

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК 2016 № 2

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК 2016 № 2

ЗАСНАВАЛЬНІК – НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

Часопіс выдаецца са студзеня 1956 г.

Выходзіць чатыры разы ў год

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Кабишов С. М., Трусова И. А., Ратников П. Э.** Формирование наружного слоя мелких разориентированных дендритов при непрерывной разливке заготовок 5
- Василец В. К., Хмыль А. А., Кушнер Л. К., Кузьмар И. И.** Влияние режимов нестационарного электролиза на кинетические закономерности осаждения сплава олово–висмут 11
- Козловский А. Л., Шлимас Д. И., Здоровец М. В., Кадыржанов К. К., Каниюков Е. Ю., Шумская Е. Е.** Влияние ионизационного излучения на структуру Си-нанотрубок 17
- Поболь А. И., Горанский Г. Г., Журавков С. П., Лобанова Г. Л., Сапрыкин Ф. Е., Петюкевич М. С.** Изучение свойств тонкодисперсных частиц, полученных при диспергировании твердого сплава ВК6 электроимпульсным методом 22
- Лецко А. И., Талако Т. Л., Парницкий Н. М.** Влияние структурного состояния хрома на стойкость к окислению композиционного порошка на основе $\beta 2\text{-FeAl}$, упрочненного включениями Al_2O_3 27

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Дечко М. М., Сенчуров Е. В.** Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки и оптимизация ее технологических режимов 33
- Томило В. А., Кочик Е. В., Тарасюк И. А., Кравчук А. С.** Сравнение методик вычисления конечных перемещений при статическом изгибе плоских пружин и рессор 40
- Шу Сюэдао, Лю Чуань, Ванг Ин** Исследование технологии параллельной поперечно-клиновой прокатки полуси автомобиля 49

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Кот В. А. Метод граничных характеристик в задачах теплопроводности на основе интеграла теплового баланса	54
Малько М. В., Василевич С. В., Богач В. Н., Дегтеров Д. В. Экспериментальное исследование кинетики карбонизации оксида кальция в изотермических условиях	66
Ахрамович А. П., Войтов И. В., Колос В. П. О работоспособности реактора с микровзлами. Условия автономности теплосъема в активной зоне на частичных нагрузках	74
Харма У. М. Моделирование неизоотермического влагопереноса в поглотителях электромагнитного излучения	81

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Левчук В. А., Ковалев В. А., Баркалин В. В., Лозовский В. Э. Компьютеризированная диагностика меланомы на базе поиска похожих дерматоскопических изображений в базе данных	86
Красновская С. В., Напрасников В. В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов	92

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Обухов В. Е., Шпак Е. П., Жвавый С. П., Азарко В. А. Моделирование процесса формирования топологических структур в слоях вакуумного резиста	99
Нагула П. К., Козел М. Н., Рыбчак С. В., Юрганов К. В. Средства учета объемного и массового расхода, эксплуатируемые в Республике Беларусь. Опыт поверки и калибровки на установке «Эталон»	108
Саванович С. Э., Борботько Т. В. Влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, введенного в поры керамзита, на его радиопоглощающие свойства	115
Храменков А. С., Ярмолик С. Н., Свинарский М. В. Синтез устройства радиолокационного распознавания объектов с возможностью остановки последовательной процедуры	120
Правила для авторов	127

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ 2016 № 2

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 27.05.2016. Падпісана да друку 27.06.2016. Выхад у свет 30.06.2016. Фармат 60 × 84¹/₈. Папера афсетная.

Друк лічбавы. Ум. друк. арк. 14,88. Ул.-выд. арк. 16,4. Тыраж 94 экз. Заказ 133.

Кошт нумару: індывідуальная падпіска – 102 900 руб.; ведамасная падпіска – 252 168 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.

© Выдавецкі дом «Беларуская навука»
Весці НАН Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук, 2016

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICO-TECHNICAL SERIES 2016 N 2

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

- Kabishov S. M., Trusova I. A., Ratnikov P. Je.** Formation of the outer layer of small undirected dendrites at continuous casting of steel 5
- Vasilets V. K., Khmyl A. A., Kushner L. K., Kuzmar I. I.** Effect of non-stationary electrolysis modes on kinetics of the forming process of tin–bismuth alloy 11
- Kozlovskiy A. L., Shlimas D. I., Zdorovets M. V., Kadyrzhyanov K. K., Kaniukov E. Y., Shumskaya E. E.** Influence of ionizing radiation on Cu-nanotubes structure 17
- Pobol A. I., Goransky G. G., Zhuravkov S. P., Lobanova G. L., Saprykin F. E., Petyukevich M. S.** Properties of WC–6Co hard alloy powders obtained by the method of spark plasma dispersion 22
- Letsko A. I., Talako T. L., Parnitsky N. M.** Effect of structural condition of chromium on oxidation resistance of composite powder based on $\beta 2$ -FeAl, reinforced with Al_2O_3 inclusions 27

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

- Akulovich L. M., Sergeev L. E., Dechko M. M., Senchurov E. V.** Modelling of magnetic abrasive finishing process and optimization of its technological modes 33
- Tamila V. A., Kochyk Y. V., Tarasyuk I. A., Kravchuk A. C.** Comparison of methods of finite displacements calculation under static bending of flat and leaf springs 40
- Shu Xuedao, Liu Chuan, Wang Ying.** Study on technology of multi-wedge cross-wedge rolling of automobile semi-axis shafts 49

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Kot V. A.** A method of boundary characteristics based on the heat-balance integral in heat-conduction problems 54
- Malko M. V., Vasilevich S. V., Bahach U. M., Degterov D. V.** Experimental study of calcium oxide carbonization kinetics under isothermal conditions 66
- Akhramovich A. P., Voitov I. V., Kolos V. P.** On the performance of a reactor with microfuel. Terms of self-similarity of heat removal in the reactor core at partial loads 74
- Khrma O. M.** Modelling of non-isothermal moisture transfer in absorbers of electromagnetic radiation 81

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Liauchuk V. A., Kovalev V. A., Barkaline V. V., Lazouski U. E.** Content-base image retrieval as a method for computer-assisted diagnosis of melanoma based on dermoscopic images 86
- Krasnovskaya S. V., Naprasnikov V. V.** Overview of optimization algorithms at finite elements modeling of condensing units design 92

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

Obukhov V. E., Shpak E. P., Zhvavyi S. P., Azarko V. A. Simulation of formation of topological structures in vacuum resist layers	99
Nahula P. K., Kozel M. N., Rybchak S. V., Yurganov K. V. Accounting means of volume- and mass flow, operating in the Republic of Belarus. Experience verification and calibration at "Etalon"	108
Savanovich S. E., Borbotko T. V. Effect of viscosity of aqueous sodium chloride solution, introduced into pores of expanded clay, on its radioabsorbing properties	115
Khramiankou A. S., Yarmolik S. N., Svinarski M. V. Synthesis of a radar recognition device with possibility to stop the sequential procedure	120
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 669.017+536.4

*С. М. КАБИШОВ, И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ***ФОРМИРОВАНИЕ НАРУЖНОГО СЛОЯ МЕЛКИХ РАЗОРИЕНТИРОВАННЫХ ДЕНДРИТОВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ ЗАГОТОВОК***Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: boxsmk@gmail.com*

Представлена расчетная методика, которая позволяет оценить влияние внешнего охлаждения и интенсивности циркуляции расплава в жидком ядре заготовки на формирование наружной корочки мелких разориентированных кристаллов. С использованием методики можно установить момент времени, когда плоский фронт теряет устойчивость и начинается рост столбчатых дендритов. Решение обратной задачи дает возможность определить толщину шлакового гарнисажа в верхней части кристаллизатора.

Ключевые слова: фронт кристаллизации, расплав, двухфазная зона, кластер, дендрит, структура, интенсивность теплообмена.

*S. M. KABISHOV, I. A. TRUSOVA, P. Je. RATNIKOV***FORMATION OF THE OUTER LAYER OF SMALL UNDIRECTED DENDRITES AT CONTINUOUS CASTING OF STEEL***Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: boxsmk@gmail.com*

A calculation method that allows assessing the impact of external cooling and circulation intensity of melt in the liquid core of the workpiece formation of outer crust of fine disoriented crystals is presented. One can also obtain the time when the plane front will lose stability and growth of columnar dendrites begins. When solving the inverse problem it is possible to set the parameters of an existing layer of slag-forming mixture on top of the mold.

Keywords: crystallization front, melt two-phase zone, cluster, dendrite structure, intensity of cooling.

В настоящее время не существует общепринятой теории, где были бы сформулированы причины возникновения того или иного типа структуры в затвердевающей слитке. В качестве причин перехода от гладкого фронта к ячеистому и далее к росту столбчатых дендритов рассматриваются факторы, такие как наличие в расплаве большого количества нерастворимых включений, являющихся центрами кристаллизации, неравномерность теплообмена на поверхности слитка, химическая неоднородность расплава и пр. [1–10 и др.]. Достоинством многих работ, представленных в технической литературе, является сопоставление расчетных результатов с экспериментальными данными. Однако возможность применения указанных методик на практике, как правило, ограничена, так как они не всегда позволяют достоверно описать процесс формирования кристаллической структуры слитка. Не претендуя на обобщение и критику различных гипотез, в данной работе приведен анализ начального этапа формирования кристаллической структуры непрерывно-литой заготовки, в частности, возникновение и рост наружного слоя мелких разориентированных кристаллов и условия его перехода к ячеистому фронту.

Практически во всех теоретических работах по рассматриваемой тематике отмечается, что наружный слой мелких разориентированных дендритов формируется в условиях интенсивного

охлаждения расплава. Применительно к технологии непрерывной разливки стали такие условия наблюдаются в момент первоначального контакта расплава с водоохлаждаемыми стенками в верхней части кристаллизатора. Вместе с тем результаты металлографических исследований показывают, что толщина этого слоя даже у сталей одинакового химического состава, разлитых на одной и той же машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) (данные центральной заводской лаборатории ОАО «Белорусский металлургический завод»), не имеет постоянного значения (таблица, п. 4, п. 6). Видимо, в данном случае различались технологические параметры разливки (температура перегрева расплава, скорость разливки, состав и толщина шлакообразующего слоя (ШОС) и др.). Прослеживалась тенденция увеличения толщины мелкозернистой корочки у сталей с более высоким содержанием углерода и легирующих компонентов. Несмотря на ограниченность объема данных, можно предположить, что основную роль в формировании слоя мелких разориентированных дендритов играют условия охлаждения в кристаллизаторе МНЛЗ и химический состав разливаемой стали.

Данные, представленные в таблице, позволяют выдвинуть еще одну гипотезу: по мере увеличения массивности заготовки (размеров сечения) толщина наружной мелкозернистой корочки уменьшается. Вероятнее всего, это объясняется снижением скорости разливки и, как следствие, изменением условий кристаллизации металла в верхней зоне кристаллизатора.

Размеры кристаллизационных зон при разливке заготовок сечением 250×300 и 300×400 мм в условиях МНЛЗ-3 ОАО «Белорусский металлургический завод» [11]

№ п.п.	Марка стали	Профиль, мм	Наружная мелкозернистая корочка, мм			Ширина зоны столбчатых кристаллов (до большой грани × до малой грани), мм		
			min	max	middle	min	max	middle
1	60С2ХФА	250×300	4	5	4	60×66	65×67	62×67
2	70Б	250×300	4	6	5	60×63	64×69	62×67
3	460	300×400	0	1	0,5	86×89	95×102	92×92
4	S355J2G3	300×400	3	2	2	70×93	74×94	72×93
5	20	300×400	0	1	0,5	82×88	96×94	91×91
6	S355J2G3	300×400	0	1	0,5	90×97	103×121	99×101
7	10	300×400	0	1	0,5	86×89	92×92	89×90

Чтобы оценить влияние различных факторов на процесс формирования наружной корочки непрерывно-литой заготовки, в данной работе предлагается анализ балансового уравнения растущего на фронте кристаллизации дендрита (кристаллита) при условии его сохранения без подплавления и разрушения. Рассматривается один акт кристаллизации продолжительностью τ_{cr} , в течение которого объем твердой фазы возрастает на величину V :

$$\rho_s L \frac{1}{\tau_{cr}} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{cr}} V d\tau + \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{cr} + \tau_c} q_l F_{l-s} d\tau = \rho_s c_s \Delta \bar{T}_d \frac{1}{\tau_{cr}} \left[V_0 + \frac{1}{\tau_{cr}} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{cr}} V d\tau \right] + \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{cr} + \tau_c} q_s F_s d\tau, \quad (1)$$

где ρ_s , c_s – плотность и теплоемкость твердой фазы; V_0 – начальный объем твердой фазы; L – скрытая теплота кристаллизации; q_s – плотность теплового потока, отводимого от охлаждаемой поверхности заготовки; q_l – плотность теплового потока, отводимого от жидкой фазы к поверхности дендрита и фронта кристаллизации в пределах выделенного объема; $\Delta \bar{T}_d$ – изменение средней температуры твердой фазы (корочки) за время кристаллизации и последующего охлаждения $\tau_{cr} + \tau_c$.

Рассмотрим процесс кристаллизации, когда образуется слой мелких разориентированных кристаллов. При этом фронт кристаллизации можно считать плоским. Если формируется слой толщиной δ , то $\Delta F_{l-s} = 0$, $F_{l-s} = F_s$, $\Delta V = \delta F_s$ (рис. 1).

Будем считать, что толщина слоя δ , который формируется в течение одиночного акта кристаллизации за время τ_{cr} , имеет порядок, близкий к размерам кластера, т. е. 1 нм [12]. Выполним оценку условий теплообмена на границах выделенного участка, которые обеспечат формирование такого слоя. Температуру переохлаждения ограничим значением $\Delta T = 10$ °С [1], т. е. максимальной величиной, которая установлена в процессе экспериментов при кристаллизации многоком-

понентных сплавов в условиях, близких к условиям промышленных технологий. Дополнительным ограничением будет неподплавление формирующегося плоского слоя, т. е. вся теплота, подводимая за время τ_{cr} со стороны перегретой жидкой фазы и выделившаяся в процессе кристаллизации, отводится в твердую корочку и частично поглощается самим формирующимся слоем при разогреве. Это вполне соответствует реальным условиям кристаллизации стали в верхней части кристаллизатора. Максимальная величина разогрева образующегося слоя твердой фазы при данном условии не будет превышать значение температуры переохлаждения, т. е. ΔT . В противном случае температура слоя (или его поверхности) превысит температуру ликвидуса T_{liq} и он расплавится. Будем считать, что средняя температура разогрева образовавшегося слоя твердой фазы будет равна $0,5\Delta T$. Выразим из балансового уравнения δ для начального момента формирования корочки ($V_0 = 0$), когда с охлаждаемой поверхностью (прослойкой шлакообразующей смеси) контактирует металлическая жидкость:

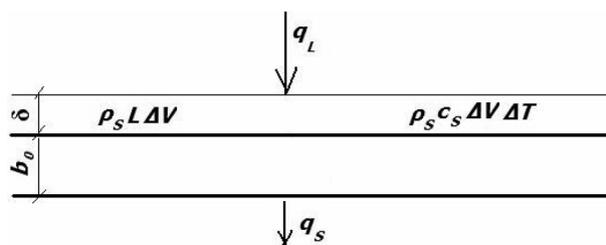


Рис. 1. Схема роста плоского слоя мелких разориентированных дендритов

$$\delta = \frac{\lambda_l \int_0^{\tau_{cr} + \tau_c} \text{grad} T_l d\tau - \lambda_s \int_0^{\tau_{cr} + \tau_c} \text{grad} T_s d\tau}{\rho_s (L - 0,5c_s \Delta T)}. \quad (2)$$

Принимая во внимание реальные значения теплоты кристаллизации и теплоемкости стали вблизи температуры фазового перехода, знаменатель всегда будет положительным и при реальных значениях температуры переохлаждения приблизительно равным $2 \cdot 10^9$. Тогда формирование плоского слоя толщиной 1 нм возможно при условии, что разность теплового потока со стороны жидкого ядра и потока, отводимого в твердую корочку, будет приблизительно составлять 2 Дж за время $\tau_{cr} \approx 10^{-6}$ с (ориентировочная продолжительность существования кластера в металлической жидкости вблизи температуры фазового перехода [1]). Фактически количество теплоты, подведенное к фронту кристаллизации со стороны жидкого ядра и выделившееся в процессе затвердевания плоского слоя, почти равно количеству теплоты, отведенному через твердую фазу и поглощенному слоем при разогреве. Однако необходимым условием формирования слоя мелких разориентированных дендритов является превышение интенсивности охлаждения над суммарным количеством теплоты, которая выделяется в процессе их кристаллизации и подводится к фронту со стороны жидкой фазы за промежуток времени $\tau_{cr} + \tau_c$.

Очевидно, что изменение интенсивности циркуляции расплава вблизи фронта кристаллизации либо снижение интенсивности охлаждения приведет к нарушению равновесия и торможению роста корочки из мелких разориентированных кристаллов. В кристаллизаторе МНЛЗ могут быть созданы такие условия, когда данный слой вообще не образуется. Увеличение толщины слоя на большую величину за время $\tau_{cr} + \tau_c$ возможно лишь в том случае, когда температура на его поверхности, контактирующей с жидкостью, при выделении скрытой теплоты кристаллизации не будет повышаться, так как при достижении температуры ликвидуса T_{liq} присоединение еще одного кластера (группы кластеров) будет невозможно.

Принимая во внимание, что процесс кристаллизации протекает не монотонно, а циклически [9], когда этапы формирования твердой фазы чередуются с периодами, в течение которых жидкость у фронта кристаллизации переохлаждается до температуры $T_{liq} - \Delta T$, разобьем процесс формирования корочки из мелких разориентированных кристаллов на N шагов ($i \in N$). Будем считать, что продолжительность каждого i -го шага одинакова и равна $\tau_{cr} + \tau_c$.

На $(i+1)$ -м шаге после появления твердой корочки выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$\delta_{i+1} = \frac{\lambda_l \int_{\tau_i}^{\tau_i + \tau_{cr} + \tau_c} \text{grad} T_l d\tau - \lambda_s \int_{\tau_i}^{\tau_i + \tau_{cr} + \tau_c} \text{grad} T_s d\tau + \rho_s \Delta i_s \sum_0^i \delta_i}{\rho_s (L - 0,5c_s \Delta T)}. \quad (3)$$

Перейдем к более детальному рассмотрению условий возникновения и роста слоя мелких разориентированных дендритов при кристаллизации в условиях МНЛЗ. Для этого необходимо проанализировать процесс отвода теплоты от поверхности затвердевающего слитка в кристаллизаторе.

Согласно рекомендациям [13], плотность теплового потока от слитка к стенке кристаллизатора равна

$$q = \frac{T_{\text{пов}} - T_{\text{ст}}}{R_0 + R_1 + R_2 + R_3}, \quad (4)$$

где R_0, R_1, R_2, R_3 – соответственно термическое сопротивление области контакта жидкой прослойки ШОС с поверхностью заготовки; термические сопротивления собственно жидкой и твердой прослоек ШОС; термическое сопротивление области контакта твердого слоя ШОС с кристаллизатором ($R_3 = 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$).

Термическое сопротивление области контакта жидкой прослойки ШОС с поверхностью заготовки $R_0 = 0$. Коэффициенты теплопроводности жидкой и твердой прослоек шлакового гарнисажа соответственно равны $\lambda_1 = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [13]. Общая толщина слоя ШОС при разливе блюмов со скоростью 0,4–1,1 м/мин составляет по разным оценкам [13, 14] от 0,08 до 0,4 мм. Поскольку формирование твердой корочки начинается в верхней части кристаллизатора, гарнисаж будет иметь максимальную толщину. Примем толщину шлакообразующего слоя $\delta_{\text{шос}} = 0,4 \text{ мм}$. Доля жидкой прослойки не превышает 20–25% (в рассматриваемом случае примем 0,1 мм) [13]. Температура поверхности заготовки в начале формирования корочки близка к температуре ликвидуса (раслав в момент контакта находится в жидком состоянии). Например, для стали ШХ15СГ данная температура составляет около 1450 °С, температура стенки кристаллизатора – 200 °С [9]. При таких параметрах плотность теплового потока, отводимого от поверхности заготовки в верхней части кристаллизатора, будет равна

$$q = \frac{1450 - 200}{\frac{0,0001}{1,5} + \frac{0,0003}{2,0} + 10^{-4}} \approx 4 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

При снижении температуры поверхности затвердевающей корочки до уровня температуры солидуса расплава (для стали ШХ15СГ $T_{\text{sol}} \approx 1320 \text{ °С}$) значение плотности теплового потока уменьшается. Однако по мере передвижения заготовки к нижней части кристаллизатора толщина прослойки ШОС также уменьшается. При этом в конце участка плотного контакта заготовки со стенками кристаллизатора она снижается в 2–3 раза из-за ферростатического давления расплава и конусности стенок. Если принять, что данный процесс происходит по линейной зависи-

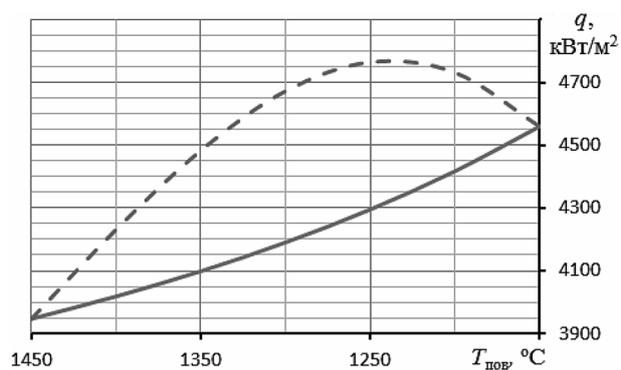


Рис. 2. Расчетная зависимость плотности теплового потока к стенке кристаллизатора от температуры поверхности заготовки: сплошная линия – толщина ШОС уменьшается по линейной зависимости при перемещении вниз вдоль вертикальной оси кристаллизатора; штриховая линия – то же, но по квадратичной параболе

мости, и учесть, что на участке кристаллизатора, где отсутствует газовый зазор, температура поверхности слитка, как показывают численные расчеты [8], снижается до 1150–1100 °С, то величина плотности теплового потока будет монотонно возрастать (рис. 2, сплошная линия). Если же предположить, что толщина шлакового гарнисажа на выбранном участке уменьшается по квадратичной параболе, то данная зависимость будет иметь явный экстремум в точке, где температура поверхности заготовки уменьшится до 1250 °С.

Учитывая результаты экспериментальных измерений интенсивности теплообмена по высоте кристаллизатора МНЛЗ [9], следует отметить, что задание квадратичной зависимости толщины ШОС в зоне плотного контакта

ближе к реальным условиям. Данная зависимость не позволяет точно определить изменение плотности теплового потока по мере снижения температуры поверхности заготовки. Однако полученные результаты показывают, что интенсивность теплообмена по высоте кристаллизатора в зоне плотного контакта будет в течение какого-то периода времени возрастать, что обусловлено, прежде всего, уменьшением толщины шлаковой прослойки. Следует отметить, что в реальных условиях разливки изменение толщины слоя ШОС имеет более сложный характер и зависит не от температуры поверхности, а от силы ферростатического давления жидкого металла, свойств ШОС, прочности формирующейся корочки слитка, режима качания кристаллизатора и других факторов. Поэтому реальные величины коэффициентов теплоотдачи могут отличаться от значений, полученных расчетным путем.

Разность среднеинтегральных плотностей тепловых потоков в формуле (2) можно оценить при учете продолжительности одиночного акта кристаллизации $\Delta\tau_{cr}$. При $\tau_{cr} \sim 10^{-6}$ с для формирования слоя толщиной 1 нм (порядок размера кластера) необходимо, чтобы данная разность составляла около $2 \cdot 10^6$ Вт/м².

Предположим, что распределение температур в твердой корочке по характеру близко к параболе [9]. Согласно экспериментальным исследованиям и результатам численных расчетов, диапазон температур на поверхности заготовки в верхней части кристаллизатора составляет около 1250–1350 °С (в расчетах примем $T_{пов} = 1300$ °С), соответственно температура на фронте кристаллизации равна T_{sol} . Температура перегрева расплава над линией ликвидуса перед разливкой составляет около 30–50 °С, температура на границе жидкой и двухфазной зоны равна $T_{liq} - \Delta T$. Для стали ШХ15СГ $T_{sol} = 1320$ °С, $T_{liq} = 1450$ °С, тогда распределение температур в твердой корочке можно представить в виде зависимости

$$T_s = T_{sol} - Ax^n.$$

Будем считать, что в рассматриваемый момент времени толщина сформированной корочки $b = 1$ мм. С учетом значений температур, приведенных выше, определим величину постоянной A . При $x = b$ получим $T_s = T_{пов} = 1300 = 1320 - A \cdot 0,001^n$, отсюда $A = 2 \cdot 10^{3n+1}$.

Градиент температуры в твердой фазе будет равен $\text{grad}T_s = -nAx^{n-1} = -2n \cdot 10^{3n+1} x^{n-1}$. При начальной толщине твердой корочки 1 мм $\text{grad}T_s = -2n \cdot 10^{3n+1} x^{n-1} = -2n \cdot 10^4$ К/м. При температуре, близкой к температуре кристаллизации, коэффициент теплопроводности стали равен около 23–25 Вт/(м·К). Среднеинтегральная плотность теплового потока $\bar{q}_s = -\lambda_s \text{grad}T_s \approx 5n \cdot 10^5$ Вт/м². Согласно результатам расчетов, выполненных выше, $\bar{q}_s \approx 4 \cdot 10^6$ Вт/м². Следовательно, в начальный период разливки стали на МНЛЗ распределение температур в твердой корочке близко к параболе со степенью 8.

Будем считать, что к моменту возникновения слоя толщиной 1 мм и далее за время $\tau_{cr} + \tau_c$ плотность теплового потока q_s существенно не изменится (рис. 2) и также практически постоянным будет значение $\bar{q}_l = -\lambda_l \text{grad}T_l$. Тогда $q_l = \bar{q}_s - 2 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^6$ Вт/м².

Рост плоского слоя прекратится, когда величина числителя в выражении (3) станет равной нулю:

$$(\tau_{cr} + \tau_c)(\bar{q}_l - \bar{q}_s) = \rho_s \Delta i_s \sum_0^i \delta_i. \quad (5)$$

Очевидно, что при численном решении уравнения теплопроводности достаточно легко определить момент, когда гладкий фронт потеряет устойчивость и перейдет в ячеистый фронт и дальше – к росту столбчатых дендритов.

Необходимо отметить, что даже ориентировочная оценка значения температурного градиента в жидкой фазе в начальный период кристаллизации возможна только численным путем. Задание параболического распределения температур по аналогии с твердой корочкой в данном случае приведет к ошибочным результатам по некоторым причинам. Прежде всего, эффективный коэффициент теплопроводности жидкой фазы существенно зависит от интенсивности циркуляции расплава вблизи границы двухфазной зоны. Согласно [15], в турбулентном пограничном слое коэффициент температуропроводности пропорционален градиенту скорости. Посколь-

ку в кристаллизаторе характер течения расплава может быть турбулентным, то градиент скорости вблизи двухфазной зоны будет достигать больших значений и эффективный коэффициент теплопроводности расплава будет существенно превышать табличные величины.

Оценим влияние интенсивности циркуляции расплава в жидком ядре заготовки на толщину пограничного слоя. В [15] показано, что его толщина обратно пропорциональна корню квадратному из критерия Рейнольдса, т. е.

$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{Re}} = \sqrt{\frac{\nu}{uD}}.$$

Кинематическая вязкость расплавленной стали вблизи температуры кристаллизации составляет $8,7 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Скорость циркуляции расплава вблизи фронта кристаллизации по разным оценкам равна 0,05–0,1 м/с [8]. Порядок толщины пограничного слоя будет составлять тогда около 10^{-2} м. Повышение скорости циркуляции в 10 раз позволит уменьшить толщину пограничного слоя в три раза.

Согласно уравнению (3), увеличение плотности теплового потока со стороны жидкой фазы будет подавлять рост слоя мелких разориентированных кристаллов. Однако данный слой формируется в непосредственной близости к зеркалу расплава, возмущение которого (например, при помощи электромагнитного перемешивания) может привести к затягиванию в расплав шлаковых частиц, что недопустимо. По этой причине катушку электромагнитного перемешивания устанавливают на некотором расстоянии от верха кристаллизатора либо используют две катушки, и та, которая располагается выше, подавляет возмущения на зеркале расплава. Такой вариант при снижении интенсивности циркуляции расплава в верхней части кристаллизатора позволит увеличить толщину слоя мелких разориентированных дендритов. Следовательно, наиболее важным условием для его возникновения будет поддержание на требуемом уровне разности между интенсивностью внешнего охлаждения и плотностью теплового потока к затвердевающей корочке со стороны жидкой фазы.

При численном решении задач теплопроводности и движения расплава в жидком ядре заготовки с учетом методики, представленной выше, можно установить, обеспечивают ли существующие условия возникновение и рост слоя мелких разориентированных кристаллов на поверхности заготовки, а также определить момент времени, когда плоский фронт потеряет устойчивость и начнется рост столбчатых дендритов. При необходимости также можно решить обратную задачу и оценить параметры прослойки ШОС в верхней части кристаллизатора.

Список использованной литературы

1. Баландин, Г. Ф. Основы теории формирования отливки / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
2. Ефимов, В. А. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов. – М.: Metallurgy, 1976. – 552 с.
3. Журавлев, В. А. Теплофизика формирования непрерывного слитка / В. А. Журавлев, Е. М. Китаев – М.: Metallurgy, 1974. – 216 с.
4. Самойлович, Ю. А. Формирование слитка / Ю. А. Самойлович. – М.: Metallurgy, 1977. – 160 с.
5. Чалмерс, Б. Теория затвердевания / Б. Чалмерс. – М.: Metallurgy, 1968. – 288 с.
6. Хворинов, Н. И. Кристаллизация и неоднородность стали / Н. И. Хворинов. – М.: Машгиз, 1958. – 392 с.
7. Флемингс М. Процессы затвердевания; пер. с англ. / М. Флемингс. – М.: Мир, 1977. – 424 с.
8. Стальной слиток. Т. 1. Управление кристаллической структурой / Ю. А. Самойлович [и др.]. – Мн.: Беларуская навука, 2000. – 583 с.
9. Стальной слиток. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю. А. Самойлович [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2000. – 637 с.
10. Вайнгард, У. Введение в физику кристаллизации металлов; пер. с англ. / У. Вайнгард. – М.: Мир, 1967. – 170 с.
11. Расчет зон столбчатых и глобулярных кристаллов при непрерывной разливке мелкосортных заготовок / О. В. Дубина [и др.] // Metallurgical and Mining Industry. – 2003. – № 4. – С. 106–109.
12. Репях, С. И. Размеры кластеров при температуре плавления металлов / С. И. Репях // Сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. «Metallurgy-2014» – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины. – 2014. – С. 184–186.
13. Исследование зоны контакта слитка и стенки кристаллизатора МНЛЗ / В. М. Паршин [и др.] // Сталь. – 1987. – № 9. – С. 26–28.
14. Зайцев, А. И. Физико-химические основы нового метода управления отводом тепла от слитка к кристаллизатору / А. И. Зайцев, А. В. Лейтес, А. Л. Либерман // Сталь. – 2003. – № 3. – С. 70–74.
15. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М.: Наука. 1986. – 736 с.

Поступила в редакцию 11.06.2015

УДК 621.357.7

В. К. ВАСИЛЕЦ, А. А. ХМЫЛЬ, Л. К. КУШНЕР, И. И. КУЗЬМАР

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА НА КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО–ВИСМУТ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,
e-mail: kushner@bsuir.by*

Приведены результаты исследования кинетики процесса электроосаждения сплава олово–висмут при различных условиях электролиза (импульсный ток, воздействие ультразвуковых колебаний, перемешивание электролита). Показано влияние частоты и скважности импульсного тока, интенсивности ультразвуковых колебаний, перемешивания на ход катодных поляризационных кривых.

Ключевые слова: нестационарный электролиз, ультразвуковые колебания, покрытие сплавом олово–висмут, бессвинцовые технологии.

V. K. VASILETS, A. A. KHMYL, L. K. KUSHNER, I. I. KUZMAR

EFFECT OF NON-STATIONARY ELECTROLYSIS MODES ON KINETICS OF THE FORMING PROCESS OF tin–BISMUTH ALLOY

*Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
e-mail: kushner@bsuir.by*

The results of kinetics research of Sn–Bi coatings deposition under different plating conditions (plating pulse and ultrasonic, stirring with a magnetic agitator), were demonstrated. It has been shown influence of frequency, pulse period-to-pulse duration ratio, ultrasonic strength, stirring on limiting diffusion current, range of cathodic potential.

Keywords: non-stationary electrolysis, ultrasonic, tin–bismuth alloy, lead-free technology.

Введение. В настоящее время одной из актуальных проблем радиоэлектроники остается разработка материалов под пайку, не содержащих свинец. Оловянно-свинцовые припои и покрытия являются особо вредными и экологически опасными для человека, их утилизация требует больших финансовых затрат. В соответствии с международной директивой RoHS с 2006 г. в Евросоюзе запрещено в законодательном порядке применение ряда опасных материалов, в том числе свинца в изделиях, используемых в производстве радиоэлектронной аппаратуры [1]. Переход на бессвинцовые технологии – достаточно сложная научная и техническая задача. Изменение в связи с этим температурной нагрузки при сборке требует смены не только припоев, но и флюсов, базовых материалов, обновления технологического оборудования. Необходимо проведение испытаний бессвинцовых паяных соединений на прочность, коррозионную стойкость, совместимость с другими материалами. В настоящий момент в данной области не предложено полноценной замены оловянно-свинцовым припоям и покрытиям под пайку. Что касается чистого олова, то многие полупроводниковые компании не приняли его в качестве электрохимического покрытия под пайку из-за склонности к образованию «усов». Данную проблему можно частично решить созданием гальванического сплава на основе олова. Согласно литературным данным, одним из наиболее перспективных легирующих компонентов при электроосаждении покрытий под пайку на основе олова является висмут при его содержании в сплаве до 2% [2–4]. В этой сфере большое внимание уделяется проблемам сохранения способности к пайке таких покрытий при длительном хранении, их коррозионной стойкости и стабильности электрофизических свойств.

Как показал анализ отечественных и зарубежных литературных источников, одним из методов получения высококачественных гальванических покрытий является способ, основанный на изменении электрического режима питания ванны во время электролиза (нестационарный элек-

тролиз) [5–7]. Появляется возможность в широких пределах регулировать качество получаемых систем металлизации, изменяя ток по определенным программам. В этом случае по сравнению с электролизом на постоянном токе нарушается обычный процесс образования и роста кристаллов, происходит периодическое перераспределение центров кристаллизации и растущих граней кристалла, что приводит к изменению структуры катодного осадка и его свойств. Помимо нестационарного электролиза широко применяются методы механической активации процессов электроосаждения металлов, а также формирования тонких пленок при воздействии на процесс ультразвуковых колебаний (УЗК).

Для обоснования использования нестационарного электролиза и УЗК при нанесении покрытий сплавом олово–висмут с требуемыми эксплуатационными свойствами необходимо всесторонне исследовать кинетику электродных процессов, выяснить механизм и основные закономерности их протекания, установить взаимосвязь между условиями электролиза и свойствами получаемых покрытий [8].

Цель настоящей работы – изучение быстропротекающих электрохимических процессов на границе электрод–электролит методом вольтамперометрии при нестационарном электролизе и воздействии УЗК.

Методика эксперимента. Осаждение металла при импульсном электролизе протекает при непрерывном варьировании во времени электродного потенциала $E(t)$. Суммарное изменение поляризации катода во времени можно представить как некоторый средний уровень, относительно которого происходят колебания от E_{\min} до E_{\max} . В данной работе исследование кинетических закономерностей проводилось путем регистрации электродных потенциалов при различных параметрах поляризующего тока и условиях осаждения. Для снятия катодных поляризационных кривых (КПК) в нестационарных условиях одновременно регистрировались минимальное E_{\min} и максимальное E_{\max} значения катодного потенциала с помощью оборудования и методики, разработанных в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники [9–11]. Значения потенциалов измерялись относительно хлорсеребряного электрода сравнения и пересчитывались в соответствии с нормальной водородной шкалой, а полученные значения силы тока пересчитывались на плотность тока (анод нерастворимый платиновый).

Исследования проводили в электролите следующего состава: олово серно-кислородное SnSO_4 (50 г/л); висмут азотнокислый $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ (1,4 г/л); кислота серная H_2SO_4 (125 г/л); антиоксидантная добавка ЦКН-32 (2 г/л). В качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) использовали неонол АФ-9-10 (2–8 г/л); температура электролита 18–25 °С. Для приготовления раствора применяли реактивы марки «ч. д. а.» и дистиллированную воду. Для изучения кинетики в нестационарных условиях использовали высокочастотный источник питания гальванической ванны импульсно-реверсным током ИП 15-5 в комплекте с управляющей ЭВМ; цифровой осциллограф RIGOL DS1052E; ванну с генератором УЗК; магнитную мешалку RH basic 2 IKAMAG.

Результаты и их обсуждение. Заметное влияние импульсного тока на структуру и физико-механические свойства покрытий обусловлено процессами, происходящими в паузе, а также высокими мгновенными значениями амплитуды тока во время действия прямого импульса. При варьировании длительности импульса и паузы становится возможным воздействие на расстояние от электрода фронта диффузии разряжающихся ионов. Крутой передний фронт импульсов обуславливает возрастание электродного потенциала до максимального значения, вследствие чего обедняется слой электролита возле стремительно растущего кристалла и процесс осаждения начинается на тех участках поверхности катода, где концентрация ионов выше. Такое перераспределение линий тока способствует получению мелкокристаллических и плотных осадков. Крутой спад импульсов приводит к росту размаха колебаний потенциала, что сопровождается уменьшением величины выхода металла по току [12]. Необходимо отметить, что при импульсном электролизе помимо фарадеевской составляющей тока в каждом импульсе появляется составляющая тока, обусловленная перезарядом емкости двойного электрического слоя вокруг электрода. Емкостный характер нагрузки может вызывать искажения формы кривой катодного потенциала по сравнению с формой поляризующего тока (рис. 1).

Колебания потенциала катода при импульсном электролизе позволяют управлять входом величины $E(t)$ в область значений потенциала нулевого заряда. Это дает возможность контролиро-

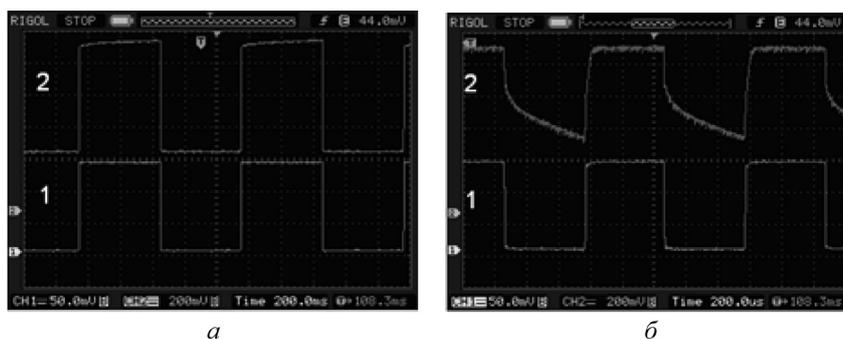


Рис. 1. Временные изменения поляризации катодов при электролизе импульсным током прямоугольной формы (1 – поляризующий ток; 2 – катодный потенциал); а – $f = 1$ Гц, $i_{cp} = 7$ А/дм², $q = 2$, механическое перемешивание; б – $f = 1000$ Гц, $i_{cp} = 7$ А/дм², $q = 2$ механическое перемешивание

вать адсорбцию/десорбцию ПАВ, а также катодную поляризацию и количество олова и висмута в покрытии. В данном случае стационарный потенциал сплава олово–висмут более электроположительный, чем потенциал нулевого заряда. Поэтому плотный адсорбционный слой существует на поверхности электрода только при мощных и длительных импульсах, когда величина катодного потенциала равна или превышает значение потенциала нулевого заряда. В паузах импульса тока, когда потенциал катода снижается вплоть до стационарного значения, происходит полная десорбция ПАВ. Если за дальнейший ход импульса тока адсорбционная пленка не успевает сформироваться полностью, то разряд ионов металла происходит через неполный адсорбционный слой. Это приводит к деполяризации катода и образованию некачественного осадка [6].

С увеличением скважности поляризующего тока происходят уменьшение длительности импульса и рост длительности паузы тока. При более высоких скважностях при одном и том же значении амплитудной плотности тока концентрация ионов металлов в диффузионном слое изменится на меньшую величину, следовательно, значение E_{max} снизится (рис. 2). Величина второго предельного тока значительно возрастает. На частоте $f = 1$ Гц при скважностях q , равных 5 и 10, наблюдается появление площадки третьего предельного тока (рис. 2, а, кривые 4', 5').

