвэлы с многослойной оболочкой способны эффективно удерживать продукты деления при любых авариях [4, 5], что позволяет создать на их основе безопасный ядерный реактор.

Однако активная зона в виде неподвижной засыпки, защемленной между решетками, обладает рядом существенных недостатков.

1. Вследствие силового воздействия потока теплоносителя на микротвэлы последние стремятся перекрыть свободное пространство. Это приводит к росту гидравлического сопротивления слоя и перераспределению потока по его сечению. Возникает клапанный эффект [6].

2. Существует предел скорости потока сквозь неподвижный зернистый слой (существенно меньший скорости звука), превысить который невозможно никаким повышением входного давления [7].

3. В плотном слое образуется непроточная зона, лимитирующая интенсивность теплосъема [8].

4. Наличие режимов с неустойчивой фильтрацией газа в тепловыделяющем слое сужает область приемлемых термодинамических параметров теплоносителя на входе-выходе из реактора и значительно усложняет его управление на частичных и переходных режимах [9].

Чтобы избежать этих недостатков или снизить негативный эффект, вызванный ими, необходимо изменить структуру топливного слоя и рационально организовать подвод теплоносителя, осуществив его распределение по высоте и радиусу активной зоны в соответствии с величиной объемного энерговыделения.

Особенности расчета энергонапряженных реакторов. Создание высокоэнергонапряженных ядерных реакторов с микротвэлами является сложной научно-технической задачей. Она может быть решена только на основе экспериментальных данных высокой точности, с помощью схем и методов математического моделирования, позволяющих проводить взаимозависимый (сопряженный) расчет размеров и форм всех элементов активной зоны с одновременным определением термогидродинамических и нейтронно-физических параметров.

Существуют прямая и обратная задачи теплофизики реактора, отличающиеся своей постановкой. В прямых задачах, исходя из размеров конструктивных элементов и их свойств, входных параметров теплоносителя, уравнений связи и функции тепловыделения, определяются температурное поле в активной зоне, давление и скорость движения теплоносителя. С появлением мощной вычислительной техники и разработки эффективных расчетных схем достигнуты значительные успехи в решении данных задач. Не составляет труда провести расчеты полей термогидродинамических параметров для любых конструкций тепловыделяющих сборок при работе реактора на частичных, переходных, штатных и нештатных режимах.

Намного скромнее успехи в области решения обратных задач – определения размеров, количества и форм ТВС, обеспечивающих заданные характеристики теплопереноса в активной зоне. Несмотря на кажущуюся простоту (эти задачи, как правило, одномерные – профили конструктивных элементов не бывают многомерными), они намного сложнее прямых задач. Для их решения отсутствует развитый математический аппарат, к тому же нет должного обмена информацией между специалистами, так как обратные задачи имеют явно прикладной характер, а разработка серьезных аппаратов составляет коммерческую, а в некоторых случаях и государственную тайны. Поэтому в открытой печати редко встречаются даже общетеоретические работы, касающиеся моделирования энергонапряженных реакторов как единого устройства.

Очевидно, что приоритеты ценностей при моделировании физических явлений и объектов для решения прямых и обратных задач совершенно различны, иногда диаметрально противоположны. Поэтому для сопряженной задачи поиска оптимальных размеров и форм конструктивных элементов активной зоны, термогидродинамических параметров теплоносителя и нейтронно-физических характеристик приходится соединять в одно целое, на первый взгляд, несоединяемое – прямую и обратную задачи. Необходимо одновременно определять и граничные условия, и поля термогидродинамических и нейтронно-физических параметров. Сопряженный расчет позволяет достигнуть глубокой оптимизации реактора, сделав его предельно эффективным.

Конструкции ТВС и анализ теплосъема в них. Обладая физико-математическим обеспечением проектирования реакторов, основанном на сопряженном расчете, проанализируем организацию теплосъема в активных зонах с топливом сферической формы. Особое внимание уделим термомеханической устойчивости. Незначительное увеличение (случайное возмущение) энерговыделения вызывает рост температуры теплоносителя и соответственно увеличение его вязкости и уменьшение плотности. Это приводит к повышению гидравлического сопротивления участка слоя и снижению массовой скорости фильтрации, что способствует дальнейшему увеличению температуры. При определенных условиях возникает лавинообразное нарастание температуры участка слоя, происходит перегрев топлива, нарушается физика реактора, появляются сложности в управлении.

Существует множество конструкций ТВС с микротвэлами. Большинство из них не имеют под собой серьезной теоретической и экспериментальной основы. Далее будут рассмотрены только реакторы со сборками, обладающими отличиями принципиального характера, проработанные на уровне не ниже эскизного проекта.

Вначале рассмотрим организацию теплосъема в широко известных высокотемпературных графитогазовых ректорах. Основу топливной загрузки здесь составляют микротвэлы, представляющие собой шары из карбида урана диаметром 0,15–0,20 мм, покрытые чередующимися слоями графита и карбида кремния. Наружный диаметр готовых микротвэлов составляет около 0,5 мм. Вместе с графитовым порошком они заполняют объем в шаровых изделиях из графита (твэлах) диаметром 60 мм. Эти реакторы имеют очень простой гидравлический тракт активной зоны – теплоноситель прокачивается через плотный слой шаровых твэлов в аксиальном направлении.

Реактор AVR, построенный в ФРГ [10], принадлежит к этому типу установок, его характеристики приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики реактора AVR (теплоноситель – гелий)

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	49
Диаметр активной зоны, м	3,0
Высота активной зоны, м	3,0
Расход теплоносителя, кг/с	13,6
Давление теплоносителя, МПа	1,0
Температура теплоносителя, К:	
на входе	473
на выходе	1123
Диаметр графитовой оболочки твэла, мм	60
Число твэлов в реакторе, шт.	7500
Объемное тепловыделение, кВт/дм ³	2,3
Максимальная температура топлива, К	1523
Максимальная температура оболочки, К	1223
Выгорание, кДж/кг	1,3×10 ¹⁰
Удельная нагрузка, кВт/кг	3000
Максимальный тепловой поток, кВт/м ²	58
Средний тепловой поток, кВт/м ²	46

Применение термостойких материалов и невысокая удельная мощность позволяют довести температуру газа на выходе из активной зоны до 1123 К (в последнем варианте до 1223 К), что на 100–200 К превышает температуру теплоносителя на выходе таких реакторов, как Dragon (Англия) и HTGR (США), где использованы трубчатые твэлы.

Опираясь на результаты исследований процессов переноса в тепловыделяющем зернистом слое [6–9], находим область устойчивой фильтрации гелия в реакторах типа AVR, описываемую следующим неравенством:

$$\Gamma = 0,26 \left[\operatorname{erf} (0,85 - \operatorname{Re}/1000) - 3,1 \right] \ln \frac{P_1}{P_2} + 0,58 \left[\operatorname{erf} (\operatorname{Re}/1000 - 1,0) - 2,0 \right] \ln \frac{T_1}{T_2} < 1,$$

где $\operatorname{Re} = \rho V d / \mu$ – число Рейнольдса; ρ , V , μ , P_1 , T_1 – соответственно плотность, скорость потока в незагруженном сечении, динамическая вязкость, давление и температура теплоносителя на входе в топливный слой, P_2 , T_2 – давление и температура на выходе из него.

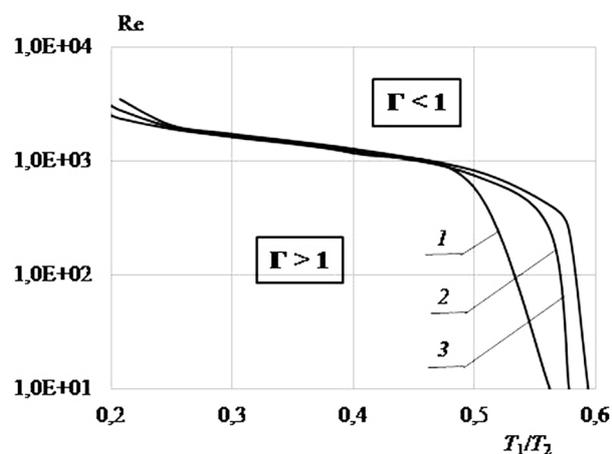


Рис. 1. Границы области устойчивого теплосъема, как функции Re и соотношений термодинамических параметров T_1/T_2 , P_1/P_2 : 1 – $P_1/P_2 = 1,05$; 2 – $P_1/P_2 = 1,1$; 3 – $P_1/P_2 = 1,15$

На рис. 1 показаны границы области устойчивого теплосъема. Как ни странно, они не зависят от величины объемного тепловыделения, а определяются уровнем турбулизации потока в топливном слое и термодинамическими параметрами теплоносителя на входе-выходе из него. Качественно эти границы похожи для всех газовых реакторов с топливом сферической формы независимо от его расположения в активной зоне и свойств теплоносителя.

Реакторы типа AVR обладают рядом достоинств: отсутствие конструктивных элементов в топливном слое, простота загрузки и выгрузки топлива, устойчивый теплосъем (главным образом, за счет турбулизации пото-

ка при обтекании твэлов большого диаметра). Однако низкое объемное тепловыделение не позволяет считать данный реактор многоцелевым.

В СССР пытались улучшить термогидродинамику топливного слоя за счет движения твэлов (диаметром 60 мм) по своеобразным магистралям в активной зоне [11] и деления слоя на части [12], но добиться заметного роста интенсивности теплосъема в этих реакторах (канальный и модульный типы) не удалось. Чтобы ощутимо увеличить энергонапряженность активной зоны, необходимо диаметр шарового элемента уменьшить с 60 мм (AVR) до 1–3 мм. В этом случае значительно увеличивается теплоотдающая поверхность и охлаждение свободно засыпанных микротвэлов происходит при малых температурных перепадах в них.

При сохранении размеров активной зоны потери давления на слое микротвэлов будут в десятки раз выше, чем в реакторе со стержневыми твэлами. Таким образом, возникает проблема рационального расположения и охлаждения топлива для удержания величины потерь давления в активной зоне в допустимых пределах.

Решая эту задачу, М. Родин с сотрудниками предложил следующую схему отвода тепла [13]. Микротвэлы располагаются плотным слоем в гексагональных коробках (рис. 2). Перфорированная трубка продевается через центральные отверстия в коробках и служит для фиксации их в активной зоне и отвода горячего теплоносителя. Холодный теплоноситель подается в специальные выемки с отверстиями на ребрах шестигранника и проходит через слой в радиальном направлении. Разработчики предполагали, что в реакторе с этой сборкой можно достичь величины энергонапряженности 7,5 МВт/дм³ при температуре газа на выходе 2573 К. На самом деле реактор с такими параметрами неработоспособен. При исследовании устойчивости теплосъема нами установлено, что при выходе на штатный режим работы приходится пересекать полосу неустойчивого, рискованного теплосъема, возникшую из-за большой разницы между выходной и входной температурами теплоносителя.

Характеристики еще одного реактора, разработанного М. Родиным с сотрудниками, представляются вполне реальными (табл. 2).

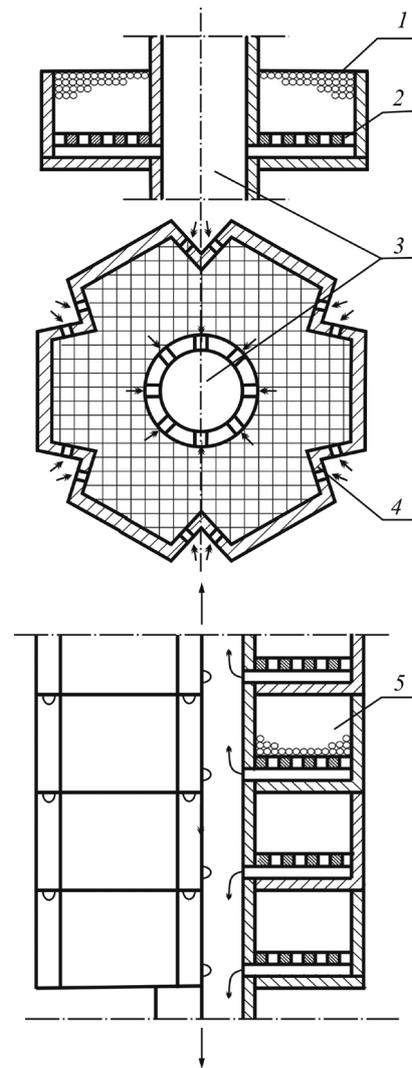


Рис. 2. Шестигранная ТВС с микротвэлами: 1 – топливный слой; 2 – экран; 3 – отводная труба; 4 – входное отверстие; 5 – сборка плоских топливных элементов

Т а б л и ц а 2. Основные характеристики реактора с шестигранными ТВС

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	50
Объем активной зоны, дм ³	66
Масса ²³⁵ U, кг	160
Число ТВС, шт.	18
Высота топливного слоя в коробке, см	1,27
Диаметр микротвэлов, мм	0,2
Объемное тепловыделение в топливе, МВт/дм ³ :	
среднее	2,5
максимальное	3,75
Давление газа на входе, МПа	4,13
Падение давления на входном устройстве, МПа	0,105
Отношение мощности на прокачку к мощности реактора	0,023
Температура газа, К:	
на входе	423
на выходе	1253

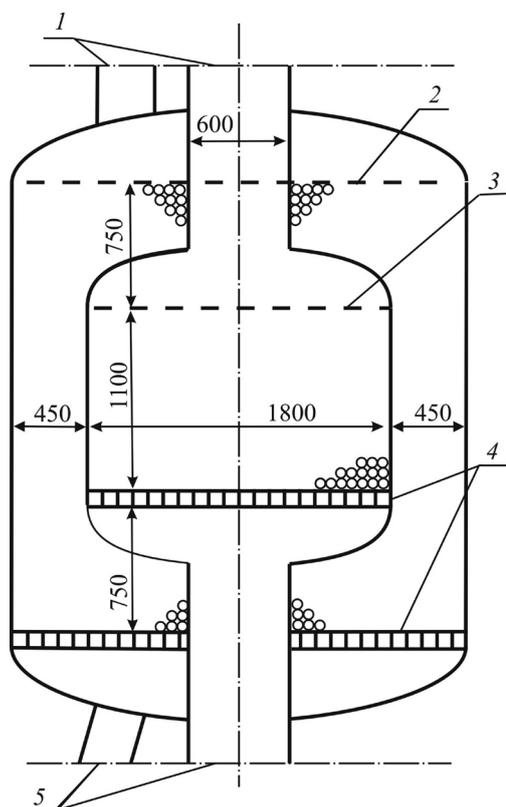


Рис. 3. Быстрый реактор со слоем микротвэлов и аксиальной прокачкой теплоносителя: 1 – вход теплоносителя; 2 – отражатель; 3 – уровень засыпки топлива; 4 – перфорированные пластины; 5 – выход теплоносителя

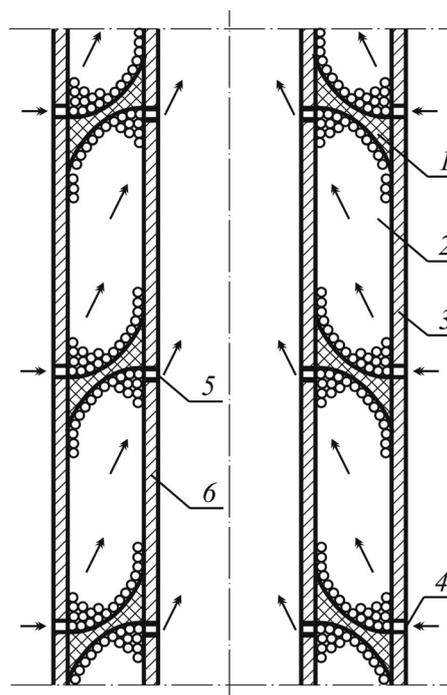


Рис. 4. ТВС с фиксированным слоем между коаксиальными трубами: 1 – диафрагма; 2 – топливный слой; 3 – внешняя труба; 4 – вход воды; 5 – выход пара; 6 – внутренняя труба

В Брукхэйвенской Национальной лаборатории разработан проект установки (рис. 3) с микротвэлами, охлаждаемыми жидкометаллическим теплоносителем – «быстрый реактор со слоем» [14]. Его активная зона выполнена в виде одного слоя микротвэлов, что, естественно, требует большой мощности для прокачки теплоносителя. Чтобы удержать ее в разумных пределах, создатели проекта пошли на увеличение размера микротвэла, доведя его диаметр до 6–10 мм.

Следует отметить, что проектом предусмотрены реакторы с аксиальной и радиальной подачей теплоносителя к слою. В табл. 3 приведены основные параметры этих аппаратов. Они не так ярко демонстрируют преимущества топлива сферической формы, как, например, результаты [13], но являются достаточно высокими по сравнению со стержневыми реакторами. Поместив в одной таблице значения параметров обоих реакторов, можно показать, какой бывает эффект от продуманной схемы прокачки теплоносителя.

Т а б л и ц а 3. Характеристики быстрых реакторов со слоем микротвэлов

Параметр	Аксиальная прокачка	Радиальная прокачка
Тепловая мощность активной зоны, МВт	837	824
Тепловая мощность зоны воспроизводства, МВт	59	57
Объем активной зоны, дм ³	1540	306
Масса Pu, кг	2800	810
Диаметр микротвэлов в активной зоне (PuC+UC), мм	5,5	3,0
Диаметр микротвэлов в зоне воспроизводства (UC), мм	6,25	3
Объемное тепловыделение в активной зоне, МВт/дм ³	0,18	0,89
Общая мощность на прокачку, кВт	2500	2200
Температура теплоносителя, К:		
на входе	563	563
на выходе	923	923

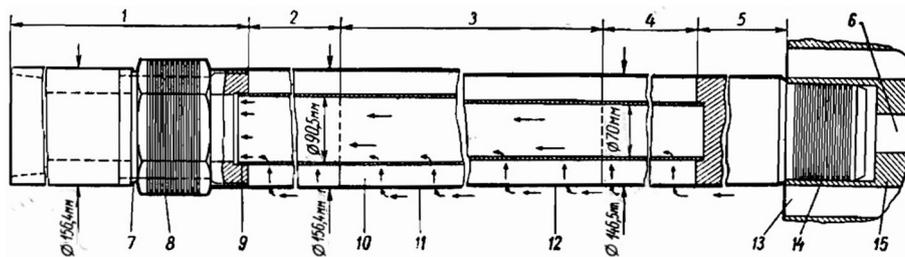


Рис. 5. Пористая ТВС с микровзлами: 1, 5 – графитовый отражатель (60 см); 2, 4 – зона воспроизводства (80 см); 3 – активная зона (100 см); 6 – канал, соединенный с газодувкой; 7 – паз для механизма перегрузки; 8, 14 – уплотнение; 9 – пористая втулка; 10 – засыпка микровзлов; 11 – втулка раздачи газа; 12 – удерживающая сетка; 13 – вход газа; 15 – опорная решетка

Переход от традиционной (аксиальной) подачи жидкого натрия в активную зону к боковой (радиальной) подаче позволяет при том же топливе увеличить удельное энерговыделение более чем в 4 раза и примерно в 3,5 раза уменьшить загрузку плутония, ощутимо снизив потенциальную опасность реактора.

Своеобразная конструкция ТВС (рис. 4) разработана в лаборатории CISE-Segrate (Милан) [15]. Две коаксиальные цилиндрические трубки скреплены диафрагмами, между которыми размещены микровзлы. Вода в качестве теплоносителя подается в специальные отверстия во внешней трубе, проходит топливный слой, снимает тепло, претерпевая при этом фазовый переход, и в виде перегретого пара через отверстия поступает во внутреннюю трубу, двигаясь по которой покидает активную зону.

Отметим, что форма диафрагм ТВС глубоко не прорабатывалась, а, вероятнее всего, выбиралась интуитивно; эти диафрагмы вызывают срыв фильтрационного потока, что сильно лимитирует интенсивность теплосъема.

Конструкции ТВС [13, 15] аналогичны тем, что желаемое распределение теплоносителя по их высоте достигается с помощью специальных раздаточных устройств, которые требуют разделения топливного слоя на секции. Диафрагмы (перегородки) полностью исключают возможность оперативной перегрузки ядерного горючего пневмо- и гидротранспортом. Идеи, воплощенные в этих конструкциях, в настоящее время малоперспективны.

Принципиально иной подход к решению задачи распределения потока газа по высоте активной зоны применен в конструкции ТВС [16], показанной на рис. 5. Здесь микровзлы также окружены непосредственно теплоносителем, что уменьшает содержание посторонних материалов в активной зоне и увеличивает поверхность теплоотдачи. Они располагаются в кольцевом пространстве шириной 3,5 см, образуемом внутри пористой втулкой из карбида кремния, а снаружи металлической сеткой, которая придает конструкции устойчивость. К сетке прилегает перфорированная втулка для равномерной раздачи теплоносителя.

Газ подается через входные отверстия, проходит через слой частиц во внутреннюю полость ТВС и далее вверх через диффузор и центральное отверстие графитового концевика. Положительной осо-

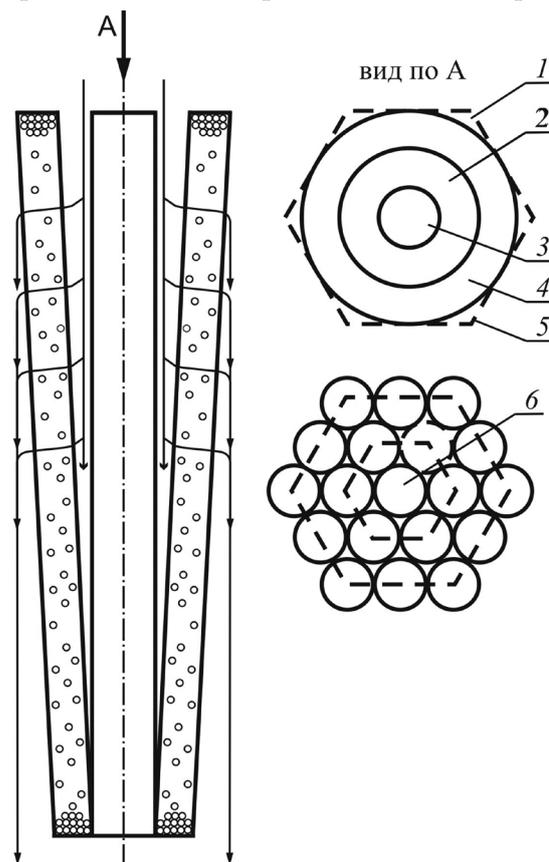


Рис. 6. Кассета плотного изогнутого слоя (модель MLX): 1 – межкассетное пространство; 2 – распределительный канал; 3 – металлогидридный замедлитель; 4 – слой микровзлов; 5 – граница ячейки; 6 – сборка

бенностью этой конструкции является отсутствие разделяющих диафрагм. Однако наличие раздаточной перфорированной втулки с заведомо высоким гидравлическим сопротивлением предотвращает низкий расход теплоносителя через ТВС.