Установленный характер изменения значений потенциала можно объяснить тем, что с ростом частоты поляризующего тока происходят уменьшения длительности импульса и паузы (от миллисекунд до микросекунд). При сокращении времени действия импульса при одном и том же значении амплитудной плотности тока концентрация ионов металлов в диффузионном слое изменится на меньшую величину. К тому же короткая пауза и инерционность процесса не позволяют компенсировать убыль ионов в прикатодном диффузионном слое так же быстро, как при низких частотах. В результате это приводит к замедлению роста катодного потенциала при высоких частотах в сравнении с низкими при одних и тех же значениях амплитудной плотности тока. Таким образом, при частоте $f = 1000$ Гц наблюдается деполяризация процесса. Площадка

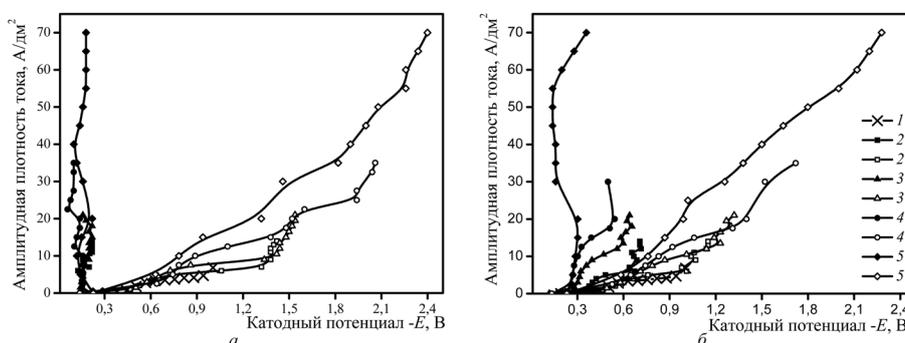


Рис. 2. Влияние скважности и частоты тока на ход поляризационных характеристик при электроосаждении сплава олово–висмут (а – $f = 1$ Гц; б – $f = 1000$ Гц); 1 – постоянный ток; 2 – импульсный ток, $q = 2$, $i(E_{min})$; 2' – $i(E_{max})$; 3 – импульсный ток, $q = 3$, $i(E_{min})$; 3' – $i(E_{max})$; 4 – импульсный ток, $q = 5$, $i(E_{min})$; 4' – $i(E_{max})$; 5 – импульсный ток, $q = 10$, $i(E_{min})$; 5' – $i(E_{max})$

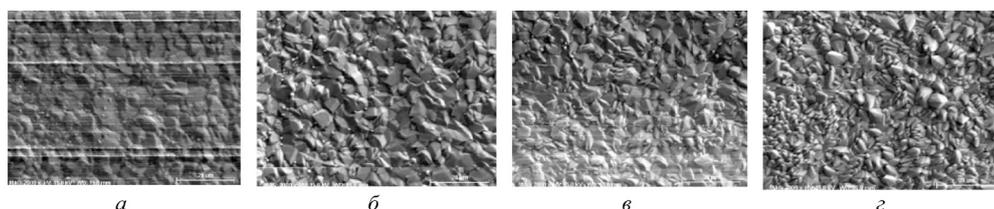


Рис. 3. Структура покрытий сплавом олово–висмут, полученных на импульсном токе ($f = 1000$ Гц, $i_{cp} = 2$ А/дм²); $a - q = 10$; $б - q = 5$; $в - q = 3$; $з - q = 2$

второго предельного тока становится уже, а площадка третьего предельного тока, наблюдаемого при высоких скважностях тока на низкой частоте, исчезает.

На рис. 3 в качестве иллюстрации влияния длительностей импульса и паузы представлена структура покрытия, полученного при электролизе с использованием импульсного тока высокой частоты (1000 Гц). При высокой скважности импульсов наблюдается тангенциальный рост слоев с сохранением устойчивости плоских граней и ребер (рис. 3, а, б). С сокращением паузы и увеличением длительности импульса наблюдаются потеря устойчивости планарного роста граней кристаллов и формирование иглообразных кристаллов (рис. 3, в, з).

Всему вышесказанному не противоречат данные, представленные на рис. 4, а, б, отражающие влияние частоты импульсного тока на КПК при электроосаждении сплава олово–висмут. Как следует из рисунка, при повышении частоты от 1 до 1000 Гц наблюдается снижение катодной поляризации, величина второго предельного тока повышается. Снижение частоты приводит к уменьшению реактивной проводимости электрода и емкостного тока, при этом фарадеевская составляющая возрастает. В результате растут E_{max} и размах ($E_{max} - E_{min}$) колебаний. При частоте 1000 Гц во время паузы, длительность которой составляет микросекунды, значение потенциала не возвращается к равновесному, за счет чего кривая минимума E_{min} существенно смещается в более электроотрицательную сторону (кривая 4).

Как видно из приведенных результатов, на поляризационных кривых выделяются два, а при более высоких скважностях тока при работе на высоких амплитудных плотностях тока – три участка предельных токов. Для исследования природы предельных токов проведены эксперименты с перемешиванием электролита. Полученные результаты показали, что величина площадки первого предельного тока не меняется с перемешиванием электролита (рис. 5), т. е. ее появление обуславливается активационной поляризацией, связанной с разрядом ионов, а возникновение площадок второго и третьего предельных токов – ограничениями транспортировки частиц к поверхности катода (диффузионным перенапряжением), так как их величина изменяется при перемешивании.

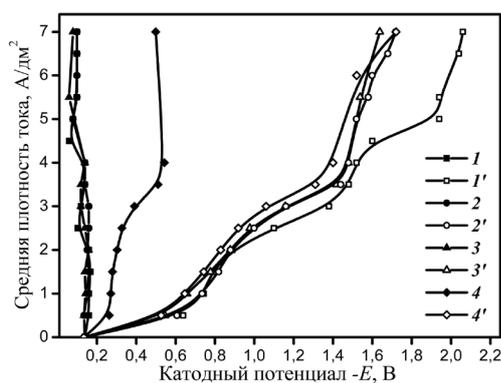


Рис. 4. Влияние частоты на КПК при электроосаждении сплава олово–висмут ($q = 5$); 1 – импульсный ток, $f = 1$ Гц, $i(E_{min})$; 1' – $i(E_{max})$; 2 – импульсный ток, $f = 10$ Гц, $i(E_{min})$; 2' – $i(E_{max})$; 3 – импульсный ток, $f = 100$ Гц, $i(E_{min})$; 3' – $i(E_{max})$; 4 – импульсный ток, $f = 1000$ Гц, $i(E_{min})$; 4' – $i(E_{max})$

Использование механического перемешивания электролита с помощью магнитной мешалки снимает диффузионные ограничения, уменьшает поляризацию катода. В результате возможно осаждение сплава олово–висмут при больших плотностях тока, но полученное покрытие имеет более крупнокристаллическую структуру. Необходимо отметить, что отсутствие второго предельного тока приводит также к снижению содержания висмута по сравнению с обычными условиями осаждения сплава, что влияет на свойства покрытий.

Анализ поляризационных кривых, приведенных на рис. 5, показывает, что при меньших скважностях величина предельного тока ниже, чем при высоких скважностях (процесс без перемешивания). При интенсивном перемешивании электролита кривые, сформированные на частоте 1 Гц на разных скважностях, практически совпадают. Та же картина наблюдается

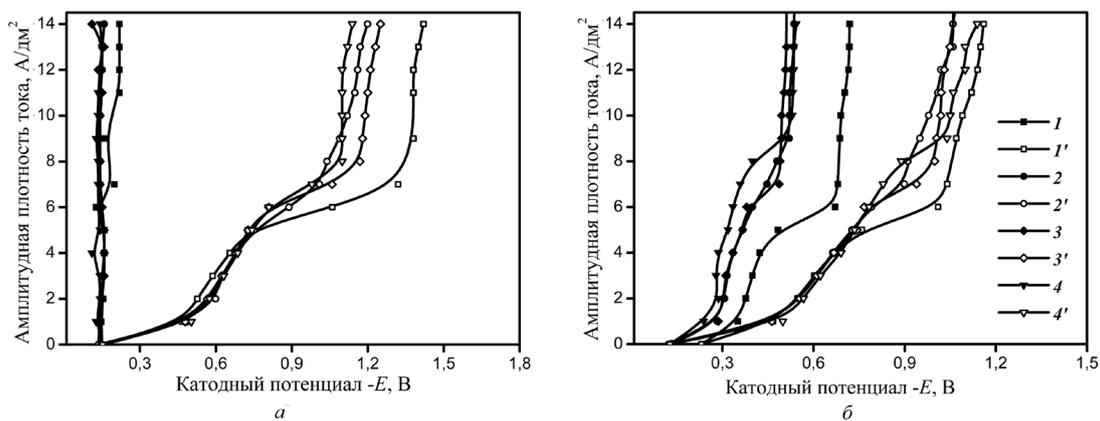


Рис. 5. Влияние механического перемешивания электролита на катодную поляризацию при электроосаждении сплава олово–висмут импульсным током ($a - 1$ Гц; $b - 1000$ Гц); $1 - q = 2, i(E_{\min})$, с перемешиванием; $1' - i(E_{\max})$; $2 - q = 2, i(E_{\min})$, без перемешивания; $2' - i(E_{\max})$; $3 - q = 5, i(E_{\min})$, с перемешиванием; $3' - i(E_{\max})$; $4 - q = 5, i(E_{\min})$, без перемешивания; $4' - i(E_{\max})$

и на более высокой частоте (1000 Гц). Таким образом, механическое перемешивание имеет преимущественное влияние на кинетику электродного процесса по сравнению с варьированием параметров импульсного электролиза. Вместе с тем это воздействие приводит к существенному повышению скорости окисления ионов Sn^{2+} в объеме сернокислого электролита, что негативно отражается на его сроке эксплуатации. Кроме того, при металлизации отверстий с высоким аспектным отношением перемешивание может играть отрицательную роль, способствуя закрытию устья отверстия в самом начале процесса осаждения.

Для исследования кинетических закономерностей электроосаждения при совместном использовании импульсного электролиза и УЗК проведены эксперименты с применением ультразвуковой ванны (частота УЗК 38 кГц, мощность акустическая 15 Вт, мощность потребляемая 40 Вт, интенсивность до 2,1 Вт/см²). КПК были сняты при следующих параметрах импульсного тока: частота 1 и 1000 Гц; скважность 2; интенсивность УЗК 0,58, 0,90, 2,10 Вт/см². Полученные результаты показали, что с применением УЗК при формировании покрытий сплавом олово–висмут импульсным током повышается величина второго предельного тока во всем исследуемом диапазоне интенсивностей ультразвука, что позволяет проводить электролиз при более высоких плотностях тока и тем самым интенсифицировать процесс (рис. 6). Стационарный потенциал смещается в сторону более электроположительных значений.

УЗК при электроосаждении импульсным током высокой частоты (рис. 6, б) заметно влияют на кривые $i(E_{\min})$. Во всем диапазоне исследуемых амплитудных плотностей тока отмечается значительное смещение кривых $i(E_{\min})$ в более электроположительную сторону (при 3 А/дм² на

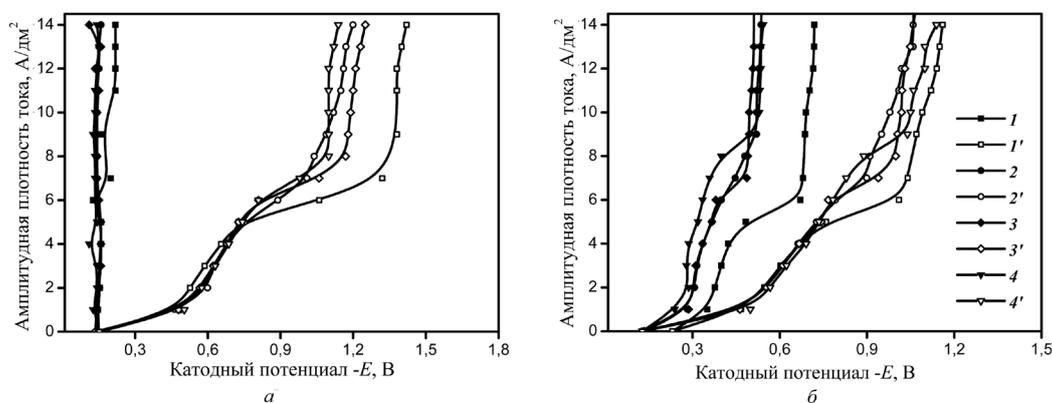


Рис. 6. Влияние ультразвуковых колебаний на КПК при электроосаждении сплава олово–висмут импульсным током ($a - f = 1$ Гц, $q = 2$; $b - f = 1000$ Гц, $q = 2$); $1 -$ без УЗК, $i(E_{\min})$; $1' - i(E_{\max})$; $2 -$ УЗК, $I = 0,58$, Вт/см², $i(E_{\min})$; $2' - i(E_{\max})$; $3 -$ УЗК, $I = 0,90$ Вт/см², $i(E_{\min})$; $3' - i(E_{\max})$; $4 -$ УЗК, $I = 2,10$ Вт/см², $i(E_{\min})$; $4' - i(E_{\max})$

80 мВ, при 6 А/дм² на 339 мВ). До значения плотности тока 6 А/дм² поляризационные кривые, полученные при воздействии УЗК различной интенсивности, практически совпадают. Кроме того, до 4 А/дм² КПК $i(E_{\max})$, полученные при воздействии ультразвука различной интенсивности, совпадают и с поляризационными кривыми, сформированными без воздействия УЗК. На низкой частоте (1 Гц) импульсного тока поляризационные характеристики $i(E_{\max})$ также совпадают при амплитудной плотности тока до 5 А/дм², а характеристики $i(E_{\min})$ – при всех значениях плотности тока (рис. 6, а). С ростом интенсивности УЗК площадка предельного тока уменьшается, форма КПК постепенно сглаживается.

Приведенной закономерности не соответствует КПК, полученная при воздействии УЗК интенсивностью 0,58 Вт/см². Аналогичное поведение катодных поляризационных кривых при той же интенсивности ультразвука отмечено в [12] при исследовании кинетики электроосаждения покрытий сплавом олово–висмут на постоянном токе при воздействии УЗК.

Заключение. Установлена взаимосвязь между условиями процесса электроосаждения сплава олово–висмут и характером его катодной поляризации. Показано, что импульсный электролиз не изменяет механизм разряда ионов олова и висмута в сернокислом электролите. Лимитирующая стадия в катодном процессе, как и при электролизе на постоянном токе, обусловлена скоростью электрохимической реакции. Однако абсолютные значения скоростей электродных реакций при импульсном электролизе выше, чем при стационарном режиме. Анализ КПК демонстрирует, что область катодных плотностей тока в импульсе, при которых покрытия сплавом олово–висмут получают хорошего качества, при скважности $q = 2$ составляет 1–5 А/дм² (при более высокой скважности до 10 А/дм²), с применением УЗК – 1–8 А/дм².

Использование полученных экспериментальных результатов позволяет обоснованно выбрать оптимальный режим получения покрытий сплавом олово–висмут, а также многослойных покрытий с заданными эксплуатационными свойствами.

Список использованной литературы

1. Медведев, А. Форум по бессвинцовым технологиям пайки / А. Медведев, А. Новиков // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 48–54.
2. Вячеславов, П. М. Электролитическое осаждение сплавов / П. М. Вячеславов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 38 с.
3. Heong, C. Y. Effects of Sn Concentration and Current Density on Sn-Bi Electrodeposition in Additive Free Plating Bath / Chiew Ying Heong [et. al] // 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design. – 2012. – P. 286–291.
4. Electrolyte media for the depositing of tin alloys and methods for the depositing of tin alloys: пат. US2007/7309411 B2. PCT/GB2002/001044 / Roderick D. Herdman, Trevor Pearson; заяв. 13.03.2002, опубликовано 18.12.2007.
5. Puipe, Jean-Claude Theory and practice of pulse plating / Jean-Claude Puipe, Frank Leaman // American electroplaters and surface finishers society. – Florida, USA. – 1986.
6. Импульсный электролиз / Н. А. Костин [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1989. – 168 с.
7. Pulse Electroplating of Sn-Bi Alloys on Micropatterned Electrodes for Lead-Free Solder Bumping / Yi-Da Tsai [et al.] // Journal of The Electrochemical Society. – 2012. – P. 108–113.
8. Антропов, Л. И. Теоретическая электрохимия: Учеб. для хим.-технолог. спец. Вузов / Л. И. Антропов – М.: Высш. шк., 1984. – 512 с.
9. Разработать и изготовить экспериментальный образец программно-управляемого источника импульсного тока и опытный образец программно-управляемого источника импульсного тока с расширенными функциональными возможностями: отчет о НИР / БГУИР; рук. А. М. Гиро; исполн. А. А. Глушков [и др.]. – Минск, 2013. – 32 с. – Библиогр.: С. 24–28. – № ГР 2120391.
10. Дежкунов, Н. В. Оборудование для ультразвуковой интенсификации гальванических техпроцессов / Н. В. Дежкунов [и др.] // Материалы 3-го Республиканского научно-технического семинара «Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий», Минск, 5–6 декабря 2013 г. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 82–85.
11. Хмыль, А. А. Формирование тонкопленочных систем металлизации в нестационарных условиях электролиза.: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.27.06. / А. А. Хмыль. – Минск, 2001. – 607 с.
12. Василец, В. К. Влияние ультразвуковых колебаний на кинетику процесса электроосаждения и структуру сплавом олово–висмут / В. К. Василец [и др.] // Докл. БГУИР. – 2015. – № 5(91). – С. 12–18.

Поступила в редакцию 06.07.2015

УДК 544.64:544.032.4

*А. Л. КОЗЛОВСКИЙ^{1,2}, Д. И. ШЛИМАС¹, М. В. ЗДОРОВЕЦ^{1,2}, К. К. КАДЫРЖАНОВ¹,
Е. Ю. КАНЮКОВ³, Е. Е. ШУМСКАЯ³*

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ Cu-НАНОТРУБОК

¹*Институт ядерной физики Республики Казахстан, Алматы, Казахстан,*

²*Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: artem88sddt@mail.ru, shlimas@mail.ru, mzdorovets@gmail.com, kadyrzhanov1945@gmail.com,*

³*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь
e-mail: ka.egor@mail.ru, lunka7@mail.ru*

Методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгеноструктурного анализа исследованы геометрия и фазовый состав полученных методом шаблонного синтеза медных нанотрубок. На основании изучения результатов взаимодействия быстрых тяжелых ионов с Cu-нанотрубками показано влияние ионизирующего излучения на изменение параметров кристаллической решетки, размеров кристаллитов и фазового состава.

Ключевые слова: медные нанотрубки, шаблонный синтез, растровая электронная микроскопия.

*A. L. KOZLOVSKIY^{1,2}, D. I. SHLIMAS^{1,2}, M. V. ZDOROVETS^{1,2}, K. K. KADYRZHANOV¹,
E. Y. KANIUKOV³, E. E. SHUMSKAYA³*

INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON Cu-NANOTUBES STRUCTURE

¹*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,*

²*L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: artem88sddt@mail.ru, shlimas@mail.ru, mzdorovets@gmail.com, kadyrzhanov1945@gmail.com,*

³*Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: ka.egor@mail.ru, lunka7@mail.ru*

Geometry and phase composition of copper nanotubes obtained by template synthesis were studied using scanning electron microscopy, energy dispersive and structural X-ray analysis. Based on the results of studies of interaction of fast heavy ions with Cu-nanotubes, the influence of ionized radiation on the change in crystal lattice, crystallite size and phase composition was shown.

Keywords: Cu-nanotubes, template synthesis, scanning electron microscopy.

Введение. В космических технологиях широко применяются наноматериалы и приборы на их основе, что обусловлено наличием таких уникальных свойств, как высокая химическая и термическая стойкость, большая удельная площадь поверхности, электрофизические свойства и др. [1, 2]. За счет дешевизны, простоты синтеза и высоких эксплуатационных качеств среди нанобъектов выделяют структуры, созданные на основе меди и пригодные для использования в качестве элементов микро- и нанoeлектронных устройств. С точки зрения получения наноматериалов перспективным является метод шаблонного синтеза за счет своей простоты и низкой стоимости при изготовлении больших массивов наноструктур с монодисперсными диаметрами и длиной. Он также обеспечивает возможность адаптации под требуемые параметры размера, длины и формы наноструктур путем управления морфологией шаблона и параметрами синтеза.

Важным требованием к материалам, используемым при создании элементов целевой аппаратуры космических аппаратов, в том числе на базе микросистемотехники, наноматериалов и нанодатчиков, является их стойкость к различного рода воздействиям внешней среды, главную роль среди которых играет ионизирующее излучение с энергиями 10^3 – 10^{20} эВ. Необходимо отметить, что теория взаимодействия ионизирующего излучения с веществом проработана довольно хорошо, однако область, связанная с влиянием радиационных эффектов на свойства наноматериалов, изучена недостаточно. В настоящее время существует лишь ряд работ, в которых анализи-

руется влияние ионизирующего излучения на структуру [например, 3–5] и проводящие свойств [например, 6–11] наноматериалов, при этом результаты работ достаточно противоречивы.

Для развития метода шаблонного синтеза и адаптации получаемых с его помощью наноструктур, пригодных к использованию в элементах целевой аппаратуры космических аппаратов, в данной работе приводится методика получения медных нанотрубок посредством шаблонного синтеза, изучаются их структурные и морфологические особенности, а также анализируется влияние ионизирующего излучения на характеристики **Си-нанотрубок на основании теоретических расчетов и экспериментальных данных по облучению быстрыми тяжелыми ионами Xe^{+22}** .

Методика эксперимента. Для получения Си-нанотрубок методом шаблонного синтеза использовались трековые мембраны на основе пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ) марки Hostaphan® производства фирмы Mitsubishi Polyester Film (Германия) толщиной 12 мкм. Облучение ПЭТФ-пленки производилось на ускорителе DC-60 ионами криптона с энергией 1,75 МэВ/нуклон. УФ-сенсбилизация облученных трековых мембран проводилась при помощи лампы UV-C с длиной волны 253,7 нм с каждой стороны в течение 30 мин. После УФ-сенсбилизации пленка подвергалась двухстороннему химическому травлению в 2,2 М растворе NaOH при температуре $(85 \pm 0,1)$ °С в течение 4,5 мин и последующей обработке в растворах нейтрализации: 1,0%-ный раствор уксусной кислоты и деионизированной воды. Качество полученных ПЭТФ-шаблонов контролировалось методами растровой электронной микроскопии и газопроницаемости, что позволило с высокой точностью определить средний диаметр пор (380 ± 10) нм.

Синтез Си-нанотрубок в порах ПЭТФ-шаблона проводился электрохимическим методом. Металл осаждался в потенциостатическом режиме при напряжении 1,0 В из электролита, содержащего $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (238 г/л), H_2SO_4 (21 г/л). Процесс осаждения контролировался методом хроноамперометрии с использованием мультиметра Agilent 34410A.

Структура и размеры полученных нанотрубок исследовались при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) Hitachi TM3030 с системой энергодисперсионного микроанализа (ЭДА) Bruker XFlash MIN SVE при ускоряющем напряжении 15 кВ. Для изучения особенностей отдельных нанотрубок ПЭТФ-шаблоны удалялись посредством погружения в горячий раствор гидроокиси натрия (9,0 М) с последующей обработкой в ультразвуковой ванне в течение 10 с для отделения остатков полимера. Кристаллическая структура нанотрубок исследовалась методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре D8 ADVANCE с использованием CuK_α -излучения рентгеновской трубки и графитового монохроматора на дифрагированном пучке. Дифрактограммы записывались в угловом диапазоне $2\theta = 20\text{--}80$ град с шагом 0,03 град при наборе спектров в течении 9 с в каждой точке.

Выявление влияния ионизирующего излучения на структурные свойства Си-нанотрубок осуществлялось при облучении содержащих медные наноструктуры ПЭТФ-шаблонов ионами Xe^{+22} с энергией 1,75 МэВ/нуклон с дозой от 10^9 до $5 \cdot 10^{11}$ см⁻² в экспериментальной камере 3-го канала ускорителя ДЦ-60 под вакуумом ($1 \cdot 10^{-6}$ Торр).

Результаты и их обсуждение. Важной особенностью электрохимического осаждения является возможность управления свойствами синтезируемых наноструктур, благодаря использованию пор с заданной геометрией, подбору состава электролита и параметров осаждения (время, температура, потенциал и т. д.). Использование в данном исследовании пор цилиндрической формы вместе со специальной методикой нанесения электрода, позволяющей создавать не полностью закрывающий отверстие поры катод для электрохимического осаждения, обеспечивало формирование полых нанотрубок. На рис. 1 представлено характерное РЭМ-изображение и ЭДА-спектр наноструктур после удаления ПЭТФ-шаблона.

Из рис. 1, а видно, что нанотрубки после растворения полимерной матрицы имеют различную ориентацию, что является следствием действия механических сил при удалении пленки ПЭТФ и сушки. Очевидно, что внутри полимерной матрицы нанотрубки располагаются параллельно, что является следствием соответствующего расположения пор в ПЭТФ-шаблонах. Анализ латеральных размеров нанотрубок позволил установить, что их длина составляет $(11,8 \pm 0,2)$ мкм, а внешние диаметры, соответствуют среднему диаметру пор (380 ± 10) нм.

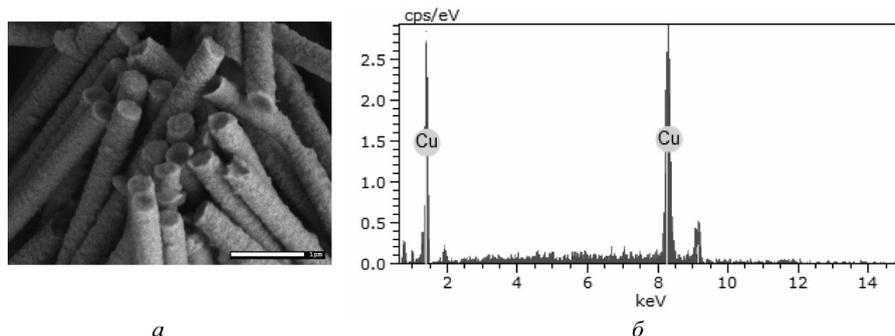


Рис. 1. Характеризация Cu-нанотрубок: *a* – РЭМ-изображение; *б* – ЭДА-спектр

Учитывая, что из-за недостаточного разрешения РЭМ-анализ внутренних диаметров Cu-наноструктур данным методом не проводился. Их изучение осуществлялось методом газопропускаемости, который позволил установить, что внутренние диаметры нанотрубок составляют примерно 180 нм. Толщина стенок, определенная как половина разницы между величинами внешних и внутренних диаметров, составила примерно 100 нм.

Для определения элементного состава Cu-нанотрубок применен метод ЭДА (рис. 1, *б*). Анализ данных ЭДА свидетельствует, что содержание меди в нанотрубках составляет 97%. Также на спектре регистрируется присутствие кислорода (примерно 3%), появление которого обусловлено окислением образца в процессе растворения ПЭТФ-шаблона в гидроксиде натрия.

Перед облучением Cu-нанотрубок проводилось моделирование взаимодействия быстрых тяжелых ионов с медной мишенью толщиной 12 мкм с помощью программы SRIM 2013Pro. В качестве облучающих частиц рассматривались ионы Xe^{+22} с энергией в интервале от 1,0 до 1,75 МэВ/нуклон (шаг 0,25 МэВ/нуклон). На основании расчетов показано, что при энергиях до 1,25 МэВ/нуклон происходит полное торможение иона в наноструктурах. При энергиях выше данного значения ионы насквозь пронизывают исследуемые наноструктуры в направлении, перпендикулярном их диаметрам. Соответственно для гарантированного преодоления налетающими частицами мишеней выбрана энергия облучения 1,75 МэВ/нуклон.

Изучение влияния ионизирующего излучения на кристаллическую структуру нанотрубок проводилось методом РСА при исследовании исходных образцов (рис. 2, *a*) и образцов, облученных с дозой от 10^9 до $5 \cdot 10^{11}$ см^{-2} (рис. 2, *б–е*). Поскольку исследуемые образцы при проведении анализа находились в полимерной матрице, на рентгенограммах присутствует широкий пик с угловым положением $2\theta = 20\text{--}32$ град.

Согласно данным РСА, все образцы Cu-нанотрубок являются поликристаллами с ГЦК-структурой и параметром элементарной ячейки a , отличающимся от эталонного параметра (3,6130 Å) для объемного образца меди. Анализ результатов РСА показывает, что при увеличении дозы облучения наблюдаются рост значения параметра элементарной ячейки, а также среднего размера кристаллитов (рассчитанного согласно уравнению Шерера), из которых состоят стенки нанотрубок, от 42,5 нм для исходного образца до 47,1 и 51,8 нм для образцов, облученных с дозами 10^{11} см^{-2} и $5 \cdot 10^{11}$ см^{-2} соответственно. Большое соотношение пиков (111) по отношению к (200) и (220) на спектрах РСА позволяет сделать вывод, что материал нанотрубок

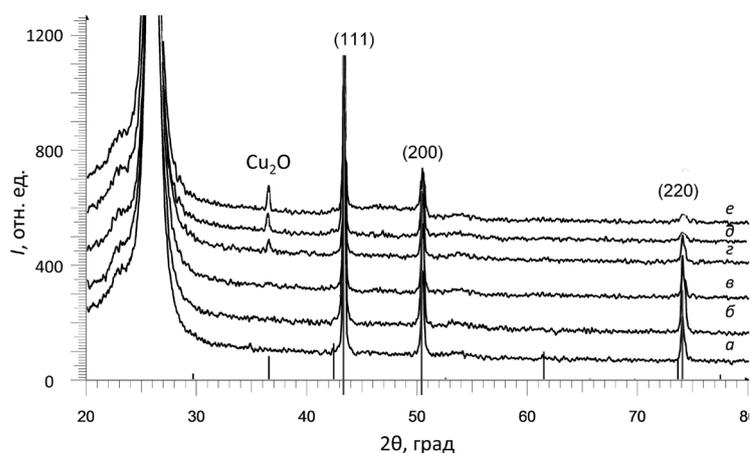


Рис. 2. Спектры РСА Cu-нанотрубок до и после облучения ионами Xe^{+22} : *a* – исходный образец; *б* – 10^9 см^{-2} ; *в* – 10^{10} см^{-2} ; *г* – $5 \cdot 10^{10}$ см^{-2} ; *д* – 10^{11} см^{-2} ; *е* – $5 \cdot 10^{11}$ см^{-2}

имеет выделенное направление [111] вдоль их оси. Увеличение дозы облучения вызывает рост соотношения интенсивностей пиков, что с учетом изменения размеров кристаллитов может свидетельствовать о вытягивании их вдоль оси нанотрубок в результате локального разогрева при взаимодействии быстрых тяжелых ионов с металлом.

Для подтверждения данного предположения изучались текстуры поликристаллических нанотрубок путем оценки текстурных коэффициентов $TC(hkl)$, которые рассчитывались по формуле Харриса:

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \bigg/ \frac{1}{n} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)},$$

где $I(hkl)$ – экспериментально полученная относительная интенсивность, $I_0(hkl)$ – относительная интенсивность, соответствующая данной плоскости согласно базе JCPDS, n – количество плоскостей. Результаты расчетов приведены в таблице.

Параметры Cu-нанотрубок, облученных ионами He^{+22} с энергией 1,75 МэВ/нуклон при различной дозе облучения

2 θ , град	(hkl)	Текстурный коэффициент $TC(hkl)$					
		Исходный	10 ⁹ см ⁻²	10 ¹⁰ см ⁻²	5·10 ¹⁰ см ⁻²	10 ¹¹ см ⁻²	5·10 ¹¹ см ⁻²
43,349	111	0,654759	0,976301	1,180722	1,246563	1,57298	2,020379
50,485	200	0,944188	0,838477	0,798708	0,8081	0,774298	0,607772
74,148	220	1,401053	1,185222	1,020571	0,945337	0,652722	0,371849

Значения текстурных коэффициентов больше единицы означают преимущественную ориентацию вдоль массива нанотрубок в соответствующих плоскостях, что предполагает увеличение размера зерен вдоль плоскости. Полученные в нашем исследовании значения, находящиеся в области 1, подтверждают предположение о том, что **Cu-нанотрубки обладают поликристаллической структурой с выделенным направлением [111]**. Повышение дозы облучения приводит к вытягиванию кристаллитов меди вдоль оси нанотрубки с увеличением их размеров, что выражается в значительном увеличении текстурных коэффициентов для плоскости [111].

На спектрах РСА, соответствующих дозам облучения 10¹¹ см⁻² и 5·10¹¹ см⁻² (рис. 2, *з-е*), появляется пик с угловым положением 2 θ = 37 град, который обусловлен зарождением оксидной фазы Cu₂O. Характерно, что интенсивность пиков оксида меди (I) растет с увеличением дозы облучения. Наличие оксидной фазы также подтверждают результаты ЭДА: при увеличении дозы от 10¹¹ до 5·10¹¹ см⁻² содержание кислорода растет от 16 до 29%. Повышение содержания кислорода является следствием окисления областей с высокой температурой за счет взаимодействия с кислородом воздуха, появляющихся в результате локального разогрева металла при взаимодействии с ионизирующим излучением.

Заключение. Методом шаблонного синтеза получены полые медные нанотрубки. Результаты исследования их морфологии и структуры методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, рентгенодифрактометрического анализа и манометрического метода определения газопроницаемости показали, что **Cu-нанотрубки являются поликристаллическими** и имеют латеральные размеры, соответствующие параметрам пор (длина около 12 мкм и внешний диаметр примерно 380 нм), при толщине стенок 100 нм. В результате изучения влияния ионизирующего излучения на кристаллическую структуру нанотрубок показано, что при дозах облучения до 5·10¹¹ см⁻² разрушения их структуры не происходит. Увеличение дозы облучения приводит к росту величин параметра элементарной ячейки и среднего размера кристаллитов за счет вытягивания кристаллитов вдоль оси нанотрубки. Изменение морфологии нанотрубок является следствием локального разогрева при взаимодействии быстрых тяжелых ионов с металлом. Локальный разогрев также инициирует образование фазы оксида меди (I) за счет реакции меди с кислородом воздуха, причем количество Cu₂O возрастает с ростом дозы облучения.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения **Cu-нанотрубок в качестве элементов устройств целевой аппаратуры космических аппаратов, функционирующих в условиях безвоздушного пространства, при которых не будет происходить окисления меди.**

Список использованной литературы

1. Новиков, Л. С. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. Л. С. Новикова. – М.: КДУ, 2007. – С. 10–38.
2. Новиков, Л. С., Перспективы применения наноматериалов в космической технике / Л. С. Новиков, Е. Н. Воронина. – М.: Университетская книга, 2008. – С. 188.
3. Deiss, E., Modeling of an electrically rechargeable alkaline Zn-air battery / E. Deiss, F. Holzer, O. Hass // *Electrochim. Acta*. – 2002. – Vol. 47. – P. 3995–4010.
4. Controllable Template Synthesis of Superconducting Zn Nanowires with Different Microstructures by Electrochemical Deposition / J. G. Wang [et al.] // *Nano Lett.* – 2005. – Vol. 5. – P. 1247–1253.
5. Wang, J. G., TEM Investigation of Zn/ZnO Nanowires with Different Microstructure Synthesized by Electrodeposition / J. G. Wang, M. L. Tian // *Microsc. Microanal.* – 2004. – Vol. 10 – P. 358–359.
6. Zhu, Y.-C., Large scale preparation of zinc nanosheets by thermochemical reduction of ZnS powders / Y.-C. Zhu, Y. Bando // *Chem. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 372. – P. 640–644.
7. A novel and simple growth route towards ultra-fine ZnO nanowires / Z. Chen, [et al.] // *Cryst. Growth*. – 2004. – Vol. 265. – P. 482–486.
8. Effect of growth temperature on the ZnO nanowires prepared by thermal heating of Zn powders / H. W. Kim [et al.] // *Cur. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 10. – P. 52–56.
9. Yavuz, H., The effect of gamma-ray irradiation on the electrical conductivity of CuO–PbO glasses / H. Yavuz, O. Kaygili // *Radiat. Eff. Def. Solids*. – 2011. – Vol. 166 (2). – P. 100–103.
10. Yavuz, H., The effect of gamma-ray irradiation on the electrical conductivity of CuO–PbO glasses / H. Yavuz, O. Kaygili // *Radiat. Eff. Def. Solids*. – 2011. – Vol. 166 (2). – P. 100–103.
11. Krashennnikov, A. V., Engineering of nanostructured carbon materials with electron or ion beams / A. V. Krashennnikov, F. Banhart // *Nat. Mater.* – 2007. – Vol. 6. – P. 723–733.

Поступила в редакцию 01.01.2016

УДК 621.762.227

А. И. ПОБОЛЬ¹, Г. Г. ГОРАНСКИЙ², С. П. ЖУРАВКОВ³, Г. Л. ЛОБАНОВА³,
Ф. Е. САПРЫКИН³, М. С. ПЕТЮКЕВИЧ³

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ ТВЕРДОГО СПЛАВА WC6 ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: alex.pobol@gmail.com,

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: georggoran@rambler.ru,

³Институт физики высоких технологий национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, Россия, e-mail: zhursp@yandex.ru

В работе представлены результаты электроискрового диспергирования (ЭИД) стружки из сплава WC6 в воде. Приведены величины удельной поверхности, морфологии, структуры и распределения частиц в порошках по размерам. Для исследования свойств использовали дисковый центробежный седиментационный анализатор размера частиц, методы растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Показана принципиальная возможность применения ЭИД для изготовления тонкодисперсных порошков из отходов твердого сплава, пригодных для повторного использования в качестве высокоактивных добавок при создании инструмента и получении износостойких упрочняющих покрытий.

Ключевые слова: твердый сплав, электроимпульсное диспергирование, тонкодисперсные частицы.

A. I. POBOL, G. G. GORANSKY, S. P. ZHURAVKOV, G. L. LOBANOVA, F. E. SAPRYKIN, M. S. PETYUKEVICH

PROPERTIES OF WC-6Co HARD ALLOY POWDERS OBTAINED BY THE METHOD OF SPARK PLASMA DISPERSION

¹Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: alex.pobol@gmail.com,

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: georggoran@rambler.ru,

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, e-mail: zhursp@yandex.ru

Properties of WC-6Co hard alloy powders obtained by the method of spark plasma dispersion (SPD) are presented. Powders of WC-6Co hard alloy were produced using spark erosion in distilled water. The properties of powders, such as specific surface area, morphology, structure and size distribution, were studied. Investigation of the powder properties was made using the methods of scanning electron microscopy, X-ray phase analysis and disk centrifugal sedimentation particle size analysis. The principal possibility of SPD method to produce highly active additives, suitable to use during creation of tools and hardening of wear-resistant coatings from hard alloy waste is shown.

Keywords: hard alloy, spark plasma dispersion, fine-grained particles.

Введение. Вольфрамсодержащие отходы инструментальных производств представляют высокую практическую ценность. Проблема их переработки решается двумя концептуальными подходами: проведением технологических операций с целью получения условно чистого вольфрама (например, для использования в качестве легирующего материала) и переработкой с последующей модификацией для повторного использования твердосплавного материала по его прямому назначению (инструмент и упрочняющие покрытия). Выбор технологической схемы переработки вольфрамсодержащих отходов твердых сплавов определяется степенью комплексного использования входящих в них ценных компонентов, требованиями экологии и рыночным спросом на ту или иную конечную вольфрамсодержащую продукцию [1]. В свою очередь методы переработки по применяемым источникам энергии можно условно разделить на химико-металлургические, электрохимические, механические и электрофизические, электроимпульсные [2–8].

Результаты механической переработки отходов сплава WC-Co в барабанных мельницах и атриторах приведены в [4]. Установлено, что использование этого процесса для измельчения

металлических отходов имеет ограничения, связанные с дисперсностью получаемых порошков, так как после определенной степени помола, как правило, до $-30\div-10$ мкм, дальнейшее разрушение практически прекращается и сопровождается самоплакированием и образованием агломератов из продуктов помола. В то же время известно, что частицы с меньшими размерами (в частности, нанодисперсные) становятся более активными за счет накопления свободной поверхностной энергии, а изделия, получаемые из этих смесей тонкодисперсных частиц, обладают более высокими прочностными свойствами.

Эффективными вариантами получения нанодисперсных металлических порошков являются электроимпульсные способы: электрический взрыв проводника в газовой атмосфере и электроискровое диспергирование металлических гранул в воде или другой жидкости [9]. Оба способа являются энергоэффективными и энергосберегающими, однако только электроискровое диспергирование позволяет перерабатывать металлические отходы в тонкодисперсные порошки в жидкой среде при напряжениях до 1000 В, что существенно упрощает технологический процесс [10].

Цель работы – изучение физико-химических процессов, протекающих при электроискровом диспергировании (ЭИД) дробленой стружки из сплава ВК6 в воде, получение исходных данных для разработки электроискровой технологии производства тонкодисперсных порошков с заданными свойствами. Работа выполнена при поддержке БРФФИ в соответствии с договором №Ф14Р-216 от 23.05.2014 г.

Методика эксперимента. Исходный материал для исследования процессов электроискрового диспергирования – стружка из сплава ВК6 (WC – 94 мас.%, Co – 6 мас.%) с размерами частиц примерно от 10 мкм до 2–5 мм. Стружка представляет собой отходы токарной обработки заготовок, полученных вакуумным спеканием, при изготовлении и восстановлении инструмента и технологической оснастки, используемых при производстве металлургической продукции.

Тонкодисперсные порошки твердого сплава ВК6 получали в экспериментальной установке по электроимпульсному диспергированию металлов [9] в дистиллированной воде. Она включает в себя импульсный источник питания ИП-1–3 и реактор, изготовленный из диэлектрического материала, объемом 0,5 дм³, в котором размещены электроды из металлического вольфрама в виде прутка диаметром 3 мм. Межэлектродный промежуток заполнен дробленой стружкой из сплава ВК6. Толщина слоя загрузки составляла 15 мм, расстояние между электродами 58 мм. Источник питания формирует импульсы напряжения длительностью 15 мкс с амплитудой 1000 В и частотой следования до 1000 имп/с. Максимальный ток разряда составлял 250 А. Источник питания построен по принципу разряда емкостного накопителя на нагрузку через быстродействующий тиристор и импульсный трансформатор.

Продолжительность одной стадии диспергирования 10 мин. После завершения каждой стадии диспергирования установку выключали. Слой образовавшейся суспензии над дисперсной металлической загрузкой декантировали, твердые продукты разделяли на фракции седиментацией или отстаивали для сгущения. Затем в реактор заливали следующую порцию рабочей жидкости для проведения процесса диспергирования, включали установку и повторяли процесс диспергирования. Влажные осадки сушили в вакуумном сушильном шкафу вначале при температуре не более 40 °С, а затем доводили до постоянного веса при 100 °С. Полученные порошки исследовали путем измерения удельной поверхности, распределения частиц по размерам, изучения фазового состава и морфологии. Величину удельной поверхности полученных из сплава ВК6 порошков определяли по тепловой десорбции азота с помощью анализатора удельной поверхности и пористости «Сорбтометр М» (ЗАО «Катакон», РФ), программное обеспечение которого на основании полученных экспериментальных данных автоматически рассчитывало величину удельной поверхности исследуемого образца по методу БЭТ (Брунауэра, Эммета, Тейлора).

Распределение частиц по размерам исследовали с помощью дисковой центрифуги CPS Disk Centrifuge DC24000 (CPS Instruments, США) в этиловом спирте. Центрифуга CPS – анализатор размера частиц в диапазоне от 5 нм до 75 мкм в коллоидных растворах. Она разделяет частицы по размерам при помощи центробежной седиментации в жидкой среде. Возможно измерение частиц практически любой плотности, используя метод анализа CPS [11].

Фазовый состав и структурные параметры образца исследовали на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 на CuK_α -излучении. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PCPDFWIN. Исследование морфологии тонкодисперсных порошков сплава ВК6 проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью микроскопов LEO1455VP («Carl Zeiss») и JEOL 6000 («Nikon Metrology Inc.»).

Результаты экспериментов и их обсуждение. Под действием импульсов электрической энергии между частицами стружки (рис. 1, а), находящимися в межэлектродном промежутке, возникает множество микрозарядов, вызывающих эрозию гранул. Ввиду малых зазоров между контактирующими с каналом разряда частицами основная энергия расходуется на нагрев металла в зонах анодного и катодного пятен на поверхности этих частиц [12], вызывая локальный нагрев металла до температур плавления и кипения. В результате происходят плавление, испарение и разбрызгивание (диспергирование) расплавленного металла. На поверхности подвергнувшейся эрозии частицы металла образуются лунки.

Фракционный состав дробленой стружки представлен в табл. 1, а морфология исходного материала – на рис. 1, а. Первые эксперименты по ЭИД стружки из сплава ВК6 показали, что продукты переработки после высушивания, вероятно, из-за наличия тонкодисперсных частиц, обладающих большой свободной энергией, обусловленной высокой площадью удельной поверхности, образуют конгломераты (рис. 1, б), разрушаемые при истирании. Это обстоятельство в дальнейшем учтено авторами в технологическом процессе переработки. Водные суспензии продуктов переработки сгущали, затем заливали этиловым спиртом и хранили в виде пасты, так как в данном состоянии они способны сохранять свою дисперсность до момента проведения последующей технологической операции.

На рис. 2 приведены микрофотографии образца порошка из сплава ВК6, полученные СЭМ. Согласно представленным изображениям, после ЭИД форма частиц преимущественно сферическая. Присутствуют как крупные (до 20 мкм) частицы, образующиеся в результате плавления и разбрызгивания металла, так и мелкие (50–100 нм), происхождение которых, видимо, связано с испарением металла в области микрозарядов и последующей конденсацией паров. На поверхности крупных частиц хорошо просматриваются очень мелкие отдельные частицы и их агломераты. Кроме того, вокруг сферических частиц видны бесформенные объемные волокнистые образования, которые, вероятнее всего, состоят из продуктов взаимодействия металлов как между собой, так и с рабочей жидкостью (водой). Данные сканирующей электронной микроскопии

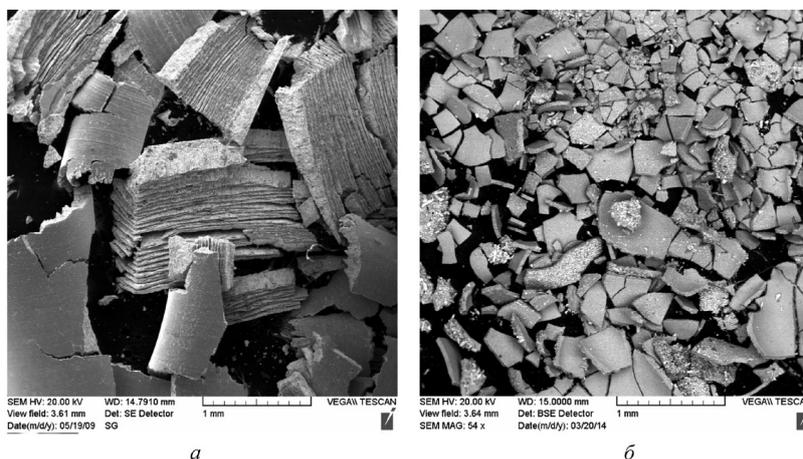


Рис. 1. Морфология исходного материала (а) и продукта ЭИД стружки (б) после высушивания (разрушение произошло при нанесении материала на угольную клейкую ленту)

Таблица 1. Фракционный состав частиц исходного материала (стружки)

Размер частиц, мм	Содержание, мас.%
+1	54
-1+0,5	26,4
-0,5	19,1

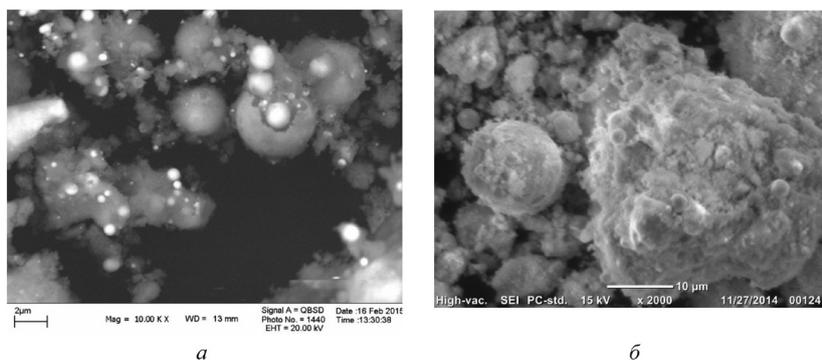


Рис. 2. Микрофотографии диспергированного порошка, полученные СЭМ: *а* – $\times 10000$; *б* – $\times 2000$

(рис. 2) вполне согласуются с результатами седиментационного анализа тонкодисперсных порошков сплава ВК6, проведенного с помощью дисковой центрифуги. На рис. 3, *а* приведено распределение относительного числа частиц к их размерам, а на рис. 3, *б* – зависимость массовой доли частиц от их диаметра. Согласно рис. 3, *а*, размер частиц порошка находится преимущественно в диапазоне 50–200 нм, максимальное количество частиц, входящих в состав исследуемой суспензии, имеют диаметр около 70 нм. Кривая распределения частиц по массам (рис. 3, *б*) имеет два явно выраженных максимума: один для частиц (или агломератов) диаметром в интервале 270–280 нм, а другой для частиц (или агломератов) диаметром в интервале 820–830 нм. В табл. 2 приведены данные по величине удельной поверхности продуктов электроэрозионного диспергирования стружки сплава ВК6 по разным частотным режимам обработки (ЭИД 1–ЭИД 4). Для сравнения приведено значение удельной поверхности фракции менее 63 мкм, отсеянной из исходной пробы дробленой стружки сплава ВК6 М (механическое измельчение).

Таблица 2. Сравнение величин удельной поверхности порошков, полученных ЭИД стружки сплава ВК6 при различных режимах измельчения

Образец	Условия измельчения, вид пробы	d , м ² /г
ВК6 М	Помол в шаровой мельнице, отсев фракции менее 63 мкм исходной пробы	0,13
ВК6 ЭИД 1	400 имп/с, легкая фракция седиментационного разделения порошка	36,99
ВК6 ЭИД 2	400 имп/с, тяжелая фракция седиментационного разделения порошка	10,8
ВК6 ЭИД 3	600 имп/с, валовая проба	12,9
ВК6 ЭИД 4	800 имп/с, валовая проба	13,8

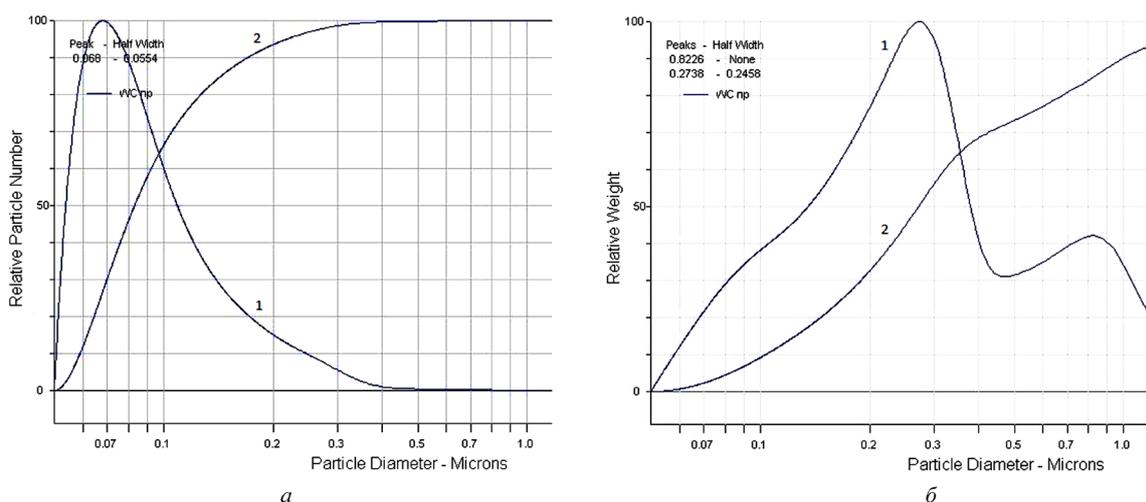


Рис. 3. Результаты седиментационного анализа продуктов диспергирования: *а* – распределение относительного числа частиц к их размерам; *б* – зависимость массовой доли частиц от их диаметра (*1* – номинальные значения, *2* – кривая с накоплением)

Таким образом, величина удельной поверхности порошков сплава ВК6, изготовленных электроискровым методом, более чем в сто раз превышает эту величину для фракции менее 63 мкм, полученной механическим измельчением. Согласно данным рентгенофазового анализа, (табл. 3), продукты диспергирования состоят как минимум из пяти компонентов, что свидетельствует о неоднородном распределении элементов и их соединений в сплаве.

Т а б л и ц а 3. Данные рентгенофазового анализа порошков, полученных из сплава ВК6

Состав фазы	Содержание, мас.%	Межплоскостные расстояния
$W_2C_{0,84}$	10,31	a: 5,1579; c: 4,6943
Co	2,5	a: 3,52
WC	0,62	a: 2,9181; c: 2,8466
Co_3W_3C	86,06	a: 11,1047
W	0,51	a: 3,1337

Заключение. Таким образом установлено, что методом электроискрового диспергирования из отходов твердых сплавов можно получать тонкодисперсные порошки с преимущественным размером частиц в диапазоне от 50 до 200 нм. Результаты проведенных исследований показали принципиальную возможность применения технологии ЭИД для получения тонкодисперсных порошков из отходов твердого сплава, пригодных для повторного использования в качестве высокоактивных добавок при создании инструмента и покрытий.

Список использованной литературы

1. Современное состояние и перспективы развития электрохимической переработки вольфрамсодержащих отходов твердых сплавов / Э. У. Курчки [и др.] // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2006. – №. 6. – С. 50–56.
2. Способ переработки отходов твердого сплава ВК8 электроэрозионным диспергированием: пат. RU 2 443 507 С2 РФ, МПК В22F 9/14, С22В 7/00, В23Н 1/00 / М. И. Дворник, Т. Б. Ершова; Институт материаловедения хабаровского научного центра дальневосточного отделения Российской академии наук – № 009133493/02; заявл. 07.09.09; опубл. 20.03.12 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. –2012. № 6.
3. Афанасьев, Л. Н. Технологические основы подготовки твердосплавных порошков из отходов металлургического производства / Л. Н. Афанасьев, М. Н. Верещагин, Г. Г. Горанский; Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет». Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого» // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 161.
4. Исследование процессов структуро- и фазообразования порошковых смесей на основе отходов твердых вольфрамсодержащих сплавов при их механосинтезе и высокоскоростном механическом диспергировании для получения порошковых композиций / М. Н. Верещагин [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 1. – С. 110–114.
5. Исследование физико-технологических свойств порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е. В. Агеев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12, ч. 2. – С. 336–340.
6. Малышев, В. В. Ресурсосберегающие способы переработки отходов твердых сплавов карбид вольфрама–кобальт и экстракции вольфрама из вольфрамовых концентратов / В. В. Малышев, А. И. Габ // Теоретические основы химической технологии. – 2007. – Т. 41, №. 4. – С. 461–466.
7. Агеев, Е. В. Выбор метода получения порошковых материалов из отходов спеченных твердых сплавов / Е. В. Агеев, Б. А. Семенихин // Изв. Самарск. научн. центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН. 2009. – Спец. вып.: Актуальные проблемы машиностроения. – 2009. – С. 12–15.
8. Агеев, Е. В. Особенности технологии получения порошковых наплавочных материалов методом электроэрозионного диспергирования отходов твердых сплавов для наплавки шеек коленчатых валов / Е. В. Агеев, М. Е. Сальков // Технология металлов. – 2008. – № 5. – С. 34–37.
9. Журавков, С. П. Определяющая роль электроимпульсных способов получения нанопорошков алюминия на особенности их взаимодействия с водой и фазовый состав продуктов / С. П. Журавков, Г. Л. Лобанова, А. В. Пустовалов // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/3. – С. 38–42.
10. Properties of Silver Nanoparticles Prepared by the Electric Spark Dispersion Method // Advanced Materials Research / S. P. Zhuravkov [et al.]. – 2014. – Vol. 872. – P. 74–78.
11. Fitzpatrick S. T. U. S. Patent 5,786,898, July 28, 1998
12. Головейко, А. Г. Кинетика выброса жидкой фазы вещества электродов при электрическом разряде / А. Г. Головейко // Изв. вузов. Энергетика. – 1966. – № 6. – С. 83–88.

Поступила в редакцию 06.11.2015

УДК 536.46: 621.762

*А. И. ЛЕЦКО, Т. Л. ТАЛАКО, Н. М. ПАРНИЦКИЙ***ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ХРОМА НА СТОЙКОСТЬ
К ОКИСЛЕНИЮ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА НА ОСНОВЕ β -FeAl,
УПРОЧНЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯМИ Al_2O_3** *Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: skeyone@rambler.ru*

Представлены результаты исследований влияния структурного состояния хрома в композиционном СВС-порошке FeAl(Cr)/Al₂O₃ на его стойкость к окислению. Для изучения возможности легирования моноалюминидом железа хромом в процессе синтеза использовали реакционные смеси, содержащие в качестве источника хрома порошки оксида хрома или сплава ПХ-30. Порошки получали методом механоактивируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (МАСВС). Испытания на циклическое окисление проводили при температуре 700–1000 °С в атмосфере воздуха в течении 2 ч. В случае использования для легирования интерметаллида сплава ПХ-30 полученный порошок проявляет больший прирост массы в отличие от порошка, синтезированного из реакционной смеси, содержащей оксид хрома, в котором хром не только легировал алюминид, но и присутствовал в свободном состоянии.

Ключевые слова: алюминид железа, легированный хромом, композиционный порошок, реакционная смесь, механоактивируемый самораспространяющийся высокотемпературный синтез (МАСВС).

*A. I. LETSKO, T. L. TALAKO, N. M. PARNITSKY***EFFECT OF STRUCTURAL CONDITION OF CHROMIUM ON OXIDATION RESISTANCE
OF COMPOSITE POWDER BASED ON β -FeAl REINFORCED WITH Al_2O_3 INCLUSIONS***Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
skeyone@rambler.ru*

The results of studies of effect of structural state of chromium in the composite SHS-powder FeAl(Cr)/Al₂O₃ on its resistance to oxidation are presented. To study the possibility of alloying of mono-aluminide iron with chromium, the synthesis reaction mixture containing a source of chromium as chromium oxide powders or alloy PX-30 were used. Powders were prepared by self-propagating mechanoactivated high-temperature synthesis (MASHS). Cyclic oxidation tests were conducted at a temperature of 700–1000 °C in an air atmosphere for 2 hours. In the case of alloying the intermetallic alloy PX-30, the resultant powder exhibits a greater weight gain in contrast to powders prepared from a reaction mixture comprising a chromium oxide in which chromium is not only alloyed aluminide but is present in a free state.

Keywords: aluminide iron alloyed chromium, composite powder, reaction mixture, mechanoactivated high-temperature synthesis (MASHS).

Введение. Интерметаллидные сплавы на основе алюминидов представляют класс материалов, которые характеризуются уникальными свойствами для конструктивных применений при повышенной температуре в неблагоприятной окружающей среде. Их основные достоинства – прочность при повышенных температурах, стойкость к окислению и коррозии, сравнительно низкая плотность и высокая температура плавления. При этом они более легкие и дешевые, чем многие жаропрочные сплавы на никелевой основе [1–4]. Некоторые из данных сплавов в настоящее время широко используются для производства ключевых деталей и защитных покрытий, работающих при высоких температурах в таких отраслях, как авиа- автомобиле- и энергостроение [5].

Известно, что среди различных алюминидов железа наилучшей стойкостью к высокотемпературному окислению при высоких механических свойствах обладает β -FeAl (37–49 ат.% Al),

который имеет фазовую структуру $\beta 2$ (CsCl-тип) [6,7]. Однако основным недостатком сплава β -FeAl является его низкая механическая прочность выше 600 °С из-за низкого сопротивления ползучести, препятствующего его высокотемпературному применению [8]. Для решения этой проблемы материал либо упрочняют добавками дисперсных оксидов (Y_2O_3 , ZrO_2 , Al_2O_3), или используют в качестве защитных покрытий на основе, имеющей хорошую механическую прочность при высоких температурах, но относительно низкую коррозионную стойкость [9–11].

Однако даже при относительно высоком содержании Al скорость окисления β -FeAl оказывается слишком высокой [12] по сравнению с другими суперсплавами на основе алюминия, такими как FeCrAl (например, FeCrAlloy и MA956), а уровень сопротивления отслоению оксидной пленки оказывается неудовлетворительным из-за формирования поверхностных пустот [13].

Проведенные исследования [14–17] показали, что добавки 2–10 мас.% Cr имели положительный эффект на механические свойства и на коррозионную стойкость при высоких температурах таких интерметаллидов, как Ni_3Al , Fe_3Al , $NiAl$, $TiAl$. Однако для оценки влияния структурного состояния хрома на стойкость к окислению $\beta 2$ -FeAl данных этих работ недостаточно.

Цель настоящей статьи – исследование влияния структурного состояния хрома на стойкость к окислению композиционного порошка на основе алюминиды железа, упрочненного включениями Al_2O_3 .

Материалы и методы испытаний. Для исследования выбраны композиции $Al_{0.4}Fe_{0.6}(Cr)/Al_2O_3$, содержащие 92–94 мас.% интерметаллида Fe – 40 ат.% Al и 6–8 мас.% оксида. Для изучения возможности легирования моноалюминиды железа хромом в процессе синтеза использовали реакционные смеси, содержащие в качестве источника хрома порошки оксида хрома ($Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + Al + Fe$) или сплава ПХ-30 ($ПХ-30 + Fe_2O_3 + Al$). Содержание хрома в порошках варьировали от 6,0 до 18,53 мас.%.

Порошки получали методом МАСВС. Благодаря высоким скоростям химических реакций в активированных материалах и пониженным температурам синтеза, методом МАСВС можно успешно получать требуемые композиционные материалы [18, 19].

Микроструктуру полученных порошков исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом (оптические микроскопы «Polyvar» (Австрия) и «Neophot-20» (Германия); сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения «Mira» фирмы Tescan, (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA 350» фирмы Oxford Instruments, Англия).

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK_α -монохроматизированном излучении с использованием системы автоматизации, включающей в себя все функции управления гониометром и программную часть с пакетом программ по сбору, обработке и анализу полученных данных. Сбор и обработку информации осуществляли с помощью программы WinDif. Расшифровку фазового состава полученной рентгенограммы проводили в программе Crystallographica SearchMatch (Oxford), микродюрметрические исследования – на микротвердометре «Akashi» (Япония) при нагрузках 25 и 200 г. Стойкость порошков к окислению оценивали по приросту массы в процессе циклического окисления образцов в воздушной атмосфере в печи с естественной конвекцией. Образцы порошков выдерживали при 700 °С, 900 °С, 1000 °С в течение 2 ч.

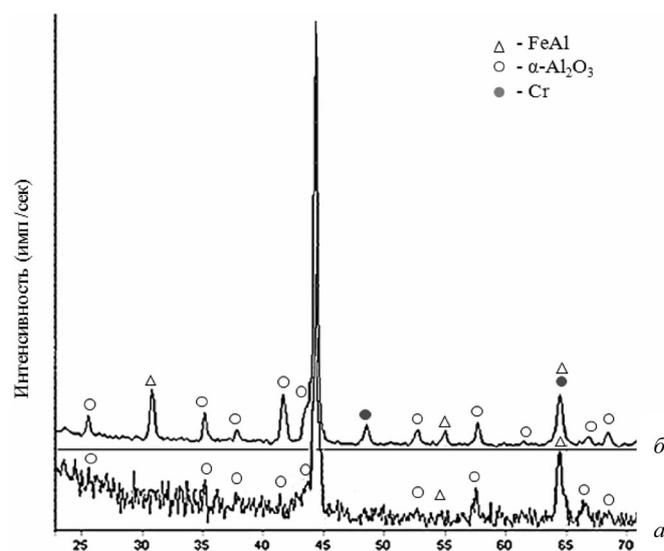


Рис. 1. Дифрактограммы композиционных порошков FeAl(Cr)/ Al_2O_3 , полученных методом МАСВС из реакционных смесей: а – ПХ-30 + Fe_2O_3 + Al, б – Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + Al + Fe

в себя все функции управления гониометром и программную часть с пакетом программ по сбору, обработке и анализу полученных данных. Сбор и обработку информации осуществляли с помощью программы WinDif. Расшифровку фазового состава полученной рентгенограммы проводили в программе Crystallographica SearchMatch (Oxford), микродюрметрические исследования – на микротвердометре «Akashi» (Япония) при нагрузках 25 и 200 г. Стойкость порошков к окислению оценивали по приросту массы в процессе циклического окисления образцов в воздушной атмосфере в печи с естественной конвекцией. Образцы порошков выдерживали при 700 °С, 900 °С, 1000 °С в течение 2 ч.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Дифрактограммы синтезиро-

ванных порошков представлены на рис. 1. По данным рентгенофазового анализа, в обоих случаях основными идентифицируемыми фазами являются FeAl и α -Al₂O₃. Отражения от исходных фаз в продуктах синтеза не идентифицируются. Кроме того, в порошке, полученном из реакционной смеси, содержащей оксид хрома, идентифицируется незначительное количество металлического хрома (рис. 1, б).

Отсутствие самостоятельных рефлексов, характерных для металлического хрома и его соединений, на дифрактограмме порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей ПХ-30 (рис. 1, а), может свидетельствовать о растворении хрома в решетке моноалюминида железа в процессе синтеза. Это подтверждается данными микрорентгеноспектрального анализа (рис. 2, а).

На дифрактограмме порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, практически не видно линии сверхструктурного отражения ($2\theta \approx 31$ град), что является показателем разупорядоченной структуры интерметаллида. Вероятно, в процессе синтеза растворенный хром при относительно быстром нагреве и охлаждении не успел покинуть решетку железа.

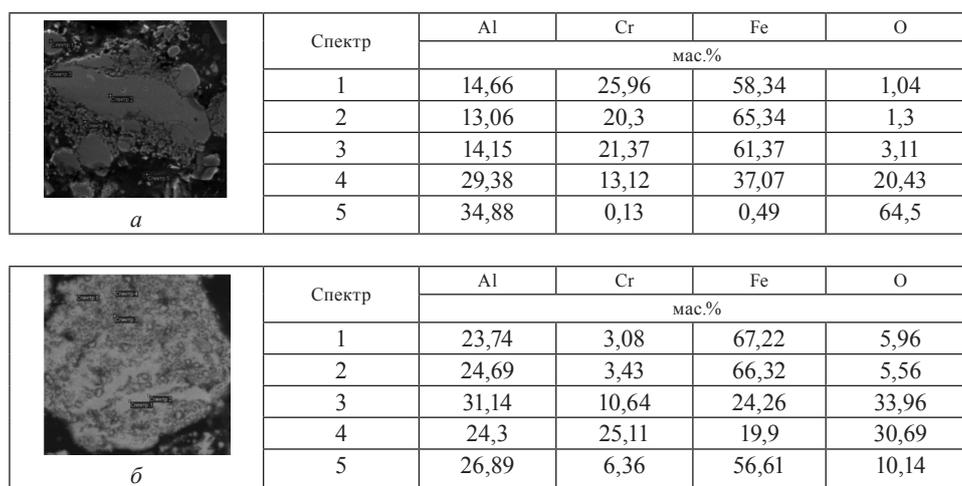


Рис. 2. Микроструктуры и таблицы результатов локального микрорентгеноспектрального анализа синтезированных порошков на основе моноалюминида железа, полученных из реакционных смесей ПХ-30 + Fe₂O₃ + Al (а) и Fe₂O₃ + Cr₂O₃ + Al + Fe (б)

По результатам полуколичественного рентгенофазового анализа, относительное содержание фаз составляет: 94% фазы FeAl и 6% оксида α -Al₂O₃ для порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, и 87,3% FeAl, 6% Al₂O₃ и 6,6% Cr для порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей оксид хрома.

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что в порошке, полученном с использованием порошка сплава ПХ-30 (рис. 2, а), оксидные частицы расположены, главным образом, по периферии интерметаллидных частиц, в то время как в порошке, полученном из реакционной смеси, содержащей оксид хрома (рис. 2, б), оксидные частицы имеют более однородное распределение в объеме материала. При этом хром обнаруживается как в составе интерметаллида (до 3,5 мас.%), так и в виде отдельных включений в областях оксидных частиц.

Микротвердость обоих порошков практически одинакова и составляет $H_{v25(N10)} = 300$ (170–464) кгс/мм² для порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, и $H_{v25(N10)} = 295$ (168–464) кгс/мм² для порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей оксид хрома.

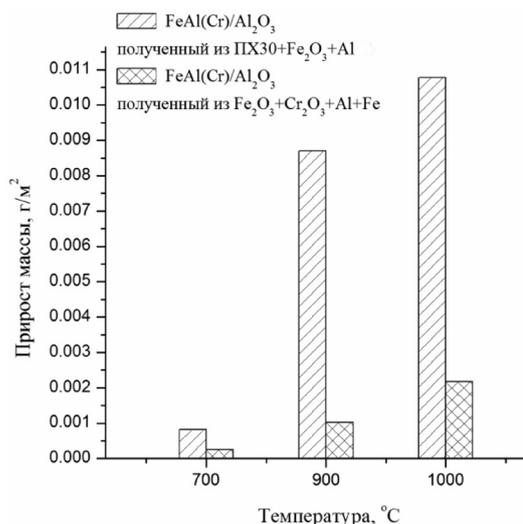


Рис. 3. Сравнительная стойкость СВС-порошков в условиях циклического окисления в воздушной атмосфере печи при 700–1000 °C в течение 2 ч

Результаты циклических испытаний синтезированных порошков на стойкость к окислению представлены на рис. 3. Из диаграммы можно отметить, что величина прироста массы для обоих порошков возрастает с увеличением температуры. Несмотря на высокое содержание растворенного хрома (18,53 мас.%), в интерметаллиде композиционного порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, удельный прирост массы в диапазоне 700–1000 °С при том же соотношении железа и алюминия и концентрации оксида алюминия значительно больше по сравнению с порошком, полученным из реакционной смеси, содержащей оксид хрома, в котором хром не только растворен в интерметаллиде (до 3,5 мас.%), но и присутствует в свободном состоянии. Сравнительные дифрактограммы указанных порошков после окисления представлены на рис. 4.

Сравнение дифрактограмм порошков после окисления показало, что их фазовый состав почти полностью соответствует составу исходных синтезированных композиций и включает FeAl и α -Al₂O₃, что свидетельствует в пользу высокой жаростойкости полученных композиций (рис. 4). Структура интерметаллида в порошке, полученном из реакционной смеси, содержащей ПХ-30 (рис. 4, а), становится более упорядоченной, что особенно заметно по появлению характерного пика на $2\theta \sim 31$ град при 900 и 1000 °С. Достаточно высокая жаростойкость порошка, синтезированного из реакционной смеси, содержащей оксид хрома, вероятно, является следствием наличия в его составе свободного хрома по сравнению с порошком, полученным из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, в котором хром был растворен.

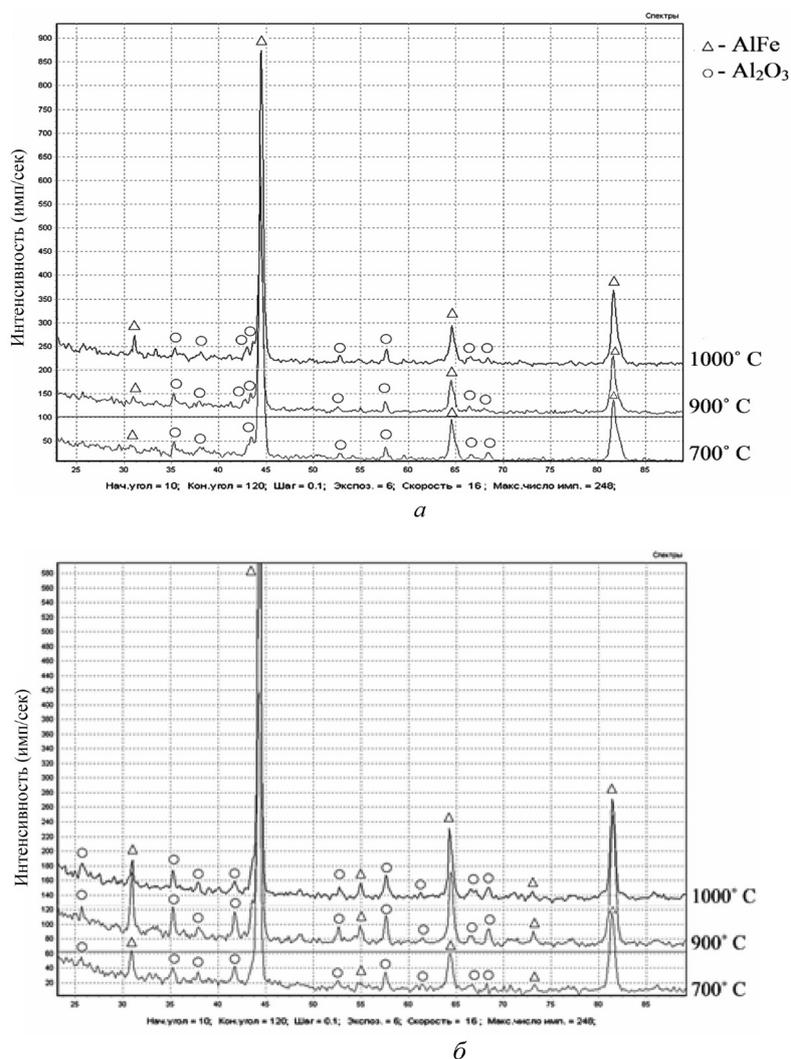


Рис. 4. Дифрактограммы композиционных порошков FeAl(Cr)/Al₂O₃ после окисления из реакционной смеси, содержащей ПХ-30 (а), и из реакционной смеси, содержащей оксид хрома (б)

Согласно исследованиям [20–23], окисление β -FeAl-сплавов с высоким содержанием Al сопровождается образованием переходной зоны из метастабильного θ -Al₂O₃. Этот процесс сопровождается постоянным расходом Al для роста θ -Al₂O₃ (в основном на начальном этапе процесса окисления) до образования более жаростойкого α -Al₂O₃. Кинетика изотермического окисления β -FeAlCr [24] показала, что дополнительное легирование Cr ускоряет процесс преобразования θ -Al₂O₃ в α -Al₂O₃. Авторы [24] предположили, что процесс перехода от θ -Al₂O₃ к α -Al₂O₃ был ускорен благодаря образованию в тонком слое θ -Al₂O₃ фазы α -Cr₂O₃, которая также может формироваться на начальном этапе окисления. В [25] высказано предположение, что поскольку и α -Cr₂O₃ и α -Al₂O₃ имеют одинаковую пространственную группу R3c и α -корундовую структуру, присутствие α -Cr₂O₃ способствует кристаллизации α -Al₂O₃ на свободной поверхности газ/пленка θ -Al₂O₃. При этом процесс перехода $\theta \rightarrow \alpha$ ускоряется при наличии большого количества центров кристаллизации α -фазы на θ -слое. Отсутствие на дифрактограммах порошков после окисления характерного пика θ -Al₂O₃ на угле 33 град [14] также свидетельствует в пользу достаточно быстрого образования и роста пленки из α -Al₂O₃.

В [24] показано, что с увеличением содержания хрома в покрытиях β -FeAlCr, кинетика окисления была быстрее, отсюда можно предположить, что достаточно высокий прирост массы порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, может быть связан с формированием большего количества Cr₂O₃ уже на начальной стадии окисления.

Присутствие в составе синтезированных порошков 6 мас.% Al₂O₃, вероятно, является одним из факторов, способствующих росту α -Al₂O₃.

Заключение. Из реакционных смесей методом механоактивируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получены композиционные порошки на основе моноалюминиды железа, легированного хромом и упрочненного тугоплавкими включениями Al₂O₃. Установлено, что легированный хромом моноалюминид железа может быть сформирован как в системах, полученных с использованием алюминотермической реакции восстановления оксида хрома, так и при использовании в качестве исходного порошка сплава ПХ-30.

Более высокая стойкость к окислению порошка, полученного из реакционной смеси, содержащей оксид хрома, по сравнению с порошком, полученным из реакционной смеси, содержащей ПХ-30, несмотря на высокое содержание хрома в последнем, может быть связана с формированием включений свободного хрома и упорядоченной β 2-структуры. Однако для уточнения этого предположения требуются дополнительные исследования.

Список использованной литературы

1. Stoloff, N. S. Iron aluminides: present status and future / N. S. Stoloff // Materials Science and Engineering. – 1998. – Vol. A 258. – P. 1–14.
2. Deformability recrystallization of Fe-Al intermetallic phase – base alloy / D. Kuc [et al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 20. – P. 143–146.
3. Kuc, D. The influence of deformation on the plasticity and structure of Fe₃Al–5Cr alloy / D. Kuc, G. Niewieski, I. Bednarczyk // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 22/1. – P. 27–30.
4. Kang, B. S. J. Evaluation of fracture behaviour of iron aluminides / B. S. J. Kang, R. Cisloiu, // Theoretical and Applied Fracture, Mechanics. – 2006. – Vol. 45. – P. 25–40.
5. Sikka, V. K. Oxidation and Corrosion of Intermetallic Alloys / V. K. Sikka, G. Welsch, P. D. Desai // Metal Information Analysis Centre. – West Lafayette, Indiana, 1996.
6. Stott, F. H. Oxidation-sulphidation of iron aluminides / F. H. Stott, H. J. Grabke, M. Schutze // Oxidation of Intermetallics. – Wiley-VCH, Weinheim, 1997.
7. High temperature corrosion behaviour of iron aluminides and iron aluminium-chromium alloys / J. Klower [et al.] // Oxidation of intermetallics. – Wiley-VCH, Weinheim, 1997.
8. Morris, D. G. Development of high strength, high ductility and high creep resistant iron aluminide / D. G. Morris, M. A. Muñoz-Morris, J. Chao // Intermetallics. – 2004. – Vol.12. – P. 82–826.
9. Elevated Temperature Coatings / P. F. Tortorelli [et al.]. – Science and Technology, TMS, Warrendale, PA, 1995.
10. Pint, B. A. Oxidation of Intermetallics / B. A. Pint, P. F. Tortorelli, I. G. Wright. – Wiley, New York, 1996.
11. Subramanian, R. Iron-aluminide-Al₂O₃ composites by in situ displacement reactions: processing and mechanical properties / R. Subramanian // Mater. Sci. Eng. A. – 1998. – Vol. 254. – P. 119–128.
12. High temperature corrosion of B2 iron aluminides / A. Mignone [et al.] // Corros. Sci. – 1998. – Vol. 40. – P. 1331.
13. Grabke, H. J. Oxidation of NiAl and FeAl. Intermetallics / H. J. Grabke // Intermetallics. – 1999. – Vol. 7.

14. *Grabke, H. J.* Oxidation of Intermetallics / H. J. Grabke, M. Schütze. – Wiley, New York, 2007.
15. *Tortorelli, P. F.* Compositional Influences of the High Temperature Corrosion Resistance of Iron Aluminides, in Processing, Properties, and Applications of Iron Aluminides / P. F. Tortorelli, J. H. DeVan. – The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, 1994.
16. *DeVan, J. H.* Oxidation Behaviour of Fe₃Al and Derived Alloys, Oxidation of High Temperature Intermetallics / J. H. DeVan. – TMS, Warrendale, 1989.
17. *Halfa, H.* Oxidation Behavior of Fe₃Al-5Cr- (0, 0.5, 1.5) Ti Alloys at Temperature Ranges from 800 °C to 1200 °C / H. Halfa // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2010. – Vol. 9. – P. 775–786.
18. *Киселева, Т. Ю.* Перераспределение атомов хрома между компонентами нанокompозита интерметаллид/оксид в процессе его получения / Т. Ю. Киселева [и др.] // Вестн. МГУ. Сер. 3. «Физика, астрономия». – 2008. – № 4.
19. Особенности самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нанокompозиционных порошков интерметаллид/оксид с использованием механокompозитов-прекурсоров / Т. Л. Талако [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2009. – № 5.
20. *Hindam, H. M.* Microstructure of α-Al₂O₃ on Ni–Al Alloys: Internal Precipitation and Transition to External Scale / H. M. Hindam, W. W. Smeltzer // J. Electrochem. Soc. – 1980. – Vol. 127 – P. 1622–1630.
21. *Doychak, J.* Oxidation of High Temperature Intermetallics / J. Doychak, J. L. Smialek, C. A. Barrett // The Minerals, Metals and Materials Society. – Warrendale, PA, 1989.
22. *Smialek, J. L.* Oxidation Behavior of FeAl + Hf, Zr, B / J. L. Smialek, J. Doychak, D. J. Gaydosh // Oxidation of Metals – 1990. – Vol. 34. – P. 259–27.
23. *Zhenyu, Liu* Effects of Chromium on the Oxidation Performance of β-FeAlCr Coatings / Liu Zhenyu, Wei Gao // Oxidation of Metals. – 2000. – Vol. 54. – P. 189–209.
24. *Doychak, J.* Transient Oxidation of Single-Crystal NiAl / J. Doychak, J. L. Smialek, T. E. Mitchell // Metall. Trans. – 1989. – Vol. 20A.
25. *Doychak, J.* TEM Studies of Oxidized NiAl and Ni₃Al Cross Sections / J. Doychak, M. Rühle // Oxid. Met. – 1989. – Vol. 31.