Использование ряда идей по стабилизации распределения теплоносителя [17–20] для улучшения характеристик ТВС не позволило заметно увеличить объемное тепловыделение. В этих конструкциях на переходных режимах проявляется неустойчивость фильтрации газа, что приводит к закручиванию потока в отводящих каналах и нарушению теплогидравлического подобия.

Одновременно с появлением вышерассмотренных конструкций ТВС в США предложена сборка, получившая название «кассета плотного изогнутого слоя – модель MLX» [21]. Она содержит (рис. 6) цилиндрический металлогидридный замедлитель; слой топлива набирается из шаров делящегося вещества малого диаметра. Активная зона состоит из ряда таких элементов, тесно упакованных и расположенных приблизительно по форме цилиндра. Теплоноситель (воздух) входит в ТВС сверху, течет по профилированному распределительному каналу, одновременно подается в радиальном направлении в топливный слой и проходит через него. Горячий воздух покидает активную зону по пространству, окружающему сборку.

Профилирование канала ТВС дает возможность организации желаемого распределения потока газа без лимитирующих теплосъем и затрудняющих перегрузку вспомогательных конструктивных элементов внутри топливного слоя, как это имеет место в моделях [13, 15], и позволяет существенно увеличить надежность теплосъема в активной зоне по сравнению с [16]. Однако устранить срыв и застой потока теплоносителя вблизи торцов топливного слоя в данном проекте не удалось.

Рассмотрим насыпные ТВС (рис. 7) и активную зону (рис. 8). В этой конструкции теплоноситель, выходя из топливного слоя, уже не попадает в межкассетное пространство, как

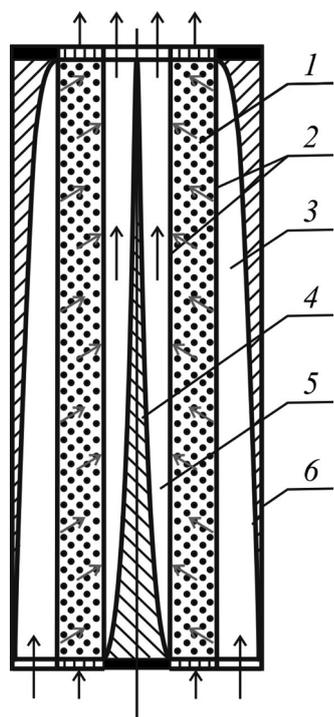


Рис. 7. Схема насыпной ТВС: 1 – слой из микротвэлов; 2 – ограждающие слой решетки; 3 – распределительный канал; 4 – вытеснительный стержень; 5 – отводной канал; 6 – обсадная трубка

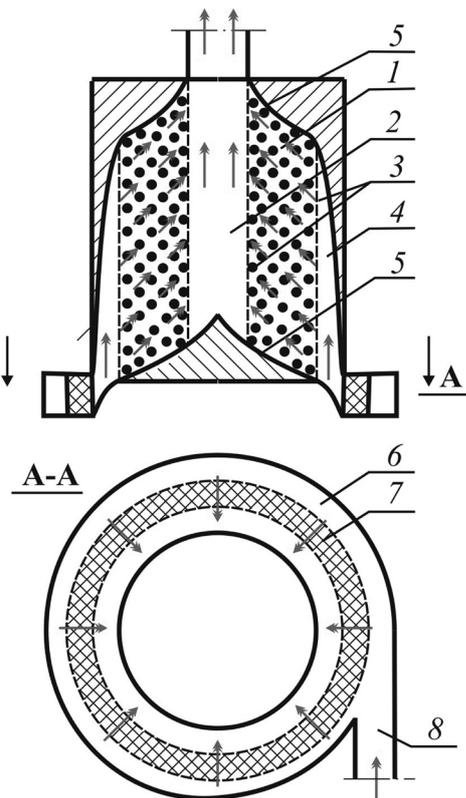


Рис. 8. Схема насыпной активной зоны с устройством ввода теплоносителя: 1 – слой микротвэлов; 2 – отводной канал; 3 – ограждающие слой решетки; 4 – распределительный канал; 5 – профилированные торцы слоя; 6 – литочный канал; 7 – пористая втулка; 8 – канал ввода теплоносителя

у предшествующей модели, а движется по изолированным друг от друга каналам. Эти отводные каналы позволили разрешить конструкционные проблемы, возникшие в «кассете плотного изогнутого слоя» [21]. Так, например, вследствие компактного расположения ТВС в активной зоне реактора MLX у каждой из них существовали шесть линий соприкосновения, что приводило к серьезным искажениям потока воздуха снаружи элементов и значительному росту области «горячих пятен».

Не только в этом заключается положительная роль отводного канала. Его наличие привело к зарождению идеи совместного профилирования обоих каналов – распределительного и отводного [22], что позволило рационально распределить теплоноситель по высоте активной зоны и добиться устойчивого автотеплового теплосъема при работе реактора на частичных нагрузках [23].

Заключение. ТВС насыпного типа является естественным результатом развития инженерной мысли. На данный момент это наиболее совершенное устройство, в котором гармонично сочетаются все достоинства топлива в виде микротвэлов и бокового подвода теплоносителя. Предельная энергонапряженность активной зоны достигает 10 МВт/дм³.

В любых конструкциях ТВС с микротвэлами устойчивость теплосъема не зависит от величины объемного энерговыделения. На нее влияют соотношение термодинамических параметров теплоносителя на входе-выходе и уровень турбулизации потока в топливном слое. Чем больше отношения P_1/P_2 , T_2/T_1 и чем меньше диаметр микротвэла (несмотря на рост при этом удельной поверхности), тем выше вероятность перегрева топлива в результате потери устойчивости фильтрации. Специальное профилирование распределительного и отводного каналов насыпной ТВС снижает угрозу возникновения этого негативного эффекта.

Список использованной литературы

1. Бабаев, Н. С. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда / Н. С. Бабаев, В. Ф. Демин, Л. А. Ильин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Синева, Н. М. Экономика атомной энергетики / Н. М. Синева, Б. Б. Батуров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.
3. Петросьянц, А. М. Ядерная энергетика / А. М. Петросьянц. – М.: Наука, 1981. – 272 с.
4. Пономарев-Степной, Н. Микротвэлами против ядерных катастроф и терроризма [Электронный ресурс] / Н. Пономарев-Степной, Е. Гришанин, Н. Кухаркин // Промышленные ведомости. – 2001. – № 18 (29). – Режим доступа: http://www.promved.ru/oct_2001_04.shtml. – Дата доступа: 18.04.2016.
5. Гришанин, Е. И. Антитеррористическое топливо для АЭС / Е. И. Гришанин // Атомная стратегия. – 2007. – № 29. – С. 15.
6. Гольдштик, М. А. Клапанный эффект в зернистом слое / М. А. Гольдштик, А. В. Лебедев, В. Н. Сорокин // Инж.-физ. журн. – 1978. – Т. 34, № 3. – С. 389–393.
7. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1984. – 164 с.
8. Гидродинамическая обстановка в свободном объеме слоя катализатора / В. А. Кириллов [и др.] // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 206, № 6. – С. 1409–1411.
9. Колос, В. П. Устойчивый и псевдоустойчивый режимы фильтрации / В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Теплофизика высоких температур. – 1983. – Т. 21, № 6. – С. 1231–1233.
10. Красин, А. К. Реакторы атомных электростанций / А. К. Красин. – Минск: Наука и техника, 1971. – 144 с.
11. Выбор концепции конструкции и физические особенности активной зоны ВТГР для энергетических производств / Г. П. Горюшкин [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1979. – № 6. – С. 73–78.
12. Ганаев, И. Х. Модульные и кольцевые зоны ВТГР / И. Х. Ганаев, А. Д. Жирнов, В. А. Царюк // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1980. – № 2. – С. 74–75.
13. Rodin, M. B. Study of the packed-bed fuel element concept / M. B. Rodin. – ANL-6193, 1960. – 57 p.
14. Robba, W. A. Settled bed fast reactor / W. A. Robba [itc]. – BNL-713 (T-250), 1961. – 38 p.
15. Perona, G. Fixed bed nuclear reactor / G. Perona, G. Palladino // IAEA. – 1963. – Vol. 1. – P. 157–174.
16. Хоперский, А. И. Быстрые высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением / А. И. Хоперский // Атомн. техн. за рубежом. – 1970. – № 10. – С. 3–13.
17. Кузнецкий, Р. С. О равномерном распределении жидкости коллектором с отверстиями / Р. С. Кузнецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 1975. – Т. 9, № 4. – С. 622–626.
18. Кузнецкий, Р. С. О перфорации коллектора с заданным распределением вытекающей жидкости / Р. С. Кузнецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 1982. – Т. 16, № 1. – С. 64–69.
19. Управление в теплообменных аппаратах коллекторного типа / Ю. В. Богданов [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1988. – № 1. – С. 43–45.

20. Расчет радиального расхода в коллекторной системе при равномерном тепловыделении и переменной пористости стенок / Ю. В. Богданов [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1988. – № 1. – С. 40–42.

21. *Temme, M. I.* The Heat-hydravlies analisis of possibility of using the fixed bed fuel element in the nuclear reactor with metal-gidrid moderator / M. I. Temme. – AN-MLX-99, 1962. – Vol. 5. – 336 p.

22. Тепловыделяющий элемент насыпного типа: а. с. 797413 СССР: G21C3/04/ А. П. Ахрамович, В. Т. Казазян, В. П. Колос; дата публ.: 15.09.1980.

23. *Ахрамович, А. П.* О работоспособности реактора с микротвэлами. Условия автомодельности теплосъема в активной зоне на частичных нагрузках / А. П. Ахрамович, И. В. Войтов, В. П. Колос // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 2. – С. 74–80.

Поступила в редакцию 28.04.2016

УДК 621.311.25:519.6:532.546

Г. З. СЕРЕБРЯНЫЙ, М. Л. ЖЕМЖУРОВ, Г. М. ЖМУРА, Д. О. РУДОВИЧ

**ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ
ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: silver@sosny.bas-net.by*

Одномерные модели переноса загрязнения в грунте не всегда адекватно отражают реально происходящие процессы. Переход к двумерной или трехмерной моделям позволяет многократно повысить точность расчетов.

Ключевые слова: продольная дисперсия, поперечная дисперсия, моделирование, радиоактивные отходы.

G. Z. SEREBRYANYI, M. L. ZHEMZHUROV, G. M. ZHMURA, D. O. RUDOVICH

**TWO-DIMENSIONAL MODEL FOR SAFETY ANALYSIS OF POINTS OF BURIAL PLACE
OF RADIOACTIVE WASTES**

*The Joint Institute of Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: silver@sosny.bas-net.by*

Single-dimensional models of contaminants migration in soil do not always adequately reflect the processes that occur in real life. Transition to two- or three- dimensional modeling would help enormously improving accuracy of calculations.

Keywords: longitudinal dispersion, transverse dispersion, modeling, radioactive wastes.

При оценках безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов часто полагают, что эффективная индивидуальная эквивалентная доза облучения поглощается индивидуумом лишь при потреблении загрязненной воды. В этом случае задача оценки безопасности пунктов захоронения сводится к прогнозированию состояния грунтовых вод в зоне влияния хранилищ на весь срок их потенциальной опасности. В качестве индикаторов безопасности используются концентрации и потоки радионуклидов в водных средах. В свою очередь задача поиска зоны влияния сводится к определению координат границы области, на которой величина концентрации радионуклидов в воде меньше или равна референтным уровням содержания радионуклидов в питьевой воде ($РУ^{вода}$).

Изучение процессов и параметров массопереноса в водоносных пластах базируется на закономерностях теории миграции подземных вод, которая дает физико-математическое описание различных механизмов сложных процессов гидродинамического и физико-химического характера. Миграция химических компонентов в водоносных пластах осуществляется в рамках конвективно-диффузионных процессов (с учетом механизма гравитационной дифференциации), на которые накладываются процессы физико-химических превращений в подземных водах и взаимодействий с вмещающими горными породами.

Для оперативного анализа процессов переноса радиоактивных водорастворимых соединений наряду с численными решениями необходимо также иметь аналитические решения, которые отражают характер, закономерности переноса и распределения их в почвах и грунтах.

Основанием для оценки безопасности и принятия тех или иных решений служит прогнозный расчет загрязнения окружающей среды вследствие возможного выноса радиоактивных веществ за пределы конструктивных границ хранилищ. При этом существенными моментами становятся точность и достоверность результатов, полученных с помощью расчетных моделей. Миграция радионуклидов в почвенном покрове определяется значительным количеством взаимо-

связанных физико-химических процессов, происходящих в системе газовая фаза – водный раствор – вмещающая порода. Вследствие сложности этих процессов для описания поведения радионуклидов целесообразно использовать методы математического моделирования. С их помощью возможно описать основные процессы, происходящие в системе, с учетом их нелинейного влияния друг на друга.

При проведении расчетных оценок безопасности хранения радиоактивных отходов в приповерхностных хранилищах обычно применяются модели, упрощенные за счет уменьшения размерности задачи для определения распространения радиоактивных веществ в геологических породах. Уменьшение размерности задачи, с одной стороны, позволяет привлечь достаточно удобные в применении аналитические решения для одномерной продольной конвективной диффузии, полученные в [1]. С другой стороны, такое упрощение является вынужденным из-за невозможности использования более сложных моделей при недостатке подробных сведений о гидрогеологическом строении исследуемой территории.

Однако одномерные модели переноса загрязнения в грунте не всегда адекватно отражают реально происходящие процессы. Переход к двумерной или трехмерной моделям позволяет многократно повысить точность расчетов. Детальное представление о возможностях и особенностях переноса радионуклидов, полученное при многомерном моделировании, создает основу для применения нормативов при обосновании в конкретных условиях решений о продлении сроков эксплуатации хранилищ, придании им статуса могильника, необходимости перегрузки радиоактивных отходов и реабилитации территории.

Процесс поперечного перемешивания жидкостей изучен в меньшей степени, чем данный процесс с учетом продольной диффузии. Дисперсия в различных направлениях приводит к образованию сложных по своим очертаниям ареалов загрязнений в водоносных горизонтах.

Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов дисперсии смесей, движущихся в пористой среде, показали их большие абсолютные значения по сравнению с величинами коэффициентов молекулярной диффузии. Установлена также линейная зависимость коэффициента дисперсии от скорости потока и размера частиц пористой среды [2–4]. Согласно этому заключению, продольная (A_L) и поперечная (A_T) дисперсности связаны с коэффициентами дисперсии следующим образом:

$$D_L = A_L V, \quad D_T = A_T V, \quad (1)$$

где V – скорость потока в продольном направлении.

Задача прогноза формирования ареалов загрязнений радионуклидами с учетом двумерной дисперсии может быть рассмотрена на основе конвективно-диффузионной модели [1], в соответствии с которой концентрация радиоактивной примеси описывается уравнением

$$nR \frac{\partial S}{\partial t} = nD_L \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - V \frac{\partial S}{\partial z} + nD_T \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \lambda nRS, \quad (2)$$

где $S = C/C_0$ – безразмерная удельная активность; C – удельная активность радионуклида в жидкой фазе, Бк/л; C_0 – начальная удельная активность радионуклида в жидкой фазе, Бк/л; $R = 1 + \rho K_d/n$ – коэффициент ретроградации; K_d – коэффициент распределения водорастворимого соединения, см³/кг; D_L – коэффициент продольной дисперсии, м²/г; D_T – коэффициент поперечной дисперсии, м²/г; n – активная пористость скелета породы, м³/м³; t – время, г; z – продольная координата; x – поперечная координата; λ – постоянная распада радионуклида (1/г); ρ – плотность скелета породы, г/см³.

Для решения уравнения (2) введем в рассмотрение новую координату $Z = z + x\sqrt{D_T/D_L}$. С учетом этого уравнение (2) принимает следующий вид:

$$nR \frac{\partial S}{\partial t} = nD \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} - V \frac{\partial S}{\partial Z} - \lambda nRS, \quad (3)$$

где $D = D_L \left(1 + \frac{D_T}{D_L} \right)$.

Для решения уравнения (3) введем в рассмотрение критерии подобия массопереноса при миграции радионуклидов в пористой среде согласно [3]: $u = ZV/nD$, $\tau = tV^2/Rn^2D$, $\beta = \lambda Rn^2D/V^2$.

В рамках принятых предположений уравнение транспорта загрязнителя приведено к безразмерному виду:

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} + \frac{\partial S}{\partial u} = \frac{\partial^2 S}{\partial u^2} - \beta S \quad (4)$$

с начальными условиями $S(0, \tau) = \exp(\beta\tau)$.

Аналитическое решение получено с помощью преобразования Лапласа [3] и имеет вид

$$S = \frac{1}{2} \exp(-\beta\tau) \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{u-\tau}{2\sqrt{\tau}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{u+\tau}{2\sqrt{\tau}}\right) \exp(u) \right], \quad (5)$$

где $\operatorname{erfc}(Y) = 1 - \operatorname{erf}(Y)$ – остаточная функция ошибок.

Для заданного расстояния от источника загрязнения время достижения максимальной концентрации определяется из условия $\partial S / \partial \tau = 0$. Тогда с учетом (5) имеем

$$-\beta S + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{u}{\tau^{3/2}} \exp(-\beta\tau) \exp\left[-\frac{(u-\tau)^2}{4\tau}\right] = 0. \quad (6)$$

Полученные решения при заданных параметрах позволяют определить расстояние от источника, где максимальная концентрация в водном растворе соответствует $РУ^{\text{вода}}$ для данного радионуклида. Таким образом, задача сводится к решению трансцендентного уравнения (6) (значения S вычисляются по (5) относительно τ при расчетном β и различных u).

Рассмотренная модель предназначена для описания процессов, протекающих в окружающей среде. Для проведения расчетов необходимы сведения о значительном числе параметров, характеризующих эту среду. Информация о них часто ограничена, а сами параметры могут изменяться в широких пределах в зависимости от состояния природного объекта. Для данной модели такими параметрами являются ρ , n , V , K_d , A_p , A_T . Постоянная распада λ для радионуклида принимается фиксированной величиной.

Для долгоживущих радионуклидов, таких как ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Pu и ^{241}Am , прогнозные оценки необходимо рассматривать в течение (порядка сотен и тысяч лет) промежутка времени, за который могут существенно меняться основные параметры модели. На основании экспериментальных данных проведен анализ корректного выбора необходимых параметров модели.

Природные факторы, связанные с передвижением почвенной влаги (фильтрационный поток, капиллярный поток и термовлагоденос) можно рассматривать как общие. Разница между видами потока заключается лишь в порождаемых его силах и направлении движения влаги. Не принимая во внимание причины, вызывающие движение влаги в почве, будем считать, что три вида потока почвенной влаги можно заменить средним суммарным, равнодействующим потоком. Его направление и величина зависят от времени года, суток, погодных условий и свойств почвы. Переменным во времени суммарным потоком оперировать неудобно вследствие многих причин и, прежде всего, в связи с большими трудностями его измерения. Поэтому при рассмотрении длительных промежутков времени (например, измеряемых годами) есть смысл считать поток в среднем постоянным в течение сезона, года или нескольких лет.

Результаты по плотности и пористости грунтов зоны аэрации получены на основании экспериментальных данных [6].

Значения коэффициента распределения водорастворимого соединения K_d для отдельно взятого радионуклида могут отличаться на несколько порядков. В большинстве работ, посвященных анализу безопасности пунктов хранения радиоактивных отходов, используется консервативный подход. Суть его заключается в том, что для выбранного радионуклида в зависимости от вида грунта проводится анализ имеющихся экспериментальных данных и выбирается наименьшее их значение. В настоящей работе величины коэффициента распределения водорастворимого соединения K_d приняты согласно [7]. $РУ^{\text{вода}}$ для радионуклидов приняты согласно приложению 9 [8].

Необходимые параметры модели, используемые при проведении модельных расчетов, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Основные параметры модели для выбранных радионуклидов

Радионуклид	ρ , г/см ³	n	K_d , см ³ /г	λ , 1/г.	РУ ^{возд} , Бк/л
¹³⁷ Cs	1,75	0.348	45	0,0240	10
⁹⁰ Sr	1,75	0.348	2.3	0,0231	10
²⁴¹ Am	1,75	0.348	177	0,0016	1
²⁴¹ Pu	1,75	0.348	174	0,0481	10

Особый интерес представляет выбор методики расчета величины дисперсности A_L . В последнее время этому вопросу в мировой литературе посвящены многочисленные исследования. В 1992 г. в [9] представлены все имеющиеся к этому времени экспериментальные данные для значений A_L . Основным выводом этой работы авторы считают, что продольная дисперсность зависит от расстояния источника до точки наблюдения. В дальнейшем при использовании результатов [9] и новых экспериментальных данных в [10–13] применена эмпирическая зависимость продольной дисперсности от расстояния источника до точки наблюдения в виде $A_L = cL^m$. Однако только в [13] все экспериментальные данные подразделены для различных геологических пород. Для песчаных водоносных горизонтов зоны аэрации в [13] для величины A_L предложена зависимость $A_L = 0,2L^{0,44}$. На основании данных [9] в [12] получено, что в среднем по всем экспериментам $A_T = A_L/3$, а диапазон отношений лежит в пределах от $A_L/2$ до $A_L/10$.