Поступила в редакцию 04.10.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

УДК 621.923

Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ, М. М. ДЕЧКО, Е. В. СЕНЧУРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: senchurov@tut.by*

Решена задача оптимизации процесса магнитно-абразивной обработки радиусных цилиндрических поверхностей на основе стохастических моделей, построенных по результатам статистического анализа экспериментальных данных, полученных методами математического планирования экспериментов. Изучены зависимости шероховатости обработанной поверхности и удельного массового съема от технологических факторов, описанные регрессионными моделями в виде полиномов третьего порядка. Выявлено и объяснено сложное взаимодействие и взаимовлияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки радиусных цилиндрических поверхностей колец шарикоподшипников. По результатам многокритериальной оптимизации определены значения технологических режимов, обеспечивающих повышение удельного массового съема при ограничениях на допустимую шероховатость поверхности.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, технологические режимы, удельный массовый съем, шероховатость, регрессионный анализ, оптимизация

L. M. AKULOVICH, L. E. SERGEEV, M. M. DECHKO, E. V. SENCHUROV

MODELING OF MAGNETIC ABRASIVE FINISHING PROCESS AND OPTIMIZATION OF ITS TECHNOLOGICAL MODES

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: senchurov@tut.by*

An optimization of magnetic-abrasive finishing process for radial cylindrical surfaces has been performed. The optimization relies on stochastic models derived from statistical analysis of experimental data obtained by applying experimental design techniques. Dependencies of surface roughness and specific material removal rate from technological modes described by regression models in the form of 3rd-degree polynomial functions have been studied. Complex relationships and interdependencies between technological modes of magnetic-abrasive finishing process for radial cylindrical surfaces of ball-bearing races have been discovered and explained. As the result of the multi-criteria optimization, such parameters of technological modes have been identified, that ensure greater specific material removal rate within the targeted surface roughness tolerances.

Keywords: magnetic abrasive finishing process, technological modes, the mass removal, surface roughness, regression analysis, optimization.

Надежность и долговечность большинства деталей машин определяются состоянием их поверхностных слоев, в которых происходит концентрация остаточных напряжений, наклепа и других дефектов, образующихся при механической обработке. Известно также, что разрушение деталей начинается именно с контактирующих поверхностей. Поэтому повышение эксплуатационных свойств деталей машин во многом определяется совершенством технологических процессов их обработки [1].

Важную роль в формировании физико-механических свойств и геометрических параметров поверхностного слоя играют методы финишной обработки, от способа реализации которых зависит также ряд технико-экономических показателей (работоспособность, долговечность, себестоимость). В свою очередь степень воздействия того или другого метода обработки на свойства

поверхностного слоя зависит от технологических режимов, поскольку их различное сочетание может привести к разным результатам как по точности, так и по качеству поверхностного слоя.

При финишной обработке, как и при других видах механической обработки, выявление взаимного влияния технологических режимов приходится проводить опытным путем и устанавливать его количественное значение посредством поиска эмпирических формул. Анализ полученных эмпирических зависимостей – один из наиболее широко используемых методов исследования способов финишной обработки резанием, в том числе и магнитно-абразивной обработки (МАО) [2] (рис. 1). Исследования по методу многофакторного планирования экспериментов [3] проводятся путем изучения функции отклика при изменении ряда варьируемых факторов и фиксации остальных факторов, статистической проверки адекватности аппроксимирующих функций, их последующего анализа, построения графиков, таблиц и т. п. Математические методы планирования экспериментов представляют собой надежное средство рациональной организации научно-исследовательских и опытно-технологических работ [3], так как сокращают сроки экспериментальных исследований и повышают эффективность поиска функциональных зависимостей.

Цель данного исследования – определение способа поиска оптимального сочетания технологических режимов МАО поверхностей деталей для достижения высоких показателей качества и точности.

Для нахождения функции отклика используют метод регрессионного анализа [3, 4], который позволяет определить коэффициенты регрессионного уравнения, отражающего искомую зависимость нормально распределенной случайной величины с постоянной дисперсией от независимых переменных факторов. Обычно уравнение регрессии является степенным полиномом, что эквивалентно разложению неизвестной функции отклика в ряд Тейлора:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \dots + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \dots, \quad (1)$$

где y – параметр оптимизации; x_i – факторы в виде независимых переменных; b_i – **искомые коэффициенты регрессии**.

Известно, что в общем случае исследование процесса, связанного с нахождением приближенной эмпирической зависимости, происходит при недостаточном знании механизма его протекания. Поэтому всякая модель является средством и инструментом для изучения и прогнозирования процесса, так как позволяет установить статистические связи между выбранными факторами и функцией отклика, отобрав из их большого числа необходимые и наиболее значимые факторы. Рассматриваемая техническая система (процесс МАО) по своей физической природе относится к классу стохастических (вероятностных) систем, так как основной режущий инструмент представляет собой совокупность абразивных частиц, параметры которых имеют некоторое статистическое распределение, а на их взаимодействие с обрабатываемой поверхностью влияет множество случайных факторов [5]. Предпринимавшиеся попытки описания процесса с помощью аналитических моделей дают лишь приблизительные результаты, не позволяющие в конкретных условиях управлять данным процессом с достаточной точностью.

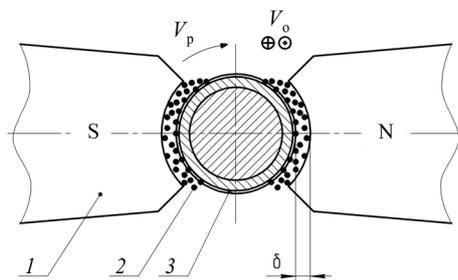


Рис. 1. Схема магнитно-абразивной обработки цилиндрических поверхностей: 1 – полюсные наконечники; 2 – ферроабразивный порошок; 3 – обрабатываемая заготовка; δ – рабочий зазор; V_p – скорость резания; $V_о$ – скорость осцилляции

Проведенные исследования [6] при использовании локально-интегральной модели процесса МАО отверстий (в частности, игольчатых подшипников 4074912 ГОСТ 4657–82, сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 61–65 HRC₃, $D \times d \times B = 85 \times 60 \times 25$ мм) и его описании в виде квадратичного полинома позволили выявить наиболее значимые факторы и определить интервалы их варьирования. Применение данного квадратичного полинома позволило получить функцию отклика. Однако исследования МАО, например, цилиндрических радиусных поверхностей беговых дорожек шариковых подшипников 1000812 ГОСТ 8338–75 (рис. 2), геометрические параметры которых имеют более сложную зависимость от технологических режимов МАО, выявили неадекватность регрессионных моделей второго порядка

в выбранном диапазоне варьирования факторов. Поэтому для описания процесса в качестве регрессионных моделей взяты полиномы третьего порядка. В данной работе решены задачи моделирования и оптимизации технологических режимов МАО радиусных цилиндрических поверхностей (канавок под уплотнительные кольца, беговых дорожек шариковых подшипников и т. п.) с помощью регрессионного анализа.

В качестве параметров оптимизации выбраны шероховатость обработанной поверхности $Y_1 = Ra$, мкм и производительность процесса, оцениваемая параметром $Y_2 = \Delta g$, мг/(см²·мин) – скорость съема массы металла с единицы площади обработанной поверхности детали с единицы времени (далее удельный массовый съем).

Исследовано влияние следующих факторов технологии МАО: $X_1 = V_p$, м/с – скорость резания (скорость вращения заготовки); $X_2 = V_o$, м/с – скорость осцилляции (скорость возвратно-поступательного движения полюсных наконечников относительно обрабатываемой поверхности); $X_3 = B$, Т – величина магнитной индукции; $X_4 = A$, мм – амплитуда осцилляции полюсных наконечников; $X_5 = Ra_0$, мкм – исходная шероховатость поверхности детали; $X_6 = t$, с – время обработки.

Для проведения эксперимента выбран композиционный ротатальный униформ-план. Для оценки воспроизводимости эксперимента в каждой точке плана выполнено трехкратное дублирование опытов. Уровни варьирования факторов в натуральных и нормированных координатах представлены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Технологический фактор	V_p , м/с	V_o , м/с	B , Т	A , $\times 10^{-3}$ м	Ra_0 , мкм	t , с
Нормированное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Основной уровень (0)	3,50	0,220	0,70	1,40	0,800	60,0
Верхний уровень (+1)	4,33	0,255	0,80	1,70	0,975	75,0
Нижний уровень (-1)	2,67	0,185	0,60	1,10	0,625	45,0
Звездная точка (+ α) + 2,828	5,85	0,319	0,98	2,25	1,295	102,4
Звездная точка (- α) - 2,828	1,15	0,121	0,42	0,55	0,305	17,6

Анализ функций распределения полученных экспериментальных значений шероховатости и производительности показал их существенное отклонение от нормального закона вследствие сильной левосторонней асимметрии. Для приближения полученных распределений к нормальному закону выполнено логарифмическое преобразование экспериментальных значений исследуемых параметров, т. е. искомые коэффициенты b_i рассчитывались для уравнения (1), представленного в экспоненциальной форме. В результате статистического анализа значимости коэффициентов регрессии и адекватности полученного уравнения установлена зависимость параметра Ra от факторов МАО вида

$$Ra = \exp \left(\begin{array}{l} -2,4217 + 0,0941X_1 + 0,1337X_2 - 0,1814X_3 + 0,2772X_4 + 0,2788X_5 + 0,0497X_6 - \\ -0,0678X_1X_6 + 0,1431X_2X_3 - 0,2166X_2X_4 - 0,0731X_4X_5 - 0,0617X_4X_6 + \\ +0,0688X_1X_2X_3 + 0,0643X_1X_2X_4 - 0,1218X_2X_3X_4 - 0,0484X_2X_3X_5 + \\ +0,1507X_1^2 + 0,0884X_2^2 + 0,1390X_3^2 + 0,0426X_4^2 + 0,0695X_5^2 + 0,0862X_6^2 - \\ -0,0425X_1^3 - 0,0213X_2^3 - 0,0130X_3^3 - 0,03086X_4^3 - 0,0265X_5^3 - 0,0214X_6^3 \end{array} \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой полином 3-й степени от 6 варьируемых факторов в полулгарифмических нормированных координатах. Кроме главных факторов и их степеней статистически значимыми оказались некоторые парные и тройные взаимодействия, что говорит

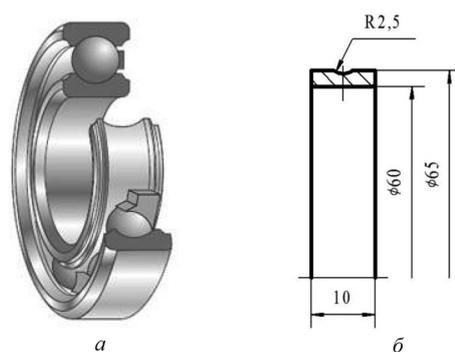


Рис. 2. Шариковый подшипник 1000812 ГОСТ 8338-75: а – 3D-модель; б – эскиз внутреннего кольца

о сложном взаимовлиянии технологических режимов MAO на получаемую шероховатость поверхности. Поэтому аналитическая интерпретация полученной зависимости затруднительна и выполнен поиск минимума функции (2) численным методом. Расчеты показывают, что параметр Ra будет иметь минимальное значение в точке исследованного факторного пространства с координатами табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Значения технологических режимов в точке с минимальной величиной Ra

Технологический фактор	V_p , м/с	V_o , м/с	B , Т	A , $\times 10^{-3}$ м	Ra_o , мкм	t , с
Нормированное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Нормированное значение	-0,363	-2,828	2,828	-2,828	-2,547	-1,046
Натуральное значение	3,19	0,121	0,98	0,55	0,35	44

Оптимальные значения трех факторов находятся на границе исследованных интервалов. Можно получить дальнейшее снижение шероховатости, согласно полученному уравнению регрессии, если уменьшить значения скорости и амплитуды осцилляции и увеличивать величину магнитной индукции.

Аналогично выполнен анализ зависимости значения Δg от факторов MAO, описываемой полученным уравнением регрессии:

$$\Delta g = \exp \left(\begin{array}{l} -0,9973 + 0,0571X_1 + 0,0982X_2 - 0,1791X_3 + 0,2862X_4 + 0,2529X_5 - \\ -0,2412X_6 - 0,0735X_1X_6 + 0,1138X_2X_3 - 0,1961X_2X_4 - 0,0641X_4X_5 + \\ +0,0551X_1X_2X_3 + 0,0597X_1X_2X_4 - 0,0774X_2X_3X_4 + 0,1388X_1^2 + \\ +0,0883X_2^2 + 0,1201X_3^2 + 0,0437X_4^2 + 0,0873X_5^2 + 0,1438X_6^2 - \\ -0,0335X_1^3 - 0,0167X_2^3 - 0,0193X_3^3 - 0,0319X_4^3 - 0,0175X_5^3 - 0,0152X_6^3 \end{array} \right). \quad (3)$$

Численное решение с использованием регрессионной зависимости (3) позволило определить технологические режимы, обеспечивающие максимальное значение Δg (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Значения технологических режимов в точке с максимальным значением Δg

Технологический фактор	V_p , м/с	V_o , м/с	B , Т	A , $\times 10^{-3}$ м	Ra_o , мкм	t , с
Нормированное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Нормированное значение	min	max	min	max	max	-1,376
Натуральное значение	1,15	0,319	0,42	2,25	1,295	40

При сравнении полученных регрессионных уравнений двух исследованных режимов процесса MAO прослеживается подобие в направлении влияния его факторов и их взаимодействий. Это связано с взаимозависимостью параметров Y_1 и Y_2 : наиболее интенсивный сьем металла происходит при более высокой шероховатости и снижается по мере срезания вершин микрорельефа. Поэтому критерии оптимизации (минимум шероховатости и максимум производительности) взаимно противоречивы. Поскольку выполнить оптимизацию процесса возможно только по одному критерию, то второе требование необходимо задавать в виде граничного значения, руководствуясь техническими ограничениями.

В качестве требований к поверхности детали обычно задана максимально допустимая величина Ra , поэтому задача управления технологическим процессом может быть сформулирована как выбор таких режимов обработки, которые обеспечат максимальную производительность обработки при заданном максимально допустимом параметре Ra получаемой поверхности. Таким образом, математическая модель оптимизации процесса MAO будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta g(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\rightarrow \max, \\ Ra(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\leq [Ra], \\ -2,0 \leq (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\leq 2,0. \end{aligned} \quad (4)$$

Область варьирования факторов в нормированных координатах сужена до ± 2 , так как на границах исследованного факторного пространства погрешность предсказания по уравнению регрессии существенно возрастает.

Полученные в результате экспериментов значения шероховатости лежат в диапазоне $Ra = 0,64\text{--}0,032$ мкм. Используемые в качестве ограничений (4) предельно допустимые величины Ra выберем из ряда предпочтительных значений шероховатости 0,63; 0,5; 0,32; 0,25; 0,16; 0,125; 0,08; 0,063; 0,04; 0,032.

Поскольку обе функции, описывающие параметры процесса, являются нелинейными регрессионными уравнениями, то данная задача относится к классу задач нелинейной оптимизации. Для ее решения использован численный метод, реализованный в программе Mathcad.

Расчетные оптимальные значения факторов режимов приведены в табл. 4, графики зависимости параметров в области оптимальных значений факторов – на рис. 3.

Т а б л и ц а 4. Расчетные оптимальные значения факторов и режимов

V_p , м/с	5,16	4,94	4,76	4,35	4,03	2,75	1,84	1,84	1,84
V_o , м/с	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,21	0,21
B , Т	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,832	1,018
$A, \times 10^{-3}$, м	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ra_o , мкм	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
t , с	90	90	90	90	90	90	87,8	90	90
Ra	0,452	0,320	0,250	0,160	0,125	0,080	0,063	0,040	0,032
Δg	9,198	6,846	5,537	3,767	3,042	2,104	1,648	0,771	0,669

Установлено, что для достижения высоких показателей Δg при учете таких режимов, как скорость резания и скорость осцилляции, необходимо гарантировать повышение значений второго параметра (рис. 4, а). Это связано с тем, что рост величины V_o способствует увеличению угла атаки микронеровностей поверхности заготовки режущим контуром ферроабразивной «щетки» и соответственно длине стружки, чем обеспечивается рост массы снимаемого материала. Диапазон низких и высоких значений скорости резания при уменьшении скорости осцилляции характеризуется в первом случае уменьшением величины мощности резания, что снижает эффективность процесса съема материала, во втором случае – проскальзыванием ферроабразивных частиц относительно микронеровностей обрабатываемой поверхности ввиду их подвижно скоординированного состояния в ферроабразивной «щетке». При учете таких параметров, как амплитуда осцилляции A и магнитная индукция B , высокие показатели производительности (рис. 4, б) определяются ростом значений обоих режимных факторов, что объясняется большой жесткостью закрепления частиц ферроабразивного порошка в ферроабразивной «щетке» с увеличением значения магнитной индукции, приводящим к интенсивному отделению стружки от основной матрицы заготовки. Амплитуда осцилляции пропорционально связана со скоростью

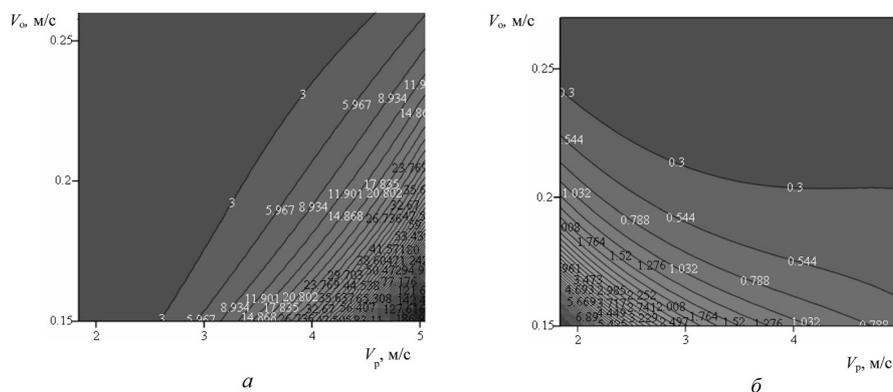


Рис. 3. Зависимости удельного массового съема Δg (а) и шероховатости поверхности Ra (б) в области оптимальных режимов МАО (табл. 4)

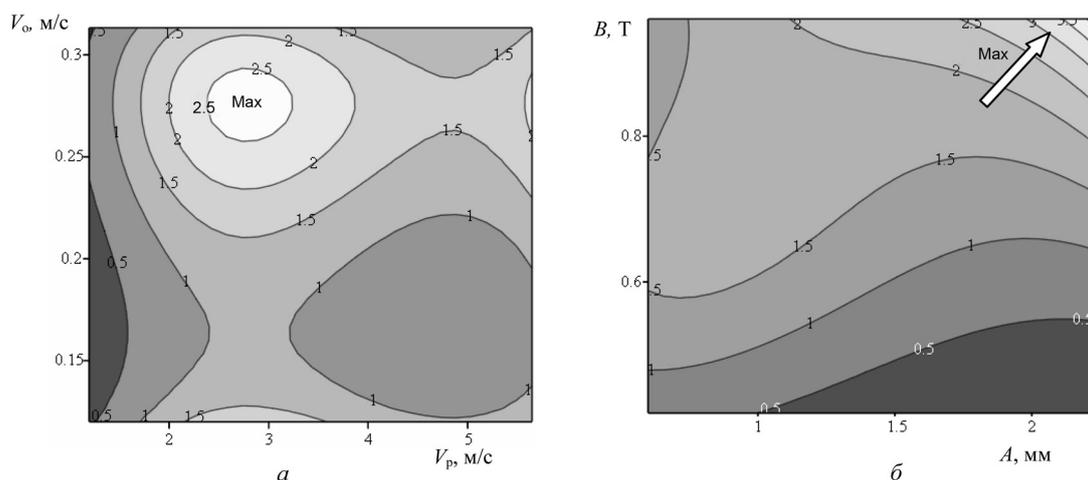


Рис. 4. Зависимости удельного массового съема Δg от скоростей резания и осцилляции (*a*), амплитуды осцилляции и магнитной индукции (*б*)

осцилляции $V_0 = Af$, где f – частота колебаний механизма осцилляции, а ее рост характеризуется увеличением пути резания, что обеспечивает повышение объема снимаемого материала.

Достижение минимальной шероховатости при варьировании скорости резания и времени обработки определяется областью минимума, расположенной в центре координатной плоскости (рис. 5, *a*). Уменьшение времени обработки как при увеличении, так и при снижении скорости резания не позволяет осуществить снятие требуемого слоя материала (в особенности для сложнопрофильной поверхности типа беговой дорожки шарикоподшипника и канавок под уплотнительные кольца). Увеличение времени обработки при уменьшении скорости резания не приводит к снижению величины шероховатости из-за падения мощности резания. В случае повышения

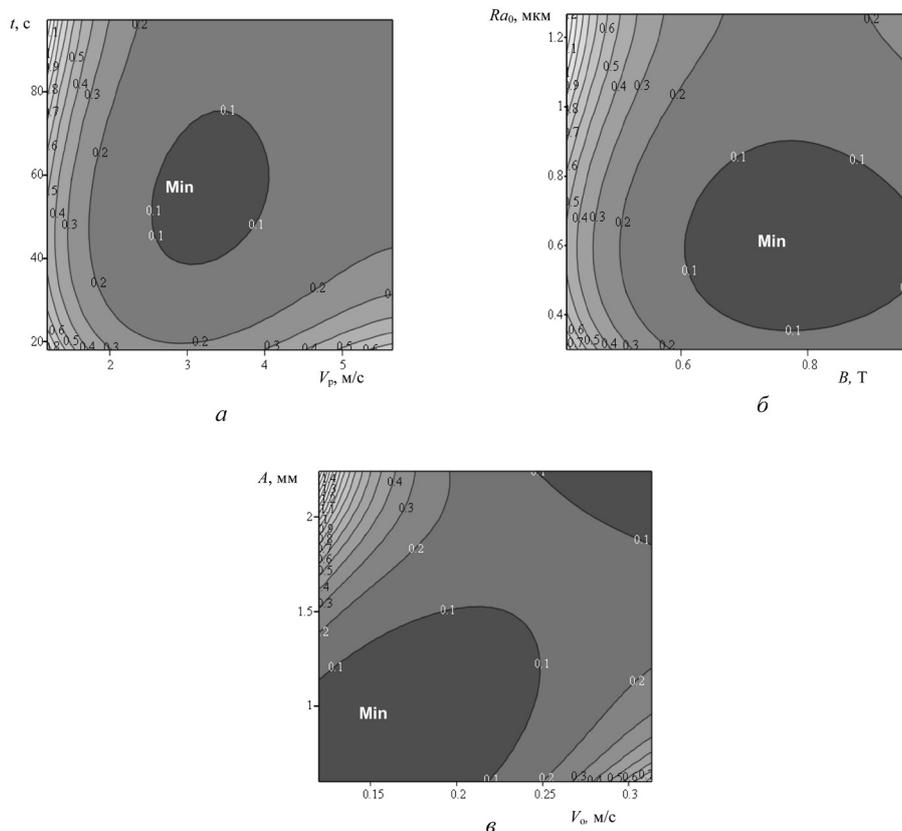


Рис. 5. Зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra от скорости резания и времени обработки (*a*), магнитной индукции и начальной шероховатости (*б*), скорости осцилляции и амплитуды (*в*)

значения скорости резания достичь минимальной величины шероховатости не представляется возможным по причине либо недостаточной мощности резания, либо проявления эффекта про- скальзывания.

На рис. 5, б представлена область минимума величины шероховатости после MAO в осях магнитной индукции и исходной шероховатости поверхности беговой дорожки шарикоподшипника. Наличие низкой исходной шероховатости как при увеличении, так и при уменьшении величины магнитной индукции приводит к росту шероховатости после обработки, так как режущий контур ферроабразивных частиц имеет больший размер, чем шаговый и высотный параметры исходной шероховатости. Важный аспект такого явления заключается в сложном профиле обрабатываемой поверхности, вследствие чего давление ферроабразивной «щетки» и его распределение носят стохастический характер. Повышение исходной шероховатости гарантирует создание присущего процессу MAO микрорельефа, наиболее приближенного к приработанному состоянию поверхности (при малых значениях параметра шероховатости Ra).

На рис. 5, в представлены две области минимума при разных сочетаниях факторов скорости и амплитуды осцилляции, которые расположены противоположно друг другу и определяются тем, что первая область характеризуется снижением значений обоих факторов, вторая – их ростом. Причина данной зависимости заключается в том, что определяющим фактором является частота возвратно-поступательного движения механизма осцилляции, т. е. интенсивность процесса резания. Противоположная область минимума, связанная с ухудшением шероховатости обрабатываемой поверхности и определяемая ростом амплитуды при падении скорости осцилляции, объясняется увеличением контактной площадки между инструментальным и обрабатываемым материалами и уменьшением частоты их взаимодействия, что приводит к снижению качества обработки. В случае повышения скорости осцилляции и уменьшения амплитуды размер контактной площадки резко сокращается, а частота взаимодействия растет, что способствует росту шероховатости обработанной поверхности.

По результатам оптимизации можно заключить, что для повышения удельного массового съема Δg при учете скоростей резания и осцилляции, амплитуды осцилляции и магнитной индукции необходимо обеспечить следующие значения технологических режимов: $B > 0,8$ Т, $A > 2$ мм, $V_0 > 0,25$ м/с, $V_p = 2 - 4$ м/с; для снижения шероховатости обработанной поверхности Ra при учете скоростей резания и осцилляции, времени обработки и исходной шероховатости необходимо обеспечить следующие величины технологических режимов: $V_0 = 0,6 - 1,0$ м/с, $V_p = 2 - 4$ м/с, $t = 40 - 70$ с, $Ra_0 = 0,4 - 0,8$ мкм.

Список использованной литературы

1. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.
2. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.
3. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
4. Гайдышев, И. П. Моделирование стохастических и детерминированных систем: Руководство пользователя программы AtteStat / И. П. Гайдышев. – Курган, 2013. – 484 с.
5. Акулович, Л. М. Основы профилирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2014. – 280 с.
6. Ящерицын, П. И. Оптимизация режимов магнитно-абразивной обработки отверстий / П. И. Ящерицын, Н. Я. Скворчевский, Л. Е. Сергеев // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 1. – С. 38–42.

Поступила в редакцию 02.04.2015

УДК 539.3

В. А. ТОМИЛО¹, Е. В. КОЧИК², И. А. ТАРАСЮК¹, А. С. КРАВЧУК³

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ВЫЧИСЛЕНИЯ КОНЕЧНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ПЛОСКИХ ПРУЖИН И РЕССОР

¹*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: jege.the.owl@gmail.com,*

²*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: zhenjatomilo@gmail.com,*

³*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: ask_Belarus@inbox.ru*

Определено, что линеаризация уравнения перемещений изогнутой балки вносит значительную относительную ошибку в определение перемещений для плоских стальных пружин и рессор. Установлено, что моделирование поведения плоских пружин и балок с помощью ANSYS 10 ED необходимо производить с использованием элементов BEAM188 и SHELL181 с включенной опцией **LargeDisplacementStatic**, поскольку в этом случае применяется нелинеаризованное уравнение для определения перемещений, что соответствует большим прогибам и перемещениям упругой линии.

Ключевые слова: механика твердого тела, рессора, балка, уравнение перемещений, компьютерное моделирование, деформация изгиба.

V. A. TAMILA¹, Y. V. KOCHYK², I. A. TARASYUK¹, A. S. KRAVCHUK³

COMPARISON OF METHODS OF FINITE DISPLACEMENTS CALCULATION UNDER STATIC BENDING OF FLAT AND LEAF SPRINGS

¹*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: jge.the.owl@gmail.com,*

²*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: zhenjatomilo@gmail.com,*

³*Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: ask_Belarus@inbox.ru*

It is determined that linearization of displacement equation of a bent beam makes a significant relative error in the definition of displacements for flat metal and leaf springs. It is found that modeling of behavior of flat springs and beams using the ANSYS ED 10 must be carried out with the use of BEAM188 and SHELL181 elements and with the enabled **LargeDisplacementStatic** option. It is because of non-linearized equation used for determination of displacements that corresponds to large deflections and displacements of elastic line.

Keywords: mechanics of rigid body, bow spring, beam, deformation equations, computer simulation, bending deformation.

В учебно-методической и научной литературе по механике твердого тела сложилось устойчивое мнение, что при решении задач определения перемещения при чистом изгибе для балок произвольного сечения достаточно использовать линеаризованное уравнение. Существуют теоретические оценки [1], что даже если перемещение нагруженного конца балки составляет 30% от ее длины, то линеаризованное уравнение даст перемещение с ошибкой 3%. Однако при непосредственной теоретической проверке перемещений для характерных геометрических параметров сечений плоских пружин и рессор можно установить, что линеаризация уравнения перемещений вносит ошибку в определение перемещений для плоских стальных пружин и рессор до 50%.

* Исследования выполнены на демонстрационной версии ANSYS 10ED/LS-DYNA, распространявшейся бесплатно на территории стран СНГ.

Определение перемещений при изгибе консольно закрепленной балки постоянного прямоугольного сечения с помощью версии ANSYS 10 ED без использования опции LargeDisplacementStatic [1–5]. В качестве примера определим перемещения консольно закрепленной балки при приложении вертикальной силы на ее другом конце в простейшем случае – в случае постоянного прямоугольного сечения. Будем считать, что длина балки l в проводимых экспериментах составляет 1 м.

Для этого построим с помощью ANSYS 10 ED для постоянных нагрузок $P_1 = 500$ Н и $P_2 = 1500$ Н поверхности в координатах h, b, v , где h – высота прямоугольной балки, b – ширина сечения балки, v – вычисляемое перемещение правого нагруженного конца балки (рис. 1, а, б). Данные поверхности построены на основе решения поставленной задачи с помощью балочных элементов BEAM188 (3Dfinitestrain).

Отметим, что указанные выше поверхности с точностью до 1% (рис. 2, а) совпадают с поверхностями в координатах h, b, v в случае использования элементов SHELL181 (Hyper 4node 181) в ANSYS 10 ED. Однако полученные результаты совпадают лишь с точностью до 28% (рис. 2, б) с результатами решений при применении элементов SOLID185 (Brick 8node 185) в ANSYS 10 ED, что связано с отсутствием у элементов SOLID185 вращательных степеней свободы.

В дополнение построим графики жесткости балок при изменении значений приложенных нагрузок P_1 от 100 до 500 Н и P_2 от 1300 до 1700 Н при постоянном сечении ($h = 0,01$ м, $b = 0,08$ м) (рис. 3, а, б). Как видно из графиков, значения жесткости при моделировании совпадают также с точностью до 1 и 28%.

Результаты вычисления перемещений по линейризованному дифференциальному уравнению. Как известно, линейризованное уравнение для определения перемещений изогнутой оси балки с постоянным прямоугольным сечением имеет вид [6]

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{H}, \quad x \in [0, l], \quad (1)$$

где $H = \frac{E h^3 b}{12}$ – жесткость балки при изгибе, $M(x) = P(l - x)$ – внутренний изгибающий момент в данном сечении стержня.

С использованием очевидных краевых условий для консольной балки $v(0) = 0$, $\left. \frac{dv}{dx} \right|_{x=0} = 0$

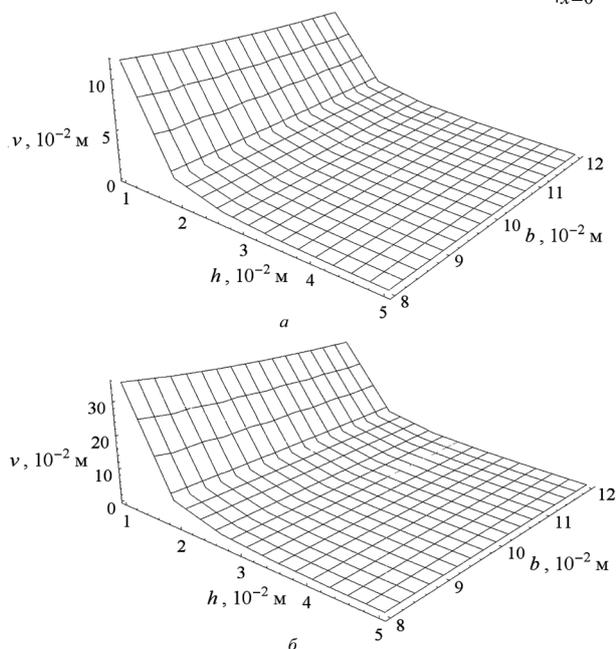


Рис. 1. Зависимость перемещения v нагруженного края балки от сечения при постоянных нагрузках $P_1 = 500$ Н (а), $P_2 = 1500$ Н (б) с выключенной опцией **LargeDisplacementStatic**

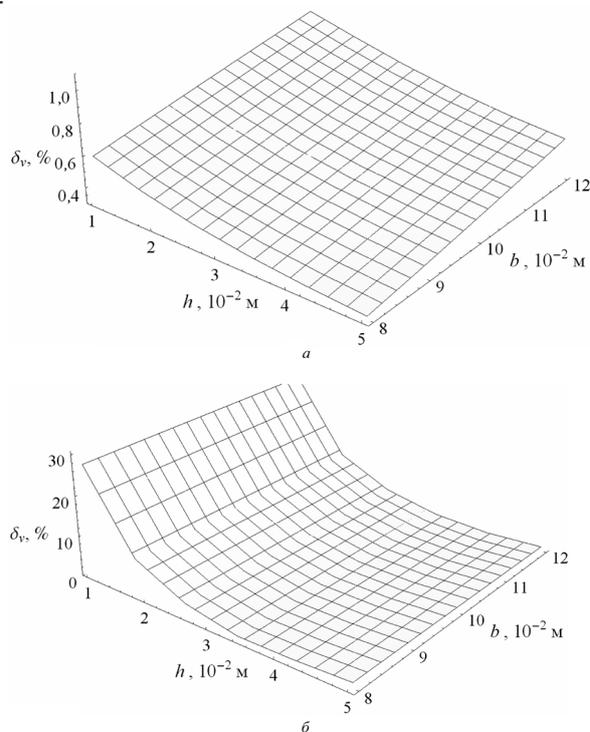


Рис. 2. Сходимость решений при использовании элементов BEAM188 и SHELL181 (а) и элементов BEAM188 и SOLID185 (б)

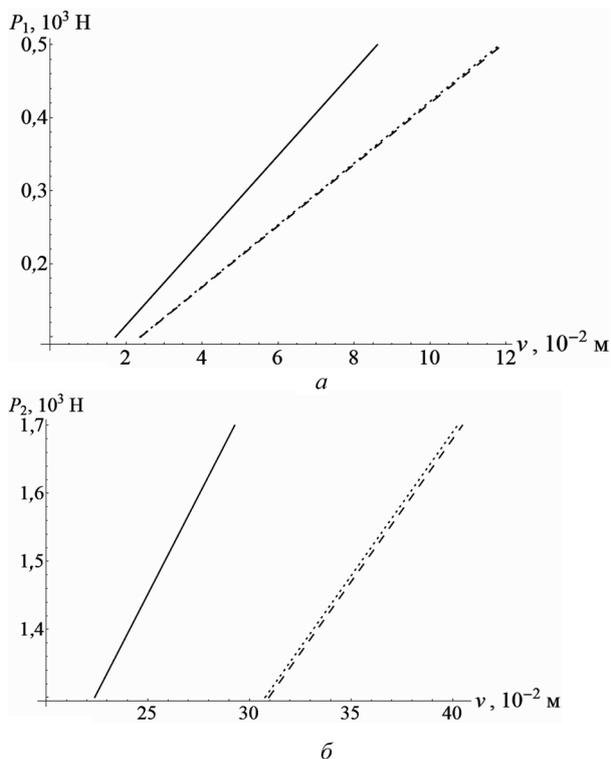


Рис. 3. Графики жесткости балки при использовании элементов BEAM188 (штриховая линия), SHELL181 (точечная линия), SOLID185 (сплошная линия) с выключенной опцией **LargeDisplacementStatic** при изменении значений приложенных нагрузок от 100 до 500 Н (а) и от 1300 до 1700 Н (б)

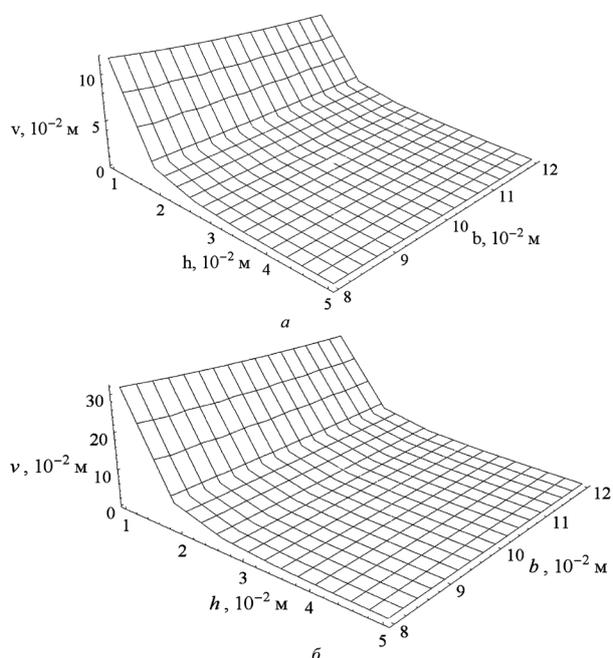


Рис. 4. Зависимость перемещения v нагруженного края балки от сечения при постоянных нагрузках $P_1 = 500$ Н (а) и $P_2 = 1500$ Н (б) с включенной опцией **LargeDisplacementStatic**

перемещения определяются с помощью уравнения

$$v(x) = \frac{2P(3lx^2 - x^3)}{Eh^3b}, \quad x \in [0, l]. \quad (2)$$

Оно позволяет построить поверхность в координатах h, b, v и график жесткости, аналогичные полученным поверхности и графику жесткости с помощью ANSYS 10 ED (рис. 1, а, б, 3, а, б). Отметим, что определяемые с помощью уравнения (1) поверхность и график жесткости в случае малых перемещений отличаются от полученных с помощью ANSYS 10 ED поверхности и графика жесткости при использовании элементов BEAM188 на 0,2%, при применении элементов SHELL181 – на 1%, при использовании элементов SOLID185 – на 28%, что связано с отсутствием у элементов SOLID185 вращательных степеней свободы (рис. 1, а, 3, а). В случае больших перемещений различия поверхностей в координатах h, b, v и графиков жесткости аналогичны случаю малых деформаций (рис. 1, б, 3, б), что не соответствует реальному прогибу балки, поскольку линейризованное уравнение (1) применяется только при малых углах поворота.

Таким образом, установлено, что при решении задач изгиба балок и оболочек в ANSYS 10 ED без применения опции **LargeDisplacementStatic** в разделе **MainMenu>Solution>AnalysisType>Sol'nControls** используются линейризованные уравнения для определения перемещений.

Вычисление перемещений по нелинейризованному уравнению для перемещений с помощью ANSYS 10 ED [1–5]. В этом случае включим опцию **Large DisplacementStatic** в разделе **Main Menu> Solution> Analysis Type> Sol'n Controls**. Как и ранее, будем считать, что длина балки l в вычислительных экспериментах составляет 1 м, и для постоянных нагрузок $P_1 = 500$ и $P_2 = 1500$ Н построим с помощью ANSYS 10 ED с включенной опцией **LargeDisplacementStatic** поверхности в координатах h, b, v с помощью балочных элементов BEAM188 (рис. 4, а, б).

Поверхности, построенные с включенной и выключенной опцией **LargeDisplacementStatic**, отличаются в случае малых перемещений на 1% (рис. 1, а, б), тогда как в случае больших перемещений различие составляет 10% (рис. 1, а, 4, б). Отметим, что указанные выше

поверхности с точностью до 1% совпадают с поверхностями в случае использования элементов SHELL181 и лишь с точностью до 28% совпадают с решениями в случае использования элементов SOLID185. Это связано с отсутствием у элементов SOLID185 вращательных степеней свободы.

В случае включенной опции **LargeDisplacementStatic** построим графики жесткости плоских пружин P_1 в интервале 100–500 Н и P_2 в интервале 1300–1700 Н при постоянном сечении ($h=0,01$ м, $b=0,08$ м) (рис. 5, а, б). Как видно из графиков жесткости консоли, при использовании опции **LargeDisplacementStatic** результаты совпадают с линеаризованным случаем для малых перемещений (рис. 3, а, 5, а) и существенно отличаются для больших перемещений (рис. 3, б, 5, б).

Аналитическое нелинеаризованное уравнение перемещений точек балки при изгибе. Нелинеаризованное уравнение перемещений балки постоянного прямоугольного сечения имеет в отличие от (1) несколько иной вид [7]:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{M}{H} = \frac{d\vartheta}{ds} - \frac{d\theta}{ds}, \quad s \in [0, l], \quad (3)$$

где θ – угол наклона касательной в текущей точке начальной кривой, ϑ – угол наклона касательной в текущей точке упругой линии, $1/R_0$ – кривизна в текущей точке начальной кривой, $1/R = \frac{d^2v/dx^2}{(1 + (dv/dx)^2)^{3/2}}$ – кривизна в текущей точке упругой линии, s – длина дуги упругой линии.

Дифференцируя уравнение (3) по s , учитывая постоянство H и $1/R_0$, а также вводя обозначения $\beta = \sqrt{Pl^2/H}$, $\zeta = \vartheta + \delta$, где δ – угол между направлением силы P и осью Ox , переходим к уравнению равновесия упругой линии в безразмерном виде:

$$l^2 \frac{d^2\zeta}{ds^2} = -\beta^2 \sin \zeta. \quad (4)$$

Первым интегралом выражения (4) является уравнение

$$\left(l \frac{d\zeta}{ds} \right)^2 = 4\beta^2 \left(C - \sin^2 \frac{\zeta}{2} \right), \quad (5)$$

где C – произвольная постоянная, определяемая начальными условиями. Следовательно, уравнение (5) дает значение кривизны в произвольной точке упругой линии. Тогда из формул (3) и (5) определяется величина изгибающего момента

$$M = 2\sqrt{PH \left(C - \sin^2 \frac{\zeta}{2} \right)} - \frac{H}{R_0}. \quad (6)$$

Вводя обозначения $C = k^2$, $\sin(\zeta/2) = k \sin \psi$, уравнение (5) для форм упругой линии перегибного рода можно переписать в виде

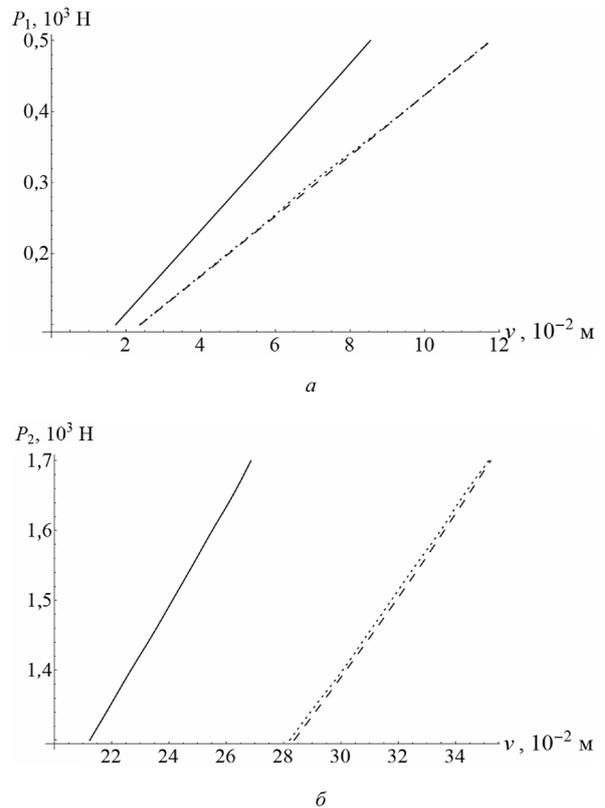


Рис. 5. Графики жесткости балки при использовании элементов BEAM188 (штриховая линия), SHELL181 (точечная линия), SOLID185 (сплошная линия) с включенной опцией **LargeDisplacementStatic** при нагрузках в интервале 100–500 Н (а) и 1300–1700 Н (б)

$$l \frac{d\psi}{ds} = \beta \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} . \quad (7)$$

Величина изгибающего момента в произвольной точке, согласно (6), для форм перегибного рода будет равна

$$M = 2k\sqrt{PH} \cos \psi - \frac{H}{R_0}, \quad s \in [0, l]. \quad (8)$$

Для форм упругой линии бесперегибного рода, вводя обозначения $C = 1/k^2$, $\sin(\zeta/2) = \sin \psi$, уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$l \frac{d\psi}{ds} = \frac{\beta}{k} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} . \quad (9)$$

Величина изгибающего момента в произвольной точке, согласно (6), для форм бесперегибного рода будет равна

$$M = \pm \frac{2}{k} \sqrt{PH} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} - \frac{H}{R_0}, \quad s \in [0, l], \quad (10)$$

где вместо двойного знака ставится знак кривизны в данной точке.

Решениями уравнений (7) и (9) будут соответственно [7]

$$\beta \frac{s}{l} = F(\psi, k) - F(\psi_0, k), \quad s \in [0, l], \quad (11)$$

$$\beta \frac{s}{l} = k F(\psi, k) - k F(\psi_0, k), \quad s \in [0, l], \quad (12)$$

где $\psi_0 = \psi(0)$, $F(\psi, k)$ – эллиптический интеграл Лежандра 1-го рода.

Аналитическое нелинеаризованное уравнение перемещений точек консольной балки при чистом изгибе. Поскольку кривизна начальной кривой $1/R_0 = 0$, а на свободном конце балки отсутствует изгибающий момент, то кривизна в данной точке $1/R_1 = 0$, а значит, конечная точка является точкой перегиба упругой линии. Кроме того, известными величинами являются $\vartheta_0 = 0$, $\delta = \pi/2$, откуда получим

$$k \sin \psi_0 = \sin(\pi/4). \quad (13)$$

Для конечной точки упругой линии балки из (11) имеем

$$\beta = F(\psi_1, k) - F(\psi_0, k), \quad (14)$$

где $\psi_1 = \psi(l)$.

Исходя из (8), величина изгибающего момента на свободном конце балки следующая:

$$M_1 = 2k\sqrt{PH} \cos \psi_1 - \frac{H}{R_0} = 0, \quad (15)$$

где $M_1 = M(l)$.

Таким образом, упругая линия изогнутой консольной балки определяется уравнениями (13)–(15):

$$\begin{cases} \beta = F(\psi_1, k) - F(\psi_0, k), \\ k \sin \psi_0 = \sin(\pi/4), \\ k \cos \psi_1 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решая систему (16) относительно k , ψ_0 , ψ_1 , получаем координаты свободного конца балки:

$$x(l) = \frac{2l}{\beta} k \cos \psi_0, \quad y(l) = l - \frac{2l}{\beta} [E(\psi_1, k) - E(\psi_0, k)], \quad (17)$$

а также представление упругой линии в параметрическом виде [7]:

$$\begin{aligned}
 x(s) &= \frac{2l}{\beta} k (\cos \psi_0 - \cos \psi), \\
 y(s) &= s - \frac{2l}{\beta} [E(\psi, k) - E(\psi_0, k)], \\
 s &\in [0, l],
 \end{aligned}
 \quad (18)$$

где $E(\psi, k)$ – эллиптический интеграл Лежандра 2-го рода.

Выражение (17) позволяет построить поверхность в координатах h, b, v и график жесткости, аналогичные поверхности и графику жесткости, полученным с помощью версии ANSYS 10 ED (рис. 6, 7).

Отметим, что полученные с помощью выражений (17) поверхность в координатах h, b, v и график жесткости в случае малых перемещений совпадают с полученными поверхностью и графиком жесткости с помощью линейризованного уравнения (1). В случае больших перемещений различия поверхностей в координатах h, b, v и графиков жесткости составляют 10 и 13% соответственно (рис. 7). Однако погрешность линейризованного уравнения значительно возрастает с увеличением нагрузки (рис. 8).

Поверхность в координатах h, b, v и график жесткости, полученные с помощью уравнения (17), в случае больших перемещений совпадают с полученными поверхностью и графиком жесткости с помощью ANSYS 10 ED с включенной опцией **LargeDisplacementStatic** с точностью до 0,15% при использовании элементов BEAM188 и SHELL181 и с точностью 26% с применением элементов SOLID185, что связано с отсутствием у элементов SOLID185 вращательных степеней свободы (рис. 4, б, 5, б – 7).

Таким образом, установлено, что при решении задач изгиба балок и оболочек в ANSYS 10 ED с применением опции **LargeDisplacementStatic** в разделе **MainMenu>Solution>AnalysisType>Sol'nControls** используются нелинейризованные уравнения для определения перемещений.

Определение жесткости плоской пружины или рессоры переменной толщины. Распространенным профилем плоских пружин переменной толщины является синусоидальный профиль [8]. Симметричный относительно середины пружины профиль имеет переменную толщину $h(s) = h_{\min} + e \sin(\pi s/l)$, $s \in [0, l]$, которая определяется по нормали к срединной линии балки (рис. 9) [8]. Здесь h_{\min} – минимальная толщина профиля, e – эксцентриситет прокатного валка, $l = R_0(\pi - 2 \arccos(L/R_0))$ – длина срединной линии профиля, где L – полудлина проекции изогнутой срединной линии профиля, h_0 – прогиб центральной части срединной линии профиля, $R_0 = \frac{h_0^2 + L^2}{2h_0}$ – радиус кривизны срединной линии профиля.

Если учесть, что в данной схеме изгиба кривизна начальной кривой $1/R_0 \neq 0$ и в начальном состоянии внешний изгибающий момент $M = 0$, то в начале процесса изгиба $1/R \neq 0$ и упругая линия примет форму бесперегибного рода. Поскольку аналитическое решение уравнения (3) в случае переменной жесткости сечения получить не представляется возможным, то следует разбить всю длину упругой линии на N равных малых участков Δs , внутри каждого из которых жесткость считается постоянной, но различной для разных малых участков:

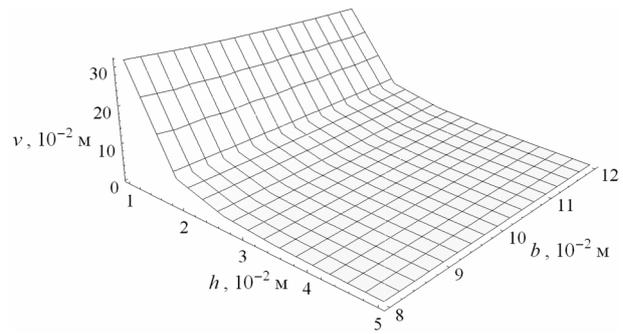


Рис. 6. Зависимость перемещения v нагруженного края балки от сечения при постоянной нагрузке $P_2 = 1500 \text{ Н}$

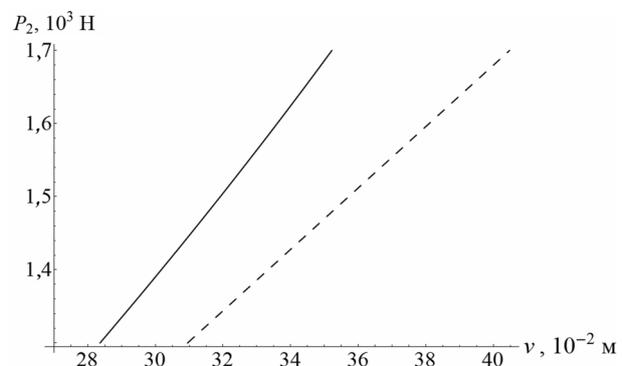


Рис. 7. Графики жесткости балки в случае больших перемещений, полученные с помощью линейризованного уравнения (1) (штриховая линия) и нелинейризованного уравнения (3) (сплошная линия)

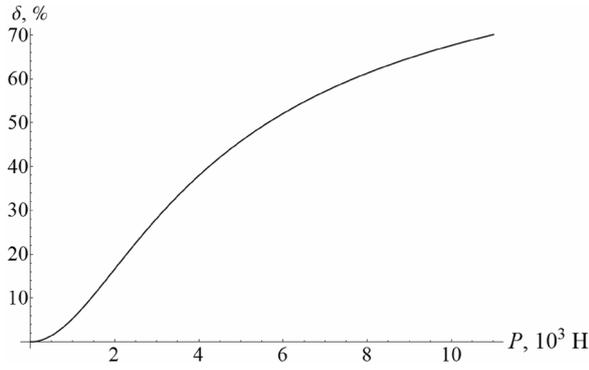


Рис. 8. Погрешность линейризованного уравнения изогнутой оси балки

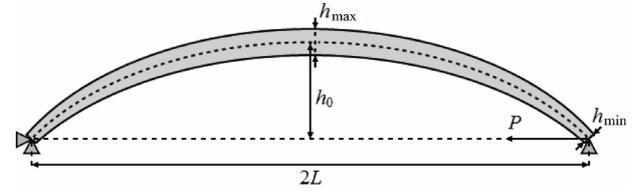


Рис. 9. Схема нагружения рессоры переменной толщины

$$H_i = \frac{E h_i^3 b}{12}, \quad h_i = h_{\min} + e \sin\left(\pi \frac{i-1}{N-1}\right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (19)$$

В этом случае дифференциальное уравнение перемещения упругой линии записывается отдельно для каждого участка, а на стыках малых участков записываются условия связей – равенства углов наклона касательной и изгибающих моментов:

$$\vartheta_{i,1} = \vartheta_{i+1,0}, \quad M_{i,0} = M_{i+1,0}, \quad i = \overline{1, N-1}. \quad (20)$$

Для концевой точки i -го участка ($i = \overline{1, N}$) из (12) имеем

$$\beta_i = k_i F(\psi_{i,1}, k_i) - k_i F(\psi_{i,0}, k_i). \quad (21)$$

Величины изгибающего момента на концах упругой линии равны

$$M_{1,0} = M(0) = 0, \quad M_{N,1} = M(l) = 0. \quad (22)$$

Таким образом, упругая линия изогнутой консольной балки определяется уравнениями (20)–(22):

$$\begin{cases} \psi_{i,1} = \psi_{i+1,0}, \quad i = \overline{1, N-1}, \\ \beta_i = k_i F(\psi_{i,1}, k_i) - k_i F(\psi_{i,0}, k_i), \quad i = \overline{1, N}, \\ \frac{2\sqrt{PH_1}}{k_1} \sqrt{1 - k_1^2 \sin^2 \psi_{1,0}} - \frac{H_1}{R_0} = \frac{2\sqrt{PH_N}}{k_N} \sqrt{1 - k_N^2 \sin^2 \psi_{N,1}} - \frac{H_N}{R_0} = 0, \\ \frac{2\sqrt{PH_i}}{k_i} \sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_{i,1}} - \frac{H_i}{R_0} = \frac{2\sqrt{PH_{i+1}}}{k_{i+1}} \sqrt{1 - k_{i+1}^2 \sin^2 \psi_{i+1,0}} - \frac{H_{i+1}}{R_0}, \quad i = \overline{1, N-1}. \end{cases} \quad (23)$$

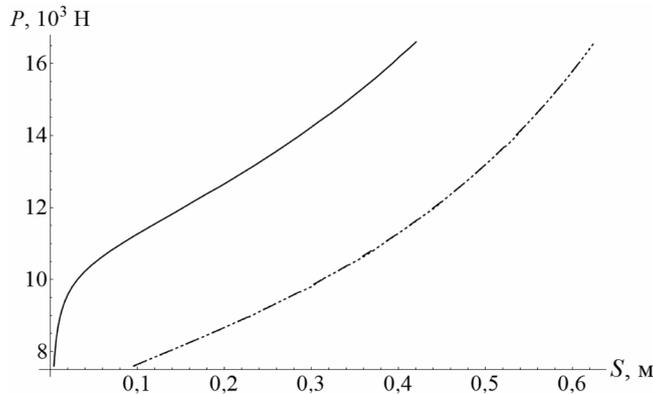


Рис. 10. Графики жесткости рессоры при использовании элементов BEAM188 (точечная линия) и SOLID185 (сплошная линия) с включенной опцией LargeDisplacementStatic и уравнения (3) (штриховая линия)

Решая систему (23) относительно k_i , $\psi_{i,0}$, $\psi_{i,1}$ ($i = \overline{1, N}$), получаем координаты конца i -го участка ($i = \overline{1, N}$) с учетом $x_{0,1} = y_{0,1} = 0$:

$$\begin{aligned} x_{i,1} &= x_i \left(\frac{l}{N} \right) = \frac{l}{N} \left(\frac{2}{k_i \beta_i} \left[E(\psi_{i,1}, k_i) - E(\psi_{i,0}, k_i) \right] - \left(\frac{2}{k_i^2} - 1 \right) \right) + x_{i-1,1}, \\ y_{i,1} &= y_i \left(\frac{l}{N} \right) = \frac{2}{k_i \beta_i} \frac{l}{N} \left(\sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_{i,1}} - \sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_{i,0}} \right) + y_{i-1,1}, \end{aligned} \quad (24)$$

а также представление упругой линии в виде

$$\begin{aligned} x_i(s') &= \left(\frac{2}{k_i \beta_i} \frac{l}{N} \left[E(\psi_i, k_i) - E(\psi_{i,0}, k_i) \right] - \left(\frac{2}{k_i^2} - 1 \right) s' \right) + x_{i-1,1}, \\ y_i(s') &= \frac{2}{k_i \beta_i} \frac{l}{N} \left(\sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_i} - \sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_{i,0}} \right) + y_{i-1,1}, \\ s' &\in \left[0, \frac{l}{N} \right], \quad \psi_i \in [\psi_{i,0}, \psi_{i,1}]. \end{aligned} \quad (25)$$

Из формул (24) определяются координаты конца упругой линии:

$$\begin{aligned} x(l) &= x_{N,1} = \frac{l}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2}{k_i \beta_i} \left(\left[E(\psi_{i,1}, k_i) - E(\psi_{i,0}, k_i) \right] - \left(\frac{2}{k_i^2} - 1 \right) \right), \\ y(l) &= y_{N,1} = \frac{l}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2}{k_i \beta_i} \left(\sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_{i,1}} - \sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \psi_{i,0}} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Для сравнения результатов расчетов построим графики жесткости плоской пружины ($L = 0,36$ м, $h_{\min} = 0,004$ м, $e = 0,004$ м, $h_0 = 0,011$ м), полученные с помощью ANSYS 10 ED и выражения (26) (рис. 10).

Результаты расчетов с помощью ANSYS 10ED с включенной опцией **LargeDisplacementStatic** при использовании элементов SOLID185 и выражения (26) указывают на существенное различие данных расчета жесткости (рис. 10), что связано с отсутствием у элементов SOLID185 вращательных степеней свободы. При использовании элементов BEAM188 погрешность результатов расчетов достигает 1% (рис. 10, 11). При применении элементов SHELL181 погрешность результатов расчетов достигает 6% (рис. 11). Кроме того, время решения задачи в этом случае существенно возрастает ввиду большего количества элементов SHELL188 в сравнении с BEAM188 при их одинаковом линейном размере, а также ввиду необходимости использования достаточно большого количества подшагов интегрирования, в то время как решение задачи с применением элементов BEAM188 происходит за один шаг.

Сравнивая графики, построенные с помощью ANSYS 10 ED с включенной опцией **LargeDisplacementStatic** и с помощью решения (26) нелинейного уравнения (3), можно утверждать, что наиболее точные результаты получаются при использовании элементов BEAM181, в то время как применение элементов SOLID185 является нежелательным, ввиду отсутствия у последнего вращательных степеней свободы.

В результате исследования установлено, что поведение плоских пружин и балок с помощью версии ANSYS 10 ED необходимо моделировать с использованием элементов BEAM188

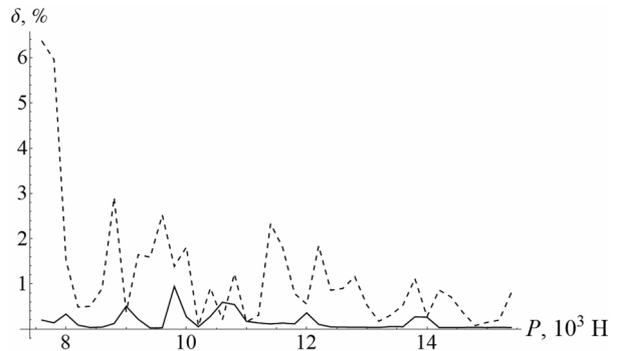


Рис. 11. Погрешности решений при использовании элементов BEAM188 (сплошная линия) и SHELL181 (штриховая линия)

и SHELL181 с включенной опцией **LargeDisplacementStatic**, поскольку в этом случае применяется нелинеаризованное уравнение для определения перемещений, что соответствует большим прогибам и перемещениям упругой линии.

Критерием адекватности моделирования статического деформирования плоских пружин является совпадение численного решения, полученного с использованием элементов BEAM188 и SHELL181 с включенной опцией **LargeDisplacementStatic**, с аналитическим решением по методу Е. П. Попова, являющемуся стандартным методом в странах СНГ для решения подобного рода задач.

Произведено сравнение результатов аналитического решения нелинеаризованного уравнения для перемещений с данными, полученными с помощью версии ANSYS 10 ED при использовании элементов SOLID185. В результате сравнения определено, что использование данных элементов при моделировании поведения плоских пружин и балок является нежелательным даже в случае малых перемещений ввиду возникновения больших погрешностей, что связано с отсутствием у элементов SOLID185 вращательных степеней свободы.

Список используемой литературы

1. *Каримов, И.* Сопrotивление материалов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.soprotmat.ru>.
2. *Кравчук, А. С.* Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс]: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1–31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 1. Графический интерфейс и командная строка. Средства создания геометрической модели / А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 130 с.: ил. – Библиогр.: с. 128. – Загл. с тит. экрана – Деп. в БГУ 28.05.2013, № 001228052013. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43440>.
3. *Кравчук, А. С.* Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс]: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 2. Средства отображения и редактирования геометрических компонентов твердотельной модели. Примеры создания твердотельных моделей средствами ANSYS для решения физических задач / А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 145 с.: ил. – Библиогр.: с. 143. – Загл. с тит. экрана. – Деп. в БГУ 28.05.2013, № 001328052013. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43443>.
4. *Кравчук, А. С.* Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1–31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 3. Определение физических констант материалов и конечноэлементное разбиение твердотельной модели. Примеры выполнения этих действий с построенными ранее моделями / А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 193 с.: ил. – Библиогр.: с. 190.– Загл. с тит. экрана – Деп. в БГУ 28.05.2013, № 001428052013. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43444>.
5. *Кравчук, А. С.* Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1–31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 4. Ограничения и нагрузки. Разделы Solution и GeneralPostproc главного меню. Примеры постановки краевых задач, их решения и просмотра результатов / А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 118 с.: ил. – Библиогр.: с. 116– Загл. с тит. экрана – Деп. в БГУ 28.05.2013, № 001528052013. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43445>.
6. *Филин, А. П.* Прикладная механика твердого деформируемого тела / А. П. Филин. Т 2: Сопrotивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. – М.: Наука, 1978.
7. *Попов, Е. П.* Теория и расчет гибких упругих стержней / Е. П. Попов. – М.: Наука, 1986.
8. *Клубович, В. В.* Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей / В. В. Клубович, В. А. Томило. – Минск, 2007.

Поступила в редакцию 29.10.2015

UDC 621.77

SHU XUEDAO, LIU CHUAN, WANG YING¹

STUDY ON TECHNOLOGY OF MULTI-WEDGE CROSS-WEDGE ROLLING OF AUTOMOBILE SEMI-AXIS SHAFTS

*Faculty of mechanical engineering and mechanics,
Zhejiang provincial key laboratory of part rolling technology, Ningbo University,
Ningbo, Zhejiang province, China, e-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn*

With rapid development of automotive industry, the demand of automobile semi-axis is increasing. However, it increases the cost investing in dies as automobile semi-axis are still produced with single-wedge cross-wedge rolling. Therefore, the study on deformation of MCWR forming automobile semi-axis is of great significance. The software PRO/E is adopted in setting up three-dimensional model, with the advanced explicit dynamic finite element DEFORM, the simulation of rolling automobile semi-axis with MCWR was analyzed systematically. The influence of rolling parameters on rolling force were attained by a practical computed method. It was shown that side wedge forming angles and side wedge transition angles had little influence on the force, the coefficient friction had critical influence on force.

Keywords: multi-wedge cross wedge rolling (MCWR), automobile semi-axis, force parameter.

ШУ СЮЭДАО, ЛЮ ЧУАНЬ, ВАНГ ИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ ПОЛУОСИ АВТОМОБИЛЯ

*Факультет машиностроения и механики, Университет г. Нинбо,
Нинбо, провинция Чжэцзян, Китай, e-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn*

С ускоренным развитием автомобилестроения возрастает потребность в полуосях для автомобилей. Однако это повышает расходы на инструмент, так как до сегодняшнего дня полуоси изготавливаются методом традиционной поперечно-клиновой прокатки. Поэтому изучение деформирования параллельной поперечно-клиновой прокатки автомобильных полуосей имеет большое значение. В данной работе освоено применение программного обеспечения PRO-E для создания трехмерной модели, подробно описано применение усовершенствованного программного обеспечения DEFORM на основе динамического метода конечных элементов, систематично проанализировано моделирование прокатки автомобильных полуосей методом параллельной поперечно-клиновой прокатки. Влияние параметров прокатки на усилие прокатки оценено методом практических вычислений. Это показало, что углы формирования боковых клиньев и углы перехода боковых клиньев не оказывают большого влияния на усилие прокатки, а коэффициент трения существенно влияет на усилие прокатки.

Ключевые слова: параллельная поперечно-клиновая прокатка, полуоси автомобилей, усилие прокатки.

Instructions. Automobile semi-axis shafts are drive shafts of driving wheels, which are power transmission shafts as shown in the Fig 1. Two driving wheels move at the different speeds of rotation in the process of driving, therefore, the two driving wheels cannot be connected by one driving shaft but driven by two semi-axis shafts which are connected with differential mechanism. Automobile semi-axis shafts which not only transmit torque from engine are an important force transmission part of the car, also withstand the vertical force and lateral force generated from the wheel, as well as traction force and longitudinal force generated from braking force. Therefore, the automobile semi-axis shafts are an important carrier transmission system, and one of the vulnerable parts of the automobile. Currently, the popular methods of producing automobile semi-axis shafts in domestic and abroad are forging and single-wedge cross-wedge rolling forming. Single-wedge cross-wedge rolling forming has lots of advantages like high production efficiency, material utilization, high quality and low cost compared to forging method. However, the investment of mold is large by single-wedge cross-wedge rolling, hence, it will



Fig. 1. Automobile Semi-axis shafts

further reduce the costs and weight of the mold and equipment by applying MCWR technology [1, 2].

MCWR is one kind of plastic forming technology which conducts radial pression and axial extension on the raw shafts simultaneously by couples of wedges called main wedge and side wedges. And MCWR is an advanced precision long shaft parts near net shaping technology which has many advantages like saving roll surface, reducing weight of the equipment, high efficiency, saving materials and is low cost compared with single wedge CWR. This technology is one of the most effective technologies to produce long shafts professionally and economically in addition [3–6].

Therefore, studying new effective and energy saving technology on producing large-scale long shafts meets the urgent requirement of the development of society and the market.

At present, the research study of automobile semi-axis shafts by MCWR is almost vacant all over the world. Therefore, the paper has established the three dimensional rigid-plastic finite model of automobile semi-axis shafts by MCWR based on the Deform-3D software and ANSYS/LS-DYNA on the basis of the model construction. The influence rolling parameters on rolling force were attained by a practical computed method, it has shown that side-wedge forming angles and side-wedge transition angles have little influence on the force, the coefficient friction has critical influence on force. Above research results provided theoretical basis for realizing professional and mass production of the MCWR automobile semi-axis.

As a conclusion, the study of automobile axle MCWR on automobile semi-axis shafts has critical significance.

Design the mold and establish the finite element model

Design the mold. There are three ideas to design the mold for automobile semi-axis shafts by MCWR. One is rolling simultaneously the side short parts and the middle long parts, and the advantage of this idea is that the surface of mold is shorter than other designation, while the disadvantage is the force is not symmetric in the process of rolling. And another idea is rolling the side short parts of shafts after having rolled the middle long parts of shafts, therefore, the mold could be designed symmetrical, while the length of die surface is too long. And the last idea is to length one of the side wedges to rolling the one side short part of shaft on the base of the second idea.

One can design a mold called No.1 for automobile semi-axis shaft as is shown in Fig. 2, *a* from the first idea, and this mold length is 2313.16 mm, which could works on H800 rolling machine.

And one can design a mold called No.2 for automobile semi-axis shafts as is shown in Fig. 2, *b* from the second idea, and this mold length is 2538.81 mm, which could works on H1000 rolling machine. Then one can design a mold called No.3 for automobile semi-axis shaft as is shown in Fig. 2, *c* from the second idea, and this mold's length is 2320.00 mm, which could works on H800 rolling machine.

As a conclusion, we selected the No.1 mold to do simulation analysis.

Establish the finite element mold. To simplify the problem, make the assumption as following:

1. Since rolling is carried out at high temperature, the elastic deformation of shafts in rolling is much smaller than the plastic deformation, so the flattening deformation of the mold and the elastic deforma-

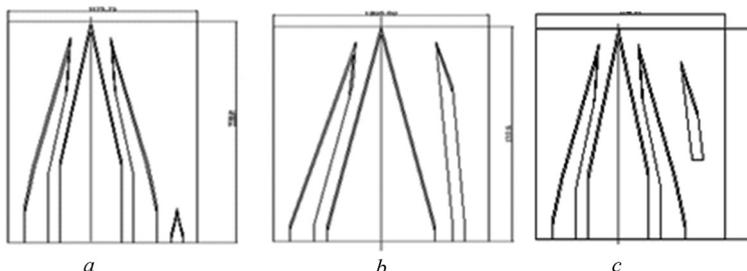


Fig. 2. Benz rear axis mold

tion of die could be ignored to some extent, and the die could be deemed as rigid which will reduce the amount of calculation in the analysis, and the elastic modulus $E = 210 \text{ GPa}$.

2. The weight of shafts is ignored and deemed as plastic, and the plastic modulus $E = 90 \text{ GPa}$.

3. Since the whole rolling process is completed in 3 to 4 seconds, and the time of heat transfer between dies and shaft with air is intensely short, rolling temperature could be deemed as constant during the process.

4. Simplify the friction between the dies and shafts is coulomb friction, assuming the friction between dies with shaft is the same in all the contact portions.

5. The shaft is not contacted with rolling guides in the process of rolling, and the rolling condition of rolling dies are perfectly symmetrical. The final finite element model is shown in Fig. 3.

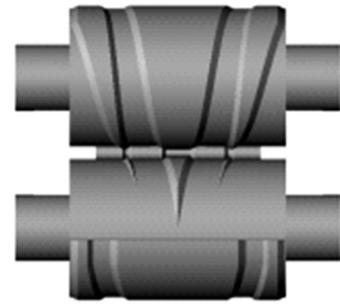


Fig. 3. Finite element simulation mold by multi-wedge cross-wedge rolling

The rules of technological parameters on force parameters

Process parameters by multi-wedge cross wedge rolling. Using the finite element model which has been established to do finite element simulation under the condition of typical process parameters. Process parameters by multi-wedge cross-wedge rolling were as follows: diameter of dies 800 mm; side forming angles 25°, 30°, 35°; side transition angles 25°, 35°, 45°; coefficient of friction 0.3, 0.4, 0.5; rolling temperature 1050 °C.

Influence rule of side forming angles on force. In the condition of side transition $\alpha_z = 25^\circ$ and friction coefficient $\mu = 0.5$, the variation of force parameters effected by different sides wedge angles in the process of rolling is shown in Fig. 4. As can be seen from Fig. 4, with the side wedge forming angles increase, the force is going to increase, however, the extent is not large.

Influence rules of side transition angles on force parameters. In the condition of side wedge forming angles $\alpha_1 = 30^\circ$, and the coefficient friction $\mu = 0.5$, the variation of force parameters effected by different side wedge transition angles in the process of rolling is shown in Fig. 5. As can be seen from Fig. 5, with the

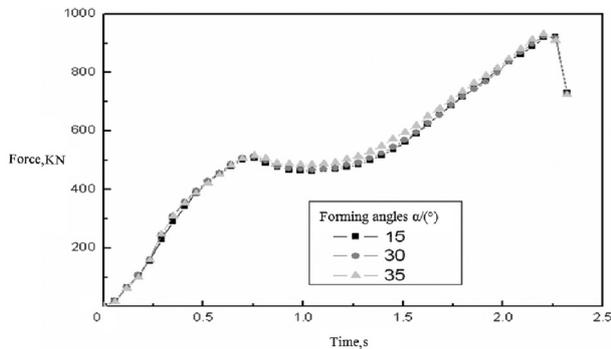


Fig. 4. Influence rule of side forming angles on force

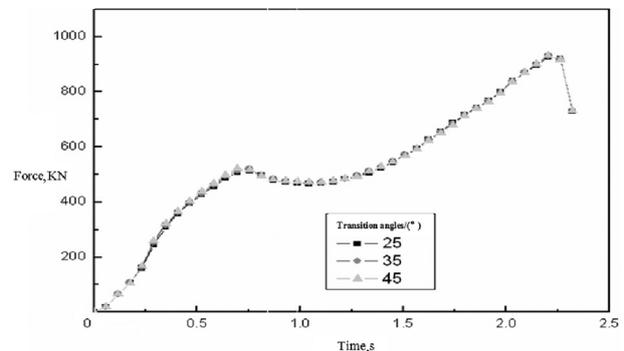


Fig. 5. Influence rule of side transition angles on force

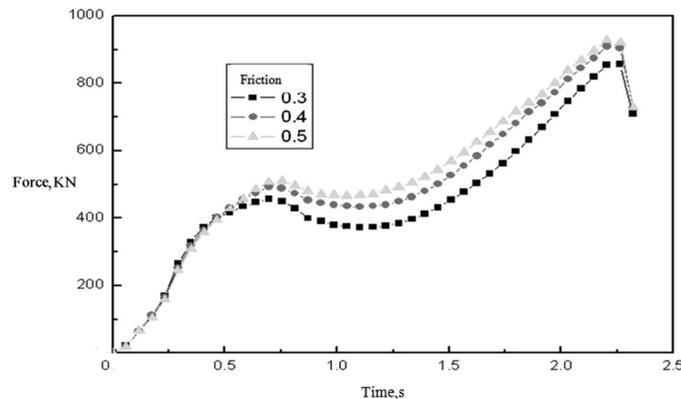


Fig. 6. Influence rule of friction on force

side wedge transition angles increase, the force is not effected actually. Therefore, changing the transition angles has not obvious effects on the variation of force.

However, the transition angles will influence the surface quality of shafts in the rolling transition section. In conclusion, in the terms of surface quality of transition section, we should choose small transition angles.

Influence rule of coefficient friction on force parameters. In the condition of side transition $\alpha_z = 25^\circ$ and side-wedge forming angles $\alpha_i = 30^\circ$, the variation of force parameters effected by different coef-

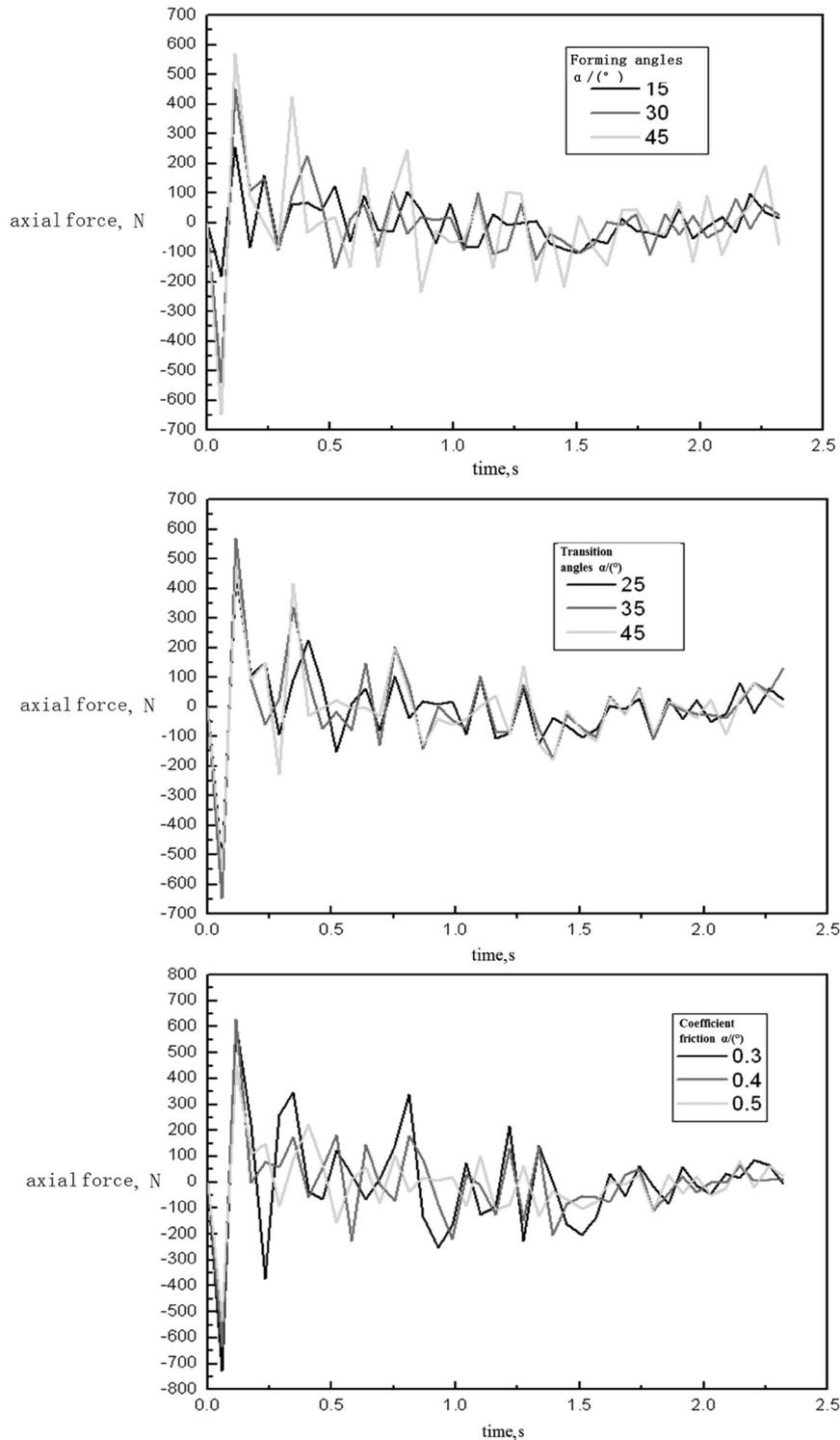


Fig. 7. Influence rules of axial force

efficient friction in the process of rolling is shown in Fig. 6. As can be seen from Fig. 6, with the coefficient friction increase, the force is going to increase, and the extent is large, considering the force parameters practically, the coefficient friction should be considered necessarily.

Influence rules of axial force

The influence rules of the axial force are shown in the Fig. 7. It can be seen from the figure that different side forming angles, different side transition angles and different coefficient friction have same effects on the axial force to a certain extent. Considering the axial force is extremely smaller than radial force and tangential force, the axial force could be almost negligible. Besides, during the process of rolling forming, the axial force generated is almost balanced from a general analysis, in other words, it means that the mold is balanced from the axial direction. And asymmetric rolling just generate imbalance which can be resolved by the plastic deformation of the shafts in a little moment.

Conclusion. Based on the finite element simulation, the law of automobile semi-axis shaft force influenced by technological parameters are studied, it has obtained a conclusion as well:

1. Side-wedge forming angles and side wedge transition angles have little influence on the force.
2. The coefficient of friction has critical influence on force.
3. Different side transition angles and different coefficient of friction have same effects on the axial force to a certain extent. During the process of rolling forming, the axial force generated is almost balanced from a general analysis.
4. Those results will provide theoretical basis for realizing professional and mass production of the MCWR automobile semi-axis.

Acknowledgement. The project was supported by following funds: the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51475247).

Reference

1. Forming technologies and theories of Cross Wedge Rolling / Shu Xuedao [et al.]. – Beijing: China science & technology press, 2014.
2. Research on influences of axial movement for cross wedge rolled asymmetric shafts / Peng Wenfei [et al.] // China Mechanical Engineering. – 2014. – N 2. – P. 311–314.
3. Yu, Penghui Influence of Process Parameters on Grain Size of Hollow Axle in Multi-wedge Cross Wedge Rolling / Yu Penghui, Shu Xuedao, Peng Wenfei [et al.] // Hot Working Technology. – 2014. – N 43. – P. 96–99.
4. Yang, Cui-ping Numerical simulation study on the cause of ellipse generation in two-roll cross wedge rolling the hollow parts with uniform inner diameter / Yang Cui-ping, Zhang Kang-sheng, Hu Zheng-huan // Journal of University of Science and Technology Beijing. – 2012. – N 34. – P. 1426–1431.
5. Zhang, Ting Study on forming mechanism Rule of Hollow Railway Axle in Multi-wedge Synchrostep Cross Wedge Rolling / Zhang Ting, Shu Xuedao. – Ningbo University, 2013.
6. Jiang, Yang The effect of process parameter on non-circularity of thick-walled hollow axle during cross wedge rolling / Jiang Yang [et al.] // Journal of Plasticity Engineering. – 2012. – N 1. – P. 19–24.

Received 09.10.2015

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

УДК 536.2(075)46

В. А. КОТ

МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

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

На основе систем из тождественных равенств, образованных $2n$ -кратными интегралами от искомой температурной функции и интегральными граничными характеристиками, получены аналитические решения краевой задачи нестационарной теплопроводности для протяженной пластины с граничным условием первого рода. По точности и сходимости решений предложенный метод превосходит на несколько порядков известные интегральные методы.

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

V. A. KOT

A METHOD OF BOUNDARY CHARACTERISTICS BASED ON THE HEAT-BALANCE INTEGRAL IN HEAT-CONDUCTION PROBLEMS

*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*

On the basis of systems of identical equalities formed by $2n$ -multiple integrals of the desired temperature function and integral boundary characteristics, analytical solutions of the boundary problem on the nonstationary heat conduction of an extended plate with the first-kind boundary conditions have been obtained. The method proposed surpasses the known integral methods in accuracy and convergence of solutions by several orders of magnitude.