Проведены расчеты максимальных концентраций и времени их достижения в зависимости от глубины зоны аэрации для радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Pu и ²⁴¹Am. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Максимальные концентрации и время их достижения в зависимости от глубины зоны аэрации для радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Pu и ²⁴¹Am

Глубина зоны аэрации, м	S_{max}				T_{max} , Г.			
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	²⁴¹ Pu	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	²⁴¹ Pu
1	5,4E-01	2,87E-03	1,10E-01	5,49E-10	22,2	167,9	1053,8	258,7
2	3,5E-01	3,89E-05	2,20E-02	1,07E-16	38,3	290,9	1836,3	443,8
3	2,3E-01	7,51E-07	4,97E-03	9,44E-23	53,4	402,3	2557,1	609,1
4	1,6E-01	1,79E-08	1,20E-03	2,04E-28	67,7	506,6	3241,3	762,6
5	1,1E-01	4,96E-10	3,03E-04	8,27E-34	81,7	606,0	3899,4	908,0
6	7,6E-02	1,54E-11	7,96E-05	5,43E-39	95,3	701,6	4537,4	1047,2
7	5,3E-02	5,24E-13	2,15E-05	5,25E-44	108,6	794,0	5159,0	1181,4
8	3,7E-02	1,93E-14	5,95E-06	7,00E-49	121,7	883,9	5766,7	1311,5
9	2,6E-02	7,58E-16	1,68E-06	1,23E-53	134,7	971,6	6362,5	1438,0
10	1,9E-02	3,16E-17	4,83E-07	2,74E-58	147,5	1057,3	6947,9	1561,6
11	1,3E-02	1,38E-18	1,41E-07	7,53E-63	160,1	1141,3	7523,8	1682,5
12	9,5E-03	6,35E-20	4,17E-08	2,50E-67	172,7	1223,8	8091,4	1801,0
13	6,8E-03	3,04E-21	1,25E-08	9,83E-72	185,1	1304,9	8651,3	1917,4
14	4,9E-03	1,51E-22	3,80E-09	4,51E-76	197,4	1384,8	9204,1	2031,9
15	3,5E-03	7,79E-24	1,17E-09	2,38E-80	209,6	1463,5	9750,4	2144,5
16	2,5E-03	4,15E-25	3,61E-10	1,43E-84	221,7	1541,2	10290,7	2255,6
17	1,8E-03	2,27E-26	1,13E-10	9,74E-89	233,8	1617,8	10825,4	2365,1
18	1,3E-03	1,28E-27	3,57E-11	7,40E-93	245,8	1693,6	11354,9	2473,3
19	9,6E-04	7,43E-29	1,14E-11	6,25E-97	257,7	1768,5	11879,3	2580,1
20	7,0E-04	4,42E-30	3,64E-12	5,82E-101	269,5	1842,5	12399,2	2685,8
21	5,1E-04	2,69E-31	1,18E-12	5,94E-105	281,3	1915,9	12914,5	2790,2
22	3,7E-04	1,67E-32	3,82E-13	6,62E-109	293,0	1988,5	13425,7	2893,6
23	2,7E-04	1,06E-33	1,25E-13	8,02E-113	304,7	2060,4	13933,0	2996,0
24	2,0E-04	6,87E-35	4,12E-14	1,05E-116	316,3	2131,7	14436,4	3097,4

Глубина зоны азрации, м	S_{\max}				T_{\max} , г.			
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{241}Am	^{241}Pu	^{90}Sr	^{137}Cs	^{241}Am	^{241}Pu
25	1,4E-04	4,54E-36	1,37E-14	1,48E-120	327,9	2202,4	14936,2	3197,9
26	1,1E-04	3,05E-37	4,56E-15	2,25E-124	339,4	2272,5	15432,5	3297,5
27	7,7E-05	2,09E-38	1,53E-15	3,64E-128	350,8	2342,0	15925,5	3396,3
28	5,6E-05	1,46E-39	5,15E-16	6,30E-132	362,2	2411,0	16415,3	3494,3
29	4,1E-05	1,03E-40	1,74E-16	1,16E-135	373,6	2479,5	16902,0	3591,5
30	3,0E-05	7,40E-42	5,93E-17	2,27E-139	384,9	2547,5	17385,8	3688,0
31	2,2E-05	5,4E-43	2,0E-17	4,7E-143	396,2	2615,0	17866,8	3783,5
32	1,6E-05	4,0E-44	7,0E-18	1,0E-146	407,5	2682,1	18345,1	3877,9
33	1,2E-05	3,0E-45	2,4E-18	2,4E-150	418,7	2748,7	18820,4	3974,7
34	8,9E-06	2,3E-46	8,3E-19	5,7E-154	429,8	2815,0	19293,3	4068,0

Если предположить, что начальная концентрация для всех радионуклидов $C_0 = 2 \cdot 10^5$ Бк/л, то безразмерная концентрация S_{\max} , равная $\text{PУ}^{\text{вода}}$, для ^{137}Cs составит $5,0 \cdot 10^{-5}$, ^{90}Sr – $5,0 \cdot 10^{-5}$, ^{241}Pu – $5,0 \cdot 10^{-5}$ и ^{241}Am – $5,0 \cdot 10^{-6}$. Как видно из табл. 2, величины S_{\max} достигаются для ^{90}Sr на расстоянии 28,4 м, для ^{241}Am на расстоянии 8 м, для ^{137}Cs порядка 1,5 м и для ^{241}Pu порядка 0,5 м. Таким образом, зона влияния определяется в основном координатами, на которых величина концентрации ^{90}Sr будет меньшая или равная $\text{PУ}^{\text{вода}}$.

Представленные выше расчеты проведены при условии, что для определения A_L и A_T приняты зависимости $A_L = 0,2L^{0,44}$ и $A_T = A_L/3$.

В [12] показано, что диапазон экспериментальных значений A_T может изменяться от $A_T = 0$ до $A_T = A_L$.

Для ^{90}Sr проведены модельные расчеты для $\text{PУ}^{\text{вода}} S_{\max} = 5,0 \cdot 10^{-5}$ для $A_L = 0,2L^{0,44}$ и различных A_T в диапазоне от 0 до $A_T = A_L$. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, изменения значения A_T в диапазоне от $A_L/2$ до 0 незначительно влияют на величину расстояния достижения $\text{PУ}^{\text{вода}} S_{\max} = 5,0 \cdot 10^{-5}$ для ^{90}Sr , а также и на величину времени достижения этой концентрации.

Проведенный нами анализ экспериментальных данных [9–13] показал, что все экспериментальные данные по продольной дисперсности A_L находятся в диапазоне от $0,15L$ до $0,01L$. В этом диапазоне авторами [10–13] с использованием методов наименьших квадратов предложены за-

Т а б л и ц а 3. Расстояния достижения $\text{PУ}^{\text{вода}} S_{\max} = 5,0 \cdot 10^{-5}$ для ^{90}Sr в зависимости от величины поперечной дисперсности

Расчет A_T	Расстояние, м	T_{\max} , г.
1	29,9	342,9
$A_L/2$	28,6	362,1
$A_L/3$	28,4	366,8
$A_L/10$	28,2	369,7
0	28,2	370,3

Т а б л и ц а 4. Расстояния достижения $\text{PУ}^{\text{вода}} S_{\max} = 5,0 \cdot 10^{-5}$ для ^{90}Sr в зависимости от величины продольной дисперсности

Расчет A_L	Расстояние, м	T_{\max} , г.
$0,15L$	37,4	290,6
$0,1L$ [9]	33,4	311,7
$0,2L^{0,44}$ [13]	28,4	366,8
$0,01L^{0,88}$ [13]	27,5	405,6
$0,83[\text{Log}_{10}(L)]^{2,414}$ [11]	31,2	330,6
$L/27,5$ [12]	28,7	359,7
$L/100$	27,4	397,4

зависимости для оценочных значений A_L . При использовании этих зависимостей и диапазона наименьших и наибольших значений A_L при $A_T = A_L/3$ для ^{90}Sr проведены модельные расчеты для $\text{РУ}^{\text{вода}} S_{\text{max}} = 5,0 \cdot 10^{-5}$. Результаты представлены в табл.4.

Следует отметить, что все расчеты по вычислению S_{max} и T_{max} для решения трансцендентного уравнения (6) проведены с использованием пакета математических программ Maple.

Как следует из результатов модельных расчетов, с увеличением значения A_L растет расстояние, на котором достигается $\text{РУ}^{\text{вода}} S_{\text{max}}$, и уменьшается время установления данной концентрации.

Проведенные расчеты по двумерной модели указывают на то, что если в модели использовать наименьшие значения коэффициента распределения K_d и наибольшие экспериментальные значения продольной и поперечной дисперсностей, то это даст самую консервативную оценку защищенности грунтовых вод от их радиоактивного загрязнения.

Таким образом, рост размерности расчетной модели позволяет существенно повысить точность обоснования безопасности хранилищ, подтвердить возможность увеличения допустимого количества размещаемых в них радиоактивных отходов.

Список использованной литературы

1. *Серебряный, Г. З.* Аналитическая модель миграции радионуклидов в пористых средах / Г. З. Серебряный, М. Л. Жемжуров // Инженерн.-физ. журн. – 2003. – Т. 76, № 6. – С. 146–150.
2. *Николаевский, В. Н.* Конвективная диффузия в пористых средах / В. Н. Николаевский // ПММ. – 1959. – Т. XXIII. – С. 1042–1050.
3. *Лыков, А. В.* Тепломассоперенос / А. В. Лыков – М.: Энергия, 1978.
4. *Рошаль, А. А.* Методы определения миграционных параметров / А. А. Рошаль // Гидрогеология и инженерная геология. – М., 1980.
5. *Bats, C. F.* A proposal estimation of soil leaching and leaching constants for use in assessment models / C. F. Bats, R. D. Sharp // J. Environ. Qual. – 1983. Vol. 12, N 1. – P. 18–28.
6. *Гвоздев, А. А.* Создание системы наблюдения за миграцией радионуклидов из пунктов хранения радиоактивных отходов в подземные воды / А. А. Гвоздев [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1995. – № 4. – С. 78–84.
7. *Sullivan, T.* Recommended values for the distribution coefficient (K_d) to be used in dose assessments for decommissioning the Zion Nuclear Power Plant. / T. Sullivan // Informal Report, BNL- 05442–2014-IR. – June 2014.
8. Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности»; Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия». – Минск: Минздрав РБ, 2012.
9. *Gelhar, L. W.* A critical review of data on field– scale dispersion in aquifers / L. W. Gelhar, C. K. Welty, R. Rehfeldt // Water Resources Research. – 1992. – Vol. 28, N 7. – P. 1955–1974
10. *Neuman, S. P.* Universal Scaling of Hydraulic Conductivities and Dispersivities in Geologic Media / S. P. Neuman // Water Resources Research. – 1990. – Vol. 26, N 8. – P. 1749–1758.
11. *Xu, M.* Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale / M. Xu, Y. Eckstein // Ground Water. – 1995. – Vol. 33, N 6. – P. 905–908.
12. *Tauxe, J. D.* Porous Medium Advection–Dispersion Modeling in a Geographic Information System / J. D. Tauxe: Ph. D. diss. – University of Texas – Austin, 1994.
13. *Schulze-Makuch, D.* Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior / D. Schulze-Makuch // Ground Water. – 2005. – Vol. 43, N 3. – P. 443–456.

Поступила в редакцию 07.04.2016

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 539.25.086:57.08 577.352.3

*Н. С. КУЖЕЛЬ¹, Е. Э. КОНСТАНТИНОВА¹, С. А. ЧИЖИК¹,
НГУЕН ТИ МАЙ ХУОНГ², НГУЕН ТРОНГ ТИН²*

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*¹Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: ekonst65@mail.ru,*

*²Институт прикладной физики и научных приборов Вьетнамской академии наук и технологий,
Ханой, Вьетнам, e-mail: nttinh@iapsi.vast.vn*

Представлен обзор литературных данных по применению метода атомно-силовой микроскопии для изучения биологических объектов. Показаны преимущества метода по сравнению с другими видами микроскопии. Описаны достижения в этой области, рассмотрены проблемы, возникающие при работе с биологическими клетками.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, биологические клетки, силовая спектроскопия, упругие свойства, адгезия.

N. S. KUZHAL¹, E. E. KONSTANTINOVA¹, S. A. CHIZHIK¹, NGUYEN THI MAY HUONG², NGUYEN TRONG TINH²

ATOMIC FORCE MICROSCOPY OF BIOLOGICAL SUBJECTS

*¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: ekonst65@mail.ru,*

*²Institute of Applied Physics & Scientific Instrument, VAST, Hanoi, Vietnam,
e-mail: nttinh@iapsi.vast.vn*

A review of references on application of the atomic force microscopy for biological subjects' investigation is submitted. Advantages of this method in comparison with other types of microscopy are shown. Achievements in this area and the problems arising during the work with biological cells are described.

Keywords: atomic force microscopy, biological cells, force microscopy, elastic properties, adhesion.

Введение. Как показывают результаты проведенных к настоящему времени исследований в области атомно-силовой микроскопии (АСМ) биологических объектов, изучение живых клеток представляет наибольший интерес и является наиболее перспективным. В данной работе представлен обзор основных задач, которые стоят перед исследователями в области изучения живых биологических клеток с использованием АСМ, способы их решения, а также перспективы развития методов АСМ.

Один из самых распространенных подходов к изучению свойств клеток – их визуализация с помощью различных видов микроскопии, которые позволяют оценить размеры клеток, их морфологию, подвижность, поверхностные структуры. Однако каждый метод микроскопии имеет свои ограничения. Оптическая микроскопия остается основным методом исследования в биологии клеток. Это связано с тем, что главные методические приемы для исследования биологических объектов тщательнее отработаны, чем в других областях микроскопии. С помощью светового микроскопа можно изучать прозрачные или полупрозрачные объекты или фиксированные препараты, которые окрашиваются специальными красителями. Другим по значимости подходом является использование электронной микроскопии, которая по сравнению с оптической обеспечивает более высокое пространственное разрешение и поэтому незаменима в гистологи-

ческих и цитологических исследованиях. Для изучения биологических объектов с помощью электронного микроскопа необходимо наносить на них тонкий слой паров металла, а само исследование проводить в вакууме. Поэтому при проведении электронной микроскопии, как правило, имеют место артефакты, связанные с пробоподготовкой. В течение последних трех десятилетий для исследования биологических клеток получил распространение метод АСМ. С расширением его применения в биологических исследованиях связано появление термина «биологическая АСМ». В отличие от остальных описанных видов микроскопии результаты исследований с использованием данного метода не зависят от окраски объекта, а его применение не требует специфических условий для приготовления и исследования образца. Кроме морфологических характеристик клеток с помощью атомно-силового микроскопа можно изучать особенности локального силового взаимодействия зонда с поверхностью и на основании результатов таких исследований судить о локальных физических свойствах биологических образцов, таких как эластичность и адгезия [1].

Биологическая атомно-силовая микроскопия. До настоящего времени большинство АСМ-исследований проводились на фиксированных биологических объектах. Использование фиксированных образцов позволяет сохранить морфологию клеток, длительно хранить образцы и транспортировать их, получать воспроизводимые результаты. В качестве фиксирующих агентов используют различные спирты и альдегиды. Подготовка образцов также может проводиться с помощью высушивания на воздухе без применения фиксаторов. Любой метод фиксации искажает размеры клеток, но позволяет более точно визуализировать такие морфологические особенности, как наличие ядра и цитоплазматических гранул [2]. К настоящему времени получены АСМ-изображения разнообразных клеток, фиксированных различными методами, определены их механические свойства. Исследованы клетки крови, различные раковые клетки, культуры клеток, культивируемых *in vitro*, а также биологические ткани [3].

Материалы и методы исследования. Забор крови пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) осуществлялся при поступлении в рентгеноперационную до проведения стентирования или в реанимацию до проведения тромболизиса. У практически здоровых лиц (группа контроля) забор крови производили натощак через 10–12 ч после приема пищи, в качестве антикоагулянта использовали 3,8 %-ный раствор цитрата натрия в соотношении 1:9. Образцы клеток для АСМ-исследований готовили по методике [4].

Исследование геометрии, структуры поверхности и упругих свойств мембраны красных клеток крови осуществляли при помощи специализированного экспериментального комплекса NT-206 (производства ОДО «Микротестмашины», Беларусь), совмещающего функции сканирующей зондовой и оптической микроскопии. Использовали стандартные кремниевые зонды NSC11 («MikroMasch» Co., Эстония). При исследовании первоначально регистрировали оптическое изображение клеток на стеклянной подложке. Затем с помощью системы микропозиционирования при оптическом контроле положения зонда в плоскости образца выбирали участок для АСМ-измерений.

Для оценки упругих свойств мембраны клеток применяли метод статической силовой спектроскопии [4]. Функция силовой спектроскопии является стандартным режимом работы атомно-силового микроскопа. Суть ее состоит в реализации контактного деформирования исследуемого объекта острием зонда и в измерении зависимости силы взаимодействия зонда с поверхностью образца от расстояния между ними. Радиус закругления острия составлял около 60 нм (определяли путем сканирования тестового образца), а коэффициент жесткости консоли – 3 Н/м (согласно спецификации производителя зондов).

Результаты и обсуждение. Примеры АСМ-изображений эритроцитов пациентов с ОКС и практически здоровых лиц представлены на рис. 1, а, б.

В результате исследований упругих свойств эритроцитов получены следующие данные. Значения модуля упругости эритроцитов у пациентов с ОКС находились в пределах от $(57,5 \pm 6,6)$ до $(88,2 \pm 9,05)$ МПа (в группе контроля – от $(72,3 \pm 3,1)$ до $(81,4 \pm 3,9)$ МПа). Распределения значений модуля упругости в группах представлены на рис. 2, а, б.

При этом значения силы адгезии у пациентов с ОКС находились в пределах от 22,2 до 33,3 нН (в группе контроля – от 23,5 до 27,2 нН). В результате анализа полученных данных установлено, что модуль упругости эритроцитов при ОКС ниже, а сила адгезии на поверхности красных клеток крови выше, чем у практически здоровых лиц, что свидетельствует о дестабилизации мембран эритроцитов у пациентов с ОКС. Полученные данные согласуются с результатами исследования деформируемости эритроцитов с использованием метода фильтруемости клеточной суспензии через поры диаметром 3 мкм. В [5] показано, что индекс ригидности эритроцитов пациентов с острыми формами ишемической болезни сердца ниже, чем у практически здоровых лиц. Полученные результаты указывают на возможность использования измеряемых с помощью АСМ модуля упругости и силы адгезии эритроцитов в качестве маркёров обострения течения ишемической болезни сердца на доклинической стадии развития процесса.

Наряду со многими преимуществами фиксированных образцов, важным является возможность изучения клеток и тканей в их нативном состоянии, а также оценка изменений их свойств по ходу различных процессов, протекающих на клеточном уровне. Для этих целей необходимо проводить АСМ-исследования живых клеток в жидкой среде, близкой к естественной и наиболее полно обеспечивающей поддержание всех процессов жизнедеятельности. В отличие от фиксированных препаратов при проведении АСМ живых биологических клеток возникает проблема прикрепления объекта исследования к подложке, так как большинство клеточных культур не фиксируются достаточно устойчиво, как необходимо для АСМ-исследований. Увеличить адгезию клеток можно с помощью обработки подложки полилизином [6] или желатином [7]. Для повышения степени спонтанной адгезии клеток крови можно использовать растворы с повышенным содержанием ионов кальция (раствор Хенкса), так как адгезия является кальцийзависимым механизмом [2]. Принимая во внимание большую функциональную значимость прямого исследования живых клеток с высоким разрешением, развитие методик АСМ для этих биологических объектов является чрезвычайно важным.

Данные, полученные с помощью методов АСМ, могут использоваться для оценки метастатического потенциала раковых клеток. Установлено, что раковые клетки, способные образовывать метастазы, имеют более низкие значения модуля упругости их мембран и силы адгезии, чем немалигнифицированные [8, 9]. Возможно, пониженная жесткость и высокая эластичность помогают метастазирующим клеткам перемещаться во внутритканевых полостях, проходить через внутриклеточный матрикс и стенки сосудов. Отмечено, что измеряемая с помощью АСМ жесткость может являться биомаркёром для диагностики трансформации клеток на ранней стадии развития раковой опухоли [10]

С использованием метода динамической силовой спектроскопии проведена оценка интегральных механических свойств мембран клеточных органелл, а также упругости сразу двух мембранных слоев ядер и митохондрий. Силовую спектроскопию проводят обычно над центральной областью клетки, так как ее края имеют низкую высоту (1 мкм и менее), что приводит к возникновению эффекта подложки. Последний проявляется таким образом, что если мягкий тонкий объект находится на более твердой подложке, то при индентировании измеренные значе-

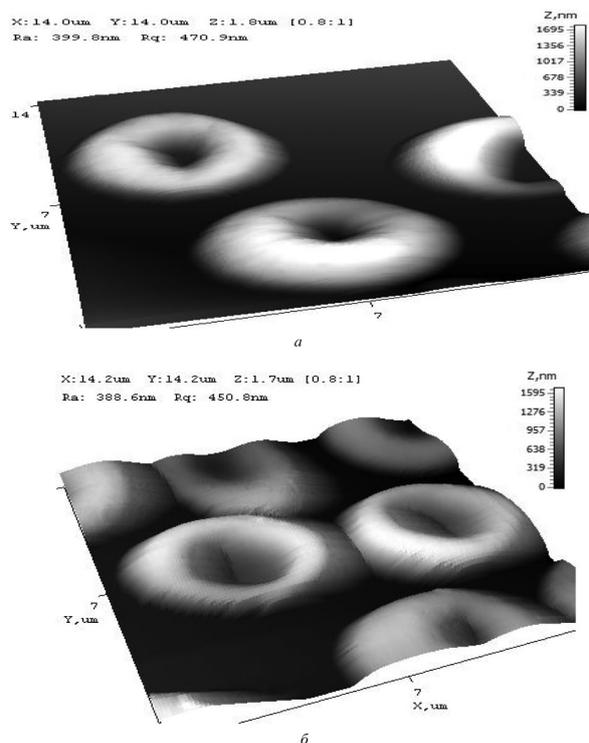
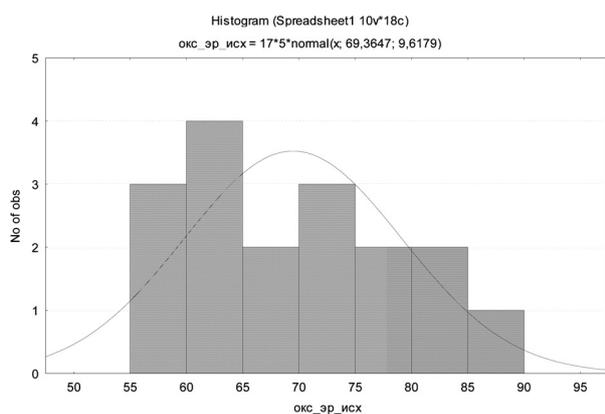
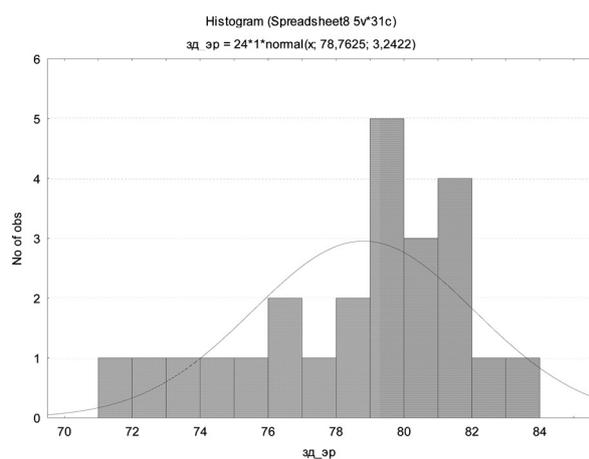


Рис. 1. Примеры изображений эритроцитов пациента с ОКС через 2 ч от начала обострения состояния (а) и практически здорового человека (б)



а



б

Рис. 2. Распределение значений модуля упругости эритроцитов в группах пациентов с ОКС (а) и практически здоровых лиц (б)

его закругления он может касаться клетки, не внося изменений в ее морфологию, либо проникать внутрь клетки, вследствие чего могут иметь место обратимые или необратимые изменения клеточной мембраны. Поэтому представлено большое количество результатов исследований с использованием различных модификаций кантилевера.

Изучение биологических объектов с помощью метода АСМ еще находится на стадии разработки методик и подходов к правильной интерпретации полученных результатов. Клетка является сложной гетерогенной сбалансированной системой, отвечающей на любое внешнее воздействие, что усложняет получение и обработку данных. Поскольку результаты, получаемые с помощью метода силовой спектроскопии, основаны на анализе кривых подвода и отвода, получаемых в процессе индентирования, то они зависят от модели, на основе которой проводится данный анализ. Одни авторы для описания локального деформирования клеток индентором применяют модель Герца при использовании закругленного зонда либо ее модификацию Шеддона при применении зонда конусной формы [14]. Другие авторы предпочитают модель Джонсона–Кендала–Робертса (ДКР), учитывающую адгезионные силы [15]. Вопрос остается открытым, так как эти модели разрабатывались для однородных материалов, они не всегда отражают объективную картину, их использование имеет ограничительные условия. Исследование биологических клеток как гетерогенных систем требует расчета новых моделей.

Заключение. Применение АСМ для исследования биологических клеток позволяет значительно расширить круг задач, решаемых в области биологии и биофизики клетки. В настоящее время имеет место тенденция к переходу от визуализации клеток к изучению их локальных ме-

ния модуля упругости для объекта окажутся выше, чем в действительности. С помощью данного метода исследованы синаптические мембраны в составе синаптосом. На их поверхности выявлены структуры, отличающиеся механическими свойствами от окружающих их участков мембраны, являющимися, возможно, поросомами [11].

Высокое разрешение метода АСМ позволяет наблюдать организацию цитоскелета живой клетки в среде культивирования. Можно оценить его целостность с помощью метода силовой спектроскопии, поскольку локальный модуль упругости в местах нахождения микрофибрилл цитоскелета значительно выше [7].

Измерение морфологических параметров клеток в ответ на биохимические [12] и физические [13] воздействия дает информацию о протекании внутриклеточных процессов. С помощью АСМ продемонстрировано действие магнитного поля на клетки [13]. Показано, что после воздействия поля с магнитной индукцией 2 Т с частотой 50 Гц на клетки лимфобластомы уменьшается высота клетки над подложкой, растет количество углублений на поверхности. Данные морфологические изменения могут свидетельствовать о наличии функциональных отклонений (например, в клеточной подвижности).

В научной литературе много внимания уделяется процессам взаимодействия зонда с образцом. В зависимости от формы и радиуса

ханических свойств. Анализ тенденций развития биологической АСМ показывает, что данный метод имеет большой потенциал для исследований биологических клеток, результаты которых могут быть использованы для решения большого круга задач, в том числе и практического применения метода в медицине, фармакологии, создании биотехнологий.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф14В-013) и Вьетнамской Академии наук и технологий (грант VAST. NTQT. Belarus.01/14-15).

Список использованной литературы

1. *Миронов, В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие для студентов старших курсов высш. уч. завед. / В. Л. Миронов. – Н. Новгород, 2004. – С. 74–75.
2. *Пестовский, Ю. С.* Изучение влияния способа фиксации на морфологические параметры клеток крови как задача для студенческого практикума по нанотехнологии / Ю. С. Пестовский // Всерос. журн. науч. публикаций. – 2013. – № 4. – С. 71–72.
3. **Probing elasticity and adhesion of live cells by atomic force microscopy indentation** / L. Sirghi [et al.] // *Europ. Biophys. J.* – 2008. – Vol. 37, N 6. – P. 935–945.
4. Регуляция механических свойств эритроцитов донорами оксида азота / Е. В. Шамова [и др.] // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 23–25 июня 2010 г.: в 2 ч. / редкол.: И. Д. Вологовский [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2010. – Ч. 2, т. 2. – С. 151–153.
5. Состояние системы микроциркуляции и показатели гемореологии при острых и хронических формах ИБС / Е. Э. Константинова [и др.] // *Акт. вопр. кардиологии: сб. науч. тр.* – Минск, 1997. – Вып. 1. – С. 127–130.
6. *Mazia, D.* **Cells adhesion probing for atomic force microscopy indentation** / D. Mazia, G. Schatten, W. Sale, // *Cell Biology.* – 1975. – Vol. 66, N 9. – P. 198–200.
7. *Ефремов, Ю. М.* Исследование распределения и механических свойств цитоскелета астроцитов в среде культивирования методом атомно-силовой микроскопии / Ю. М. Ефремов // *Acta Naturae.* – 2011. – Vol. 3, N 3. – P. 96–102.
8. Atomic force microscopy-based microrheology reveals significant differences in the viscoelastic response between malign and benign cell lines / J. Rother [et al.] // *Open Biology.* – 2014. – N 4: 140046. – P. 1–7.
9. *Дедков, В. Г.* Контактная атомно-силовая спектроскопия биологических тканей / В. Г. Дедков // *Письма в ЖТФ.* – 2010. – Т. 36, вып. 3. – С. 76–81.
10. *Lekka, M.* Cancer cell recognition-Mechanical phenotype / M. Lekka // *Micron.* – 2012. – Vol. 43. – P. 1259–1266.
11. *Кузнецова, Т. Г.* Исследование структурно-функциональных свойств клеточных мембран методами атомно-силовой микроскопии / Т. Г. Кузнецова. // *Мед. журн.* – 2005. – № 3. – С. 80–81.
12. **Shape and Volume of Living Aldosterone-Sensitive Cells Imaged with the Atomic-Force Microscope** / S. W. Schneider [et al.] // *Atomic Force Microscopy: Biomedical methods and Applications* –Humana Press– 2004. – P. 255–279.
13. *Grimaldi, S.* Lymphoblastoid Cells Exposed to Low-Frequency Magnetic Fields / S. Grimaldi, M. Gurasole, Cricenti // *Atomic Force Microscopy: Biomedical methods and Applications.* – Humana Press, 2004. – P. 323–339.
14. Atomic force microscopy probing of cell elasticity / T. G. Kuznetsova [et al.] // *Micron.* – 2007. – Vol. 38. iss. 8. – P. 824–833.
15. *Мохаммед Салем, А. А.* Методические аспекты определения модуля упругости высокоэластичных материалов и биологических клеток методом силовой спектроскопии / А. А. Мохаммед Салем // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2015. – № 2 (31). – С. 80–84.

Поступила в редакцию 18.05.2016

УДК 537.624.21, 537.622.4

*М. М. САЛЕМ¹, М. Г. НЕМАТОВ¹, А. УДДИН¹, С. В. ПОДГОРНАЯ¹,
Л. В. ПАНИНА^{1,2}, А. Т. МОРЧЕНКО¹*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМОРФНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МИКРОПРОВОДОВ В КАЧЕСТВЕ ВСТРОЕННЫХ СЕНСОРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия,*

² *Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия,
e-mail: elshshrawy@science.tanta.edu.eg, lpanina@plymouth.ac.uk*

В настоящее время предпринимаются значительные усилия для развития неразрушающих методов контроля механических напряжений, возникающих при деформации различных объектов. В данной работе описан новый способ мониторинга внутренних напряжений в композитных материалах. Его можно отнести к встроенной сенсорной технологии, чувствительным элементом которой является ферромагнитный микропровод в стеклянной оболочке, обладающий определенным видом магнитной анизотропии. Микропровод диаметром 10–100 мкм не влияет на структурную целостность композита. В процессе перемагничивания микропровода возникает резкий скачок напряжения, который характеризуется высокочастотными гармониками в спектре сигнала. Их амплитуда весьма чувствительна к механическим напряжениям в материале. Результаты экспериментов проанализированы в рамках простых магнитостатических моделей.

Ключевые слова: магнитный импеданс; ферромагнитный микропровод; встроенные сенсоры; бистабильность

M. M. SALEM¹, M. G. NEMATOV¹, A. UDDIN¹, S. V. PODGORNOY¹, L. V. PANINA^{1,2}, A. T. MORCHENKO¹

MAGNETIC AMORPHOUS MICROWIRES AS EMBEDDED STRESS SENSORS IN FUNCTIONAL MATERIALS

¹*National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia,*

²*Institute for Design Problems in Microelectronics RAS, Moscow, Russia,
e-mail: elshshrawy@science.tanta.edu.eg, lpanina@plymouth.ac.uk*

Considerable efforts have been made to develop non-destructive methods for testing internal stress/strain condition of polymer composite materials. A new method of monitoring internal stresses is presented. The method can be referred to as embedded sensing technique, where the sensing element is a glass-coated ferromagnetic microwire with a specific magnetic anisotropy. With a diameter 10–100 microns, the microwire does not affect the structural integrity. When the microwire is remagnetized the sharp voltage is induced which is characterized by high frequency harmonics. The amplitude of these harmonics sensitively depends on various stresses. The experimental results are analyzed using simple magnetostatic models.

Keywords: magneto-impedance; magnetic wires; embedded sensors; bistable behavior.

Введение. Ферромагнитный микропровод с аморфной или нанокристаллической структурой имеет ряд специфических магнитных свойств: наличие двух устойчивых состояний, или бистабильность [1–3], большой магнитный импеданс (МИ) [4–6] и импеданс, чувствительный к механическим напряжениям [7, 8]. Все указанные свойства находят свое применение в качестве механизмов, на которых основаны принципы работы различных сенсоров. С точки зрения практических приложений важно, чтобы магнитные и структурные свойства провода можно было бы регулировать с помощью специальных обработок, в частности отжига. Магнитные свойства провода со стеклянным покрытием значительно зависят от соотношения толщины стекла и диаметра металлического сердечника. Существует два основных типа магнитных микропроводов. Первый тип, обычно присущий составам, богатым железом, характеризуется практически прямоугольной петлей магнитного гистерезиса, измеренной в магнитном поле вдоль оси микропровода. Микропровод такого типа генерирует четкий сигнал напряжения при перемагничивании,

имеющий в спектре гармоник высоких порядков. Выявление высоких гармоник возможно благодаря четкому соотношению сигнал/шум, так как обычный шум и $1/f$ -шум существенно подавляются на высоких частотах. Амплитуда гармоник зависит от внешних параметров, таких как деформация, механическое напряжение, температура. Следовательно, подобные проводники могут использоваться в качестве беспроводных датчиков с дистанционным запросом, установленных на поверхности изделий либо размещенных внутри материалов. Второй тип микропроводов характеризуется практически линейной наклонной петлей гистерезиса с насыщением. В них проявляется эффект МИ – значительное изменение высокочастотного импеданса микропровода под влиянием продольного магнитного поля [4–6]. Указанное свойство схоже с явлением гигантского магниторезистивного эффекта и используется при разработке высокочувствительных магнитных датчиков для регистрации слабых магнитных полей (например, обзор [9]). Такие проводники могут также применяться в качестве встроенных сенсоров, которые работают на гигагерцовых частотах. Провод конечной длины ведет себя как симметричная антенна, параметр релаксации которой зависит от внешних факторов МИ. В данной работе мы фокусируем внимание на первом типе проводников, часто называемых проводниками двух устойчивых состояний, или бистабильными проводниками, и на их свойстве генерировать высокие гармоники индуцированного электрического напряжения. В статье приведены результаты, что указанные гармоники могут быть чувствительными к растягивающим и скручивающим механическим напряжениям, и это явление может быть использовано для мониторинга целостности различных конструкций.

В технологиях внедренных сенсоров в качестве чувствительных элементов обычно используются особые частицы или волокна, играющие роль посредников между внутренними параметрами среды и считывающим устройством (детектором). В зависимости от физического принципа, используемого для реализации данной передаточной функции, возможен выбор различных физических величин в качестве измеряемых параметров. Последние включают в себя, например, ток, напряжение, сопротивление или импеданс, электрические или магнитные поля, магнитную или электрическую проницаемость, амплитуду и фазу отраженных или проходящих электромагнитных волн и т. д. Метод мониторинга внутренних растягивающих напряжений, разработанный в настоящей работе, заключается во встраивании обладающего двумя устойчивыми состояниями (бистабильности) микропровода в полимерную матрицу и в регистрации гармонического спектра отклика получившейся системы при ее опросе.

Из данных сравнительного анализа методов формирования встроенных сенсоров наиболее оптимальным с точки зрения неразрушающих испытаний композиционных материалов является метод, использующий встроенные оптические волокна [10, 11]. Кремниевые или полимерные оптические волокна могут выполнять роль сенсоров самостоятельно либо передавать сигналы между тестируемой областью, где свет взаимодействует с веществом, и считывающим устройством. Наряду с высокой чувствительностью при помощи оптического метода можно также измерять широкий ряд характеристик, таких как натяжение, температура, давление, влажность и вибрация. Кроме того, метод не восприимчив к электромагнитным помехам. Недостатком оптического метода является необходимость в защитном покрытии, что увеличивает общий размер сенсорного элемента. В свою очередь магнитные микропроводы со стеклянным покрытием могут иметь размеры в единицы микрометров, что сопоставимо с размерами элементов структуры композита. К преимуществам использования магнитных микропроводов в качестве встроенных датчиков относятся также чувствительность отклика, перенастраиваемость характеристик, небольшая стоимость и относительно простая обработка сигнала.

В импедансной спектроскопии [12–16] эффективный импеданс смеси проводящих (стальных или углеродных) армирующих волокон и слабопроводящей матрицы измеряется в определенном частотном диапазоне (обычно в мегагерцовом диапазоне) между парой коммутационных контактов, прикрепленных к поверхности образца. Поскольку объемная доля волокон обычно ниже порога перколяции, наличие слабопроводящей матрицы абсолютно необходимо для обеспечения эффективной проводимости. Внешнее напряжение не изменяет электрических свойств немагнитных проводящих волокон. Пьезоимпедансный эффект вызван интерфейсом между матрицей и волокнами, который имеет емкостную природу из-за наличия оксидного и поляризационного

слоев, формирующихся на поверхностях стальных и углеродных волокон соответственно. Следовательно, данный метод вряд ли может быть применен при использовании матриц с низкой проводимостью (например, полимерных матриц). Напротив, чувствительность ферромагнитных микропроводов к механическим напряжениям вызвана только их внутренними магнитными свойствами, исходя из этого, такие провода можно использовать в любых диэлектрических матрицах.

В способе магнестрикционной маркировки магнитные микрочастицы сплава Терфенол-Д (Tb–Fe–Dy) определенного калибра добавляются в матрицу для обеспечения эффективных магнитных свойств композита [17, 18]. Поскольку частицы Терфенола-Д почти в девять раз плотнее, чем материал матрицы, они имеют склонность к осаждению в процессе отвердевания смолы. Для предотвращения этого нежелательного явления образец помещается между полюсами постоянного магнита, создающего однородное магнитное поле, перпендикулярное поверхности образца. Образцы, приготовленные таким способом, имеют кластеры, состоящие из выстроенных частиц, и демонстрируют при нагрузке высокий магнестрикционный отклик. Механическое напряжение, передаваемое частицам по матрице, вызывает изменение равновесного направления намагниченности за счет обратного магнестрикционного эффекта. Мониторинг механического напряжения производится с помощью контроля продольной или перпендикулярной компоненты магнитного поля вблизи поверхности образца посредством магнитометра. Указанный магнестрикционный эффект используется и в нашем методе. Однако измеряемой в этом случае величиной является амплитуда высших гармоник отклика. Использование готовых микропроводов освобождает от необходимости обеспечения формирования нужных магнитных свойств в процессе отвердевания материала, а использование соотношения высокочастотных гармоник позволяет избавиться от решения проблемы калибровки при измерении.

Материалы и методика. Нами изучены аморфные провода с составом $\text{Co}_{71}\text{Fe}_3\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$ и со стеклянным покрытием. Исследуемые образцы характеризовались низким положительным значением константы магнестрикции (порядка 10^{-7} – 10^{-6}). В экспериментах использовались два типа проводов с различной геометрией (общий диаметр 29,5 и 41,5 мкм и диаметр металлического сердечника 23,9 и 36,3 мкм соответственно), обозначенных образец № 1 и образец № 2 (по номеру катушки, поставляемой производителем микропроводов MFTI Ltd). Рассмотрены процессы намагничивания проводов под воздействием растягивающей нагрузки до 50 г (что соответствует механическому напряжению 693 МПа для диаметра проволоки около 30 мкм) с использованием индукционного метода с двумя дифференциальными катушками, имеющими внутренний диаметр 3 мм. Для питания использовался ток частотой 500 Гц, амплитуда намагничивающего поля составляла 1000 А/м. Нагрузка прикладывалась с одного конца микропровода. Для построения петли гистерезиса индуцированный электрический сигнал численно интегрировался как функция от времени.

Также изучена зависимость высокочастотного импеданса от магнитного поля в диапазоне частот 1–100 МГц с помощью векторного анализатора цепей **Hewlett-Packard 8753E** путем измерения параметра S_{12} (коэффициента передачи) в цепи, содержащей микропровод в специально разработанной микроволновой полосковой ячейке.

Высокочастотные гармоники выделяются численным методом с применением фурье-преобразования измеряемого импульса напряжения при перемагничивании в некотором временном интервале.

Полученные результаты и их анализ. Как показано на рис. 1, при отсутствии растягивающего напряжения петли гистерезиса проводов обоих типов практически идентичны с небольшой коэрцитивной силой около 25 А/м. Петля гистерезиса у провода меньшего диаметра имеет два более ярко выраженных устойчивых состояния. Значение остаточной намагниченности, близкое к насыщению, также подтверждает существование осевой анизотропии практически во всем объеме провода. Данный результат соответствует графикам импеданса (рис. 2), которые при отсутствии внешнего магнитного поля имеют один максимум. Такое поведение МИ типично для материалов с простой осью анизотропии, параллельной магнитному полю и току возбуждения [19]. Однако образец с меньшим диаметром (образец № 1) имеет более высокий МИ с чувстви-

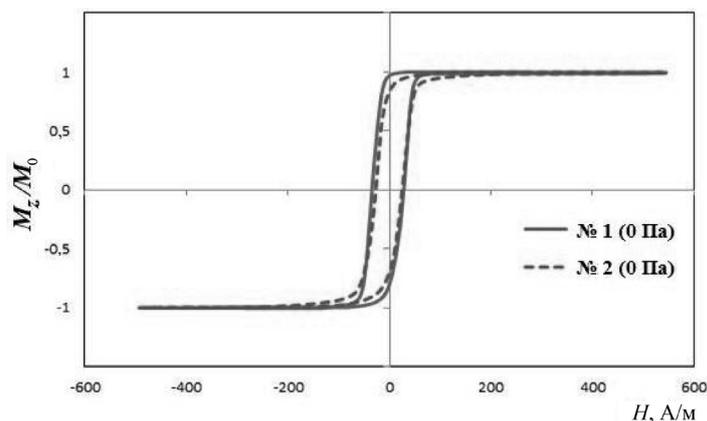


Рис. 1. Петли гистерезиса образца № 1 микропровода $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$

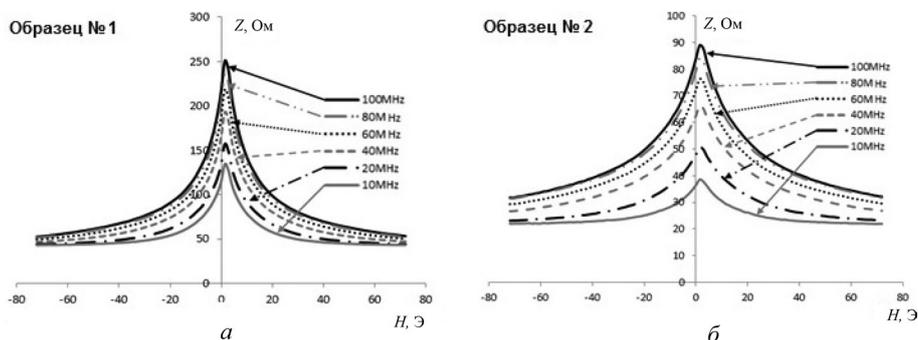


Рис. 2. Зависимость действительной части импеданса от магнитного поля при различной частоте тока возбуждения в микропроводах с разной геометрией: *a* – образец № 1; *б* – образец № 2

тельностью примерно 4,5% на 1 А/м при 100 МГц, в то время как чувствительность МИ второго провода составляет 1,7% на 1 А/м.

Форма петель гистерезиса образца № 1 под действием растягивающего напряжения в изученных типах проводов значительно отличается. Образец № 1 теряет свойство бистабильности, демонстрируя наклонную петлю гистерезиса с резко уменьшенной восприимчивостью, как показано на рис. 3. Данное преобразование происходит по причине индуцированной магнито-стрикционной анизотропии циркулярного типа. Природа изменения анизотропии может быть связана со сменой знака магнито-стрикции под действием растяжения [20]. В образце № 2 характер воздействия растягивающего напряжения на петлю гистерезиса существенно отличается. Как показано на рис. 4, по мере роста нагрузки коэрцитивная сила провода увеличивается, петля приобретает ярко выраженное свойство бистабильности. Следовательно, в данном случае знак магнито-стрикции остается положительным.