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

Введение. Интегральный метод теплового баланса (Heat Balance Integral Method – HBIM) [1] является одним из наиболее мощных и эффективных методов приближенного решения задач тепломассопереноса. Среди других приближенных методов, например, таких как численные методы [2, 3], метод возмущений [4], метод луча [5] и др., HBIM занимает достойное место. Концепция метода заключается в следующем: в результате теплового воздействия на тело в нем образуется область с фронтом возмущения $R(t)$, за пределами которой температура тела $T(x, t)$ (либо иная полевая функция) остается неизменной. Первая стадия процесса заканчивается при достижении движущейся границей фронта возмущения центра симметрии тела либо противоположной поверхности, либо встречного фронта в некоторый определенный момент времени $t = t_1$. На второй стадии изменение температуры происходит уже по всему объему. Разделение процесса на две взаимосвязанные стадии позволяет существенно упростить решение с расширением спектра аналитически решаемых задач. В HBIM с помощью простых полиномов возможно приближенное аналитическое описание многих достаточно сложных задач. Это относится и к тем задачам, которые либо не поддаются точным решениям, либо решения приобретают настолько сложный вид, что становятся практически непригодны. В то же время полиномиальное описание температурного поля гарантирует простоту анализа решений и предоставляет отличные возможности для решения обратных задач либо в случае, когда тепловая задача является лишь промежуточной стадией в описании какого-либо иного процесса.

В аналитической теории теплопроводности методы, в которых используется понятие *фронта температурного возмущения*, имеют широкий спектр разных подходов: НВИМ, метод эквивалентных источников [6], методы М. Био [7], Г. И. Баренблатта [8], А. А. Дородницына [9] и др. Применение данных методов чрезвычайно широко: от линейных и нелинейных задач нагрева тел с нелинейными (а также с зависящими от времени) граничными условиями до задач с фазовыми переходами (так называемые стефановские задачи); от задач ламинарного обтекания пластины до задач течения жидкостей в каналах и гидродинамики неньютоновских жидкостей и т. д. [10].

Главным недостатком интегральных методов, использующих понятие фронта возмущения, является их относительно низкая точность. В первую очередь, это связано с тем, что в основу этих методов положено построение интеграла теплового баланса, что равнозначно осреднению исходного дифференциального уравнения в пределах фронта возмущения. Имеется несколько разных подходов для решения проблемы точности НВИМ. Это, в частности, RIM (Refined Integral Method) [11, 12], CIM (Combined Integral Method) [13], *схема Майера – Лангфорда* [14, 15], оптимизация формы аппроксимирующего полинома [16–18], метод дополнительных граничных условий [19–23]. Однако получаемые данными методами решения, как правило, затрагивают лишь самые простые случаи: медленно и монотонно изменяющееся во времени тепловое воздействие, отсутствие существенных нелинейностей и т. д. Когда же внешнее возмущение характеризуется большими скоростями или носит сложновременный характер, то данные решения, как правило, характеризуются весьма существенными ошибками. Представляется важной задача перевода интегрального метода, основанного на фронте возмущения, на качественно иной уровень, когда приближенные аналитические решения близко примыкают к численным и даже точным решениям, причем независимо от характера и скорости изменения возмущающего воздействия.

Постановка задачи. В качестве примера найдем решение задачи нестационарной теплопроводности для бесконечной пластины в следующей математической постановке:

$$\frac{\partial T(\rho, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(\rho, t)}{\partial \rho^2}, \quad t > 0, \quad 0 \leq \rho < 1, \quad (1)$$

$$T(\rho, 0) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \rho}(0, t) = 0, \quad T(1, t) = h(t), \quad (3)$$

где $T = (\bar{T} - \bar{T}_0) / \Delta T$ – относительная избыточная температура, \bar{T} – температура, \bar{T}_0 – начальная температура, $T(1, t) = (\bar{T}_1 - \bar{T}_0) / \Delta T$, \bar{T}_1 – температура поверхности пластины, ΔT – температурный масштаб, $t = \bar{t} / \tau$, $\tau = L^2 / \kappa$, $\rho = y / L$ – безразмерная координата, \bar{t} – время, κ – коэффициент теплопроводности, L – половина толщины пластины, y – пространственная координата.

В соответствии с общей концепцией рассматриваемых интегральных методов разделим весь тепловой процесс на две стадии. Будем предполагать, что на первой стадии происходит постепенное продвижение фронта прогрева $\delta(t) = 1 - R(t) / L$ в глубь пластины вплоть до момента достижения ее центра симметрии. Тогда область, которая находится за пределами фронта возмущения ($0 \leq \rho < 1 - \delta(t)$), сохраняет исходную температуру. На второй стадии процесса пластина постепенно прогревается по всему сечению.

Первая стадия процесса в первом приближении. Переходя к новой координате $x = 1 - \rho$, отсчитываемой от поверхности пластины, краевую задачу для первой стадии процесса записываем в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad 0 < x < \delta(t), \quad (4)$$

$$T(x, 0) = 0, \quad (5)$$

$$T(0, t) = h(t). \quad (6)$$

Условия на фронте возмущения принимают вид

$$T(\delta(t), t) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}(\delta(t), t) = 0. \quad (7)$$

Представим искомый температурный профиль в виде полинома N -й степени

$$T = h(t) + \sum_{j=1}^N a_j(t) \left(\frac{x}{\delta(t)} \right)^j. \quad (8)$$

Запишем известное решение, которое использует краевые условия (5)–(7) и интеграл теплового баланса Т. Гудмена [1]:

$$\int_0^{\delta(t)} \frac{\partial T}{\partial t} = \int_0^{\delta(t)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = - \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}. \quad (9)$$

В случае представления решения в виде полинома второй степени при $h(t) = 1$ имеем [1]

$$T(x, t) = \left(1 - \frac{x}{\delta(t)} \right)^2. \quad (10)$$

Подставив выражение (10) в формулу (9) и введя переменную $\sigma(t) = \delta(t)^2$, получим $\sigma'(t) = 12$. Отсюда при начальном условии $\sigma(0) = 0$ находим $\sigma(t) = 12t$. В итоге приходим к искомому решению для первой стадии процесса в первом приближении [1]

$$T(x, t) = \left(1 - x/\sqrt{12t} \right)^2. \quad (11)$$

Положив $\sigma(t_1) = \delta(t_1) = 1$, найдем время окончания первой стадии: $t_1 = 1/12 \approx 0,08333$. Результаты расчета, согласно (13), в сравнении с точным решением [24] приведены на рис. 1, а. Отклонения безразмерных температур, найденных по приближенной формуле (11), от точных значений достигают существенных величин. Для повышения точности аппроксимационного решения необходимо увеличить степень полинома. Тогда для определения новых полиномиальных коэффициентов требуется соответствующие дополнительные уравнения. Ниже приведена схема, обеспечивающая получение сколь угодно числа таких дополнительных уравнений. В ее основе заложена идея применения *интегральных граничных характеристик*.

Интегральные граничные характеристики. Последовательность тождественных равенств для первой стадии процесса. Прежде дадим следующее определение.

Определение. Интегральные граничные характеристики краевой задачи для дифференциального уравнения (4) с граничным условием $\alpha_1 T(0, t) + \alpha_2 \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h(t)$ ($\alpha_1^2 + \alpha_2^2 > 0$) есть эле-

менты последовательности $\Gamma_n(t) = \int_0^t \dots \int_0^t h(t) dt$, $\forall n \in \mathbb{Z}_+$.

Введем в рассмотрение интегральные операторы, определяемые последовательностью

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}_1^x \equiv \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2, \quad \mathcal{L}_2^x \equiv \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x dx^2 \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2, \dots \\ \dots \mathcal{L}_n^x \equiv \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x dx^2 \dots \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2 \end{array} \right\}, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (12)$$

В дополнение к граничным характеристикам (12) введем последовательность из интегральных операторов с конечным интервалом интегрирования $x \in [0, \delta(t)]$:

$$\left\{ \mathcal{L}_1 \equiv \int_{\delta(t)\delta(t)}^0 \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2, \quad \mathcal{L}_2 \equiv \int_{\delta(t)\delta(t)}^0 \int_{\delta(t)\delta(t)}^x dx^2 \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2, \dots \mathcal{L}_n \equiv \int_{\delta(t)\delta(t)}^0 \int_{\delta(t)\delta(t)}^x dx^2 \dots \int_{\delta(t)\delta(t)}^x \int_{\delta(t)\delta(t)}^x (\dots) dx^2 \right\}, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (13)$$

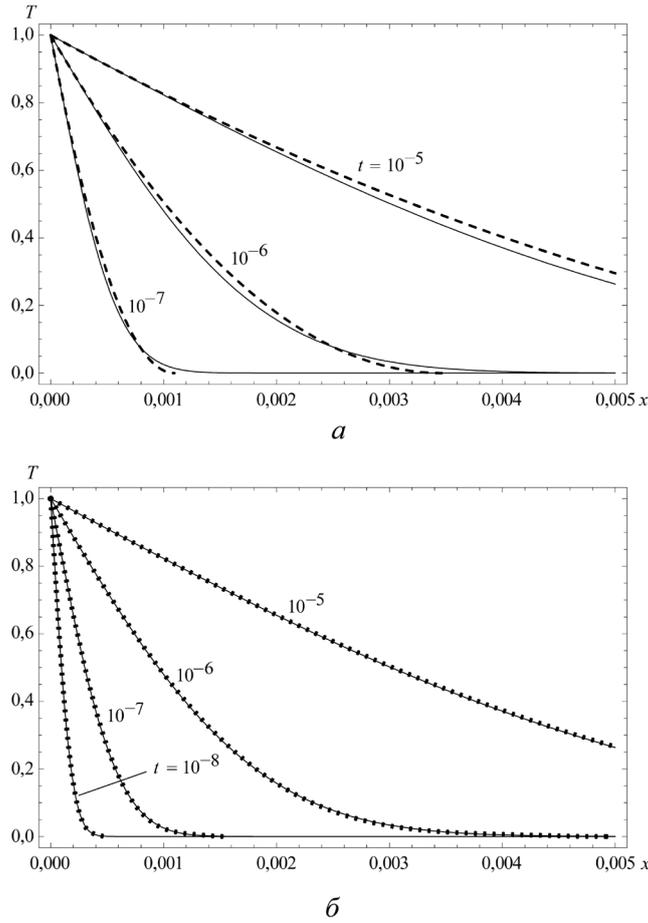


Рис. 1. Приближенные температурные профили в различные моменты времени в сравнении с точным решением (сплошные линии): а – расчет по формуле (11) (штриховые линии); б – расчет по формуле (28) (пунктир) ($N = 5$)

Применим оператор \mathcal{L}_1^x к уравнению (4). Так как $T(x,t)$ – непрерывная аналитическая функция, то в силу теоремы Лейбница и условий (7) для левой части уравнения (4) имеем

$$\mathcal{L}_1^x \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_1^x T + \frac{d\delta(t)}{dt} T(\delta(t), t) \int_{\delta(t)}^x dx = \frac{d}{dt} \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x T dx = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_1^x T. \quad (14)$$

Для области интегрирования $x \in [\delta(t), 0]$, основываясь на уравнениях (13) и (14), получаем

$$\mathcal{L}_1^x \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_1^x T \Big|_{x=0}. \quad (15)$$

Используя интегральный оператор \mathcal{L}_1^x к правой части уравнения (4), в силу условий на фронте возмущения (7) имеем

$$\mathcal{L}_1^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dx = \int_{\delta(t)}^x \left(\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T(\delta(t), t)}{\partial x} \right) dx = T - T(\delta(t), t) = T. \quad (16)$$

Отсюда из соотношений (4), (15) и (16) следует уравнение

$$\frac{d}{dt} \mathcal{L}_1^x T = T. \quad (17)$$

Применив уравнение (17) в точке $x = 0$, с учетом граничного условия (6) получим уравнение

$$\left. \frac{d}{dt} \mathcal{L}_1^x T \right|_{x=0} = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_1 T = h(t). \quad (18)$$

Проинтегрировав уравнение (18) при начальном условии (5), приходим к интегральному тождеству

$$\mathcal{L}_1 T \equiv \Gamma_1(t). \quad (19)$$

Далее применим интегральный оператор \mathcal{L}_1^x к уравнению (17). С учетом граничных характеристик (12), теоремы Лейбница и условий (7) получим

$$\mathcal{L}_1^x \frac{d}{dt} \mathcal{L}_x T = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_1^x \mathcal{L}_1^x T = \frac{d}{dt} \underbrace{\mathcal{L}_1^x \mathcal{L}_1^x}_2 T = \mathcal{L}_2^x T, \quad (20)$$

где $\underbrace{\mathcal{L}_1^x \mathcal{L}_1^x}_2 T = \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x T dx$. Для $x=0$ при использовании условия (6) из (19) и (20) следует уравнение

$$\left. \frac{d}{dt} \underbrace{\mathcal{L}_1^x \mathcal{L}_1^x}_2 T \right|_{x=0} = \frac{d}{dt} \mathcal{L}_2 T = \mathcal{L}_1^x T \Big|_{x=0} = \mathcal{L}_1 T \equiv \Gamma_1(t). \quad (21)$$

Его интегрирование при начальном условии (5) приводит к тождественному равенству

$$\mathcal{L}_2 T \equiv \Gamma_2(t). \quad (22)$$

Аналогичным образом может быть получено третье интегральное тождество вида

$$\mathcal{L}_3 T \equiv \Gamma_3(t). \quad (23)$$

Основываясь на вышеизложенном, приходим к следующей последовательности, которую образуют $2n$ -кратные интегралы от искомой температурной функции и интегральные граничные характеристики:

$$\{\mathcal{L}_n T \equiv \Gamma_n(t)\}, \quad n \in \mathbb{Z}_+, \quad (24)$$

где $\mathcal{L}_n T = \underbrace{\int_{\delta(t)}^0 dx \int_{\delta(t)}^x dx \dots \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x dx \int_{\delta(t)}^x T dx}_{n}$ $= \int_{\underbrace{0}_{2n}}^0 \dots \int_{\underbrace{0}_{2n}}^{xx} T dx^n$, $\Gamma_n(t) = \int_{\underbrace{0}_{n}}^t \dots \int_{\underbrace{0}_{n}}^t h(t) dt^n$.

Первая стадия процесса в последующих приближениях. Используя соотношения (21)–(24), можно получить недостающие три уравнения для определения коэффициентов полинома пятой степени. В частности, при $h(t) = 1$ получим следующее выражение:

$$T(x,t) = \left(1 - \frac{x}{\delta(t)}\right)^2 \left(1 + \sum_{j=1}^3 a_j(t) \left(\frac{x}{\delta(t)}\right)^j\right), \quad (25)$$

где

$$a_1(t) = \frac{3675}{8} \frac{t}{\delta(t)^2} - \frac{19845}{2} \frac{t^2}{\delta(t)^4} + 86625 \frac{t^3}{\delta(t)^6} - \frac{143}{16},$$

$$a_2(t) = -\frac{6405}{4} \frac{t}{\delta(t)^2} + 40635 \frac{t^2}{\delta(t)^4} - 381150 \frac{t^3}{\delta(t)^6} + \frac{169}{8},$$

$$a_3(t) = \frac{10395}{8} \frac{t}{\delta(t)^2} - \frac{72765}{2} \frac{t^2}{\delta(t)^4} + 363825 \frac{t^3}{\delta(t)^6} - \frac{231}{16}.$$

Подставляя (25) в интеграл теплового баланса (9), приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно $\sigma(t) = \delta(t)^2$:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = 168 \frac{19800t^3 - 1872t^2 \sigma(t) + 69t \sigma(t)^2 - \sigma(t)^3}{55440t^3 - 4536t^2 \sigma(t) + 126t \sigma(t)^2 - \sigma(t)^3}. \quad (26)$$

Для $h(t)=1$ температурный фронт, как известно, подчиняется закону «квадратного корня» [например, 1, 4, 6, 16, 18], что дает основание записать $\sigma(t) = \alpha t$. Отсюда уравнение (26) преобразуется в обыкновенное алгебраическое уравнение

$$\alpha^4 - 294\alpha^3 + 16128\alpha^2 - 369936\alpha + 3326400 = 0. \quad (27)$$

Уравнение (27) имеет два действительных корня: $\alpha = 24,10645$ и $\alpha = 230,7940$. Исходя из принципа наибольшей близости к величине 12, стоящей в выражении (11) с функцией $\sigma(t) = 12t$, выбираем первый корень $\alpha = 24,10645$, что дает $\delta(t) = \sqrt{24,10645t}$. Положив $\sigma(t_1) = \delta(t_1) = 1$, найдем время окончания первой стадии $t_1 = 0,04148$. Подстановка функции $\delta(t)$ в (25) даст решение

$$T(x,t) = \left(1 - 0,203673 \frac{x}{\sqrt{t}}\right)^2 \left(1 - 0,157343 \frac{x}{\sqrt{t}} - 0,107104 \frac{x^2}{t} + 0,02389216 \frac{x^3}{t^{3/2}}\right). \quad (28)$$

Для полинома восьмой степени следующие два уравнения будут

$$\mathcal{L}_4^0\{T\} \equiv \Gamma_4(t), \quad \mathcal{L}_5^0\{T\} \equiv \Gamma_5(t). \quad (29)$$

В качестве третьего уравнения воспользуемся условием, введенным в расчетную практику Т. Гудменом [1] и отражающим выполнение дифференциального уравнения теплопроводности в точке $x = 0$, откуда получим

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x=0} = \frac{dh(t)}{dt} = 0. \quad (30)$$

Тождественные равенства (21)–(23), (29) совместно с уравнением (30) позволяют определить восемь коэффициентов $a_j(t)$, $j = 1, 8$, температурного профиля (8). В данном случае решение будет следующим:

$$T(x,t) = 1 - 0,56422 \frac{x}{\sqrt{t}} + 0,0467173 \frac{x^3}{t^{3/2}} + 0,00231282 \frac{x^4}{t^2} - 0,0066571 \frac{x^5}{t^{5/2}} + \\ + 0,0017066 \frac{x^6}{t^3} - 0,000181 \frac{x^7}{t^{7/2}} + 7,224365 \cdot 10^{-6} \frac{x^8}{t^4}. \quad (31)$$

При этом $\delta(t) = \sqrt{36,20416t}$. Время окончания первой стадии процесса $t_1 = 0,0276$.

Результаты расчетов температуры, согласно формуле (31), для $N = 5$ в сравнении с точным решением [24] приведены на рис. 1, б. Отличие приближенного решения от точного при $t < 0,04148$ не превышает 0,3%. Для температурного профиля (31) с полиномом $N = 8$ максимальное отклонение приближенного решения от точного уменьшается (по сравнению с предыдущим значением) почти на порядок, составляя около 0,03%. Отметим, что в известном методе дополнительных граничных условий [21] получаем при той же степени полинома $N = 8$ максимальное отклонение примерно 0,75%. Проведенный анализ показал, что для достижения точности аппроксимационного решения, достигаемой предлагаемым методом при полиноме пятой степени, в известном методе дополнительных граничных условий требуется полином 29-й степени, а для достижения примерной точности, которая отвечает предложенному методу при $N = 8$, в методе дополнительных граничных условий необходимы полиномы с $N > 100$. Как показывают расчеты, при описании температуры полиномом 14-й степени точность интегрального метода граничных характеристик превосходит точность интегрального метода дополнительных граничных условий более чем на три порядка. Таким образом, введение тождественных равенств (24)

с системой граничных характеристик $\Gamma_n(t)$ позволяет самым кардинальным образом повысить точность аппроксимационного решения краевой задачи (4)–(7).

Вторая стадия процессов в первом приближении. Как отмечалось, интегральный метод граничных характеристик применим и для второй стадии процесса, чему отвечает $t > t_1$. В этом случае фронт температурного возмущения теряет смысл, тогда его заменяет температура в центре сечения пластины $T(1, t) = q(t)$. В данном случае математическая постановка задачи выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t_1 > t, \quad 0 < x \leq 1, \quad (32)$$

$$T(0, t) = 1, \quad T(1, t) = q(t), \quad \frac{\partial T(1, t)}{\partial x} = 0. \quad (33)$$

Задания начального условия не требуется, поскольку распределения температур для первой и второй стадий для момента времени $t = t_1$ полностью совпадают.

Решение задачи (32)–(33) определим полиномом

$$T(x, t) = 1 + \sum_{j=1}^N b_j(t) x^j. \quad (34)$$

При $N = 2$ коэффициенты $b_{1,2}(t)$ определим из условий (33): $b_1(t) = 2(q(t) - 1)$, $b_2(t) = 1 - q(t)$. Применив к уравнению (32) интеграл теплового баланса

$$\int_0^1 \frac{\partial T}{\partial t} dx = \frac{d}{dt} \int_0^1 T dx = -\frac{\partial T(1, t)}{\partial x}, \quad (35)$$

получим обыкновенное дифференциальное уравнение $q' + 3q = 3$, решение которого при начальном условии $q(t_1) = 0$ имеет вид $q(t) = 1 - \exp[-3(t - t_1)]$. Отклонение приближенного решения от точного в данном случае достигает 8–9% [21]. Для повышения точности аппроксимационного решения увеличим степень полинома с привлечением дополнительных уравнений. Таковыми являются уравнения, образующие ниже доказанную последовательности из тождественных равенств.

Последовательность тождественных равенств для второй стадии процесса. Введем в рассмотрение интегральные операторы

$$\left\{ \mathcal{M}_1^x \equiv \int_1^{xx} \int_1^{xx} (\dots) dx^2, \mathcal{M}_2^x \equiv \int_1^{xx} \int_1^{xx} dx^2 \int_1^{xx} \int_1^{xx} (\dots) dx^2, \dots, \mathcal{M}_n^x \equiv \int_1^{xx} \int_1^{xx} dx^2 \dots \int_1^{xx} \int_1^{xx} (\dots) dx^2 \right\}, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (36)$$

В дополнение к этому введем также две последовательности, составленные из интегральных операторов:

$$\left\{ \mathcal{M}_1 \equiv \int_1^{\overbrace{0x}^1} \int_1^{xx} (\dots) dx^2, \mathcal{M}_2 \equiv \int_1^{\overbrace{0x}^2} \int_1^{xx} dx^2 \int_1^{xx} \int_1^{xx} (\dots) dx^2, \dots, \mathcal{M}_n \equiv \int_1^{\overbrace{0x}^n} \int_1^{xx} dx^2 \dots \int_1^{xx} \int_1^{xx} (\dots) dx^2 \right\}, \quad n \in \mathbb{Z}_+, \quad (37)$$

$$\left\{ G_n(t) \equiv \int_{t_1}^{\overbrace{t}^n} dt \dots \int_{t_1}^t q(t) dt = \int_{t_1}^{\overbrace{t}^n} \int_{t_1}^{\overbrace{t}^n} q(t) dt^n \right\}, \quad n = -1, 0, 1, 2, \dots, \quad (38)$$

где $G_{-1}(t) = \frac{dq(t)}{dt}$, $G_0(t) = q(t)$.

Левая часть уравнения (4) с учетом оператора \mathcal{M}_1^x имеет вид

$$\mathcal{M}_1^x \frac{\partial T}{\partial t} = \int_1^{xx} \int_1^{xx} \frac{\partial T}{\partial t} dx^2 = \frac{\partial}{\partial t} \int_1^{xx} T dx^2 = \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_1^x T. \quad (39)$$

Применив оператор \mathcal{M}_1^x к правой части уравнения (4), с учетом условий (33) имеем

$$\mathcal{M}_1^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \int_1^x \int_1^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx^2 = \int_1^x \left(\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} \right) dx = T - q(t). \quad (40)$$

Отсюда приходим к уравнению

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_1^x T = T - q(t). \quad (41)$$

Тогда на основе уравнений (40) и (41) запишем

$$\frac{d}{dt} \mathcal{M}_1^x T \Big|_{x=0} = \frac{d}{dt} \mathcal{M}_1 T = T(0,t) - q(t) = h(t) - q(t). \quad (42)$$

Интегрируя (42) с учетом начального условия (5), получаем

$$\mathcal{M}_1 T = \int_0^t h(t) dt - \int_0^t q(t) dt + C. \quad (43)$$

Исходя из концепции фронта возмущения, предполагающей сохранение начального условия при $x \in [\delta(x), 1]$, для граничной функции $q(t)$ имеем $q(t) = T(1,t) = 0$, $0 < t \leq t_1$, тогда уравнение (43) следующее:

$$\mathcal{M}_1 T = \int_0^t h(t) dt - \int_{t_1}^t q(t) dt + C. \quad (44)$$

Постоянную интегрирования C найдем из условия, вытекающего из первой стадии процесса для момента $t = t_1$. Принимая во внимание идентичность условий задач для первой и второй стадий при $t = t_1$, а также выполнение очевидного тождественного равенства

$$\mathcal{M}_n \equiv \mathcal{L}_n^{\delta(t)} \Big|_{x=1} = \mathcal{L}_n^{\delta(t_1)} = \mathcal{L}_n^1, \quad (45)$$

из уравнения (44) для $t = t_1$ следует

$$\mathcal{M}_1 T \Big|_{t=t_1} = \mathcal{L}_1 T \Big|_{t=t_1} = \int_0^{t_1} h(t) dt = \Gamma_1(t_1). \quad (46)$$

Отсюда запишем

$$\mathcal{M}_1 T \Big|_{t=t_1} = \Gamma_1(t_1) - \int_{t_1}^{t_1} q(t) dt + C = \Gamma_1(t_1) + C, \quad (47)$$

что дает $C = 0$. Тогда на основании уравнений (45)–(47) окончательно получим тождественное равенство

$$\mathcal{M}_1 T \equiv \Gamma_1(t) - G_1(t). \quad (48)$$

Применим к дифференциальному уравнению (4) оператор \mathcal{M}_2^x . Используя уравнение (19), имеем для левой части (4)

$$\mathcal{M}_2^x \frac{\partial T}{\partial t} = \mathcal{M}_1^x \mathcal{M}_1^x \frac{\partial T}{\partial t} = \mathcal{M}_1^x \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_1^x T = \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_2^x T. \quad (49)$$

Для правой части уравнения (4) с учетом условий (33) находим

$$\mathcal{M}_2^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \mathcal{M}_1^x \left\{ \mathcal{M}_1^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right\} = \mathcal{M}_1^x \{T - q(t)\} = \mathcal{M}_1^x T - \mathcal{M}_1^x q(t) = \mathcal{M}_1^x T - q(t) \mathcal{M}_1^x \{1\}. \quad (50)$$

Из (4), (49) и (50) получим уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_2^x T = \mathcal{M}_1^x T - \mathcal{M}_1^x \{1\} q(t), \quad (51)$$

которое для $x = 0$ примет вид

$$\left. \frac{d}{dt} \mathcal{M}_2^x T \right|_{x=0} = \frac{d}{dt} \mathcal{M}_2 T = \mathcal{M}_1 T - \mathcal{M}_1 \{1\} q(t). \quad (52)$$

В итоге из (48) и (52) имеем уравнение

$$\frac{d}{dt} \mathcal{M}_2 T = \Gamma_1(t) - G_1(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} q(t). \quad (53)$$

Интегрирование уравнения (53) (можно показать, что постоянная интегрирования C также равна нулю) приводит ко второму тождественному равенству

$$\mathcal{M}_2 T \equiv \Gamma_2(t_1) - G_2(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} G_1(t). \quad (54)$$

Следующее тождественное равенство, содержащее граничную характеристику третьего порядка $\Gamma_3(t_1)$, получим аналогично, применив интегральный оператор \mathcal{M}_3^x к уравнению (4). Для левой его части имеем

$$\mathcal{M}_3^x \frac{\partial T}{\partial t} = \mathcal{M}_1^x \left\{ \mathcal{M}_2^x \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \mathcal{M}_1^x \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_2^x T = \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_3^x T. \quad (55)$$

Правую часть уравнения (4) с учетом (53) преобразуем следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_3^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \mathcal{M}_1^x \left\{ \mathcal{M}_2^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right\} = \mathcal{M}_1^x \left\{ \mathcal{M}_1^x T - \mathcal{M}_1^x \{1\} q(t) \right\} = \\ &= \mathcal{M}_1^x \left\{ \mathcal{M}_1^x T \right\} - \mathcal{M}_1^x \left\{ \mathcal{M}_1^x \{1\} q(t) \right\} = \mathcal{M}_2^x T - \mathcal{M}_2^x \{1\} q(t). \end{aligned} \quad (56)$$

Из (4), (55) и (56) получим уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_3^x T = \mathcal{M}_2^x T - \mathcal{M}_2^x \{1\} q(t). \quad (57)$$

Таким образом, исходя из уравнений (41), (53) и (57) запишем последовательность

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}_n^x T = \mathcal{M}_{n-1}^x T - \mathcal{M}_{n-1}^x \{1\} q(t) \right\}, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (58)$$

С учетом интегрального тождества (54) уравнение (58) при $x = 0$ приводится к виду

$$\frac{d}{dt} \mathcal{M}_3 T = \mathcal{M}_2 T - q(t) \mathcal{M}_2 \{1\} = \Gamma_2(t_1) - G_2(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} G_1(t) - \mathcal{M}_2 \{1\} q(t). \quad (59)$$

Интегрирование выражения (59) (постоянная интегрирования здесь также принимает нулевое значение) приводит к тождественному равенству

$$\mathcal{M}_3 T = \Gamma_3(t_1) - G_3(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} G_2(t) - \mathcal{M}_2 \{1\} G_1(t). \quad (60)$$

Аналогично могут быть получены тождественные равенства четвертого порядка и выше:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_4 T &= \Gamma_4(t) - G_4(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} G_3(t) - \mathcal{M}_2 \{1\} G_2(t) - \mathcal{M}_3 \{1\} G_1(t), \\ \mathcal{M}_5 T &= \Gamma_5(t) - G_5(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} G_4(t) - \mathcal{M}_2 \{1\} G_3(t) - \mathcal{M}_3 \{1\} G_2(t) - \mathcal{M}_4 \{1\} G_1(t), \\ &\dots\dots\dots \\ \mathcal{M}_n T &= \Gamma_n(t) - G_n(t) - \mathcal{M}_1 \{1\} G_{n-1}(t) - \mathcal{M}_2 \{1\} G_{n-2}(t) - \dots - \mathcal{M}_{n-1} \{1\} G_1(t). \end{aligned} \quad (61)$$

Положив $\mathcal{M}_0 = 1$, на основании уравнений (48), (54), (60), (61) приходим к последовательности

$$\left\{ \mathcal{M}_n T \equiv \Gamma_n(t) - \sum_{i=1}^n k_i G_i(t) \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+, \quad (62)$$

где $k_i = \mathcal{M}_{n-i} \{1\} = \int_1^{0x} \int_1^{0x} \dots \int_1^{0x} dx^2 \dots \int_1^{0x} dx^2$. Проведя для $\mathcal{M}_{n-i} \{1\}$ $2n$ -кратное интегрирование, вместо (64) получаем

$$\left\{ \mathcal{M}_n T \equiv \Gamma_n(t) - \sum_{i=1}^n \frac{G_i(t)}{(2n-2i)!} \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (63)$$

Интегральные тождества, образующие последовательность (63), объединяют интегральные граничные характеристики $\Gamma_n(t)$, $2n$ -кратные интегралы от искомой температурной функции по всей области определения $x \in [0,1]$ и спектр характеристик $\{G_n(t)\}_n$ для граничной функции $q(t)$.

Вторая стадия процесса в последующих приближениях. Вернемся к рассмотрению задачи (32)–(33) с представлением температурного профиля в виде полинома пятой степени. В этом случае из (63) сразу запишем три дополнительных уравнения:

$$\begin{aligned} \int_1^{0x} \int_1^{0x} T(x,t) dx^2 &= \Gamma_1(t) - G_1(t), & \int_1^{0x} \int_1^{0x} \int_1^{0x} T(x,t) dx^4 &= \Gamma_2(t) - G_2(t) - \frac{1}{2} G_1(t), \\ \int_1^{0x} \int_1^{0x} \int_1^{0x} \int_1^{0x} T(x,t) dx^6 &= \Gamma_3(t) - G_3(t) - \frac{1}{2} G_2(t) - \frac{1}{24} G_1(t). \end{aligned} \quad (64)$$

Найдем из граничных условий (33) и уравнений (64) коэффициенты $b_j(t)$, $j = \overline{1,5}$, полинома (34):

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{35}{16} \left(-5 + 210t - 4536t^2 + 39600t^3 - 52G_0(t) - 5574G_1(t) - 109728G_2(t) - 237600G_3(t) \right), \\ b_2 &= 40 \left(1 - 63t + 1512t^2 - 13860t^3 + 20G_0(t) + 2016G_1(t) + 38556G_2(t) + 83160G_3(t) \right), \\ b_3 &= \frac{105}{8} \left(-5 + 378t - 9720t^2 + 92400t^3 - 144G_0(t) - 13758G_1(t) - 257760G_2(t) - 554400G_3(t) \right), \\ b_4 &= 50 \left(1 - 84t + 2268t^2 - 22176t^3 + \frac{184}{5} G_0(t) + 3360G_1(t) + 61992G_2(t) + 133056G_3(t) \right), \\ b_5 &= \frac{231}{16} \left(-1 + 90t - 2520t^2 + 25200t^3 - 44G_0(t) - 3870G_1(t) - 70560G_2(t) - 151200G_3(t) \right). \end{aligned}$$

Для определения функции $q(t)$ применим интеграл теплового баланса (35), что приводит к интегродифференциальному уравнению

$$4q'(t) + 1275q(t) + 94410G_1(t) + 1669680G_2(t) + 3564000G_3(t) = 2070t - 56160t^2 + 594000t^3 - 30, \quad (65)$$

в котором функция $q(t)$ присутствует в виде производной $q'(t)$, а также под знаками интегралов в функциях $G_1(t)$, $G_2(t)$ и $G_3(t)$. Уравнение (65) может быть переведено в обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка относительно новой функции $p(t) = G_3(t)$. Отсюда имеем очевидные равенства:

$$G_3(t) = p(t), \quad G_2(t) = p'(t), \quad G_1(t) = p''(t), \quad q(t) = p^{(3)}(t), \quad q'(t) = p^{(4)}(t). \quad (66)$$

С учетом равенств (66) уравнение (65) примет вид

$$4p^{(4)} + 1275p^{(3)} + 94410p''(t) + 1669680p'(t) + 3564000p(t) = 2070t - 56160t^2 + 594000t^3 - 30. \quad (67)$$

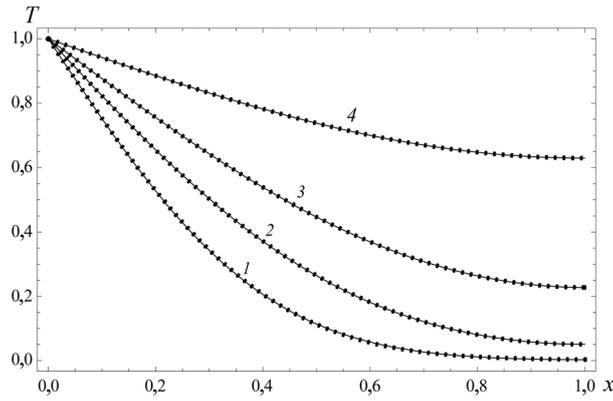


Рис. 2. Приближенные температурные профили, рассчитанные по формуле (71) (пунктир), в сравнении с точным решением (сплошные линии) в разные моменты времени: 1, 2, 3, 4 – $t = 0,05$; $0,1$; $0,2$; $0,5$ соответственно ($N = 5$)

Для функции $p(t)$, исходя из ее определения и представления функции $G_n(t)$ в виде (38), справедливы начальные условия

$$p(t_1) = G_3(t_1) = 0, \quad p'(t_1) = G_2(t_1) = 0, \quad p''(t_1) = G_1(t_1) = 0, \quad p^{(3)}(t_1) = q(t_1) = 0. \quad (68)$$

Отсюда на основании уравнения (67) и условий (68) приходим к задаче Коши для функции $p(t) = G_3(t)$ с нулевыми начальными условиями. Запишем характеристическое уравнение

$$4\mu^4 + 1275\mu^3 + 94410\mu^2 + 1669680\mu + 3564000 = 0, \quad (69)$$

корни которого определяют собственные значения: $\mu_1 = 2,467401$ (точное значение $\mu_1^* = 2,467401$ [24]), $\mu_2 = 22,1410$ ($\mu_2^* = 22,2066$ [24]), $\mu_3 = 74,13041$, $\mu_4 = 220,01121$. Первое вычисленное собственное значение совпадает с точным значением вплоть до шестого знака после запятой. Следует отметить, что известный интегральный метод дополнительных граничных условий [18–20] для приближенного решения с тем же полиномом пятой степени ($N = 5$) позволяет получить лишь два собственных значения, причем с более низкой точностью.

Решение системы (67)–(68) и последующее трехкратное дифференцирование по t найденной функции $p(t)$ дает искомую граничную функцию в следующем виде:

$$q(t) = 1 - 1,27324 e^{-2,467401t} + 0,41846 e^{-22,14098t} - 0,38808 e^{-74,13041t} - 2,4668 e^{-220,01121t} \quad (70)$$

и соответственно приближенное аналитическое решение задачи для второй стадии теплового процесса ($t_1 = 0,04148$):

$$\begin{aligned} T(x, t) = & 1 - \left(1,8054344x + 0,004587x^2 - 0,767965x^3 + 0,04726x^4 + 0,06005x^5\right) e^{-2,467401(t-t_1)} - \\ & - \left(0,80085x + 0,431778x^2 - 5,826683x^3 + 6,31953x^4 - 1,892494x^5\right) e^{-22,140976(t-t_1)} - \\ & - \left(0,14928x - 0,27480x^2 - 0,929812x^3 + 2,1765076x^4 - 1,103256x^5\right) e^{-74,13041(t-t_1)} - \\ & - \left(0,016962x - 0,1247245x^2 + 0,30535x^3 - 0,3057115x^4 + 0,1078574x^5\right) e^{-220,0112(t-t_1)}. \end{aligned} \quad (71)$$

Результаты расчетов безразмерных температур, согласно формуле (71), представлены на графиках рис. 2. Их анализ позволяет отметить, что полученное решение во всем рассматриваемом временном диапазоне практически совпадает с точным решением.

Заключение. На основе интеграла теплового баланса и применения систем из тождественных равенств, включающих $2n$ -кратные интегралы от искомой температурной функции и интегральные граничные характеристики, образуемые многократным интегрированием задаваемой функции граничного условия, получены аналитические решения краевых задач нестационарной теплопроводности для регулярного и нерегулярного режимов процесса нагрева (охлаждения)

протяженной пластины при граничных условиях первого рода. Доказано существование последовательностей, которые образуют тождественные равенства как для первой стадии процесса, так и для второй его стадии. Показано, что по точности и сходимости приближенных решений предложенный интегральный метод граничных характеристик превосходит известные методы, основанные на рассмотрении фронта возмущения, на порядок и выше. Полученные данным методом решения, по существу, являются точными, поскольку погрешность для широкой области значений параметров задач составляет сотые – десятитысячные доли процента.

Список использованной литературы

1. *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.
2. *Caldwell, J.* Numerical methods for one-dimensional Stefan problems / J. Caldwell, Y. Y. Kwan // *Comm. Numer. Meth. Eng.* – 2004. – Vol. 20, N 7.– P. 535–545.
3. *Caldwell, J.* Numerical solution of the Stefan problems by the heat balance integral method, Part I – cylindrical and spherical geometries / J. Caldwell, Y. Y. Kwan // *Comm. Numer. Meth. Eng.* – 2000. – Vol. 16, N 8.– P. 535–545.
4. A cubic heat balance integral method for one-dimensional melting of a finite thickness layer / T. G. Myers [et al.] // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2007. – Vol. 50, N 25–26. – P. 5305–5317.
5. *Addison, J. A.* Ray Methods for free boundary problems / J. A. Addison, S. D. Howison, J. R. King // *Quart. Appl. Math.* – 2006. – Vol. LXIV, N 1. – P. 41–59.
6. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, Д. Н. Андрианов.– Минск.: Бел. наука, 2005. – 560 с.
7. *Био, М.* Вариационные принципы в теории теплообмена / М. Био. – М.: Энергия, 1975. – 209 с.
8. *Баренблатт, Г. И.* О некоторых приближенных методах в теории одномерной неустановившейся фильтрации жидкости при упругом режиме / Г. И. Баренблатт // *Изв. АН СССР. ОТН.* – 1954. – № 9. – С. 35–49.
9. *Dorodnitsyn, A. A.* General method of integral relations and its application to boundary layer theory / A. A. Dorodnitsyn. – Th. von Karman. *Advances in Aeronautical Sciences*, Pergamon, 1965. – P. 207–219.
10. *Hristov, J.* The heat-balance integral method by a parabolic profile with unspecified exponent: Analysis and exercises / J. Hristov // *Thermal Sci.* – 2009. – Vol. 13, N 2. – P. 27–48.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *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.
15. *Langford, D.* The heat balance integral method / D. Langford // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* – 1973. – Vol. 16, N 12. – P. 2424–2428.
16. *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.
17. *Layeni, O. P.* Hybrids of the heat balance integral method / Layeni O. P., Johnson J. V. // *Appl. Math. Comput.* – 2012. – Vol. 218, N 14–15. – P. 7431–7444.
18. *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.
19. *Goodman, T. R.* The heat-balance integral – further considerations and refinements / T. R. Goodman // *Transactions of ASME, ser. C.* – 1961. – N 1. – P. 83–93.
20. *Федоров, Ф. М.* Граничный метод решения прикладных задач математической физики / Ф. М. Федоров. – Новосибирск: Наука, 2000. – 220 с.
21. *Кудинов, В. А.* Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях / В. А. Кудинов, Б. В. Аврин, Е. В. Стефанюк. – М.: Высшая школа, 2008. – 305 с.
22. *Кудинов, В. А.* Аналитический метод решения задач теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения / В. А. Кудинов, Е. В. Стефанюк, М. С. Антимонов// *Инженерно-физический журнал.* – 2009. – Т. 82, № 3. – С. 540–558.
23. *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.
24. *Лыков, А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 600 с.