Необходимо отметить, что изменение знака магнито-стрикции также очень важно для понимания большой чувствительности МИ к напряжению в проводах при гигагерцовых частотах. Известно, что при увеличении частоты основное влияние на чувствительность импеданса оказывает зависимость направления статического намагничивания от внешнего фак-

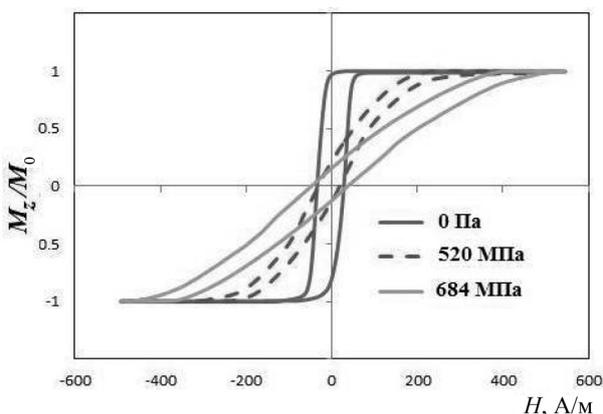


Рис. 3. Влияние растягивающего напряжения на осевую петлю гистерезиса микропровода в стеклянной оболочке (образец № 1). Нагрузка прикладывалась к свободному концу провода (оценка напряжения, создаваемого грузом в 1 г, составляет 14 МПа)

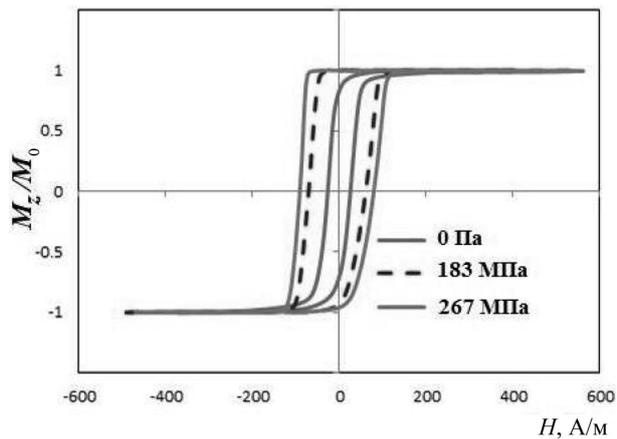


Рис. 4. Влияние растягивающего напряжения на осевую петлю гистерезиса микропровода в стеклянной оболочке (образец № 2). Нагрузка прикладывалась к свободному концу провода (оценка напряжения, создаваемого грузом в 1 г, составляет 7 МПа)

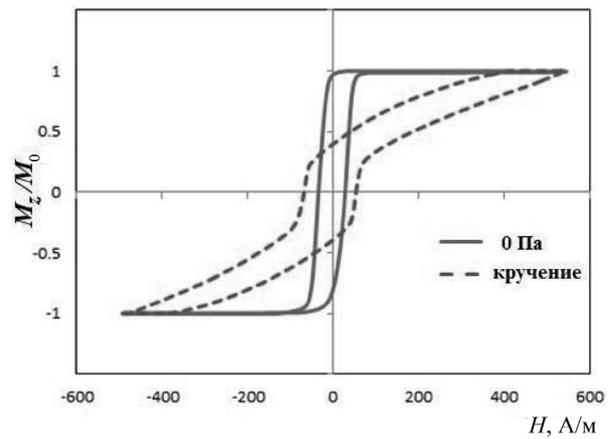


Рис. 5. Влияние напряжения кручения на петли осевого гистерезиса микропровода в стеклянной оболочке (образец № 1)

тора [21, 22]. В проводах как с отрицательной магнитострикцией (циркулярная анизотропия), так и с положительной магнитострикцией (осевая анизотропия) приложение растягивающего напряжения не приводит к изменению направления намагничивания. Если напряжение приводит к изменению знака магнитострикции, это вызовет резкие изменения типа анизотропии и направления намагничивания.

Процесс намагничивания провода также реагирует и на иные типы механического воздействия (в частности, на напряжение кручения). На рис. 5 показано влияние напряжения кручения, выражающееся в повышении коэрцитивной силы, при этом кривая гистерезиса имеет два четко выраженных участка, относящихся к широким скачкам Баркгаузена в области смещения доменных границ и вращению намагниченности в более высоких полях. Такое поведение согласуется с предположением, что изменение знака магнитострикции происходит под воздействием напряжения. Напряжение кручения, являющееся сочетанием напряжений растяжения и сжатия, велико в поверхностной области микропровода и способствует росту намагниченности. Центральная область микропровода сохраняет аксиальную анизотропию, механизм ее намагничивания ограничивается процессами смещения доменных стенок.

В обоих типах проводов электрическое напряжение, индуцированное при их перемагничивании, характеризуется генерированием высоких гармоник, амплитуда которых значительно изменяется под воздействием механического напряжения, как это показано на рис. 6, а, б. Если речь идет о проводах меньшего диаметра (образец № 1), амплитуды гармоник непрерывно уменьшаются с ростом напряжения вплоть до 500–700 МПа (в зависимости от количества гармо-

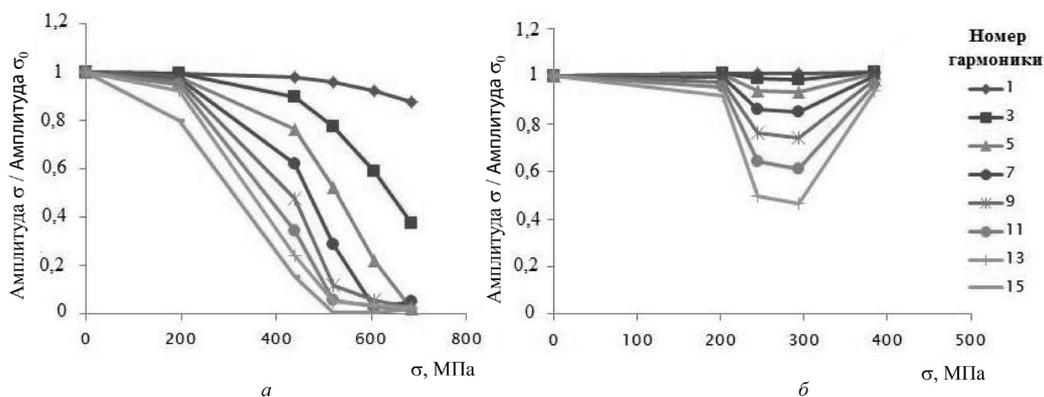


Рис. 6. Амплитуды высоких гармоник как функции приложенного напряжения: а – образец № 1; б – образец № 2. Амплитуды нормированы к их значениям в отсутствие механического напряжения

ник); при этом для бистабильного провода минимальное значение амплитуды в зависимости от напряжения достигается при 300 МПа, а при малых напряжениях наблюдается область отсутствия чувствительности. Следовательно, для применения в качестве элемента, чувствительного к механическим напряжениям, образец провода № 1 является более предпочтительным.

Для данного образца также изучена чувствительность к напряжению с учетом соотношения высоких гармоник (в частности, нормированных к амплитуде третьей гармоники) (рис. 7). Указанное соотношение имеет высокую чувствительность к напряжению, что важно для практических целей, так как его можно использовать при калибровке. Согласно полученным результатам, аморфные микропровода с незначительной положительной магнитострикцией могут использоваться в качестве чувствительных к механическим напряжениям элементов внутри различных материалов. Изменения в индуктивном спектре гармоник могут обеспечивать информацией о состоянии деформации и механического напряжения внутри материалов, которые трудно измерить другими способами.

Заключение. Предложено использование аморфных проводов в стеклянной оболочке с малой положительной магнитострикцией в качестве встроенных сенсоров механических напряжений, действие которых основано на изменении спектра их сигнала. Изучены процессы намагничивания под воздействием растягивающих напряжений и генерация высоких гармоник в двух типах проводов состава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$ с различной геометрией. Показано, что амплитуды высокочастотных гармоник демонстрируют высокую чувствительность к механическим напряжениям, которая наиболее ярко выражена в проводах, где напряжение приводит к изменению преимущественных направлений магнитной анизотропии.

Таким образом, в основу принципа действия встроенных сенсоров можно положить зависимость спектра гармоник сигнала аморфных ферромагнитных микропроводов от механических напряжений. Для практического применения бистабильных проводов в сенсорах важным преимуществом является отсутствие необходимости их калибровки по причине высокой чувствительности отношения амплитуды отдельных гармоник к механическим напряжениям.

Настоящая работа выполнена при поддержке и в рамках государственного заказа Российской Федерации по организации научной работы Л. В. Паниной и частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-08-01319. Авторы выражают особую благодарность В. Ларину (MFTI Ltd) за предоставление образцов бистабильных микропроводов.

Список использованной литературы

1. Chiriac, H. Amorphous Glass-Covered Magnetic Wires: Preparation, Properties / H. Chiriac, T.-A. Ovari // Applications Progr. Mater. Sci. – 1996. – Vol. 40. – P. 333–407.
2. Zhukov A. Magnetic properties and applications of ferromagnetic Microwires with amorphous and nanocrystalline structure / A. Zhukov, V. Zhukova. – Nova Science Publishers, New York. – 2009.
3. On the state-of-the-art in magnetic Microwires and expected trends for scientific and technological studies / M. Vazquez [et al.] // Phys. Status Solidi A. – 2011. – Vol. 208. – P. 493–501.
4. Panina, L. Magneto-impedance effect in amorphous wires / L. Panina, K. Mohri // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 65. – P. 1189–1191.
5. Knobel, M. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress / M. Knobel, K. R. Pirota // J. Magn. Mater. – 2002. – Vol. 242/245. – P. 33–40.
6. Tannous, C. Giant magneto-impedance and its applications / C. Tannous, J. Gieraltowski // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2004. – Vol. 15. – No 3. – P. 125–133.
7. Panina, L. V. Stress effect on magneto-impedance in amorphous wires at GHz frequencies and application to stress-tunable Microwave composite materials / L. V. Panina, S. I. Sandacci, D. P. Makhnovskiy // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 013701–6.

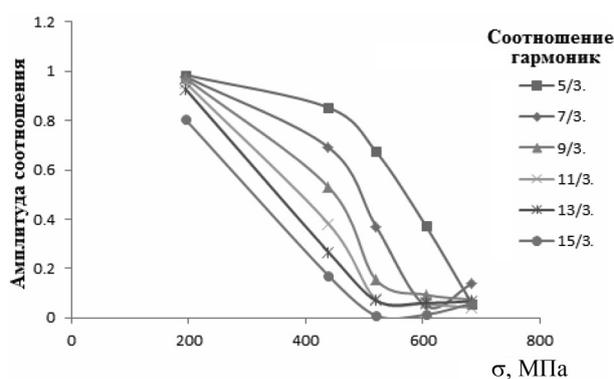


Рис. 7. Отношение амплитуд гармоник как функции приложенного напряжения для образца № 1

8. Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive Micromagnetic sensors utilizing magnetoimpedance and stress-impedance (SI) effects / K. Mohri [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 2002. – Vol. 38. –No. 5. – P. 3063–3068.
9. Super MI Sensor: Recent Advances of Amorphous Wire and CMOS-IC Magneto-Impedance Sensor / K. Mohri [et al.] // J. Nanoscience and Nanotechnology. – 2012. – Vol.12. – P. 7491–7495.
10. *Fernando, G. F.* Fibre optic sensor systems for monitoring composite structures / G. F. Fernando // Reinf. Plast. – 2005. – Vol. 49. – P. 41–49.
11. *Peters, K.* Polymer optical fiber sensors – a review / K. Peters // Smart Mater. Struct. – 2011. –Vol. 20. – P. 013002–18.
12. *Torrents, J. M.* Impedance spectra of fiber-reinforced cement-based composites. A modeling approach / J. M. Torrents, T. O. Mason, E. J. Garboczi // Cem. Concr. Research. – 2000. – Vol. 30. – P. 585–592.
13. Intrinsic conductivity of short conductive fibers in composites by impedance spectroscopy / A. D. Hixson [et al.] // J. Electroceramics. – 2001. – Vol. 7. – P. 189–195.
14. Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites / A. Peled [et al.] // ACI Mater. Journal. – 2001. – Vol. 98. – P. 313–322.
15. Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber reinforced composites / J. M. Torrents [et al.] // J. Mater. Sci. – 2001. – Vol. 36. – P. 4003–12.
16. *Hou, T. C.* Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures / T. C. Hou, J. P. Lynch // J. Intel. Mater. Syst. Struct. – 2009. – Vol. 20. – P. 1363–1379.
17. Magnetostrictive properties of epoxy resins modified with Terfenol-D particles for detection of internal stress in CFRP. Part 1: materials and process / M. Kubicka [et al.] // J. Mater. Sci. – 2012. –Vol. 47. – P. 5752–5759.
18. Magnetostrictive properties of epoxy resins modified with Terfenol-D particles for detection of internal stress in CFRP. Part 2: evaluation of stress detection / M. Kubicka [et al.] // J. Mater. Sci. – 2013. – Vol. 48. – P. 6578–6584.
19. Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with two types of magnetic anisotropy: helical and circumferential / D. P. Makhnovskiy [et al.] // Phys Rev B. – 2001. – Vol. 63. –P. 144424–144441.
20. Magnetostriction of Co–Fe-Based Amorphous Soft Magnetic Microwires / A. Zhukov [et al.] // Journal of Electronic Materials. –2015. – Vol. 44. – P. 1–9.
21. Valve-like behaviour of the magnetoimpedance in the GHz range / S. Sandacci [et al.] // J. Magn. Magn. Mat. – 2004. – Vol. 272. – P. 1855–1857.
22. Stress effect on magneto-impedance (MI) in amorphous wires at GHz frequencies and application to stress-tuneable Microwave composite materials / L. V. Panina, [et al.] // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 013701–013703.

Поступила в редакцию 04.10.2015

УДК 539.1.07+519.245+519.254

А. И. ЖУКОВСКИЙ¹, К. МОГИ², С. А. КУТЕНЬ³

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ ПОЧВ МЕТОДОМ IN SITU

¹Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь, e-mail: alexzhukovski@gmail.com,

²Радиационные решения К°, Сендай, Япония,

³Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

Обсуждаются результаты моделирования методом Монте-Карло процесса in situ измерений с помощью сцинтилляционного детектора загрязненной радионуклидами цезия почвы. Изучена зависимость функций отклика детектора для радионуклидов ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs от глубины загрязнения. Показана возможность определения толщины загрязненного слоя почвы при использовании метода in situ, без проведения предварительного отбора и анализа проб.

Ключевые слова: спектрометр, энергетическое распределение импульсов, in situ, толщина загрязненного слоя почвы.

A. I. ZHUKOUSKI¹, K. MOGI², S. A. KUTSEN³

IN SITU SOIL RADIOACTIVITY MEASUREMENT

¹SPE «ATOMTEX», Minsk, Belarus, e-mail: alexzhukovski@gmail.com,

²Rad-Solutions Co., Ltd., Sendai, Japan,

³Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

The results of Monte Carlo simulations of measurement of uniformly in-depth contaminated with Cs nuclides soil using scintillation detector in situ measuring geometry have been discussed. The dependence of detector response functions on contamination depth is studied for nuclides ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs. Using the in situ methodology has shown the possibility of determining the depth of Cs nuclides distribution in soil without a preliminary sampling and analysis.

Keywords: spectrometer, gamma-ray spectra, in situ, contamination depth.

Введение. Мониторинг окружающей среды (в частности, определение загрязнения почв в результате радиоактивных выпадений) является обязательным условием системы обеспечения радиационной безопасности при нормальных условиях эксплуатации атомных электростанций, а также в случае возникновения внештатных ситуаций на предприятиях ядерного топливного цикла.

В настоящее время средства измерений, позволяющие проводить радиационный контроль почв, преимущественно лабораторные (стационарные). Определение плотности радиоактивных выпадений для оценки и прогнозирования радиационной обстановки загрязненных территорий на основе отбора и подготовки представительных проб почв с последующим их измерением на стационарных спектрометрах имеет ряд существенных недостатков, связанных, в первую очередь, с высокой вероятностью возникновения случайных и систематических ошибок [1, 2].

Использование портативных и легких спектрометров с возможностью проведения измерений методом in situ позволяет быстро оценить удельную активность контролируемых радионуклидов и плотность загрязнения с необходимой точностью того или иного участка почвы [3].

Основным условием возможности применения метода in situ при обследовании загрязненных территорий является наличие априорной информации об источнике γ -излучения (радионуклидный состав, толщина загрязненного слоя почвы, размеры загрязненного участка почвы, т. д.). Необходимая информация может быть получена как предварительно, так и непосредственно в процессе измерения.

В данной работе представлены основные результаты моделирования переноса γ -излучения из почвы к сцинтилляционному детектору методом Монте-Карло и описание ключевых моментов методики определения основных параметров геометрии измерения – толщины загрязненного слоя и размера загрязненного участка почвы без проведения предварительного отбора и анализа проб.

Материалы и методы. Для получения функций отклика спектрометра в заданных геометриях измерения разработаны с применением метода Монте-Карло модели устройства детектирования спектрометра и источника γ -излучения (загрязненной почвы) с различными толщинами загрязненного слоя почвы радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs и размерами загрязненного участка почвы. При измерениях активности радионуклидов методом *in situ* размер участка почвы определяется значением эффективного радиуса – радиуса загрязненного участка почвы, который формирует более 90 % функции отклика спектрометра для определенной толщины загрязненного слоя почвы.

Для оптимизации параметров модели источника γ -излучения дополнительно использовался аналитический метод, позволивший оценить значения эффективного радиуса для различных толщин загрязненного слоя почвы (табл. 1) [4].

Т а б л и ц а 1. Эффективный радиус источника γ -излучения

Толщина загрязненного слоя почвы D , см	Относительное отклонение показаний детектора от истинного значения β , % ¹		
	3	5	10
	Эффективный радиус участка почвы R , см		
2	115	98	76
5	83	71	55
10	71	60	47
15	64	55	42

¹ Истинное значение – отклик спектрометра при измерении загрязненного участка почвы условно бесконечного радиуса.

Математическое моделирование методом Монте-Карло. Для численного моделирования методом Монте-Карло использовалось программное обеспечение MCNP (Monte-Carlo N-Particle Transport, Los Alamos National Laboratory, USA) версии 4A [5]. На начальном этапе для верификации модели спектрометра применялись образцовые спектрометрические γ -источники типа ОСГИ-3 с γ -излучающими радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs . При эксперименте и моделировании методом Монте-Карло источники располагались на расстоянии 5 см от торцевой поверхности контейнера с блоком детектирования.

Отклонение амплитуд пиков полного поглощения (ППП) γ -излучения с энергией 661,7 кэВ для ^{137}Cs , 597,4 и 796,4 кэВ для ^{134}Cs на уровне 2 % (погрешность ОСГИ-3 ± 5 %) отражает высокую степень соответствия модели Монте-Карло физическому образцу спектрометра.

Для определения функции отклика устройства детектирования к присутствующим в почве техногенным изотопам ^{134}Cs , ^{137}Cs и природным радионуклидам ^{40}K , ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th использовалась модель для почв с различными толщинами почвенного слоя, загрязненного техногенными радионуклидами. На рис. 1 показаны сечения компонент системы источник – детектор, полученные из кода MCNP.

Значение плотности почвы принято $1,3 \text{ г/см}^3$. Элементный состав, используемый в моделировании переноса γ -излучения в геометрии измерения *in situ*, представлен в табл. 2 [4].

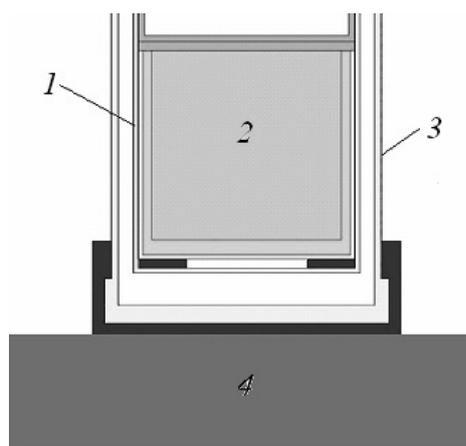


Рис. 1. Модель устройства детектирования и почвы в геометрии измерения *in situ*: 1 – корпус блока детектирования; 2 – детектор NaI(Tl); 3 – термоударопрочный контейнер; 4 – почва

Таблица 2. Элементный состав почвы

Химический элемент	Si	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	O	P	S	C	H	N
Массовая доля, %	24,32	5,07	1,04	0,31	0,62	1,21	1,08	62,18	0,03	0,07	3,53	0,38	0,19

Результаты моделирования методом Монте-Карло позволили подтвердить и в некоторых случаях скорректировать значения эффективных радиусов источника γ -излучения, вычисленных с использованием аналитического подхода (табл. 1). Модели устройства детектирования спектрометра и загрязненного участка почвы позволили получить функции отклика спектрометра в геометрии измерения *in situ* в виде расчетных спектров для различных толщин загрязненного слоя почвы радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs , являющихся составной частью математического обеспечения спектрометра.

При использовании данных аналитического подхода и моделирования определена функциональная зависимость эффективного радиуса участка почвы R (см) от толщины загрязненного слоя почвы D (см), в которой распределены радионуклиды ^{134}Cs и ^{137}Cs :

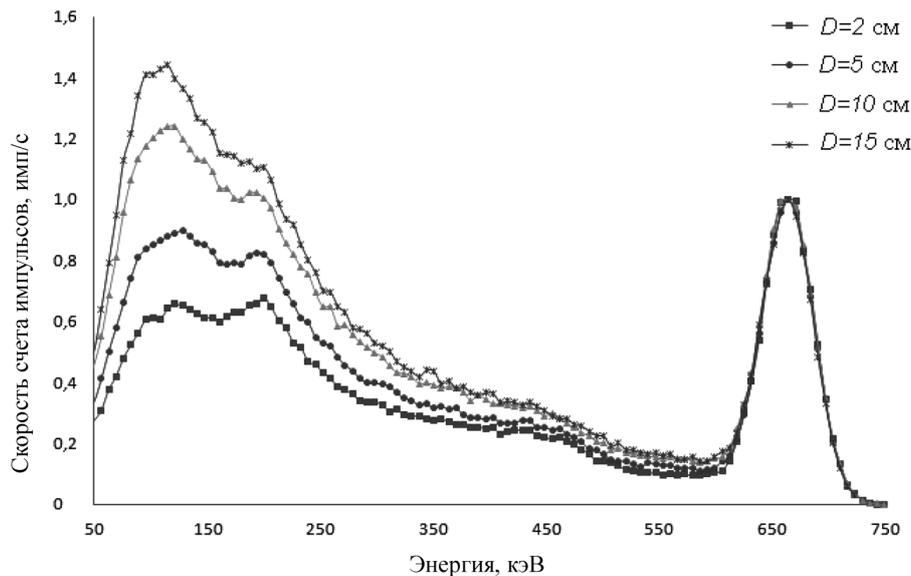
$$R(D) = 0,397D^{-0,193}. \quad (1)$$

Она позволяет проводить измерения удельной активности радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs или плотности загрязнения почвы данными радионуклидами, а также оценивать их удельную активность на заданную толщину почвенного слоя.

На рис. 2 представлены расчетные спектры, полученные путем моделирования переноса γ -излучения из источника в детектор методом Монте-Карло при условии равномерного распределения радионуклида ^{137}Cs в заданном слое почвы с учетом эффективного радиуса источника γ -излучения. Для наглядности спектры нормированы на единицу в ППП с энергией γ -излучения 661,7 кэВ.

Математические методы обработки энергетического распределения γ -квантов. Для решения задач радиационного контроля и мониторинга почв с использованием метода *in situ* разработано математическое обеспечение на основе спектрометрического анализа энергетического распределения γ -квантов (далее спектр) в процессе измерения активности радионуклидов ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th в заданной геометрии измерения.

Толщина загрязненного слоя почвы радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs является одним из основных параметров геометрии измерения при использовании метода *in situ*. Эта величина не является константой, а зависит от времени, прошедшего с момента радиоактивного загрязнения, механического воздействия на почву (вспашка, рекультивация, рыхление), типа почв и т. д. Таким

Рис. 2. Расчетные спектры радионуклида ^{137}Cs

образом, для корректного измерения активности ^{134}Cs и ^{137}Cs в почве непосредственно в месте залегания необходимо знать данный параметр при оценке геометрии измерения, в частности объема почвы, формирующего более 90% функции отклика детектора.

Процедура анализа аппаратного спектра γ -излучения (спектра, непосредственно измеренного с использованием спектрометра) с целью определения толщины загрязненного слоя почвы заключается в поэтапном решении следующих задач:

вычет фоновой составляющей, обусловленной собственным фоном устройства детектирования и космическим излучением;

поиск и идентификация ППП естественных и техногенных радионуклидов [6, 7];

определение параметров найденных ППП (положение центроиды пика, полная ширина пика на полувысоте, площадь пика за вычетом фонового пьедестала) [6, 7];

построение теоретических спектров с учетом идентифицированных радионуклидов и расчетных нормированных спектров для заданных толщин загрязненного слоя почвы техногенными радионуклидами;

определение невязки каждого теоретического спектра в заданном энергетическом диапазоне относительно аппаратного спектра;

нахождение функции, аппроксимирующей невязку, и оценка реальной толщины загрязненного слоя почвы техногенными радионуклидами.

Исключая фоновую составляющую, обусловленную собственным фоном устройства детектирования и космическим излучением из сигнала, аппаратный спектр $F(E)$ представляем таким образом:

$$F(E) = F'(E) + \Delta^D(E), \quad (2)$$

где $\Delta^D(E)$ – невязка теоретического спектра относительно измеренного аппаратного спектра в виде некоторого энергетического распределения импульсов; $F'(E)$ – теоретический спектр, полученный с использованием расчетных спектров по результатам идентификации радионуклидного состава измеряемого участка почвы:

$$F'(E) = \sum_i G_i^D(E) K_i, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – количество идентифицированных радионуклидов в почве; $G_i^D(E)$ – нормированный на единицу времени и активности расчетный спектр i -го радионуклида для загрязненного почвенного слоя толщиной D , полученный путем моделирования методом Монте-Карло; K_i – коэффициент, характеризующий геометрию измерения и активность i -го радионуклида. Он определяется по результатам поиска, идентификации и анализа ППП аппаратного спектра по алгоритмам, описанным в [6, 7].

Выделяя из аппаратного спектра фоновую компоненту, обусловленную присутствием в почве естественных радионуклидов, получаем суммарный отклик спектрометра $F_{\text{Cs}}(E)$ к радионуклидам ^{134}Cs и ^{137}Cs в искомом почвенном слое. Поскольку изотопы цезия химически не различаются относительно друг друга, механизм их распределения в почвенном профиле будет иметь одинаковый характер. Используя выражения (2), (3), суммарный отклик спектрометра $F_{\text{Cs}}(E)$ представляем в следующем виде:

$$F_{\text{Cs}}(E) = G_{^{134}\text{Cs}}^D(E) K_{^{134}\text{Cs}} + G_{^{137}\text{Cs}}^D(E) K_{^{137}\text{Cs}} + \Delta^D(E), \quad (4)$$

где $G_{^{134}\text{Cs}}^D(E)$ и $G_{^{137}\text{Cs}}^D(E)$ – нормированные на единицу времени и активности расчетные спектры радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs , распределенных в почвенном слое заданной толщины D .

Коэффициенты $K_{^{134}\text{Cs}}$ и $K_{^{137}\text{Cs}}$ определяются по результатам аппроксимации ППП с энергиями γ -излучения 796,4 и 661,7 кэВ соответственно в суммарном отклике спектрометра $F_{\text{Cs}}(E)$.

Представлен результат использования выражений (1)–(4) в виде теоретических спектров для заданных толщин загрязненного почвенного слоя D , равных 2, 5, 10 и 15 см (рис. 3).

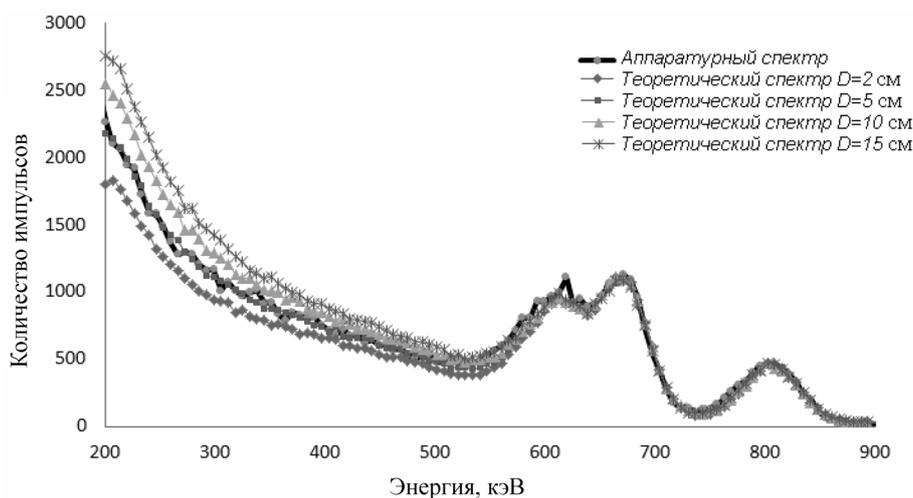


Рис. 3. Аппаратурный и теоретические спектры с радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs . Получены на участке почвы с глубиной залегания радионуклидов $D = 5$ см, расположенном в регионе Тохоку (Япония)

Для определения толщины загрязненного слоя почвы радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs используется вспомогательная линейная функция

$$H(D) = a + bD. \quad (5)$$

Коэффициенты a и b определяются путем аппроксимации методом наименьших квадратов невязок $\Delta^D(E)$ для толщин загрязненного почвенного слоя D , равных 2, 5, 10 и 15 см.

На рис. 4 приведены вспомогательные функции $H(D)$, полученные в результате анализа нескольких аппаратурных спектров в соответствии с предложенным выше методом. Аппаратурные спектры измерялись на участках почвы, расположенных в регионе Тохоку (Япония) на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на АЭС Фукусима. Толщина загрязненного почвенного слоя D_s определялась из условия $H(D_s) = 0$.

В [2] представлены результаты сравнения измерений методом *in situ* с данными измерения отобранных представительных проб почвы на спектрометре на основе детектора из особо чистого германия. В процессе измерения удельной активности контролируемых радионуклидов в почве автоматически определялась толщина загрязненного почвенного слоя, значение которой использовалось для корректировки удельной активности на заданный слой почвы. Отклонения не

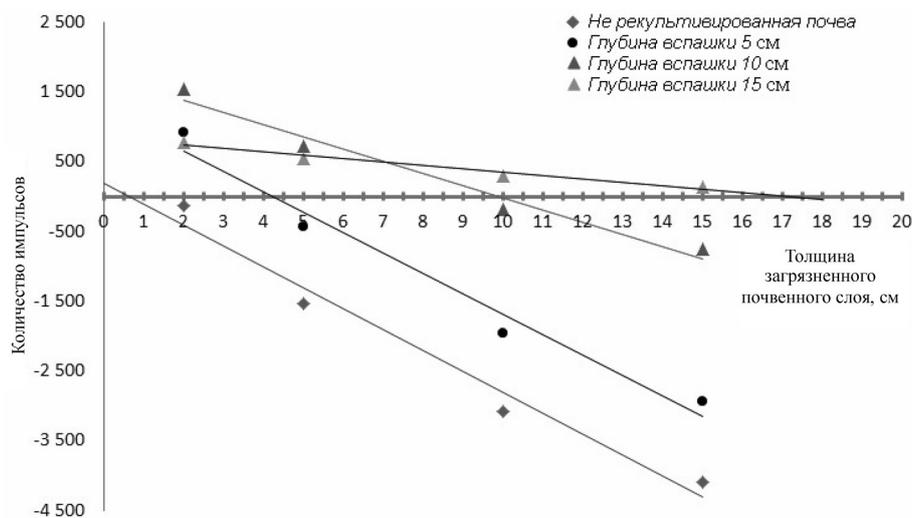


Рис. 4. Результаты аппроксимации невязок с использованием выражения (5) для различных толщин загрязненного почвенного слоя радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs

более $\pm 10\%$ значений удельной активности ^{137}Cs , полученных с применением метода *in situ*, относительно показаний, полученных с применением пробоотбора, подтверждают корректную работу метода определения толщины загрязненного почвенного слоя радионуклидами в процессе измерения.

Испытания университета Фукусимы совместно с японской сельскохозяйственной ассоциацией на фруктовых и рисовых полях (более 450), расположенных в регионе Тохоку, с различным распределением контролируемых радионуклидов в почвенном профиле, подтвердили корректную работу данного метода и показали необходимость определения толщины загрязненного почвенного слоя при измерении активности радионуклидов методом *in situ* [8].

Заключение. Использование результатов взаимодополняющих теоретических и экспериментальных исследований позволило определить функции отклика спектрометра в требуемых геометриях измерения к заданным радионуклидам. Предложенные функциональные зависимости позволяют вычислить основные параметры геометрии измерения (толщину загрязненного почвенного слоя и эффективный радиус источника γ -излучения) в процессе измерения активности радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs без отбора проб.

Список использованной литературы

1. Грубич, А. О. Радиоактивное загрязнение почв. От исследований Чернобыльских выпадений к контролю АЭС / А. О. Грубич. – Гомель: Институт радиологии, МЧС, Беларусь, 2010.
2. Портативный гамма-спектрометр МКС-АТ6101ДР для измерения методом *in situ* / А. И. Жуковский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2015 – № 3 (70). – С. 9–12.
3. Гамма-спектрометр: пат. 2657 Респуб. Беларусь, МКПО (9) 10–05 / В. Д. Гузов, А. М. Бирило, А. И. Жуковский, В. А. Чирикало, А. Н. Семеняко, Е. В. Быстров; заявитель НПУП «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» – f 20120231; заявл. 07.08.2012; опубл. 28.02.2013 // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1 (90). – С. 255.
4. Оценка области влияния загрязненного участка почвы при решении задач радиационного мониторинга методом *in situ* / А. И. Жуковский [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2014 – № 1 (8). – С. 119–124.
5. Bristmeister, J. F. Ed. MCNP- A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4A. / J. F. Bristmeister. // Report LA-12625-M. – Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1994.
6. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / Д. Райлли [и др.]. – М.: БИНОМ, 2000.
7. Спектрометр для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в легких взрослого человека. Часть II. Математическое обеспечение СКГ-АТ1316А / А. И. Жуковский [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2 (7). – С. 5–11.
8. AT6101DR gamma-spectrometer for soil radiation control and monitoring by *in situ* as a result of Belarus and Japan cooperation in overcoming the consequences of the accident at Fukushima nuclear power plant / A. Zhukouski [et al.] // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: сб. докл. XIII междунар. совещ. – СПб., 2015. – С. 160–163.

Поступила в редакцию 17.11.2015

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 004.912

С. Ф. ЛИПНИЦКИЙ

АЛГОРИТМЫ РУБРИКАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ И КРАТКИХ СООБЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГА

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: lipn@newman.bas-net.by*

Предлагается подход к автоматической рубрикации текстовых документов и кратких сообщений, основанный на использовании тематических корпусов текстов. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при рубрикации неструктурированных текстов на различных входных языках. Для каждого языка «вручную» должен быть построен рубрикатор, каждой позиции которого ставится в соответствие поисковый образ релевантного ей корпуса текстов.

Ключевые слова: информативность слов, информационный мониторинг, корпус текстов, рубрикация текстовых документов.

S. F. LIPNITSKY

ALGORITHMS OF CATEGORIZATION OF TEXT DOCUMENTS AND SUMMARIES IN A SYSTEM OF INFORMATIONAL INTERNET-MONITORING

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: lipn@newman.bas-net.by*

An approach to automatic categorization of text documents and summaries is proposed. This approach is based on the use of thematic text corpora. The developed algorithms can be used to categorize unstructured texts on different input languages. A rubricator for each language must be built «by hand», where each item of which is associated with the search image relevant to her corpus.

Keywords: the information content of words, information monitoring, body text, headings text documents.

Введение. Информационный мониторинг – технология систематического сбора и обработки информации с целью использования ее при принятии решений в различных предметных областях. Необходимость автоматизации процессов мониторинга связана с большими интеллектуальными и финансовыми затратами предприятий и организаций при «ручном» выполнении этих работ. Мониторинг информации в Интернете характеризуется двумя наиболее существенными аспектами. Первый аспект связан с поиском релевантных запросу пользователя текстов среди большого количества неупорядоченных интернет-данных, а второй – с анализом и рубрикацией найденных текстовых документов и сообщений.

Различают монотематические и политематические тексты, а также краткие сообщения. Под монотематическим понимают текст, посвященный единой тематике (например, монография). Политематический текст (например, сборник статей) является «склежкой» (конкатенацией) нескольких монотематических текстов. Краткое сообщение – текст объемом порядка 10000 слов и меньше (например, статья или новостное сообщение). Рубрикация монотематического текста сводится к его индексированию и поиску релевантного тематического корпуса текстов. При ру-

брукации политематического текста релевантная позиция рубрикатора ищется для каждого его раздела. При рубрикации кратких сообщений каждое из них целиком соотносится с релевантной рубрикой.

В данной статье предлагается подход к автоматической рубрикации неструктурированных текстовых документов и кратких сообщений, основанный на использовании тематических корпусов текстов, накопленных в соответствии с позициями рубрикатора. Для рубрикации текстов предлагается использовать разработанную автором модель представления знаний о предметной области на основе вербальных ассоциаций [1]. В отличие от существующих методов (см., например, [2]), основанных преимущественно на составляемых «вручную» списках ключевых слов, предлагаемый подход обеспечивает автоматическое индексирование документов и сообщений.

1. Понятие рубрикатора текстов и кратких сообщений

При построении рубрикатора каждой его позиции соотнесем название рубрики и поисковый образ (ПО) релевантного ей тематического корпуса текстов. Формализуем понятие рубрикатора.

1.1. Упорядоченные тематические корпуса текстов. Рассмотрим множество $CT = \{Ct_i \mid i = \overline{1, n}\}$ всех тематических корпусов текстов и их объединение, т. е. полный корпус текстов $Cf = \bigcup_{i=1}^n Ct_i$.

Определим на множестве CT отношение строгого порядка (антирефлексивное и транзитивное бинарное отношение) \prec . Обозначим через \prec^r редукцию $\prec^r = \prec \setminus \prec^2$ строгого порядка \prec . Содержательно редукция \prec^r соответствует отношению подчинения позиций рубрикатора (например, *раздел-подраздел*, *подраздел-пункт* и т. д.), каждая из которых представлена релевантным ей тематическим корпусом текстов. Позиции рубрикатора имеют, как правило, названия (например: *Методы обработки*; *Инструмент*; *Материалы* и т. д.).

1.2. Создание поисковых образов тематических корпусов текстов. Поисковый образ любого тематического корпуса текстов Ct_i – совокупность ключевых слов a, b, \dots , каждому из которых приписано значение показателя его информативности $I_{Ct_i}^a, I_{Ct_i}^b, \dots$:

$$ПО_{Ct_i} = \{(a, I_{Ct_i}^a), (b, I_{Ct_i}^b), \dots \mid a \in Ct_i, b \in Ct_i, I_{Ct_i}^a > I_{Ct_i}^0, I_{Ct_i}^b > I_{Ct_i}^0\}, \quad (1)$$

где $I_{Ct_i}^0$ – пороговое значение информативности.

Будем рассматривать корпус текстов Ct_i как единый текст T_i , полученный в результате последовательного объединения всех предложений всех текстов из множества Ct_i . Тогда $ПО_{Ct_i}$ корпуса Ct_i получим в результате индексирования текста T_i . Информативность каждой словоформы a из текста T_i при его индексировании будем вычислять как отношение абсолютной частоты встречаемости словоформы a в тематическом корпусе текстов Ct_i к абсолютной частоте ее появления в полном корпусе текстов Cf [2]:

$$I_{Ct_i}^a = n_{Ct_i}^a / n_{Cf}^a. \quad (2)$$

Информативность $I_{Ct_i}^a$ слова a вычисляется с учетом словоизменений и синонимии, которые зафиксированы в следующих лингвистических словарях [3]:

частотный словарь словоформ $Dis_a = \{(a, n_{Cf}^a, n_{Ct_1}^a, n_{Ct_2}^a, \dots, n_{Ct_n}^a) \mid a \in W_{Cf}\}$, в котором каждой словоформе приписаны частоты ее встречаемости $n_{Cf}^a, n_{Ct_1}^a, n_{Ct_2}^a, \dots, n_{Ct_n}^a$ во всех корпусах текстов (W_{Cf} – множество всех словоформ полного корпуса текстов Cf);

частотный словарь слабоинформативных словоформ $We_a = \{(a, n_{Cf}^a, n_{Ct_1}^a, n_{Ct_2}^a, \dots, n_{Ct_n}^a) \mid a \in W_{Cf}, n_{Ct_i}^a / n_{Cf}^a \leq I_0, i = \overline{1, n}\}$, где I_0 – пороговое значение информативности словоформы;

частотный словарь вербально-ассоциативных пар слов $Dis_{ab} = \{(a, b), n_{Cf}^{ab}, n_{Ct_1}^{ab}, n_{Ct_2}^{ab}, \dots, n_{Ct_n}^{ab}\} \mid a, b \in W_{Cf}, n_{Cf}^{ab} \neq 0, n_{Ct_i}^{ab} \neq 0, i = \overline{1, n}\}$, где $n_{Cf}^{ab}, n_{\langle Cp_i, Ev_i \rangle}^{ab}$ – абсолютные частоты совместной встречаемости слов a и b в одном и том же предложении полного Cf и i -го тематического корпуса текстов Ct_i ($i = \overline{1, n}$);

частотный словарь слабоинформативных вербально-ассоциативных пар слов $We_{ab} = \{ \langle (a, b), n_{Cf}^{ab}, n_{Ct_1}^{ab}, n_{Ct_2}^{ab}, \dots, n_{Ct_n}^{ab} \rangle \mid a, b \in W_{Cf}, n_{Cf}^{ab} \neq 0, n_{Ct_i}^{ab} \neq 0, n_{Ct_i}^{ab} / n_{Cf}^{ab} \leq I_{00}, i = \overline{1, n} \}$, где I_{00} – пороговое значение информативности вербально-ассоциативной пары слов;

словарь словоизменительных парадигм $Dic_{par} = \{ (a, Par_a) \mid a \in W_{Cf}, a \in Par_a \}$, состоящий из пар (словоформа, парадигма). В позиции парадигмы Par_a представлены все словоизменения данной словоформы a ;

словарь синонимичных словоформ $Dic_{syn} = \{ (a, Syn_a) \mid a \in W_{Cf}, a \in Syn_a \}$, включающий в себя пары (словоформа, синонимичные словоформы), в которых каждой словоформе a соответствует множество ее синонимов Syn_a .

С учетом словоизменения и синонимии формула (2) примет вид

$$I_{Ct_i}^a = \frac{n_{Ct_i}^a + \sum_{b \in Par_a, b \neq a} n_{Ct_i}^b + \sum_{c \in Syn_a, c \neq a} (n_{Ct_i}^c + \sum_{d \in Par_c, d \neq c} n_{Ct_i}^d)}{n_{Cf}^a + \sum_{b \in Par_a, b \neq a} n_{Cf}^b + \sum_{c \in Syn_a, c \neq a} (n_{Cf}^c + \sum_{d \in Par_c, d \neq c} n_{Cf}^d)}. \quad (3)$$

Тогда процесс построения ПО (1) тематического корпуса текстов Ct_i сводится к последовательному вычислению информативности $I_{Ct_i}^a$ каждого слова a из текста T_i и проверке неравенств $I_{Ct_i}^a > I_{Ct_i}^0$.

1.3. Определение рубрикатора. Пусть G – орграф отношения \prec^r . Пометим каждую вершину орграфа G парой, включающей в себя название соответствующей рубрики и поисковый образ релевантного ей тематического корпуса текстов. Обозначим полученный орграф через Net_{cat} , назовем его рубрикатором текстовых документов и кратких сообщений.

2. Рубрикация монотематических текстовых документов

Рубрикация монотематических текстов сводится к поиску релевантной вершины рубрикатора Net_{cat} с наибольшим значением критерия выдачи. Рубрикация реализуется в три этапа.

На первом этапе индексируется подлежащий рубрикации текстовый документ как запрос пользователя на поиск рубрики.

На втором этапе корректируется поисковое предписание, полученное в результате индексирования этого текста. При коррекции по первоначальному поисковому предписанию проводится поиск релевантных документов в полном корпусе текстов. Найденное множество документов индексируется и строится его поисковый образ, т. е. откорректированное поисковое предписание.

На третьем этапе проводится поиск релевантных рубрик по откорректированному поисковому предписанию. Из найденных рубрик выбирается та, которой соответствует наибольшее значение критерия выдачи. К найденной рубрике относится исходный текст.

2.1. Индексирование рубрицируемого монотематического текста. Рассмотрим произвольный монотематический текст T ($T \in Cf$). ПО текста T – совокупность информативных (ключевых) слов, каждому из которых соответствует значение его информативности. Этот образ является предписанием на поиск релевантной вершины рубрикатора:

$$ПО_T = \{ (a, I_T^a), (b, I_T^b), \dots \mid a \in T, b \in T, I_T^a > I_T^0, I_T^b > I_T^0 \}. \quad (4)$$

В множестве $ПО_T$ ключевым словам a и b каждой пары соответствуют величины их информативности I_T^a и I_T^b в тексте T , превосходящие пороговое значение I_T^0 .

При индексировании текста T информативность I_T^a произвольного слова a текста T будем вычислять по формуле, аналогичной выражению (3):

$$I_T^a = \frac{n_T^a + \sum_{b \in Par_a, b \neq a} n_T^b + \sum_{c \in Syn_a, c \neq a} (n_T^c + \sum_{d \in Par_c, d \neq c} n_T^d)}{n_{Cf}^a + \sum_{b \in Par_a, b \neq a} n_{Cf}^b + \sum_{c \in Syn_a, c \neq a} (n_{Cf}^c + \sum_{d \in Par_c, d \neq c} n_{Cf}^d)}. \quad (5)$$

2.2. Коррекция поискового образа рубрицируемого монотематического текста. При коррекции ПО (4) нужно построить динамический корпус текстов, релевантных тексту T , а затем проиндексировать его. Полученный индекс – откорректированный ПО рубрицируемого текста.