Поступила в редакцию 19.06.2015

УДК 549.742.121+662.765

М. В. МАЛЬКО, С. В. ВАСИЛЕВИЧ, В. Н. БОГАЧ, Д. В. ДЕГТЕРОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ КАРБОНИЗАЦИИ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

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

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований кинетики реакции $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_2$, выполненные в изотермических условиях при температурах 773, 873, 973 и 1123 К. В опытах пиролизный газ, содержащий примерно 14,5 мас.% CO_2 , подавался в реакционную зону, в которой размещался образец отожженного доломита. Степень протекания реакции определялась по приросту массы образца, выдерживаемого при постоянной температуре.

Анализ полученных данных показал, что кинетика карбонизации CaO характеризуется наличием типичных для гетерогенных процессов периодов, таких как индукция, ускорение и замедление. Для малых степеней превращения стадией, определяющей скорость суммарного процесса, является химическое взаимодействие CaO и CO_2 . Для данной стадии на основании выполненного исследования определены энергия активации (29,6 кДж/моль) и предэкспоненциальный фактор аррениусовской зависимости ($0,36 \cdot 10^{-1} \text{ мин}^{-1}$ или $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$).

Ключевые слова: пиролизный газ, диоксид углерода, доломит, кинетика карбонизации, энергия активации, предэкспоненциальный фактор.

M. V. MALKO, S. V. VASILEVICH, U. M. BANACH, D. V. DEGTEROV

EXPERIMENTAL STUDY OF CALCIUM OXIDE CARBONATION KINETICS UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

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

The results of experimental studies of kinetics of the reaction $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_2$ performed at isothermal conditions at temperatures of 773, 873, 973 and 1123 K are being discussed. Pyrolysis gas, containing approximately 14.5% vol. of CO_2 was fed during the experiments into the reaction zone, which housed the sample of calcinated dolomite. The extent of the reaction was determined from the weight gain of the sample kept at a constant temperature.

Analysis of the data has shown that the kinetics of the CaO carbonation reaction is characterized by typical periods of heterogeneous processes, such as periods of induction, reaction acceleration and deceleration. The rate-determining step of the overall process for small degrees of conversion is a chemical reaction of CaO and CO_2 . Activation energy and pre-exponential factor of the Arrhenius equation were estimated for this stage on the basis of the performed study. They are 29.6 kJ/mol and $0.36 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($6.0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) respectively.

Keywords: pyrolysis gas, carbon dioxide, dolomite, kinetics of the carbonation, activation energy, pre-exponential factor.

Введение. В настоящее время в разных странах мира проводятся исследования по использованию биомассы в качестве топлива для энергетических установок. Особый интерес представляет технология термохимической конверсии биомассы [1], которая позволяет использовать имеющееся энергетическое оборудование. Проведение конверсии по технологии быстрого пиролиза при температурах порядка 800 К дает возможность получения жидких продуктов, пригодных для применения в качестве топлива двигателей внутреннего сгорания. Термохимическая конверсия биомассы при температурах выше 1000 К позволяет получать газообразные продукты (водород и монооксид углерода), которые можно применять как топливо для газопоршневых машин.

Один из существенных недостатков процесса термохимической конверсии биомассы – образование большого количества диоксида углерода, составляющего при определенных условиях до 50% объема получаемого газа. Следствие этого – невысокая теплотворная способность продуктов термохимической конверсии, что существенно снижает эффективность данного процесса.

Результаты экспериментальных исследований специалистов разных стран позволяют заключить, что данную проблему можно решить путем связывания CO_2 по реакции $\text{CO}_2 + \text{CaO} = \text{CaCO}_3$ с использованием природных доломитов качестве источника CaO [2–6].

Республика Беларусь располагает большими запасами растительной биомассы [7] и природных доломитов [8], что способствует производству топлива для двигателей внутреннего сгорания и других тепловых машин с применением технологий термохимической конверсии биомассы.

Как известно, природный доломит является минералом двойного карбоната $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, содержащим также примеси свободного карбоната кальция CaCO_3 , окислов железа, алюминия и других элементов [9]. В процессе выдержки доломита на протяжении примерно 30 мин и выше при температуре порядка 1000 К происходят полное разложение соединений $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и CaCO_3 с выходом CO_2 в газовую фазу и, следовательно, превращение исходного сырья в смесь оксидов кальция, магния, железа, алюминия и т. д. [10]. Такой процесс получил название отжига.

Кинетика реакции взаимодействия CO_2 с отожженным доломитом зависит от размера и состава его частиц, условий отжига, условий исследования и других факторов. Невозможность напрямую применять технологии по связыванию CO_2 доломитом, разработанные в других странах, требует экспериментального изучения собственных природных доломитов. Последнее и определяет актуальность как разработки технологий термохимической конверсии биомассы, так и технологий по очистке полученных продуктов от CO_2 , что в свою очередь указывает на важность исследования кинетики взаимодействия диоксида углерода и оксида кальция.

В настоящей работе приведены предварительные результаты экспериментального исследования кинетики реакции $\text{CO}_2 + \text{CaO} = \text{CaCO}_3$, выполненного в изотермических условиях при 773, 873, 973, 1123 К.

Методика экспериментального исследования. Опыты по кинетике реакции взаимодействия CO_2 с оксидом кальция проведены на экспериментальной установке (рис. 1) с лабораторным реактором 1, позволяющим нагревать образцы отожженного доломита до 1273 К. Камера реактора 2 выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали диаметром 2 см и высотой 10 см, в который помещался образец отожженного доломита с исходной массой около 0,5 г. Нижний конец камеры 2 соединялся с подводящим каналом, по которому из газогенератора поступал пиролизный газ. Содержание CO_2 в пиролизном газе на выходе из газогенератора составляло 14,5 мас. %.

Температура пиролизного газа на входе в камеру поддерживалась равной 673 К, давление 1 атм, а расход составлял 0,025 кг/ч. Температура в реакционной камере регистрировалась с помощью термопары 3 и измерителя-регулятора температур «Сосна-002» 4, обеспечивающих возможность работы при измерении температур до 1373 К с точностью до $\pm 0,01\text{К}$.

Состав пиролизного газа на выходе из газогенератора измерялся с помощью газоанализатора «Дэкос» 5, позволяющего измерять состав газовых смесей, температуру, давление, скорость течения, объемный расход с относительной погрешностью концентраций отдельных компонентов $\pm 5\%$, температуры $\pm 2\text{К}$, давления ± 1 отн.%, скорости потока $\pm 0,01$ м/с. Расход пиролизных газов измерялся при помощи ротаметра типа РМ (ГОСТ 13045–81).

В опытах образцы отожженного доломита выдерживались при заданной постоянной температуре. Через образцы пропускался пиролизный газ с фиксированным содержанием CO_2 . Масса образцов измерялась через определенные промежутки времени на электронных весах Stohl с относительной погрешностью 2%.

Степень протекания реакции определялась по приросту массы образца, выдерживаемого при постоянной температуре. Результаты исследования динамики изменения массы исходных образцов доломита представлены в табл. 1.

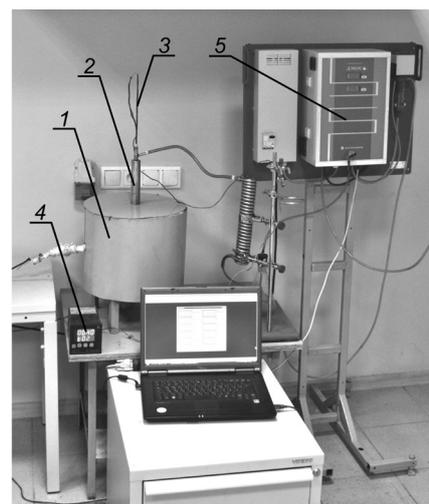


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – лабораторный реактор; 2 – реакционная камера; 3 – термопара; 4 – измеритель-регулятор температур; 5 – газоанализатор

Т а б л и ц а 1. Изменение массы исходных частиц отожженного доломита с течением времени выдержки

Время, мин	Температура, К			
	773	873	973	1023
	Масса образца, г			
0	0,64	0,6	0,5	0,5
10	0,64	0,6	0,5	0,5
30	0,66	0,63	0,52	0,52
60	0,67	0,7	0,58	0,54
90	0,67	0,74	0,64	0,54
120	0,67	0,75	0,66	0,55
150	0,66	0,75	0,64	0,54
180	0,67	0,75	0,65	0,54

Кинетический анализ. Подход, разработанный Ли [11], использован в настоящей работе для анализа кинетики реакции



Автор [11] предложил следующее выражение для описания степени превращения в гетерогенном процессе:

$$\frac{dX}{dt} = k \left(1 - \frac{X}{X_u} \right)^n. \quad (2)$$

Здесь k – константа скорости реакции; X – текущая степень превращения CaO по реакции взаимодействия CaO с CO_2 ; X_u – предельная степень превращения CaO в этом процессе, зависящая от температуры и размеров частицы и не являющаяся равновесной величиной; n – численный коэффициент, равный 1 или 2.

Величина X определяется по формуле

$$X = \frac{\mu_{\text{CaO}}}{\mu_{\text{CO}_2}} \left(\frac{m_t - m_0}{cm_0} \right), \quad (3)$$

где μ_{CaO} и μ_{CO_2} – молекулярные веса CaO и CO_2 ; m_t и m_0 – текущая и исходная массы образца доломита; c – константа, характеризующая массовую долю CaO в исходном отожженном доломите, равная 0,57. Эта величина определена на основании данных по составу природных доломитов, приведенному в [10].

Возможность использования степени превращения CaO для количественного описания реакции (1) обусловлена тем, что в этой реакции расходуется одинаковое количество молей CO_2 и CaO.

Результаты расчета значений X , выполненные на основе данных табл. 1, представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, величина X является сложной функцией времени выдержки. На начальной стадии наблюдается практически линейная зависимость величины X от времени, характеризующая максимальную скорость реакции (1). С увеличением времени выдержки скорость изменения X снижается и приближается к некоей постоянной величине X_u , определяющей предельную степень превращения CaO и CO_2 в CaCO_3 .

Зависимость величины X от времени выдержки (рис. 2) указывает на переход от этапа, на котором лимитирующим процессом, определяющим скорость, является химическое взаимодействие CaO и CO_2 , к этапу, где скорости взаимодействия CaO и CO_2 определяются наличием диоксида углерода в зоне непосредственного взаимодействия данных компонентов. Количество CO_2 может быть ограничено снижением скорости диффузии молекул CO_2 к молекулам CaO вследствие формирования слоя из карбоната кальция, образующегося вследствие взаимодействия CaO и CO_2 . Причиной снижения скорости реакции (1) при достижении определенной степени превращения CaO может быть уменьшение скорости химической адсорбции CO_2 вследствие снижения

количества центров адсорбции по мере протекания суммарного процесса образования CaCO_3 . Возможны и другие причины данного явления, что требует детального исследования всех возможных причин, обуславливающих замедление скорости карбонизации CaO .

Данные, полученные в настоящем исследовании, позволяют отметить, что обсуждаемый эффект замедления скорости реакции (1) имеет энергетический барьер. На это указывает величина предельной степени превращения по реакции (1). Если при 773 К предельная степень превращения CaO составляет примерно 0,1, то при 973 К она достигает величины 0,6 (рис. 2). При этом основное превращение CaO в карбонат кальция происходит за время выдержки, при котором химическое взаимодействие является лимитирующим процессом. Переход суммарного процесса в зону, где лимитирующая стадия – эффект торможения (например, диффузия), приводит к прекращению процесса и достижению предельного значения степени превращения X_u .

Значения величины X_u , рассчитанные по данным табл. 1, представлены в табл. 2 и на рис. 3. Предельная степень превращения CaO и CO_2 растет в области температур 773–973 К и снижается с дальнейшим ростом температуры. Более низкое значение величины X_u при температурах порядка 1100 К обусловлено распадом образующегося CaCO_3 .

Т а б л и ц а 2. Значения предельной степени реакции $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$

T, K	773	873	973	1123
X_u	0,104	0,557	0,712	0,200

При малых степенях превращения CaO уравнение (2) запишется приближенно в виде

$$\frac{dX}{dt} \approx k. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет оценить величину константы скорости реакции (1). Его удобно записать в виде

$$\frac{X_j - X_i}{t_j - t_i} = k. \quad (5)$$

Здесь X_j и X_i – соответственно эмпирические значения параметра X в моменты времени t_j и t_i .

Соотношение (5) использовано в настоящей работе для оценки константы скорости взаимодействия CaO с CO_2 на основании данных табл. 1. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Экспериментальные значения константы скорости реакции $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$

T, K	773	873	973
$t_j - t_i, \text{мин}$	30–10	90–10	60–30
$k, \text{мин}^{-1}$	0,00348	0,00649	0,00891

Аррениусовская зависимость, построенная по данным табл. 3, показана на рис. 4. Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения доломита, представленных в табл. 3, приводит к зависимости

$$\ln(k) = -\frac{3564,2}{T} - 1,0211. \quad (6)$$

Точность аппроксимации определяется следующими величинами:

$$R^2 = 0,986, \quad p = 0,077. \quad (7)$$

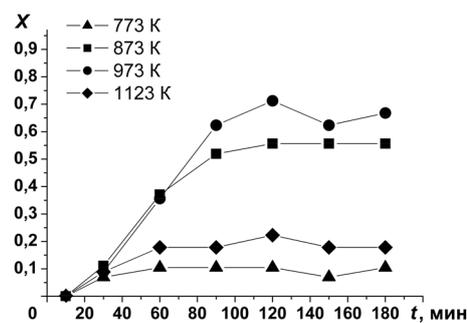


Рис. 2. Изменение степени превращения оксида кальция в зависимости от температуры и времени выдержки

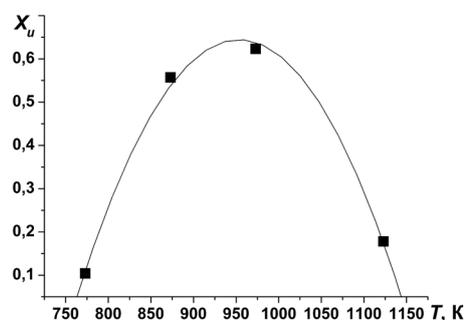


Рис. 3. Зависимость предельного значения степени превращения по реакции (1) от температуры

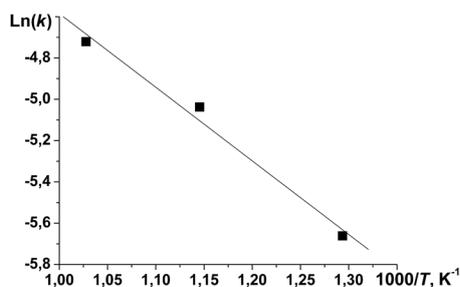


Рис. 4. Аррениусовская зависимость константы скорости реакции карбонизации оксида кальция от обратной температуры

ментальных исследований, выполненных в области 773–1123 К. Ву и Лан [13] определили значение энергии активации реакции (1) на стадии, контролируемой химическим взаимодействием, равное 30,2 кДж/моль. Данные авторы изучали процесс карбонизации СаО в области 773–873 К.

Вместе с тем в ряде работ установлены значения энергии активации химической стадии реакции (1), которые существенно отличаются от величины, полученной авторами настоящего исследования. По данным Ли [11], величина энергии активации реакции (1) равна 72 кДж/моль. Столь сильное расхождение в результатах требует привлечения дополнительных данных для определения действительного значения энергии активации. Такие данные существуют. Как известно из химической кинетики, для каждой обратимой реакции выполняется условие

$$E_d - E_r = \Delta H . \quad (8)$$

Здесь E_d , E_r – энергии активации прямой и обратной обратимой реакции; ΔH – энтальпия реакции при постоянном давлении.

В данном случае в качестве прямой обратимой реакции можно принять реакцию термического разложения СаСО₃:



а в качестве обратной обратимой реакции – реакцию взаимодействия СаО с СО₂, т. е. реакцию (1).

В [14] энергия активации разложения кальцита, т. е. прямой обратимой реакции (9), определена равной 203 кДж/моль. Подстановка этой величины и значения энергии активации взаимодействия СаО и СО₂, установленного в настоящем исследовании ($E \approx 29,6$ кДж/моль), дает значение энтальпии обратимой реакции разложения кальцита (173,4 кДж/моль).

Расчеты на основании термодинамических данных, приведенных в [15], дают для интервала 700–900 К усредненное значение теплового эффекта реакции (1), равное 173,3 кДж/моль. Эта величина практически полностью совпадает со значением теплового эффекта, рассчитанным выше на основании данных по энергии активации прямого и обратного процессов реакции (1). Необходимо отметить, что энергия активации реакции (1), определенная в настоящем исследовании (29,6 кДж/моль), и энергия активации термического разложения СаСО₃, приведенная в [14] (203 кДж/моль), установлены в независимых экспериментальных исследованиях.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о корректности значений энергии активации термического разложения СаСО₃. Отсюда же следует, что обсуждаемое выше расхождение в значениях энергии активации данного процесса обусловлено некорректностью определения этой величины автором [11].

Свободный член зависимости (6) определяет значение предэкспоненциального фактора A константы скорости, описывающей скорость термического разложения доломита в изученных условиях ($A = 0,36$ мин⁻¹).

С учетом приведенных выше величин можно выразить значения константы скорости в исследованном интервале температур:

$$k = 0,36 \cdot 10^{-1} \exp\left(-\frac{29600}{R_0 T}\right), \text{ мин}^{-1}, \quad (10)$$

$$k = 6 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{29600}{R_0 T}\right), \text{ с}^{-1}, \quad (11)$$

что позволяет адекватно описать кинетику реакции (1) в условиях, когда лимитирующей стадией процесса взаимодействия CaO и CO₂ является химическое взаимодействие указанных компонентов.

Согласно Ли [11], интегрирование кинетического уравнения (2) при $n = 1$ дает следующее выражение для определения величины X :

$$X = X_u \left[1 - \exp\left(-\frac{kt}{X_u}\right) \right]. \quad (12)$$

Для $n = 2$ автор [11] получил следующее интегральное выражение:

$$X = \frac{X_u t}{X_u / k + t}. \quad (13)$$

Значения величины X , рассчитанные при температуре 773 К по уравнению (12), представлены на рис. 5, а. Здесь же для сравнения даны экспериментальные значения величины X . Как следует из рис. 5, а, уравнение (12) дает адекватное описание экспериментальных величин, установленных для карбонизации CaO при 773 К. Об этом свидетельствует усредненное отклонение расчетных величин X от соответствующих экспериментальных величин, равное 5,1%. Последняя величина рассчитана на основании выражения

$$Y = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - X_i^f|}{X_i}, \quad (14)$$

где X_i – эмпирическая степень превращения CaO; X_i^f – величина, рассчитанная по выражению (12).

На рис. 5, б представлены эмпирические значения величины X и значения, рассчитанные по уравнению (13). Сравнение данных рис. 5, а, б указывает, что кинетика взаимодействия CaO и CO₂ по реакции (1) более точно описывается выражением (12), полученным в [11] при интегрировании уравнения (2) с параметром n , равным 1.

Следует отметить, что и уравнение (12), и уравнение (13) не совсем точно описывают экспериментальные данные по кинетике карбонизации оксида кальция. При степенях превращения порядка 0,05–0,06 уравнения (12), (13) дают величины, превышающие экспериментальные значения, а при X свыше 0,05–0,06 – величины, более низкие по сравнению со значениями, приведенными в настоящей работе.

Аналогичные результаты получены для опытов, выполненных при 873, 973 и 1123 К, о чем свидетельствуют данные в табл. 4, где приведены усредненные для каждой температуры степени отклонения значений величины X , рассчитанной по выражениям (12) и (13), от опытных значений этой величины. Анализ данных табл.4 показывает, что для рассматриваемых температурных режимов уравнение (12) дает более точное описание эмпирических значений степени пре-

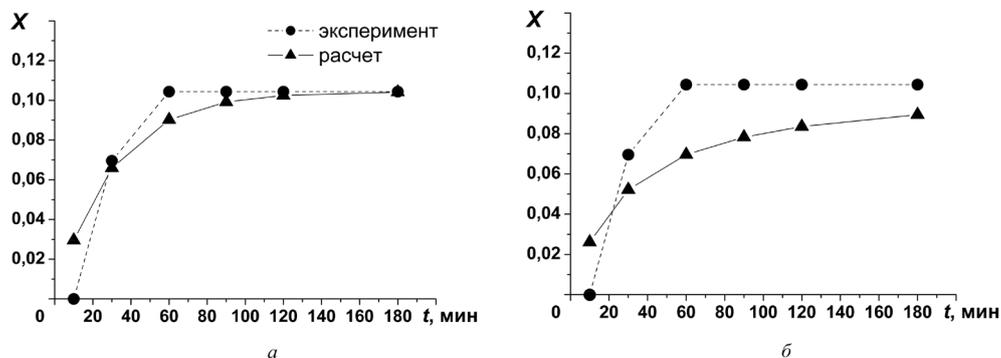


Рис. 5. Сравнение экспериментальных значений параметра X и величин, рассчитанных по уравнениям (12) (а), (13) (б)

Т а б л и ц а 4. Степени отклонения экспериментальных и расчетных значений превращения CaO в реакции $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$

T, K	773	873	973	1123
Y_{12} (уравнение (12))	5,1	26,3	37,7	10,9
Y_{13} (уравнение (13))	23,5	37,3	40,9	27,4

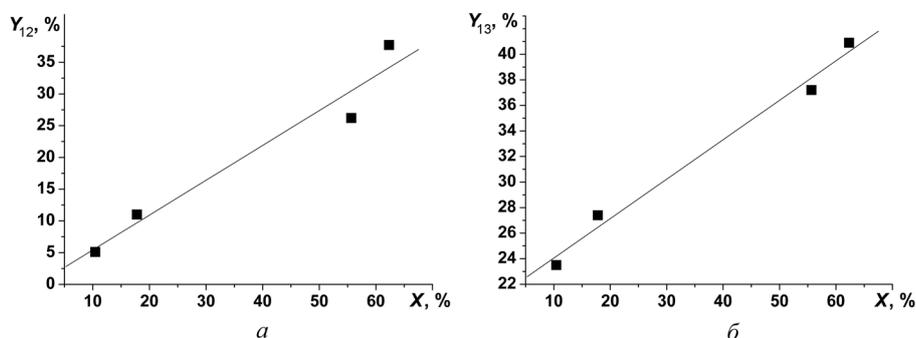


Рис. 6. Зависимость значений степени отклонения Y , рассчитанных по уравнениям (12) (а), (13) (б) от опытных величин X

вращения CaO по реакции (1), чем уравнение (13). Это означает, что параметр $n = 2$ не следует применять для описания диффузионного торможения реакции (1).

Как следует из данных табл. 4, при температуре выше 773 К ни уравнение (12), ни уравнение (13) не дают адекватного описания кинетики взаимодействия CaO и CO_2 . Применение этих уравнений занижает реальные значения степени превращения CaO в области диффузионного торможения. Отклонение расчетных значений степени превращения от экспериментальных возрастает с увеличением степени превращения. Это можно видеть из данных, представленных на рис. 6, а, б.

Аппроксимация методом наименьших квадратов данных (табл. 4, рис. 6, а, б) показала, что отклонения являются линейными функциями степени превращения:

$$Y_{13} = 54,904X - 0,072; R^2 = 0,950; p = 0,025, \quad (15)$$

$$Y_{14} = 30,879X + 20,961; R^2 = 0,986; p = 0,0069. \quad (16)$$

Как следует из (15) и (16), имеется статистически достоверная связь между величиной усредненного отклонения расчетных и опытных величин степени превращения CaO по реакции (1). Это указывает, что наблюдаемое отклонение обусловлено не погрешностями эксперимента, а погрешностями модели Ли [11], учитывающей диффузионные эффекты не полностью.

Очевидно, что адекватное описание кинетики реакции (1) не только на стадии химического контроля суммарного процесса, но и на стадии торможения требует продолжения экспериментальных и теоретических исследований реакции карбонизации CaO.

Заключение. В статических условиях при 773, 873, 973 и 1123 К выполнены экспериментальные исследования кинетики взаимодействия CO_2 и CaO. Данный процесс изучался на основе регистрации прироста массы образцов доломита с исходной массой порядка 0,5 г, помещенных в лабораторный реактор. На основании выполненных исследований определены значения константы скорости химического взаимодействия CaO и CO_2 и аррениусовские параметры этого процесса: $E = 29,6$ кДж/моль, $A = 0,36$ мин⁻¹ ($6 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹).

Список использованной литературы

1. Bridgwater, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass / A. V. Bridgwater // Chem. Eng. J. – 2003. – Vol. 91. – P. 87–102.
2. Stendardo, S. Carbon dioxide capture with dolomite: a model for gas-solid reaction within the grains of a particulate sorbent / S. Stendardo, P. U. Foscolo // Chem. Eng. Sci. – 2009. – Vol. 64, N 10. – P. 2343–2352.

3. Hot gas cleaning and upgrading with a calcined dolomite located downstream a biomass fluidized bed gasifier operating with steam-oxygen mixtures / P. Pérez [et al.] // *Energy and Fuels*. – 1997. – Vol. 11, N 6. – P. 1194–1197.
4. Catalytic hot gas cleaning of gasification gas / P. Simell [et al.] // *Catalysis Today*. – 1996. – Vol. 27, N 1-2. – P. 55–62.
5. Orio, A. Performance of difference dolomites on hot raw gas cleaning from biomass gasification with air / A. Orio, J. Corella and I. Narvaez // *Proceedings of Conference on Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Banff, Canada, 20–24 May 1996*. – 1996. – P. 1144–1150.
6. Biomass gasification: Produced Gas Upgrading by In-Bed Use of Dolomit / A. Olivares [et al.] // *Industrial & Eng. Chem. Res.* – 1997. – Vol. 35. – P. 5220–5226.
7. Ковалевич, А. И. Лесные ресурсы как возобновляемый энергетический потенциал Беларуси / А. И. Ковалевич // *Матер. Междунар. семинара экспертов, Минск, Беларусь, 22–24 февраля 2011*. – Минск 2011. – С. 101–114.
8. Полезные ископаемые Беларуси: К 75-летию БелНИГРИ / Редкол.: П. З. Хомич [и др.]. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2002. – С. 395–398.
9. Горная энциклопедия. Т. 1 / Под ред. Е. А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – С. 172.
10. Сорбент на основе природного доломита для извлечения радионуклидов кобальта / А. И. Ратько [и др.]. // *Радиохимия*. – 2011. – Т. 53, № 6. – С. 534–537.
11. Lee, D. K. An apparent kinetic model for the carbonation of calcium oxide by carbon dioxide / D. K. Lee // *Chem. Eng. J.* – 2004. – Vol. 100. – P. 71–77.
12. Rashidi, N. F. The kinetic model of calcination and carbonation of Andara Granosa / N. F. Rashidi, M. Mohamed, S. Yusup // *Int. J. Renewab. Energ. Research*. – 2012. – Vol. 2, N 3. – P. 497–503.
13. Wu, S. F. A kinetic model of Nano-CaO reactions with CO₂ in a sorption complex catalyst / S. F. Wu, P. Q. Lan // *AIChE Journal*. – 2012. – Vol. 58, N 5. – P. 1570–1577.
14. Экспериментальное исследование кинетики термического разложения белорусских доломитов / М. В. Малько [и др.] // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. навук*. – 2015. – № 1. – С. 95–101.
15. Robie, R. A. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 Bar (10⁵ Pascals) Pressure and at Higher Temperatures / R. A. Robie, B. S. Hemingway. – United States Government Printing Office, Washington, 1995. – P. 470.

Поступила в редакцию 09.07.2015

УДК 621.039.577-182.3

*А. П. АХРАМОВИЧ¹, И. В. ВОЙТОВ², В. П. КОЛОС¹***О РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕАКТОРА С МИКРОТВЭЛАМИ.
УСЛОВИЯ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ ТЕПЛОСЪЕМА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ
НА ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ***¹Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: ahr@bas-net.by,**²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: rector@belstu.by*

Получены условия автомодельности теплосъема в насыпных активных зонах относительно мощности реактора. При этом термические напряжения конструктивных элементов на частичных нагрузках остаются неизменными. В таких активных зонах могут быть достигнуты энергонапряженность 10 МВт/дм³ и нейтронные потоки свыше 5·10¹⁶ нейтрон/(см²·с), что открывает путь к созданию компактных, мобильных ядерных установок различного целевого назначения.

Ключевые слова: реактор с микротвэлами, топливный слой, энерговыделение, динамическое согласование, продольно-поперечная фильтрация, линии тока, теплосъем.

*A. P. AKHRAMOVICH, I. V. VOITOV, V. P. KOLOS***ON THE PERFORMANCE OF A REACTOR WITH MICROFUEL.
TERMS OF SELF-SIMILARITY OF HEAT REMOVAL IN THE REACTOR CORE AT PARTIAL LOADS***¹Institute 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: rector@belstu.by*

Conditions of self-similarity of heat removal relative to the reactor power for bulk active zones have been determined. In this case the thermal stresses of structural elements at partial loads remain unchanged. The power intensity of 10 MW / dm³ and neutron fluxes over 5·10¹⁶ neutron/(cm²·s) can be achieved in such active zones. This opens a way for creation of compact and mobile nuclear devices of different using.

Keywords: reactor with micro fuel, fuel bed, dynamic coherence, longitudinal and transvers filtration, streamlines, heat removal.

Преимущества ядерного топлива в виде микротвэлов (шариков из делящегося материала диаметром порядка миллиметра, покрытых оболочкой для удержания радиоактивных продуктов деления) обусловлены их сыпучестью, большой удельной поверхностью теплосъема и высокой стойкостью. Эти свойства топлива позволяют достичь энергонапряженности активной зоны 10 МВт/дм³ и нейтронных потоков свыше 5·10¹⁶ нейтрон/(см²·с) [1–3], открывая тем самым путь к созданию безопасных, компактных, мобильных ядерных установок различного целевого назначения. Насыпная кассета [4, 5] является одной из наиболее рациональных конструкций, в которой в полном объеме реализуются положительные свойства микротвэлов. Активная зона может состоять из одной или многих таких кассет с одинаковой схемой гидравлического тракта.

Рассмотрим одно из главных условий работоспособности насыпных монокассетных реакторов – эффективный теплосъем в активной зоне при работе на частичных нагрузках. Принципиальная схема показана на рисунке.

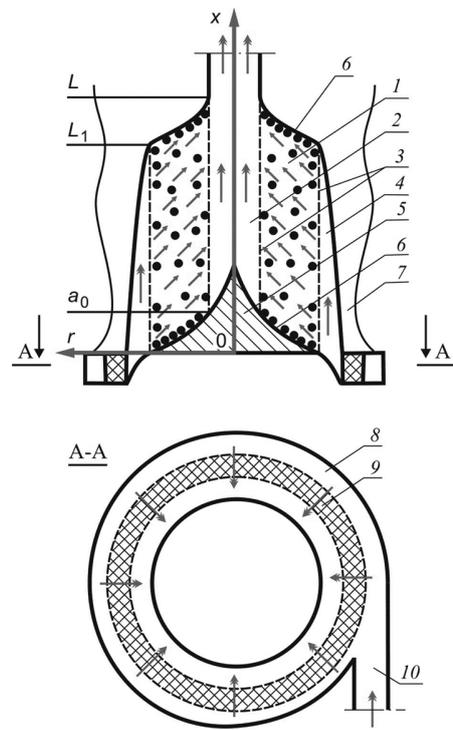
Микротвэлы находятся между двумя коаксиальными цилиндрическими решетками и профилированными торцевыми стенками и образуют плотный топливный слой (засыпку). Профилированная обечайка и внешняя ограждающая решетка формируют кольцевой распределительный канал, внутренняя ограждающая решетка является проницаемой стенкой отводного канала.

Входное устройство имеет форму улитки. Теплоноситель в нем за счет сил инерции равномерно распределяется по полярному углу кольцевого проходного сечения распределительного канала [6]. Двигаясь по каналу, теплоноситель проходит сквозь внешнюю ограждающую решетку, попадает в топливный слой, фильтруется в продольно-поперечном направлении и снимает генерируемое тепло. Через внутреннюю ограждающую решетку он поступает в отводной канал и по нему покидает активную зону. Требуемая раздача теплоносителя в насыпном реакторе достигается профилированием каналов и торцов слоя [7, 8]. Монокассетный реактор может быть как водо-водяным, так и газовым на быстрых нейтронах.

Очевидно, что распределение потока по высоте засыпки зависит не только от размеров и форм конструктивных элементов, но и от величины энерговыделения и расхода теплоносителя. Здесь необходимы специальные меры, обеспечивающие интенсивный теплосъем при различной мощности установки, в противном случае возможен перегрев активной зоны с нарушением физики реактора. Таким образом, задача обоснования работоспособности насыпного реактора сводится к определению условий, при которых поле энтальпии потока в активной зоне не изменяется при различных расходах теплоносителя и мощностях тепловыделения.

Проанализируем термогидродинамику монокассетной активной зоны. Для этого используем цилиндрическую систему координат, ось аппликат которой совместим с осью конструкции и направим в сторону выхода теплоносителя, а начало системы поместим на входе (рисунок). Индексом 1 отметим параметры, относящиеся к распределительному каналу, индексом 2 – параметры, относящиеся к отводному каналу. Нулем обозначим величины в начале активной зоны (при $x = 0$), символом L – величины в конце активной зоны (L – высота засыпки). Индекс 1, 2 присвоим соотношениям, имеющим одинаковую форму записи как для распределительного, так и отводного каналов. Символ * присвоим параметрам на проницаемых стенках каналов. Величины, используемые в общих рассуждениях или касающиеся непосредственно топливного слоя, не помечаются.

Ограждающие решетки выполнены гидродинамически инертными. Они имеют строго цилиндрические поверхности, малую толщину и максимально высокую проницаемость, поэтому не оказывают существенного воздействия на поток теплоносителя. Данное обстоятельство позволяет для описания термогидродинамики активной зоны использовать условия сопряжения на границе раздела пористых сред [9, 10], приняв, что в топливном слое в силу его квазиоднородности пористость имеет постоянное значение по всему объему, а со стороны канала она равна единице. При моделировании процесса теплосъема пренебрегаем скачками энтальпии и давления, возникающими при входе-выходе потока из засыпки, поскольку они на несколько порядков меньше перепадов соответствующих величин в топливном слое. В результате получим выражения, справедливые для обеих боковых поверхностей засыпки:



Принципиальная схема активной зоны с микротвэлами: 1 – топливный слой (засыпка); 2 – отводной канал; 3 – коаксиальные цилиндрические решетки; 4 – распределительный канал; 5 – обтекатель; 6 – профилированные торцевые стенки; 7 – профилированная обечайка; 8 – канал в форме улитки; 9 – пористая втулка; 10 – входной патрубок

$$[I]=0; [P]=0; [\varepsilon V_r]=0; [V_x]=0, \quad (1)$$

где I, P – энтальпия и давление теплоносителя; V_r, V_x – радиальная и аксиальная компоненты вектора скорости потока \vec{V} ; ε – пористость.

Отметим также, что разрывы термодинамических параметров на границе раздела сред следует принимать во внимание при исследовании устойчивости фильтрации в тепловыделяющем слое [11, 12]. В нашем случае их учет приводит к очень громоздким промежуточным выкладкам, а на окончательное решение (вывод) не влияет.

При течении теплоносителя сквозь засыпку поток подчиняется законам идеальной жидкости с учетом эффективной силы трения \vec{S} в общем балансе сил [13]. Таким образом, при стационарной фильтрации уравнение движения имеет вид

$$[\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} + \nabla P] \cdot \vec{l} = \vec{S} \cdot \vec{l} = -\frac{\xi \rho}{2d} |\vec{V}|^2; \quad \xi = c \text{Re}^m, \quad (2)$$

где ρ – плотность теплоносителя; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления засыпки; Re – число Рейнольдса; \vec{l} – безразмерный единичный вектор, касательный к линии тока; d – диаметр микротвэла; c, m – экспериментально получаемые коэффициенты, зависящие от режима течения.

При небольших скоростях сила трения пропорциональна \vec{V} :

$$\vec{S} = -\frac{\varepsilon}{\aleph} \vec{V}, \quad (3)$$

при значительных скоростях имеет место квадратичный закон сопротивления [14]:

$$\vec{S} = -k \rho |\vec{V}| \vec{V}; \quad k = \frac{1,7(1-\varepsilon)}{\varepsilon d}. \quad (4)$$

Здесь \aleph – коэффициент фильтрации.

Силы инерции при фильтрации сконцентрированы в узком пространстве вблизи границ топливного слоя, поэтому движение теплоносителя опишем уравнением

$$\nabla P = \vec{S}, \quad (5)$$

а влияние инерционных эффектов на поведение потока на боковых границах учтем посредством условий сопряжения (1).

Что касается торцов засыпки, то здесь силы инерции приводят к образованию застойных и отрывных зон, лимитирующих интенсивность теплосъема [15]. Для нивелирования этого негативного эффекта смачиваемым поверхностям ограждающих стенок придается специальная форма. Она определяется из требования одновременного выполнения условий безынерционности фильтрации и непроницаемости торцов при номинальных параметрах [8]:

$$V_n |_{\Phi_{0,L}} \equiv 0, \quad (6)$$

где V_n – проекция вектора скорости на нормаль к смачиваемым поверхностям торцевых стенок $\Phi_{0,L}$. Для сохранения высокой интенсивности теплосъема на частичных нагрузках необходимо, чтобы поле скоростей также удовлетворяло тождеству (6).

Тепловая обстановка в активной зоне описывается системой стационарных уравнений [15]:

$$I_1 = I(x, R_1) = I_{10}; \quad (7)$$

$$\varepsilon \rho \vec{V} \nabla I = q; \quad (8)$$

$$\nabla \rho \vec{V} = 0; \quad (9)$$

$$I_2 = G_2^{-1} \int_{a_0}^x I(x, R_2) \frac{dG_2}{dx} dx; \quad (10)$$

$$\rho = \rho(P, I), \quad (11)$$

а течение теплоносителя в каналах – усредненными (по проходным сечениям) уравнениями движения [10]:

$$\frac{dP_{1,2}}{dx} = \left(-\frac{3}{2} \frac{G}{F^2 \rho} \frac{dG}{dx} + \frac{G^2}{F^3 \rho} \frac{dF}{dx} + \frac{G^2}{(F\rho)^2} \frac{d\rho}{dx} + \frac{\rho}{2G} \frac{dG}{dx} (V_x^*)^2 - \frac{\xi G^2}{2F^2 \rho D} \right)_{1,2}. \quad (12)$$

Здесь $R_{1,2}$ – внешний, внутренний радиусы топливного слоя; q – объемное тепловыделение в засыпке; $(F, D, \xi)_{1,2}$ – соответственно проходное сечение, эквивалентный гидравлический диаметр, коэффициент гидравлического сопротивления канала; x, r – текущие координаты; $G_{1,2}$ – расход теплоносителя в каналах; a_0 – аппликата линии пересечения торцевой стенки с внутренней боковой поверхностью топливного слоя.

Обратимся к величине объемного тепловыделения. Ее зависимость от мощности определяется нейтронно-физическими процессами в активной зоне, природа и характер которых позволяют описать q функциями с разделенными переменными [16]:

$$q(Q, x, r) = \frac{Q}{Q^0} q^0(x, r), \quad (13)$$

где Q – мощность реактора на частичных нагрузках; Q^0 – номинальная мощность реактора. Здесь и далее верхним индексом 0 отмечаются параметры на номинальном режиме работы установки.

Как наиболее простой вариант поставленной задачи сначала определим условия неизменности поля энтальпии в активной зоне на частичных нагрузках при радиальном течении теплоносителя в топливном слое, рассматривая его как предельный случай продольно-поперечной фильтрации ($V_x/V_r \rightarrow 0$). Затем покажем состоятельность этих условий для теплосъема без ограничений кривизны линий тока в засыпке.