Рассмотрим l -мерное евклидово пространство E . Для его построения лексикографически упорядочим все слова полного корпуса текстов Cf , т. е. сформируем кортеж $W_{Cf} = \langle c_1, c_2, \dots, c_l \rangle$. Для ПО _{Q} (4) каждого текста Q из полного корпуса текстов Cf построим вектор в пространстве E :

$$\mathbf{F}_{\text{ПО}_Q} = (J_{c_1}, J_{c_2}, \dots, J_{c_l}),$$

где $J_{c_1}, J_{c_2}, \dots, J_{c_l}$ – значения информативности ключевых слов c_1, c_2, \dots, c_l соответственно. (Компонента вектора $J_{c_k} = 1$, если слово c_k присутствует в ПО _{Q} текста Q , и $J_{c_k} = 0$ в противном случае.) Аналогично представим вектор ПО _{T} рубрицируемого текста T :

$$\mathbf{F}_T = (I_{c_1}, I_{c_2}, \dots, I_{c_l}).$$

Как показано в [1], в качестве критерия выдачи целесообразно использовать косинус угла между векторами \mathbf{F}_T и $\mathbf{F}_{\text{ПО}_Q}$:

$$\cos \varphi = \frac{\mathbf{F}_T \mathbf{F}_{\text{ПО}_Q}}{|\mathbf{F}_T| |\mathbf{F}_{\text{ПО}_Q}|} = \frac{\sum_{k=1}^l I_{c_k} J_{c_k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^l I_{c_k}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^l J_{c_k}^2}}. \quad (6)$$

Если эта мера превышает некоторый порог $\cos \varphi_0$, то текст Q будем считать элементом создаваемого динамического корпуса текстов Dt :

$$Dt = \{Q \mid Q \in Cf, \cos \varphi > \cos \varphi_0\}.$$

Индексирование динамического корпуса текстов. При индексировании корпуса текстов Dt информативность каждого его слова вычисляется по формуле, аналогичной выражению (3):

$$I_{Dt}^a = \frac{n_{Dt}^a + \sum_{b \in \text{Par}_a, b \neq a} n_{Dt}^b + \sum_{c \in \text{Syn}_a, c \neq a} (n_{Dt}^c + \sum_{d \in \text{Par}_c, d \neq c} n_{Dt}^d)}{n_{Cf}^a + \sum_{b \in \text{Par}_a, b \neq a} n_{Cf}^b + \sum_{c \in \text{Syn}_a, c \neq a} (n_{Cf}^c + \sum_{d \in \text{Par}_c, d \neq c} n_{Cf}^d)}. \quad (7)$$

Полученный в результате индексирования ПО динамического корпуса текстов Dt – откорректированное поисковое предписание на поиск ПО тематического корпуса текстов, релевантного динамическому корпусу Dt :

$$\text{ПО}_{Dt} = \{(a, I_{Dt}^a), (b, I_{Dt}^b), \dots \mid a \in Dt, b \in Dt, I_{Dt}^a > I_{Dt}^0, I_{Dt}^b > I_{Dt}^0\}. \quad (8)$$

Искомому ПО будет соответствовать позиция рубрикатора, релевантная рубрицируемому тексту.

2.3. Поиск релевантной позиции рубрикатора. Нужно найти в множестве $CT = \{Ct_i \mid i = \overline{1, n}\}$ тематический корпус текстов Ct_i , релевантный поисковому предписанию (8). При поиске будем использовать критерий выдачи, аналогичный критерию (6):

$$\cos \psi = \frac{\mathbf{F}_{Ct_i} \mathbf{F}_{\text{ПО}_{Dt}}}{|\mathbf{F}_{Ct_i}| |\mathbf{F}_{\text{ПО}_{Dt}}|}, \quad (9)$$

где \mathbf{F}_{Ct_i} – вектор ПО тематического корпуса текстов Ct_i , а $\mathbf{F}_{\text{ПО}_{Dt}}$ – вектор ПО динамического корпуса текстов Dt .

Результатом поиска является тематический корпус текстов Ct_i с наибольшим значением критерия выдачи $\cos \psi$, причем $\cos \psi > \cos \psi_0$ ($\cos \psi_0$ – пороговое значение критерия выдачи). Если же релевантный тематический корпус не найден, то необходимы включение в рубрикатор новой позиции и формирование соответствующего тематического корпуса текстов.

2.4. Алгоритм рубрикации монотематических текстовых документов. В соответствии с алгоритмом индексируется входной текстовый документ и ищется релевантная полученному его ПО позиция рубрикатора.

А л г о р и т м 1. На входе алгоритма – монотематический текст T , на выходе – вершина рубрикатора G , помеченная поисковым образом тематического корпуса текстов, релевантным тексту T , а также названием соответствующей рубрики.

1. Вычислить информативность I_T^a каждой словоформы a текста T по формуле (5).
2. Проиндексировать текст T , т. е. сформировать его ПО в виде выражения (4).
3. Сформировать динамический корпус текстов $Dt = \{Q | Q \in Cf, \cos \varphi > \cos \varphi_0\}$, используя критерий выдачи (6).
4. Проиндексировать корпус текстов D_t , т. е. сформировать его ПО в виде выражения (8).
5. Искать позицию (вершину) рубрикатора Net_{cat} , релевантную ПО D_t .
6. Если позиция рубрикатора найдена, то конец, иначе перейти к п. 7.
7. Выдать сообщение «Необходимо сформировать новый тематический корпус текстов». Конец.

3. Рубрикация кратких сообщений

Процедура рубрикации кратких сообщений аналогична процессу рубрикации монотематических текстов. Отличие в алгоритме индексирования рубрицируемого сообщения в используемом критерии выдачи.

3.1. Индексирование рубрицируемого краткого сообщения. Рассмотрим произвольное краткое сообщения Nov ($Nov \in Cf$). Индексирование сообщения Nov сводится к перечислению всех словоформ, присутствующих в нем (кроме слабоинформативных), а также их синонимов и словоизменений. Полученный ПО сообщения Nov представим в следующем виде:

$$ПО_{Nov} = \{a | a \in Nov \cup Par_a \cup Syn_a, a \notin We_a\}. \quad (10)$$

Для поиска синонимов слова a используем словарь синонимичных словоформ Dic_{syn} , а все словоизменения этого слова ищем в словаре словоизменительных парадигм Dic_{par} . Слабоинформативные слова краткого сообщения Nov представлены в словаре We_a .

3.2. Коррекция поискового образа краткого сообщения. По аналогии с коррекцией ПО монотематического текста коррекцию краткого сообщения реализуем путем построения динамического корпуса текстов $DNov$, релевантных сообщению Nov . В результате индексирования этого корпуса получим откорректированный ПО рубрицируемого текста.

Информативность вербально-ассоциативной связи между текстами. Обозначим через W_{Nov} множество всех слов ПО рубрицируемого сообщения Nov , а через W_Q – множество всех слов ПО произвольного текста Q из полного корпуса текстов Cf . Тогда информативность вербально-ассоциативной связи между сообщением Nov и текстом Q будем вычислять по формуле

$$I^{NovQ} = \frac{\sum_{a \in W_{Nov}, b \in W_Q} I^{ab}}{\sqrt{\sum_{a \in W_{Nov}, b \in W_Q} (I^{ab})^2}}. \quad (11)$$

Информативность I^{ab} вербально-ассоциативной связи слов a и b вычисляется по формуле, аналогичной выражению (5):

$$I^{ab} = \frac{n_{Nov \cup Q}^{ab} + \sum_{\substack{c \in Par_a, c \neq a \\ d \in Par_b, d \neq b}} n_{Nov \cup Q}^{cd} + \sum_{\substack{r \in Syn_a, r \neq a \\ s \in Syn_b, s \neq b}} (n_{Nov \cup Q}^{rs} + \sum_{\substack{p \in Par_r, p \neq r \\ q \in Par_s, q \neq s}} n_{Nov \cup Q}^{pq})}{n_{Cf}^{ab} + \sum_{\substack{c \in Par_a, c \neq a \\ d \in Par_b, d \neq b}} n_{Cf}^{cd} + \sum_{\substack{r \in Syn_a, r \neq a \\ s \in Syn_b, s \neq b}} (n_{Cf}^{rs} + \sum_{\substack{p \in Par_r, p \neq r \\ q \in Par_s, q \neq s}} n_{Cf}^{pq})}, \quad (12)$$

где $n_{Nov \cup Q}^{ab}$, $n_{Nov \cup Q}^{cd}$, $n_{Nov \cup Q}^{rs}$, $n_{Nov \cup Q}^{pq}$, n_{Cf}^{ab} , n_{Cf}^{cd} , n_{Cf}^{rs} , n_{Cf}^{pq} – абсолютные частоты совместной встречаемости пар слов (a, b) , (c, d) , (r, s) и (p, q) в одном и том же предложении объединения $Nov \cup Q$ сообщения Nov и текста Q , а также полного корпуса текстов Cf .

Информативность I^{NovQ} – это мера релевантности текста Q рубрицируемому краткому сообщению Nov , т. е. критерий выдачи. Если эта мера превышает некоторый порог I^0 , то текст Q будем считать элементом создаваемого динамического корпуса текстов:

$$DNov = \{Q | Q \in Cf, I^{NovQ} > I^0\}.$$

Индексирование динамического корпуса текстов. При индексировании корпуса текстов $DNov$ информативность каждого его слова вычисляется по формуле, аналогичной выражению (3):

$$I_{DNov}^a = \frac{n_{DNov}^a + \sum_{b \in Par_a, b \neq a} n_{DNov}^b + \sum_{c \in Syn_a, c \neq a} (n_{DNov}^c + \sum_{d \in Par_c, d \neq c} n_{DNov}^d)}{n_{Cf}^a + \sum_{b \in Par_a, b \neq a} n_{Cf}^b + \sum_{c \in Syn_a, c \neq a} (n_{Cf}^c + \sum_{d \in Par_c, d \neq c} n_{Cf}^d)}. \quad (13)$$

Полученный в результате индексирования ПО динамического корпуса текстов $DNov$ – откорректированное поисковое предписание на поиск ПО тематического корпуса текстов, релевантного динамическому корпусу $DNov$:

$$ПО_{DNov} = \{(a, I_{DNov}^a), (b, I_{DNov}^b), \dots | a \in DNov, b \in DNov, I_{DNov}^a > I_{DNov}^0, I_{DNov}^b > I_{DNov}^0\}. \quad (14)$$

Искомому поисковому образу будет соответствовать позиция рубрикатора, релевантная рубрицируемому краткому сообщению.

3.3. Алгоритм рубрикации кратких сообщений. Согласно алгоритму, индексируется входное краткое сообщение, корректируется его ПО путем формирования динамического корпуса текстов и реализуется поиск релевантной позиции рубрикатора.

А л г о р и т м 2. На входе алгоритма – краткое сообщение Nov , на выходе – позиция рубрикатора G .

1. Проиндексировать краткое сообщение Nov , т. е. построить его ПО в виде выражения (10).

2. Вычислить информативность вербально-ассоциативной связи I^{ab} по формуле (12) между словами $a \in W_{Nov}$ и $b \in W_Q$ для всех возможных пар слов (a, b) .

3. Вычислить информативность вербально-ассоциативной связи I^{NovQ} по формуле (11) между сообщением Nov и текстами $Q \in Cf$ и сформировать динамический корпус текстов $DNov$.

4. Проиндексировать корпус текстов $DNov$, т. е. сформировать его ПО в виде выражения (14), вычисляя информативность слов по формуле (13).

5. Искать вершину графа Net_{cat} , которой соответствует тематический корпус текстов, релевантный поисковому предписанию ПО _{$DNov$} .

6. Если позиция рубрикатора найдена, то конец, иначе перейти к п. 7.

7. Выдать сообщение «Необходимо сформировать новый тематический корпус текстов». Конец.

4. Рубрикация политематических текстовых документов

Признаком политематичности текста является наличие в нем монотематических разделов. Каждый раздел в зависимости от его объема можно рассматривать как монотематический текст или краткое сообщение. Поэтому при рубрикации разделов политематического текста будем использовать рассмотренные выше два алгоритма.

А л г о р и т м 3. На входе алгоритма – политематический текст $Q = \langle R_1, R_2, \dots, R_k \rangle$, состоящий из разделов R_1, R_2, \dots, R_k , на выходе – позиции рубрикатора G для каждого раздела текста.

1. $i := 1$.

2. Если R_i – монотематический текст, то перейти к п. 3, если же R_i – краткое сообщение, то перейти к п. 4.

3. $T := R_i$. Выполнить алгоритм 1. Перейти к п. 5.

4. $Nov := R_i$. Выполнить алгоритм 2.

5. Если $i = k$, то конец, иначе перейти к п. 6.

6. $i := i + 1$. Перейти к п. 2.

Заключение. Предложенные в статье алгоритмы могут быть использованы при рубрикации неструктурированных текстов на различных входных языках. Для каждого языка «вручную» должен быть построен рубрикатор, каждой позиции которого ставится в соответствие поисковый образ релевантного ей тематического корпуса текстов. Процессы индексирования текстовых документов и сообщений, а также их рубрикации осуществляются автоматически.

Список использованной литературы

1. Липницкий, С. Ф. Модель представления знаний в информационных системах на основе вербальных ассоциаций / С. Ф. Липницкий // Информатика. – 2011. – № 4. – С. 21–28.

2. Хачумов, М. В. Задача кластеризации текстовых документов / М. В. Хачумов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 2. – С. 42–49.

3. Липницкий, С. Ф. Индексирование текстовой информации на основе моделирования вербальных ассоциаций / С. Ф. Липницкий // Информатика. – 2012. – № 3. – С. 94–102.

4. Липницкий, С. Ф. Моделирование информационного поиска на основе динамических корпусов текстов / С. Ф. Липницкий, А. А. Мамчич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 1. – С. 72–81.

Поступила в редакцию 28.05.2015

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

УДК 625.85:625.76 (476)(083.74) 691.16(088.8)

*И. И. ЛИШТВАН², Г. Д. ЛЯХЕВИЧ¹, А. Г. ЛЯХЕВИЧ¹, В. М. ДУДАРЧИК²,
В. М. КРАЙКО², С. А. ЗВОННИК¹*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ БУРЫХ УГЛЕЙ
И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЯХ**

*¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
²Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: nature@ecology.basnet.by; lfdi@hotmail.com; dudwm@tut.by; vvkraiko@gmail.com*

С использованием фундаментальных и специальных методов исследования изучены характеристики золы бурых углей и горючих сланцев, асфальтобетонные смеси, образцы асфальтобетона, содержащие золу. Результаты исследований показали возможность использования золы бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений Беларуси для получения строительных материалов. Новизна выполненных исследований заключается в разработке составов асфальтобетонных смесей, способов их приготовления с использованием золы бурых углей и горючих сланцев.

Ключевые слова: бурые угли, горючие сланцы, зола, активность золы, асфальтобетонная смесь, дорожно-строительные материалы.

*I. I. LISHTVAN², G. D. LJAKCHEVICH¹, A. G. LJAKCHEVICH¹, V. M. DUDARCHYK²,
V. M. KRAIKO², S. A. ZVONNIK¹*

**EXPERIMENTAL RESEARCH AND EFFICIENCY OF USE OF BROWN COAL ASH
AND OIL SHALE IN ASPHALT MIXES**

*¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
²The Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: nature@ecology.basnet.by; lfdi@hotmail.com; dudwm@tut.by; vvkraiko@gmail.com*

With the usage of fundamental and special methods of research the characteristics of brown coal ashes, asphalt concrete mixtures, asphalt concrete samples which contain these ashes have been explored. The results of the research showed the ability of use of Zhitkovichi brown coal deposit and Turov ash deposit for building materials production. The novelty of the research is to develop formulations of asphalt concrete mixtures, methods for their preparation with the use of brown coal ash and oil shale ash.

Keywords: brown coal, oil shale, ash, ash activity, asphalt-concrete mixture, road-building materials.

Введение. Во многих странах мира значительную часть электроэнергии получают благодаря сжиганию твердого топлива. Например, в России около 70% всей электроэнергии вырабатывается при сжигании твердого топлива – углей, сланцев, торфа. В результате ежегодно образуется около 50 млн т отвалов золошлаковых смесей. К концу 2013 г. в отвалах теплоэлектростанций находилось свыше 1,9 млрд т таких отходов. Уровень утилизации этих отходов в России составляет около 10%; в ряде развитых стран – около 50%, во Франции и в Германии – 70%, а в Финляндии – около 90% их текущего выхода. Там применяется в основном сухая зола и проводится

государственная политика, стимулирующая ее использование. В Польше резко повышена цена на землю под золоотвалы. В Китае зола доставляется потребителям бесплатно, а в Болгарии сама зола бесплатна. В Великобритании действуют пять региональных центров по сбыту золы [1].

Анализ отечественного и зарубежного опыта использования золы и золошлаковых материалов показал, что их можно применять, прежде всего, в дорожном строительстве при сооружении земляного полотна, для устройства укрепленных оснований, в качестве заполнителя и минерального порошка в асфальтобетонах. Потребление материальных ресурсов при строительстве автомобильных дорог чрезвычайно велико. Поэтому уменьшение потребности в дорожно-строительных материалах и повышение эффективности их использования остаются важнейшими проблемами. Одним из способов их решения является применение вторичных ресурсов – отходов промышленности, которые могут быть использованы или в качестве непосредственно дорожно-строительного материала, или как исходный продукт для его получения. К таким отходам относятся зола и шлаки – продукты сжигания на тепловых электростанциях твердого топлива: угля, торфа, сланцев и других горючих материалов. В 1976–1990 гг. разработан ряд нормативных документов, развивающих возможности использования золы и золошлаковых смесей в дорожном строительстве, что способствовало строительству автомобильных дорог с применением золы особенно в районах, испытывающих дефицит традиционных дорожно-строительных материалов.

Токсико-гигиеническая оценка золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей. Золошлаковые отходы, продукты сгорания углей – наиболее объемный вид отходов промышленного производства, хранение и переработка которых представляет ощутимую экологическую угрозу из-за наличия в их составе высокотоксичных компонентов. В связи с этим разработаны комплексная гигиеническая оценка золошлаковых отходов – продуктов сгорания бурых углей разных месторождений, методические подходы к комплексной токсико-гигиенической оценке золошлаковых отходов, позволившие установить их токсическую, мутагенную и фитотоксическую опасность [2, 3].

Определены параметры токсического и фитотоксического действия золошлаковых отходов, образующихся при сжигании бурых углей на теплокровных животных и растениях. Разработаны методики отбора, транспортировки и хранения проб золошлаковых отходов для аналитических, гигиенических исследований и токсикологических испытаний и методические подходы к оценке класса опасности промышленных отходов на основе комплексных экспериментальных токсикологических исследований. Сформулированы положения совершенствования государственного санитарно-эпидемиологического надзора за условиями образования, транспортировки и хранения золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей, и обоснована методология научного сопровождения предложений к региональным и отраслевым программам и проектам профилактических мероприятий. В зонах размещения золошлаковых отходов концентрации в подземных водах железа, марганца и алюминия, а в почве марганца, меди, никеля, кобальта, свинца и цинка многократно превышают предельно допустимые концентрации. На основании расчетных и экспериментальных методов с учетом состава, физико-химических свойств, токсического и фитотоксического действия золошлаковые отходы, образующиеся при сжигании углей, отнесены к промышленным отходам 3–4-го классов опасности [4–6]. Золошлаковые отходы – уникальный ресурс, который может использоваться в различных отраслях экономики с получением значительного социального и эколого-экономического эффектов. Таким образом, применение золошлаковых отходов позволит сэкономить на стоимости основных дорогостоящих материалов без ущерба качеству изделия, одновременно решив проблему их утилизации.

Цель работы – изучение возможности использования золы бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений в асфальтобетонных смесях. Задачи исследований – с помощью фундаментальных и специальных методов охарактеризовать золу бурых углей и горючих сланцев, органических вяжущих на их основе, разработать технологию приготовления асфальтобетонных смесей, их составы, изготовить образцы асфальтобетона, изучить их физико-химические и реологические характеристики.

Характеристика золы от сжигания технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений. Зола состоит из мелких стекловидных частиц,

в основном гладкой шаровидной формы, иногда полых внутри. Ее цвет может изменяться от серого до черного в зависимости от количества несгоревшего углерода. Чем светлее зола, тем ниже содержание углерода. На ее химические свойства влияют в значительной степени вид твердого топлива, методы сжигания, обработки и хранения. Главные составляющие – оксиды кремния, алюминия, железа и кальция с переменным количеством углерода, измеряемым потерей при прокаливании (ППП). В табл. 1 дано сравнение химических компонентов золы для основных видов топлива и золы, полученной из технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений.

Т а б л и ц а 1. Химический состав золы твердых горючих ископаемых

Оксиды и ППП	Зола, полученная из твердого топлива при сжигании, мас. %				
	промышленные условия			лабораторные условия	
	антрацит	тощий каменный уголь	БУ*Канско-Ачинского месторождения	БУ* Житковичского месторождения	ГС** Туровского месторождения
SiO ₂	20–60	40–60	15–45	64,35	56,4
Al ₂ O ₃	5–35	20–30	10–25	10,63	18,8
Fe ₂ O ₃	10–40	4–10	4–15	2,39	10,9
CaO	1–12	5–30	15–40	13,10	1,5
MgO	0–5	1–6	3–10	1,66	1,6
SO ₃	0–4	0–2	0–10	0,07	2,3
Na ₂ O	0–4	0–2	0–6	1,37	0,2
P ₂ O ₅	–	–	–	0,09	0,6
MnO	–	–	–	0,73	0,1
TiO ₂	–	–	–	1,30	1,0
K ₂ O	0–3	0–4	0–4	2,00	6,6
ППП	0–15	0–3	0–5	0,2	1,8

* БУ- бурые угли.

** ГС – горючие сланцы.

Важнейшими физическими свойствами золошлаковых материалов являются зерновой состав, насыпная и истинная плотности, водонасыщение. Зерновой состав определяется видом топлива, его подготовкой к сжиганию, режимом сжигания, способом улавливания золы, местом отбора (табл. 2). От зернового, химического и фазового составов золы зависит ее насыпная плотность, которая может составлять от 0,6 до 1,3 г/см³. Истинная плотность золы колеблется от 1,75 до 3,5 г/см³, составляя в среднем 2,1–2,4 г/см³.

Т а б л и ц а 2. Зерновой состав золы твердых топлив

Вид топлива	Размер зерен, мм							
	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	<0,05	
	Содержание зерен, %							
БУ Житковичского месторождения*	–	–	–	0,87	29,07	69,41	0,65	
ГС Туровского месторождения*	–	–	–	0,87	29,07	69,41	0,65	
Вид топлива	Размер зерен, мм							
	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	<0,05
	Содержание зерен, %							
БУ Житковичского месторождения**	0,6	0,8	5,6	18,5	60,2	10,4	3,2	0,7
ГС Туровского месторождения**	0,3	29,6	30,2	26,2	10,8	2,4	0,5	–

* Технологические пробы золы БУ Житковичского месторождения и ГС Туровского месторождения подвергались измельчению в шаровой мельнице.

** Технологические пробы золы БУ Житковичского месторождения и ГС Туровского месторождения не подвергались измельчению в шаровой мельнице.

Физические характеристики золы, полученной при сжигании технологических проб бурого угля Житковичского и горючего сланца Туровского месторождений Беларуси, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Физические свойства золы

Зола твердого топлива	Средняя плотность, г/см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г
БУ Житковичского месторождения*	2,13	0,74	2918
ГС Туровского месторождения*	2,02	0,71	2854

* Технологические пробы золы БУ Житковичского месторождения и ГС Туровского месторождения подвергались измельчению в шаровой мельнице.

Определение активности золы, полученной при сжигании технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений Беларуси. Основным критерием, определяющим способность золы и шлака к проявлению вяжущих свойств, является наличие кальция в свободном или связанном виде. Наряду с этим используются следующие критерии [4, 7–9]:

модуль основности (гидросиликатный модуль) M_o , который представляет собой отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов:

$$M_o = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) : (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3); \quad (1)$$

силикатный (кремнеземистый) модуль M_c , означающий отношение оксида кремния, вступающего в реакцию с другими оксидами, к суммарному содержанию оксидов алюминия и железа:

$$M_c = \text{SiO}_2 : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3); \quad (2)$$

коэффициент качества K , означающий отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее:

$$K = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) : (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2). \quad (3)$$

Результаты расчетов величин M_o , M_c , K , показали, что зола, полученная при сжигании технологической пробы бурых углей Житковичского месторождения, является активной и может использоваться как самотвердеющий материал в вяжущих, в изделиях на их основе (преимущественно автоклавного твердения), а также в дорожном строительстве, а зола, полученная при сжигании технологической пробы горючих сланцев Туровского месторождения, относится к скрытоактивным золошлаковым материалам и поэтому требует интенсификации твердения. После активации зола также может применяться как самотвердеющий материал в вяжущих и в дорожном строительстве.

Технология приготовления, составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетонов, содержащих золу от сжигания бурых углей Житковичского месторождения. Для приготовления асфальтобетонной смеси использовали: щебень ГП «Гранит» с максимальной крупностью зерен 20 мм, плотностью 2685 г/см³, содержанием пластинчатых и игольчатых зерен 19,3%; марка щебня 1200 соответствует ГОСТ 8267; песок с модулем крупности M_k , равным 2,1, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 8736; резиновую крошку (резина дробленая ТУ 38.108035–87), модифицированную высокомолекулярными нефтепродуктами, например, маслом ПН-6ш (ТУ 38.1011217–89); нефтяной битум марки БНД 60/90 соответствует ГОСТ 22245; золу от сжигания бурых углей Житковичского месторождения.

Технология приготовления асфальтобетонной смеси: предварительно золу активировали оксидатом отработанных минеральных масел (ООММ) при температуре 20–60 °С в течение 2–5 мин. Особенностью ООММ является значительное содержание кислородсодержащих функциональных групп, обеспечивающих повышенную адгезию оксидата к золе, что существенно влияет на водонасыщение образцов асфальтобетона и их водостойкость при длительном водонасыщении. Затем расчетное количество песка, щебня, активированной золы загружали в лопастную мешалку, нагревали до 120–160 °С и перемешивали до получения однородной массы. В мешалку подавали

резиновую крошку, модифицированную маслом ПН-6ш, нефтяной битум марки БНД 60/90. Смесь перемешивали при 120–160 °С до равномерного и полного обволакивания поверхности минеральных частиц пленкой и готовую асфальтобетонную смесь выгружали и исследовали.

В табл. 4 представлены составы асфальтобетонных смесей и физико-химические характеристики асфальтобетона. Примеры 2–4 подтверждают оптимальные составы асфальтобетонных смесей, а примеры 1,5 – запредельные составы, показывающие, что в случае отклонения от оптимальных составов качество асфальтобетона ухудшается.

Т а б л и ц а 4. Составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетона с использованием золы бурых углей

Компонент	Пример					
	1	2	3	4	5	
	Состав асфальтобетонных смесей, мас. %					
Битум	4,0	4,5	5,0	5,5	6	
Резиновая крошка, модифицированная маслом ПН-6ш	1,5	3	5	5	5,5	
Зола, активированная оксидатом отработанных минеральных масел	4	6	8	10	12	
Щебень	60	60	55	55	55	
Песок	30,5	26,5	28,0	24,5	21,5	
Показатель	Пример					
	1	2	3	4	5	ГОСТ 31015–2002*
	Физико-механические характеристики асфальтобетона					
Пористость минеральной части, %	17,9	15,8	15,5	15,2	15,6	От 15 до 19
Остаточная пористость, %	4,2	3,8	2,9	2,4	1,9	От 1,5 до 4,5
Водонасыщение, % по объему	3,4	2,0	1,7	1,5	1,2	От 1,0 до 4,0
Предел прочности при сжатии, МПа:						
при 20 °С	4,2	4,0	3,6	3,4	2,8	Не менее 2,2
при 50 °С	2,4	2,3	2,5	2,3	1,6	Не менее 0,65
Трещиностойкость – предел прочности на растяжение при расколе при 0 °С, МПа	2,8	3,9	4,7	5,1	5,4	2,5–6,0
Водостойкость при длительном водонасыщении	0,84	0,89	0,93	0,95	0,96	Не менее 0,85

* Значение показателей для дорожно-климатических зон II, III.

Как показывают результаты испытаний, асфальтобетонная смесь, содержащая золу от сжигания бурых углей Житковичского месторождения, имеет лучшие показатели водонасыщения, водостойкости при длительном водонасыщении, трещиностойкости, предела прочности при сжатии при 20 и 50 °С по сравнению с параметрами асфальтобетонной смеси (ГОСТ 31015–2002).

Технология приготовления, составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетонов, содержащих золу от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения. Зола содержит повышенное содержание реакционноспособных соединений Na_2O и K_2O , которые при попадании воды будут активно взаимодействовать с ней с образованием гидроксидов натрия и калия, являющихся чрезвычайно агрессивными соединениями. В результате физико-механические свойства асфальтобетона существенно ухудшатся. Нами предложена новая технология приготовления асфальтобетона, содержащего золу от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения.

Для приготовления асфальтобетонной смеси использовали: щебень ГП «Гранит» с максимальной крупностью зерен 20 мм, плотностью 2685 г/см³, содержанием пластинчатых и игольчатых зерен 19,3%, марка щебня 1200 соответствует ГОСТ 8267; песок с модулем крупности M_k 2,1, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 8736; резиновую крошку (резина дробленая ТУ 38.108035–87), модифицированную высокомолекулярными нефтепродуктами, например, маслом ПН-6ш

(ТУ 38.1011217–89); нефтяной битум марки БНД 60/90 соответствует ГОСТ 22245; золу сжигания горючих сланцев Туровского месторождения.

Особенность приготовления асфальтобетонной смеси – перед введением в данную смесь зола от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения предварительно обрабатывается кислым гудроном, образующимся на предприятиях нефтехимии. В нашем случае использовался кислый гудрон от производства сульфонатных присадок со следующими параметрами: плотность при 20 °С (г/см³) 1,2792; компонентный состав (мас. %): серная кислота 6,3; вода 1,4; органическая масса (ОМ) 92,3; групповой химический состав ОМ (мас. %): смолисто-масляные 28,5, смолисто-асфальтовые 4,1, сложные кислые эфиры 3,2, карбоновые кислоты 1,7, сульфокислоты 54,8. Количество кислого гудрона, используемого для обработки золы, зависит от содержания в ней реакционноспособных соединений типа К₂О, Na₂О, а также от содержания в кислом гудроне свободной серной кислоты и сульфокислот. В нашем случае золу обрабатывали 7,5 мас. % кислого гудрона.

Приготовление асфальтобетонной смеси: расчетное количество песка, щебня, золы, предварительно обработанной кислым гудроном, загружали в лопастную мешалку, нагревали до 120–160 °С при перемешивании до получения однородной массы. Затем подавали резиновую крошку, модифицированную маслом ПН-6ш, нефтяной битум марки БНД 60/90. Массу перемешивали при 120 – 160°С до равномерного и полного обволакивания поверхности минеральных частиц пленкой и готовая асфальтобетонная смесь выгружалась и исследовалась.

Составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетона приведены в табл. 5. Примеры 2–4 подтверждают оптимальные составы асфальтобетонных смесей, а примеры 1,5 – запредельные составы, показывающие, что в случае отклонения от оптимальных составов качество асфальтобетона ухудшается.

Как показывают результаты испытаний, асфальтобетонная смесь, содержащая модифицированную золу от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения, имеет лучшие показатели водонасыщения, водостойкости при длительном водонасыщении, трещиностойкости, предела прочности

Таблица 5. Составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетона с использованием золы горючих сланцев

Компонент	Пример					
	1	2	3	4	5	
	Состав асфальтобетонных смесей, мас. %					
Битум	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5	
Резиновая крошка, модифицированная маслом ПН-6ш	2,5	4,0	6	8,5	6,5	
Зола, от сжигания ГС Туровского месторождения, предварительно обработана кислым гудроном	3	4,5	6,0	8,5	10,5	
Щебень	60	60	55	55	55	
Песок	30,5	26,5	28,0	24,5	21,5	
Показатель	Пример					
	1	2	3	4	5	ГОСТ 31015–2002*
	Физико-механические характеристики асфальтобетона					
Пористость минеральной части, %	19,2	17,9	16,4	14,7	16,1	От 15 до 19
Остаточная пористость, %	4,3	3,9	3,2	2,9	2,8	От 1,5 до 4,5
Водонасыщение, % по объему	4,2	3,8	2,9	2,5	1,8	От 1,0 до 4,0
Предел прочности при сжатии, МПа						
при 20 °С	3,6	3,1	2,8	2,6	2,4	Не менее 2,2
при 50 °С	1,8	1,9	2,0	1,7	0,9	0,65
Трещиностойкость – предел прочности на растяжение при расколе при 0 °С, МПа	2,5	2,8	3,4	4,7	5,0	2,5–6,0
Водостойкость при длительном водонасыщении	0,87	0,89	0,90	0,93	0,91	Не менее 0,85

*Значение показателей для дорожно-климатических зон II, III.

при сжатии при 20 и 50 °С, чем асфальтобетонная смесь по ГОСТ 31015–2002. В то же время при сравнении образцов асфальтобетон, содержащий золу из бурых углей, имеет более высокие физико-механические свойства, чем асфальтобетон, содержащий золу из горючих сланцев.

Заключение. Золошлаковые материалы можно использовать, прежде всего, в дорожном строительстве в качестве заполнителя и минерального порошка в асфальтобетонах, самостоятельного вяжущего, активной добавки к неорганическим и органическим вяжущим веществам, а также при укреплении грунтов различного состава.

На основании расчетов модуля основности (гидросиликатный модуль), силикатного (кремнеземистый) модуля, коэффициента качества установлено, что зола, полученная при сжигании технологической пробы бурых углей Житковичского месторождения, является активной и может применяться в дорожном строительстве, а зола, полученная при сжигании технологической пробы горючих сланцев Туровского месторождения, относится к скрытоактивным золошлаковым материалам и поэтому требует интенсификации твердения. После активации она также может использоваться в дорожном строительстве и как самотвердеющий материал в вяжущих, изделиях на их основе.

В экспериментальных условиях отработана технология приготовления асфальтобетонных смесей, содержащих золу от сжигания бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений, испытаны составы асфальтобетонных смесей, включающие в себя битум, золу, термопластичный полимер, щебень и песок. На основании результатов проведенных исследований можно отметить, что появилась возможность использования золы, полученной при сжигании технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений Беларуси, в асфальтобетонных смесях.

Список использованной литературы

1. *Малинина, Л. А.* Экологические и технологические аспекты развития строительства и производства строительных материалов в мире. / Л. А. Малинина, Ю. С. Волков, Я. А. Рекитар. – М.: БИНТИ, 2001. – № 5. – С. 15–18.
2. Методические рекомендации по определению класса опасности отходов / Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Рос. Федерации. – М., 1996.
3. *Русаков, Н. В.* Эколого-гигиенические проблемы опасности отходов производства и потребления; 2-й междунар. конгресс по управлению отходами / Н. В. Русаков. – М., 2001. – С. 95–97.
4. *Галибина, Е. А.* Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающего их рациональное направление использования для производства строительных материалов / Е. А. Галибина // Исследования по строительству. Строительная теплофизика. Долговечность конструкций. – НИИ строительства Госстроя ЭССР – Таллин: Вулгас, 1981. – С. 121–129.
5. Методические рекомендации по использованию золы уноса Канско-Ачинских углей для осушения и укрепления грунтов земляного полотна и устройства оснований и морозозащитных слоев дорожных одежд. – М.: Союздорнии, 1986.
6. Методические рекомендации по укреплению грунтов и отходов промышленности вяжущими для устройства верхней части земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Союздорнии, 1979.
7. *Волженский, А. В.* Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1984.
8. *Гурячков, И. Л.* Исследования по уточнению требований к золам уноса, применяемым в качестве самостоятельного вяжущего при укреплении несвязных грунтов / И. Л. Гурячков // Тр. Союздорнии. – М., 1975. – Вып. 82. – С. 87–92.
9. *Гончарова, Л. В.* Дисперсность и химико-минералогический состав зол уноса и пути их активации / Л. В. Гончарова, В. И. Баранова, М. П. Панюкова // Тр. Союздорнии. – М., 1975. – Вып. 82. – С. 102–108.

Поступила в редакцию 05.02.2015

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

Петр Александрович Витязь (К 80-летию со дня рождения)

6 августа исполнилось 80 лет известному ученому в области порошковой металлургии, материаловедения и машиностроения, академику НАН Беларуси, Академии военных наук Российской Федерации и Международной Академии наук Евразии, Заслуженному деятелю науки Беларуси, доктору технических наук, профессору Петру Александровичу Витязю, почетному доктору наук и профессору Белорусского национального технического университета, Белорусского аграрного технического университета, почетному доктору Российской Академии наук.

П. А. Витязь родился в 1936 г. в д. Первомайская Березовского района Брестской области. В 1960 г. окончил Белорусский лесотехнический институт им. С. М. Кирова (в настоящее время Белорусский государственный технологический университет), в 1970 г. защитил кандидатскую, а в 1983 г. – докторскую диссертации. С 1961 г. работает в области порошковой металлургии, где достиг значительных успехов (с 1992 г. – директор НИИ порошковой металлургии). В 1997 г. П. А. Витязь становится вице-президентом НАН Беларуси, еще через пять лет – ее первым вице-президентом, через два года первым заместителем Председателя Президиума, а с 2012 г. по настоящее время – руководитель аппарата НАН Беларуси.



Круг научных интересов П. А. Витязя охватывает актуальнейшие направления современного машиностроения и материаловедения: пористые порошковые, композиционные и сверхтвердые материалы, наноматериалы, функциональную керамику, защитные покрытия, космическую технику, энергоэффективные технологии.

Петр Александрович – талантливый руководитель и организатор науки и производства. Находясь в руководстве Национальной академии наук, он уделяет много внимания сохранению и развитию академической науки, укреплению научных организаций Академии наук и их связей с регионами, промышленностью, расширению международного сотрудничества.

По инициативе Петра Александровича и при его непосредственном участии в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси созданы научные отделы: импульсных методов нагружения, физико-химических исследований, пористых материалов; активно развивались отделы машиностроительных материалов и нанесения защитных покрытий, использования энергии взрывчатых веществ для сварки и прессования порошковых материалов. При непосредственном участии ученого построен Молодечненский завод порошковой металлургии, на предприятиях республики созданы десятки производственных участков порошковой металлургии, газотермических покрытий и сверхтвердых материалов.

С конца 1990 г. при участии П. А. Витязя выполняются работы по утилизации обычных боеприпасов, в 2010 г. построен завод по производству эмульсионных взрывчатых веществ мощностью 10 тыс. т в год. Построен и введен в эксплуатацию Республиканский полигон для испытания автотракторной техники. Построен завод по защите крупногабаритных металлоконструкций методом горячего оцинкования мощностью до 30 тыс. т в год. Выполняются работы по научному сопровождению развития энергетики и энергосберегающих технологий.

В настоящее время П. А. Витязь руководит работами по созданию и развитию белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли. Отвечает за проведение государственной политики по координации и регулированию деятельности организаций в области исследования и использования космического пространства в мирных целях.

Большое место в научной деятельности П. А. Витязя занимают теоретические и практические вопросы создания пористых порошковых материалов на базе металлов, керамики и неорганических волокон; новых материалов с использованием механического легирования, плазмохимического синтеза и СВЧ; конструкционной и функциональной керамики с повышенной вязкостью разрушения; термодинамического моделирования плазменных потоков частиц металлов; технологии упрочнения и восстановления деталей методами газотермического нанесения покрытий; получения алмазных и сверхтвердых материалов, разработка наноматериалов и нанотехнологий.

Петр Александрович отвечает за реализацию и освоение научных результатов в производстве, за развитие и обновление материально-технической базы науки, курирует государственное программно-целевое финансирование, обеспечивающее развитие приоритетных научных и научно-технических направлений в республике, много внимания уделяет разработке и выполнению программ Союзного государства Беларуси и России и развитию зарубежных связей в рамках ЕАЭС, СНГ и дальнего зарубежья.

П. А. Витязь – член редакционной коллегии ряда журналов России, Украины и дальнего зарубежья, главный редактор журнала «Известия НАН Беларуси» (серия физико-технических наук) и республиканского сборника научных трудов «Порошковая металлургия». Он также член американского общества материалов (ASM), Председатель общества дружбы «Беларусь – Финляндия», председатель и сопредседатель международных конференций и семинаров, руководитель ряда международных проектов с организациями России, Украины, Германии, Франции, США, Индии, Китая.

Ученый П. А. Витязь является сопредседателем Межакадемического совета по проблемам развития Союзного государства, членом Совета по координации фундаментальных исследований НАН Беларуси, заместителем Председателя Межведомственного научно-технического совета Министерства промышленности Республики Беларусь, членом Координационного совета технических вузов Республики Беларусь и многих других специализированных ученых советов НАН Беларуси, университетов, министерств.

Школа академика П. А. Витязя известна в машиностроении, автомобиле-, станкостроении, инструментальной промышленности, материаловедении, медицине, электротехнике и других областях, где используются материалы и технологии порошковой металлургии, защитные покрытия, сверхтвердые наноматериалы и нанотехнологии.

Петр Александрович поддерживает активные контакты с учеными стран СНГ, США, Германии, Франции, Италии, Канады, Индии, Китая, Польши и др. Среди его учеников – 16 докторов и 22 кандидата технических наук. Им лично или при его руководстве разработано более 80 новых технологий и материалов, издано 40 монографий, около 1000 научных статей и материалов докладов, около 200 авторских свидетельств и патентов. Научные работы ученого имеют высокий потенциал и широко известны в международных научных кругах.

За вклад в развитие отечественной науки и новых производств Петр Александрович получил множество наград: Государственную премию БССР (1980 г.), Премию Совета Министров СССР (1987 г.), Премию НАН Беларуси и Сибирского отделения РАН им. академика В. А. Коптюга (2002 г.), Премию академий наук Украины, Беларуси и Молдовы (2007 г.), Премию РАН и НАН Беларуси (2012 г.), Премию НАН Беларуси (2013 г.), ордена «Отечество» II и III степени (РБ), «Дружба народов» (СССР), медали «За доблестный труд» (СССР), Франциска Скорины (РБ), «За сотрудничество» к 10-летию Союза Беларуси и России.

Особое уважение среди коллег и учеников П. А. Витязь заслужил необыкновенной работоспособностью, активной жизненной позицией, умением работать с людьми из самых разных сфер, профессиональным подходом к вопросам организации. Трудовой путь ученого говорит о таких чертах характера, как последовательность и настойчивость в достижении поставленных целей, чувство долга и высокая ответственность за порученное дело. Знания, стремление к новому, умение руководить коллективом, педагогическая практика позволяют ему реализовывать задуманное в перспективных и необходимых для республики направлениях.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию в двух экземплярах на белорусском, русском или английском языках; шрифт – **Times New Roman**, кегль – **14 (в том числе в формулах)**; **межстрочный интервал – 1,5**. За-номерованные формулы выключаются в отдельную строку. В тексте не допускаются рукописные вставки и вклейки. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК); инициалы и фамилии авторов; название статьи; полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны, адрес электронной почты каждого автора.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся *на английском языке*, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи не должен превышать 17 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки (до 7–8). Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисовочные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – *русском (белорусском) и английском*.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1–2003). Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Приводится список цитированных источников *в романском алфавите* (латиница) («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

Примеры подготовлены по материалам методических рекомендаций «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования» О. В. Кирилловой (http://elsevier-science.ru/files/kirilova_editorial.pdf).

• Статьи из журналов:

Zagurenko A. G., Korotovskikh V. A., Kolesnikov A. A., Timonov A. V., Kardymon D. V. Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizaina gidrorazryva plasta [*Techno-economic optimization of the design of hydraulic fracturing*]. Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry, 2008, no.11, pp. 54–57.

• Описание статьи из электронного источника:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B. P. *Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange*. Journal of Computer-Mediated Communication, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

• Описание статьи с DOI:

Zhang Z., Zhu D. *Experimental research on the localized electrochemical micromachining*. Russian Journal of Electrochemistry, 2008, vol. 44, no. 8, pp. 926–930. doi: 10.1134/S1023193508080077.

• Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M. V., Tagantsev T. V. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti soedinenii «stal'-kompozit» [Experimental study of the strength of joints «steel-composite»]. Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem» [Proc. of the Bauman MSTU «Mathematical Modeling of Complex Technical Systems»], 2006, no. 593, pp. 125–130.

• **Описание материалов конференций:**

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi» [Proc. 6th Int. Symp. «New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact»]. Moscow, 2007, pp. 267–272.

• **Описание книги (монографии, сборники):**

Izvekov V. I., Serikhin N. A., Abramov A. I. Proektirovanie turbogeneratorov [Design of turbo-generators]. Moscow, MEI Publ., 2005, 440 p.

• **Описание Интернет-ресурса:**

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 5 February 2011).

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov (Rules for the Citing of Sources) Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed 7 February 2011)

• **Описание диссертации или автореферата диссертации:**

Semenov V. I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

• **Описание ГОСТа:**

GOST 8.586.5–2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

• **Описание патента:**

Palkin M. V., e. a. Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

8. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Acknowledgements»).

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), ученую степень, звание, должность, место работы с указанием адреса, контактную информацию (e-mail, телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке или присылается по электронной почте в редакцию журнала – ftvesti@mail.ru. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType. Собственным редактором формул версий Microsoft Office 2007 и выше пользоваться нельзя, так как в редакционно-издательском процессе он не поддерживается. Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C^2 , C_4) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать курсивом, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, Cl) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word), а также даются в виде отдельных файлов в формате tif (600 точек на дюйм). Желательно также предоставлять их в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel, Origin Pro и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). На обороте рисунков (если они даются отдельно) указываются фамилии авторов, название статьи. Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

Материалы для публикации направлять по адресу: ул. Академическая, 1, к. 119, редакция журнала «Весті НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук», 220072, г. Минск, Республика Беларусь: тел. для справок: + 375(017)284-19-19 (четверг, пятница) либо по электронной почте: ftvesti@mail.ru, либо через онлайн-форму на сайте.