Несложно заметить, что при радиальном течении требование (6) выполняется при плоских торцах, ортогональных оси активной зоны, без явных математических ограничений величины расхода G_{10} . Тогда в соответствии с выражением (13) и уравнениями (7)–(11) получим, что поле энтальпии сохраняется при автомодельности профиля массовой скорости фильтрации относительно расхода, подаваемого в активную зону:

$$\rho_1 V_r(x, R_1) L \int_0^L \rho_1 V_r(x, R_1) dx \neq f(G_{10}). \quad (14)$$

Выясним, когда возможен отмеченный режим течения. При любом значении расхода G_{10} справедливо уравнение динамического согласования [17]

$$\frac{dP_1}{dx} - \frac{dP_2}{dx} - \frac{d}{dx} \Delta P = 0, \quad (15)$$

описывающее распределение потока теплоносителя по высоте топливного слоя. Введем безразмерную величину $g = G_2/G_{10}$ и запишем проинтегрированное уравнение (8) и уравнение (15) в развернутом виде:

$$I(x, r) = I_{10} - \frac{2\pi}{Q^0} \left(\frac{dg}{dx} \right)^{-1} \frac{Q}{G_{10}} \int_{R_1}^r q^0(x, r) r dr;$$

$$\frac{3(1-g)}{2(F^2\rho)_1} \frac{dg}{dx} + \frac{(1-g)^2}{(F^3\rho)_1} \frac{dF_1}{dx} + \frac{(1-g)^2}{2(F\rho)_1^2} \frac{d\rho_1}{dx} - \frac{\xi_1(1-g)^2}{2(F^2\rho D)_1} +$$

$$+ \frac{3}{2(F^2\rho)_2} \frac{g}{dx} \frac{dg}{dx} - \frac{g^2}{(F^3\rho)_2} \frac{dF_2}{dx} - \frac{g^2}{2(F\rho)_2^2} \frac{d\rho_2}{dx} + \frac{\xi_2 g^2}{2(F^2\rho D)_2} = -\frac{1}{8\pi^2 d} \frac{dg}{dx} \frac{d^2 g}{dx^2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\xi dr}{r^2 \rho}.$$

Проанализировав выражения (16), определим условия, при которых поле энтальпии потока в реакторе, работающем на номинальном режиме, остается таким же и на частичных нагрузках; ими будут постоянство отношения мощности реактора к расходу G_{10}

$$\frac{Q}{G_{10}} = \left(\frac{Q}{G_{10}} \right)^0, \quad (17)$$

неизменность параметров теплоносителя на входе в активную зону

$$I_{10} = I_{10}^0; P_{10} = P_{10}^0, \quad (18)$$

квадратичный закон сопротивления в каналах и слое

$$(\xi_{1,2} \wedge \xi) \neq f(\text{Re}), \quad (19)$$

невысокая изотермическая сжимаемость теплоносителя

$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \ll 1. \quad (20)$$

В расчетной практике вместо выражения (20) удобно использовать равнозначное ему условие

$$\left. \frac{\rho(T, P_{10}) - \rho(T, P_{2L})}{\rho(T, P)} \right|_{\substack{T \in [T_{10}; T_{2L}] \\ P \in [P_{10}; P_{2L}]} \ll 1, \quad (21)$$

явно связывающее между собой термодинамические параметры теплоносителя на входе-выходе из активной зоны и позволяющее плотность теплоносителя считать функцией только энтальпии:

$$\rho = \rho(I). \quad (22)$$

Далее покажем, что выполнение условий (17)–(19), (21) обеспечивает и при продольно-поперечном течении в топливном слое сохранность поля энтальпии теплоносителя в активной зоне на частичных нагрузках ($\delta I/dQ \approx 0$). Для этого введем новый параметр ϑ , связанный с давлением теплоносителя следующим образом:

$$P = P_{10} - G_{10}^2 \vartheta. \quad (23)$$

Уравнение фильтрации (5) при квадратичном законе сопротивления (4) разрешим относительно вектора массовой скорости. На результирующее выражение

$$\rho \vec{V} = G_{10} \frac{\nabla \vartheta}{\sqrt{k |\nabla \vartheta| / \rho}} \quad (24)$$

подействуем оператором дивергенции, а затем, освободившись с помощью уравнения неразрывности (9) от \vec{V} , получим приведенное уравнение динамики теплоносителя в слое

$$\nabla^2 \vartheta = \frac{1}{2} \nabla \vartheta \cdot \nabla \ln \frac{k}{\rho} |\nabla \vartheta|. \quad (25)$$

Уравнение энергии (8) после подстановки в него (13), (17), (22), (23) примет вид

$$\frac{\varepsilon \nabla I \cdot \nabla \vartheta}{\sqrt{k |\nabla \vartheta| / \rho(I)}} = \frac{1}{Q^0} \left(\frac{Q}{G_{10}} \right)^0 q^0(x, r), \quad (26)$$

откуда следует, что

$$I = f(\vartheta, (\cdot)^0) \Rightarrow \rho = \rho(\vartheta, (\cdot)^0); \quad (27)$$

$$\rho_1 = \rho|_{r=R_1} = \rho_1^0; \quad \rho|_{r=R_2} = \rho(\vartheta, (\cdot)^0)|_{r=R_2}; \quad \rho_2 = \rho_2(\vartheta, (\cdot)^0).$$

При записи (27) учитывались выражения (7), (10) и (18). Множество величин, относящихся к номинальной мощности реактора, обозначено $(\cdot)^0$.

Рассмотрим краевые условия. При продольно-поперечной фильтрации форма торцов слоя определяется интегрированием уравнения линии тока [7, 8]:

$$\frac{dx}{dr} = \frac{V_x}{V_r} \Rightarrow \frac{dx}{dr} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} / \frac{\partial \vartheta}{\partial r}; \quad (28)$$

$$x|_{r=R_1} = 0 \wedge L_1,$$

где L_1 – длина распределительного канала.

В этом случае тождество (6) примет вид

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right|_{\Phi_{0,L}} = 0. \quad (29)$$

Перейдем к формулировке краевых условий на боковых поверхностях топливного слоя. Из выражения (1) для давления следует, что

$$\left. \frac{dP_{1,2}}{dx} = \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{r=R_{1,2}}. \quad (30)$$

Левая часть равенства (30) описывается выражением (12). Изменение расхода в каналах $\frac{dG_{1,2}}{dx}$, сам расход $G_{1,2}$ и массовую скорость скольжения $\rho V_x^*|_{1,2}$ выразим через ϑ , используя формулу (24):

$$\frac{dG_{1,2}}{dx} = \pm 2\pi \varepsilon R_{1,2} \rho V_r|_{r=R_{1,2}} = \pm 2\pi \varepsilon R_{1,2} G_{1,0} \left. \frac{\partial \vartheta / \partial r}{\sqrt{k|\nabla \vartheta|/\rho}} \right|_{r=R_{1,2}};$$

$$G_{1,2} = G_{1,0} \left(1 + 2\pi \varepsilon R_{1,2} \int_{0;L}^x \left. \frac{\partial \vartheta / \partial r}{\sqrt{k|\nabla \vartheta|/\rho}} \right|_{r=R_{1,2}} dx \right); \quad (31)$$

$$\rho V_x^*|_{1,2} = G_{1,2} \left. \frac{\partial \vartheta / \partial x}{\sqrt{k|\nabla \vartheta|/\rho}} \right|_{r=R_{1,2}}.$$

Подставив (27) и (31) в уравнение (12), получим развернутые выражения левых частей боковых краевых условий, которые можно представить следующим образом:

$$\left. \frac{dP_{1,2}}{dx} = G_{1,0}^2 f_{1,2}(\vartheta, (\cdot)^0) \right|_{r=R_{1,2}}, \quad (32)$$

сами же граничные условия примут вид

$$f_{1,2}(\vartheta, (\cdot)^0) + \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{r=R_{1,2}} = 0. \quad (33)$$

Поскольку приведенное уравнение динамики (25) с учетом выражения для плотности теплоносителя (27) и краевых условий (29), (33) содержит лишь величины ϑ и $(\cdot)^0$, то его решение будет зависеть только от величин, относящихся к номинальной мощности реактора:

$$\vartheta = f((\cdot)^0) = \vartheta^0.$$

Отсюда и следуют (см. (24), (26)) автомодельность поля массовой скорости фильтрации, характеризующей теплосъем

$$\rho \vec{V} = \frac{G_{10}}{G_{10}^0} (\rho \vec{V}^0)$$

и сохранность энтальпии теплоносителя в активной зоне

$$I = I^0$$

при выполнении условий (17)–(19), (21).

В этом же случае линии тока на торцах слоя не изменяются, они совпадают с образующими поверхностями ограждающих стенок. В результате на частичных нагрузках не возникают зоны с резко сниженной интенсивностью теплосъема.

Полученные условия (17)–(19), (21) можно реализовать на практике. Основанием для такого заключения служат результаты работы Р. Симпсона, полученные при обдувании пластины потоком газа с одновременной фильтрацией через нее [18]. Автомодельность теплосъема является уникальной положительной особенностью функционирования ядерных реакторов с микротрещинами, обусловленной спецификой их конструкции. Очень важно, что при высокой энергонапряженности активной зоны термические напряжения в ее конструктивных элементах можно сохранить неизменными при работе установки на частичных нагрузках.

Список использованной литературы

1. Rodin, M. B. Study of the packed-bed fuel element concept / M. B. Rodin // ANL-6193. 1960. – 55 s.
2. Powell, J. R. High flux research reactors based on particulate fuel / J. R. Powell, H. Takahashi, F. L. Horn // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. – 1986. – Vol. 249. – P. 66–76.
3. Характеристики и экспериментальные возможности реактора СМ после модернизации активной зоны / В. А. Цыканов [и др.] // Исследовательские реакторы в XXI в.: Сб. докладов Международной конференции. Москва, 21–24 июня 2006 г. – М.: НИКИЭТ, 2006. – С. 109–118.
4. Тепловыделяющий элемент насыпного типа: а. с. 797413 СССР / А. П. Ахрамович, В. Т. Казазян, В. П. Колос; дата публ.: 15.09.1980.
5. Ядерный реактор насыпного типа: а. с. 1313236 СССР / А. П. Ахрамович [и др.]; дата публ.: 22.01.1987.
6. Колос, В. П. Гидромеханика входного устройства тепловыделяющего аппарата / В. П. Колос, С. М. Кочемазов, В. Н. Сорокин // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 43, № 3. – С. 370–377.
7. Ахрамович, А. П. Оптимизация профилей каналов аппарата радиального типа с учетом точности их изготовления, обеспечиваемой технологией производства / А. П. Ахрамович, В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. – 1990. – № 3. – С. 90–101.
8. Колос, В. П. Организация безотрывного продольно-поперечного течения жидкости в кольцевом плотном слое / В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Докл. АН БССР. – 1986. – Т. 30, № 1. – С. 51–54.
9. Колос, В. П. Условия сопряжения на границе раздела пористых сред / В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Докл. АН БССР. – 1984. – Т. 28, № 8. – С. 713–716.
10. Ахрамович, А. П. Закономерности скольжения жидкости на проницаемой стенке канала / А. П. Ахрамович, В. В. Сорокин // Докл. АН БССР. – 1991. – Т. 35, № 2. – С. 140–143.
11. Колос, В. П. Условия гидродинамической устойчивости насыпного твэла / В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Докл. АН БССР. – 1981. – Т. 25, № 6. – С. 710–713.
12. Колос, В. П. Устойчивый и псевдоустойчивый режимы фильтрации / В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Теплофизика высоких температур. – 1983. – Т. 21, № 6. – С. 1231–1233.
13. Гольдштик, М. А. Элементарная теория концентрированных дисперсных систем / М. А. Гольдштик, Б. Н. Козлов // Прикладная механика и техническая физика. – 1973. – № 4. – С. 67–77.
14. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2005. – 358 с.
15. Ахрамович, А. П. Продольно-поперечная фильтрация жидкости в кольцевом тепловыделяющем слое / А. П. Ахрамович, В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Инженерно-физический журнал. – 1987. – Т. 52, № 5. – С. 756–765.
16. Дементьев, Б. А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов / Б. А. Дементьев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
17. О возможности создания высокоэнергонапряженного ядерного реактора на низкообогащенном топливе / А. П. Ахрамович [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 4. – С. 115–118.
18. Simpson, R. L. The turbulent boundary layer on a porous plate: experimental skin friction with variable injection and suction / R. L. Simpson, R. J. Moffat, W. M. Kays // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1969. – Vol. 12, N 7. – P. 771–789.

Поступила в редакцию 15.10.2015

УДК 536.2:532/533; 517.958:539.219.3

У. М. ХАРМА

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОГЛОТИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,
e-mail: abuhawash@hotmail.com*

Приведены результаты численного моделирования неизо термического влагопереноса в пористом поглотителе электромагнитной энергии с учетом явления термовлагопроводности. Анализ полей влагосодержания, давления пара, температуры для различных моментов времени показывает существенное перераспределение влаги в неизо термических условиях, которое необходимо учитывать при маскировке объекта.

Ключевые слова: неизо термический влагоперенос, пористый поглотитель, электромагнитная энергия, изотерма сорбции, термовлагопроводность.

О. М. KHRMA

MODELLING OF NON-ISOTHERMAL MOISTURE TRANSFER IN ABSORBERS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
e-mail: abuhawash@hotmail.com*

Results of numerical modeling of non-isothermal moisture transfer in porous absorber of electromagnetic energy in view of the phenomena of heat and moisture are presented. An analysis of the moisture content of fields, steam pressure and temperature for different times shows a significant distribution of moisture in non-isothermal conditions, which must be considered when masking object.

Keywords: nonisothermal moisture transfer, porous absorber, electromagnetic energy, sorption isotherm, heat and moisture.

Введение. Как известно [1–7], вода является эффективным поглотителем электромагнитной энергии СВЧ-поля, что может использоваться в материалах для маскировки объектов. Наиболее эффективно использование воды, находящейся не в свободном, а в капиллярно-связанном состоянии в пористом материале. В отличие от воды в макрообъеме свойства тонких, моно- и полимолекулярных ее слоев в капиллярно-пористых структурах зависят от межмолекулярных сил притяжения на границах раздела смежных сред. Связанная вода обладает повышенными плотностью, вязкостью, относительной диэлектрической проницаемостью.

Если радиус капилляра меньше 10^{-7} м, то под действием сил поверхностного натяжения жидкость может оказаться в метастабильном состоянии, так как ее капиллярное давление $P_c = \frac{2\sigma \cos\Theta}{r} < 0$, и, следовательно, находится при отрицательных давлениях, что может привести к релаксационным фазовым переходам с участием термодинамически неустойчивых состояний – спиnodального распада [7]. Существенно, что при $P_c < 0$ жидкость является метастабильной и могут происходить ее спонтанное вскипание и конденсация.

Для моделирования процессов переноса в пористых средах часто используют процессы переноса в отдельном капилляре, а также уравнения Навье–Стокса с соответствующими краевыми условиями. Однако в этом случае сложно оценить глубину «захода» жидкости в метастабильное состояние, время вскипания, а также образование пузырьков и их влияние на течение в капилляре. Фазовое равновесие в этом случае необходимо понимать в динамическом смысле, так как во внутрипоровом пространстве постоянно происходят процессы вскипания и конденсации фаз.

Эффект поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в СВЧ-диапазоне длин волн возрастает при повышенном содержании солей в водном растворе. При этом добавка (например, хлористого кальция) обеспечивает одновременно морозостойкость влагосодержащего пористого экрана. Отметим, что во многих случаях обеспечение малозаметности объекта затруднительно в неизотермических условиях, когда экран располагают над «горячей» поверхностью (например, нагретым корпусом танка) и существует разница температур между поверхностью и окружающей средой.

Вследствие явления термовлагопроводности происходят движение влаги в холодные части образца и практически полное насыщение пористой структуры водным раствором электролита. Эффект поглощения электромагнитной энергии в этом случае уменьшается и материал не обеспечивает требуемой маскировки.

Математическая модель. Как правило, влагосодержащие экраны располагают в герметических оболочках, поэтому в дальнейшем потоки пара в окружающую среду через оболочку не учитываем. При численном моделировании будем использовать разработанную нами ранее физико-математическую модель неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых средах [8, 9], которая базируется на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции влаги пористым материалом, термодинамических уравнениях Кельвина, Клапейрона–Клаузиуса. При данном подходе количество эмпирических коэффициентов переноса значительно уменьшается. Задачу формулируем в одномерной постановке. Схематически модель изображена на рис. 1.

На границах раздела смежных сред металл – поглотитель – воздух происходит теплообмен по закону Ньютона. Окружающая среда имеет температуру T_c , экранируемая поверхность – температуру T_s , которую полагаем постоянной величиной.

При построении физической модели будем использовать допущение о справедливости выполнения гипотезы локального термодинамического равновесия в элементарном макрообъеме пористого тела, что можно обосновать следующим образом. В пористой среде граница двух фаз разбивается на множество отдельных участков с различной кривизной R_0 , близкой по порядку величины к размеру R_0 порового канала. В [7, 8] показано, что время релаксации и переход в состояние термического равновесия имеют тот же порядок, что и время установления динамического массообменного равновесия между жидкостью и паром. Неравновесный процесс движения влаги в этом случае необходимо понимать как квазиравновесный процесс, когда каждый локальный макрообъем пористого тела проходит через непрерывный ряд мгновенных состояний локального термодинамического равновесия (ЛТР) между фазами. В большинстве ситуаций гипотеза ЛТР является достаточно обоснованной как в теории сушки А. В. Лыкова при определении массообменных характеристик, так и в теории двухфазной фильтрации при определении функции Леверетта. В [7] показано, что, как правило, время релаксации много меньше характерных времен протекания процессов движения влаги в пористой структуре. На границе поглотителя и окружающей среды происходит теплообмен по закону Ньютона.

Постановка задачи. Рассмотрим пористый влажный образец (ткань) толщиной 5 мм с начальным влагосодержанием 2 кг/кг и температурой $T_0 = 293$ К, помещенный в оболочку, непроницаемую для пара и влаги. Левая граница образца ($x = 0$) контактирует с окружающей средой с температурой $T_c = 20$ °С, а правая граница – с экранируемым металлическим объектом (например, площадка над работающим двигателем танка) с температурой $T_s = 50$ °С. Коэффициент теплообмена между тканью и окружающей средой полагаем $\alpha_0 = 30$ Вт/(м²·К), между тканью и металлом – $\alpha_R = 50$ Вт/(м²·К). Известна изотерма сорбции ткани:

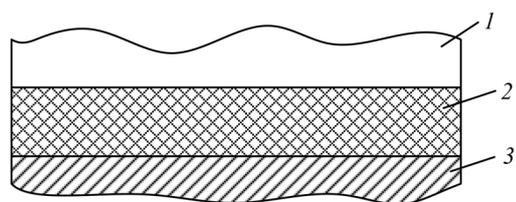


Рис. 1. Схема модели расчета: 1 – окружающая среда; 2 – пористый поглотитель ЭМИ; 3 – экранируемая поверхность

теплообмена между тканью и окружающей средой полагаем $\alpha_0 = 30$ Вт/(м²·К), между тканью и металлом – $\alpha_R = 50$ Вт/(м²·К). Известна изотерма сорбции ткани:

$$u_e = 4 \left(\frac{1}{1 - 10 \ln \varphi} + \frac{1}{1 - 20 \ln \varphi} \right), \quad (1)$$

где φ – относительная влажность.

Физические параметры для ткани: проницаемость $K = 1 \cdot 10^{-12}$ м², плотность $\rho = 100$ кг/м³, пористость $m = 0,8$, теплопроводность $\lambda = 0,2$ Вт/(м·К), эффективная

теплоемкость $C_p = 0,9 \cdot 10^6$ Дж/(кг·К). Начальное внутрипоровое давление пара определяется из изотермы сорбции данного материала по методике [7–9]: $P_{n0} = 2000$ Па. Капиллярные перетоки влаги существенны для капиллярно-пористых сред при $\phi \geq 0,7$, когда равновесное влагосодержание, согласно (1), превышает $u_e(0,7)$.

В данной работе учитывается движение влаги только вследствие процесса перемещения паров внутри ткани. Капиллярные течения в микрокапиллярах, согласно [7], могут вносить дополнительный вклад в данный процесс, но направление движения в холодные части пористой структуры за счет градиента температуры может только усиливать данный эффект. Кроме того, в настоящее время отсутствуют методы определения обобщенного коэффициента фильтрации капиллярной жидкости, так как этот параметр можно определить только из решения обратной задачи на основе экспериментальных данных. Систему дифференциальных уравнений тепло-массопереноса можно представить в виде:

уравнение переноса пара

$$m \frac{\partial(\rho_v \theta_v)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_v K_0 f_v}{\eta_v} \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) - I, \quad (2)$$

уравнение переноса энергии

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + LI. \quad (3)$$

Используя изотерму сорбции (1) и замыкающие соотношения:

состояние идеального газа (пара)

$$P_v = \rho_v RT / v'', \quad (4)$$

зависимость (аппроксимация) давления насыщенного пара от температуры (погрешность 10–15%)

$$P_s = 10^5 \left(\frac{T}{373} \right)^{15}, \quad (5)$$

выражение для удельной теплоты фазового перехода

$$L = r_0 - \frac{RT^2}{v''_{liq}} \left(\frac{\partial \ln P_v}{\partial T} \right)_{P_{liq}}, \quad (6)$$

выражение интенсивности массообмена между фазами

$$I = \rho_s \frac{\partial u_e}{\partial t} = \rho_s \left(\frac{\partial u_e}{\partial P_v} \right) \frac{\partial P_v}{\partial t} + \rho_s \left(\frac{\partial u_e}{\partial T} \right)_{\rho_v} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

получаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными T и P_v .

Используя зависимость $\theta_v = 1 - \theta_{liq} = 1 - \frac{\rho_s}{m \rho_{liq}} u_{liq}$ и закон для идеального газа (4), левую часть уравнения переноса пара (2) запишем в виде

$$\begin{aligned} m \frac{\partial(\rho_v \theta_v)}{\partial t} &= m \theta_v \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + m \rho_v \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = m \theta_v \frac{v''}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_v}{T} \right) + m \frac{P_v v''}{RT} \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \\ &= \left(m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v''}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \left(m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v'' P_v}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{P_v v'' \rho_s}{RT \rho_{liq}} \frac{\partial u_{liq}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение фильтрации пара имеет вид

$$\begin{aligned} &\left(- \left(m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v'' P_v}{RT^2} + \rho_s \left(\frac{\partial u_e}{\partial T} \right)_{P_v} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \\ &+ \left(- \left(m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v''}{RT} + \rho_s \left(\frac{\partial u_e}{\partial P_v} \right)_T \right) \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v v'' \rho_s}{RT \rho_{liq}} \frac{\partial u_{liq}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_v K_0 f_v}{\eta_v} \left(\frac{\partial P_v}{\partial x} \right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

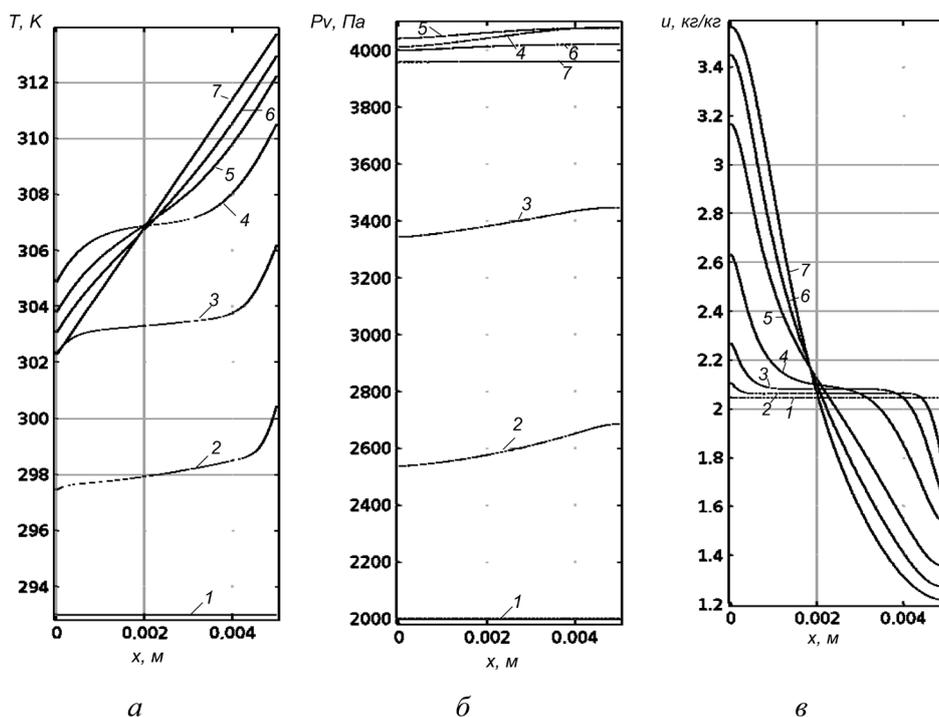


Рис. 2 Распределение температуры (а), давления пара (б), влагосодержания (в) по сечению образца для различных моментов времени: 1 – 0 с, 2 – 20, 3 – 60, 4 – 180 с, 5 – 540, 6 – 900, 7 – 2700 с

Краевые условия для уравнений (3), (9):

$$t = 0: T(x, 0) = T_0, P_v(x, 0) = P_{v0}, \quad (10)$$

$$x = 0: \frac{\partial P_v}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0(T - T_c), \quad (11)$$

$$x = R: \frac{\partial P_v}{\partial x} \Big|_{x=R} = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=R} = \alpha_R(T - T_3). \quad (12)$$

В данном случае α_0 – коэффициент теплообмена поглотителя с окружающей средой, а α_R – коэффициент теплообмена поглотителя с маскируемым объектом.

Численный метод решения системы уравнений (1)–(12) изложен в [8, 9]. На рис. 2 приведены результаты численного расчета полей влагосодержания, давления пара и температуры для различных моментов времени для одномерного случая. Вследствие повышения температуры возрастает внутрипоровое давление паров воды, а градиенты температуры приводят к движению и конденсации паров воды в холодных частях образца ткани. Отметим, что, как правило, внутрипоровая жидкость обладает хорошей электропроводностью и ее накопление на поверхности ткани (контакт с окружающей средой) может привести к значительному увеличению отражающей способности электромагнитных полей и эффект маскировки, обусловленный поглощением ЭМИ в гетерогенной пористой структуре, значительно снижается. Ввиду этого необходимы меры по поддержанию поглотителя ЭМИ в изотермических условиях, например обдувом поглотителя теплым воздухом от работающего двигателя или охлаждением поверхности техники обдувом атмосферным воздухом (под поглотителем).

В данной задаче не учитывалось влияние капиллярных сил, но, как было показано в [7], качественный характер эволюции во времени полей влагосодержания, давления пара, температуры сохраняется. Кроме того, ткань является средой с двойной пористостью (сочетание макро- и микропор), в которых, как известно, действие капиллярных течений не является существенным.

Заключение. Приведены результаты численного моделирования неизолированного влагопереноса в пористом поглотителе электромагнитной энергии с учетом явления термовлагопро-

водности. Анализ полей влагосодержания, давления пара, температуры для различных моментов времени показывает зависимость распределения влаги от градиента температур, которую необходимо учитывать при маскировке объекта.

Обозначения

c_p – удельная изобарная теплоемкость пористого тела, Дж/(кг·К); c_{pliq} , c_{ps} , c_{pv} – теплоемкость жидкой, твердой и газообразной фазы, Дж/(кг·К); I – интенсивность массообмена между фазами, кг/(м³·с); K – коэффициент проницаемости пористой среды, м²; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; m – пористость, м³/м³; P_c – капиллярное давление, Па; P_{liq} – давление жидкости, Па; P_s – давление насыщенного пара, Па; P_v – давление пара, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); r_0 – удельная теплота испарения свободной жидкости, Дж/кг; t – время, с; T – температура, К; u_e – равновесное влагосодержание, кг/м³; u_{liq} – влагосодержание, кг/м³; v_{liq}'' , v_v'' – молярная масса жидкости и водяного пара, кг/моль; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); η_v – динамическая вязкость пара и жидкости, Па·с; Θ – краевой угол смачивания, град; θ_{liq} , θ_v – насыщенность пористой среды жидкостью и паром, м³/м³; λ – теплопроводность пористой среды, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; ρ_{liq} , ρ_s , ρ_v – плотность жидкой, твердой и газообразной фазы, кг/м³; σ – поверхностное натяжение, Н/м; φ – относительная влажность паров.

Список использованной литературы

1. Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах / Т. В. Борботько [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2006. – 230 с.
2. Технические средства защиты информации: тезисы докл. XII Белорусско-российской научно-технической конференции (Минск, 28–29 мая 2014 г.) / [редколлегия: Л. М. Лыньков и др.]. – Минск, БГУИР, 2014. – 79 с.
3. Комбинированные материалы для имитации естественных сред в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн для систем защиты информации / Омер Джамаль Саад Абулькасим [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2014. – 159 с.
4. Пассивные технические средства обеспечения информационной безопасности от утечки по электрическому, оптическому и акустическому каналам / Х. М. Алялябад [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2010. – 226 с.
5. Абдулькадер, А. Х. Тепловые и оптические каналы утечки информации. Методы и средства защиты / А. Х. Абдулькадер, Т. В. Борботько, Л. М. Лыньков. – Минск: Бестпринт, 2012 – 176 с.
6. Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения / Н. В. Колбун [и др.] // Вестн. Полоцкого государственного университета. Серия В. «Прикладные науки. Промышленность». – 2004. – № 12. – С. 30–34.
7. Гринчик, Н. Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах / Н. Н. Гринчик. – Минск, 1991. – 251 с.
8. Моделирование тепловлагоденоса в древесине при досушке энергией свч-поля / Н. Н. Гринчик [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 1. – С. 37–43.
9. Гринчик, Н. Н. К проблеме неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых средах / Н. Н. Гринчик, У. М. Харма, Т. Е. Щелак // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 4. – С. 71–79.

Поступила в редакцию 04.03.2016

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 004.932.2

*В. А. ЛЕВЧУК¹, В. А. КОВАЛЕВ¹, В. В. БАРКАЛИН², В. Э. ЛОЗОВСКИЙ²***КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА МЕЛАНОМЫ НА БАЗЕ ПОИСКА ПОХОЖИХ ДЕРМАТОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БАЗЕ ДАННЫХ***¹Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: vitali.liauchuk@gmail.com**²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: vladislavlozovski@gmail.com*

Предлагается метод решения задачи компьютеризированной диагностики новообразований кожи, основанный на поиске изображений в базе данных по содержанию. Предложенный метод отличается достаточной простотой, надежностью, меньшей зависимостью от настроек аппаратуры. При тестировании на открытой базе данных дерматоскопических изображений метод поиска показал результаты, по точности сравнимые с результатами работы гораздо более сложного классического метода. Наилучшее качество диагностики достигалась при комбинировании двух методов.

Ключевые слова: меланома, диагностика, поиск, база данных, анализ изображений

*V. A. LIAUCHUK¹, V. A. KOVALEV¹, V. V. BARKALINE², U. E. LAZOUSKI²***CONTENT-BASE IMAGE RETRIEVAL AS A METHOD FOR COMPUTER-ASSISTED DIAGNOSIS OF MELANOMA BASED ON DERMOSCOPIC IMAGES***¹The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: vitali.liauchuk@gmail.com,**²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: vladislavlozovski@gmail.com*

A method for computer-aided diagnosis of skin lesions based on image retrieval scheme is proposed. The suggested method is rather simple, reliable and robust. The results of the tests carried out on a publically available image dataset suggest that the performance of the method proposed is comparable with one of a rather complicated conventional method of melanoma diagnosis. The best performance is achieved when combining both methods together.

Keywords: melanoma, diagnostics, retrieval, database, image analysis

Введение. Известно, что количество зарегистрированных случаев рака кожи, включая меланому, постоянно возрастает на протяжении последних нескольких десятков лет. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в настоящее время в мире регистрируется порядка 2–3 млн случаев различных форм рака кожи в год, среди которых около 200 тыс. случаев составляет меланома. При этом количество смертельных исходов, ассоциированных с меланомой, достигает порядка 46 тыс. в год. Заболеваемость меланомой у представителей белой расы ежегодно увеличивается на 5–10% и составляет в Европе примерно 11,3 на 100 тыс. населения. Согласно имеющимся статистическим данным, число случаев меланомы кожи удваивается примерно за каждые 10–20 лет [1]. В Республике Беларусь заболеваемость меланомой кожи составляет 1–4% в общей структуре злокачественных новообразований человека. В настоящее время точность клинической диагностики первичных меланом кожи врачами общей практики в Республике Беларусь составляет 50–75%, что явно недостаточно для обеспечения эффективной диагностики и лечения заболевания.

В настоящее время достигнуты определенные успехи в области разработки компьютеризированных систем диагностики новообразований кожи, нацеленных на повышение точности клинической диагностики меланомы и уменьшение нагрузки на медицинский персонал [2]. Следует отметить, что в основе большей части таких систем лежат сложные многошаговые процедуры анализа дерматоскопических снимков, включающие в себя алгоритмы предобработки изображений, выделения бликов и нахождения волос, сегментации новообразования, вычисления различных текстурных, цветовых, геометрических характеристик и определенных дерматологических критериев и т. д. Алгоритмы, используемые на каждом шаге, сами по себе могут быть достаточно сложными, каждый из них может иметь свои пороговые значения и управляющие параметры, от правильной настройки которых может существенно зависеть качество их работы. В результате данные программные диагностические решения становятся достаточно сложными, зависимыми от настроек аппаратуры и недостаточно надежными.

Активно развивающаяся концепция **Big Data** [3] предлагает альтернативные подходы к решению такого рода задач. Высказываются предположения, что при наличии подходящих методик анализа огромных массивов данных можно выделять полезные знания из объемных баз данных и использовать их «напрямую» для решения задач распознавания.

Цель настоящей работы – сравнение традиционных методов диагностики меланомы с методом, основанным на сопоставлении входного снимка с образцами из базы данных с известными диагнозами.

Используемая база дерматоскопических изображений. Для сравнения методов компьютеризированной диагностики меланомы использована свободно доступная база данных изображений PH² [4]. Дерматоскопические изображения получены в отделении дерматологии госпиталя Педро Гиспано (г. Матосингос, Португалия). Все изображения получены в одинаковых условиях при помощи системы **Tuebinger Mole Analyzer с оптическим увеличением 20**. Эти снимки представляют собой 8-битные цветные изображения с разрешением 768×560 пикселей. База данных изображений содержит в общей сложности 200 дерматоскопических снимков, включая 80 изображений типичных невусов, 80 изображений атипичных невусов и 40 изображений меланом. База PH² включает в себя медицинские описания каждого снимка, а также экспертную сегментацию новообразований, клинический и гистопатологический диагнозы и оценку нескольких дерматологических характеристик: присутствующие цвета, пигментная сеть, точки/глобулы, наличие радиальной лучистости, областей регресса и бело-голубой вуали. Оценка каждой характеристики проведена экспертом-дерматологом. Примеры исходных изображений представлены на рис. 1.

Классический метод. Первый традиционный метод автоматизированной диагностики меланомы основан на многошаговой процедуре, широко описанной в научной литературе. Метод включает в себя ряд алгоритмов обработки изображений, выделения и описания структур.

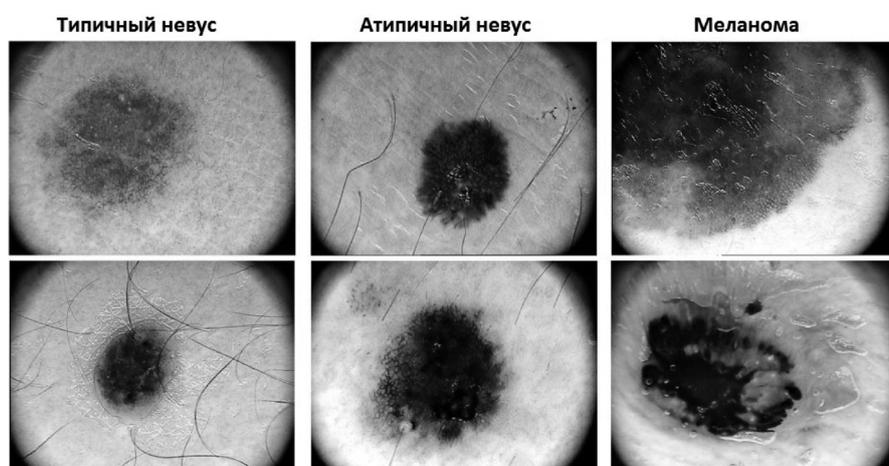


Рис. 1. Примеры дерматоскопических изображений базы данных PH²

Нахождение бликов и волос производилось при помощи алгоритмов, основанных на направленных гауссовых фильтрах [5]. Удаление волос с изображения производилось при помощи алгоритмов закрашивания его выделенных участков.

Процесс *сегментации* состоял из нескольких этапов: преобразование изображения из цветного в серое, удаление волос, размытие, бинаризация по адаптивному порогу. Полученная бинарная маска представляла собой результат сегментации и в дальнейшем использовалась в большинстве алгоритмов описания. Этапы процесса выделения новообразования на дерматоскопическом снимке представлены на рис. 2.

Из возможных характеристик новообразований программно выделялись следующие: степень асимметрии, резкость границ, присутствие определенных цветов, наличие бело-голубой вуали, областей регресса, точек/глобул, пигментной сети, радиальной лучистости.

Для оценки *асимметрии* у бинарной маски новообразования находился центр масс, вычислялись оси инерции и затем оценивалась симметрия относительно выделенных осей. В рамках данной работы вычислялась лишь асимметрия формы, без учета возможной текстурной асимметрии. Для определения показателя *резкости границ* изображение новообразования разделялось на 8 сегментов, в каждом из которых вычислялась энтропия распределения яркостей пикселей, характеризующая степень четкости границы новообразования.

Важную роль в диагностике меланомы кожи играет наличие *бело-голубой вуали*. Для определения последней цветное изображение новообразования переводилось в представление *hue–saturation–value (HSV)*, а затем вычислялась **относительная доля пикселей, удовлетворяющих условиям: $210 < \text{hue} < 240$ и $\text{saturation} > 40$** . Бело-голубая вуаль детектировалась при достижении порогового значения в 5,7%. Вычисленные таким образом признаки присутствия вуали на изображениях базы РН² достаточно хорошо совпали с экспертным мнением, демонстрируя при этом 86% чувствительности и 93% специфичности.

Для определения *цветов*, присутствующих на изображении, использовалась палитра из 6 оттенков, предварительно полученная при помощи алгоритмов квантизации цветового пространства.

Для детектирования *областей регресса* разработан алгоритм, основанный на построении выпуклого множества. Множество точек бинарной маски новообразования достраивалось до выпуклого множества (рис. 3). Из достроенных замкнутых участков выбирался участок наибольшего размера. Если относительный размер выбранного участка превышал заданный порог в 5,2%, то алгоритм отмечал присутствие области регресса.

Точки и глобулы на изображениях находились также при помощи подхода, основанного на практически тех же фильтрах [5], как и в случае с выделением волос. Метод выделения точек/глобул отличался использованием только изотропных (ненаправленных) фильтров.

Пигментные сети детектировались и описывались при помощи многоступенчатой процедуры [6], включающей в себя алгоритмы выделения границ, бинарные операции, алгоритмы выде-

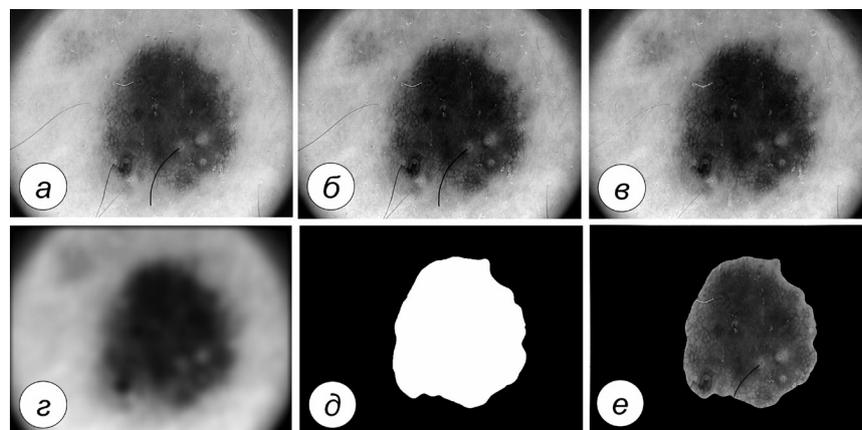


Рис. 2. Сегментация новообразования: *а* – исходный снимок; *б* – серое изображение; *в* – удаление волос; *г* – размытие; *д* – бинаризация по порогу; *е* – результат сегментации

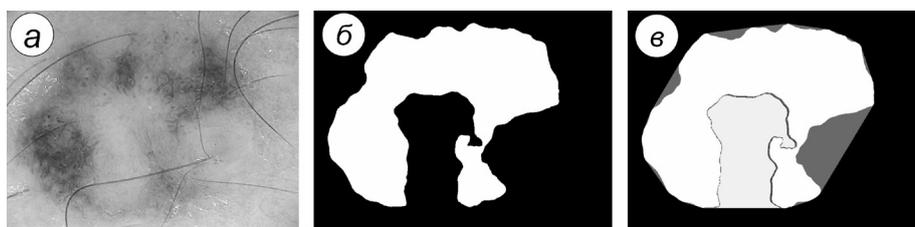


Рис. 3. Детектирование области регресса: *а* – исходное изображение; *б* – бинарная маска новообразования; *в* – достроенное выпуклое множество

ления и описания графов. *Радиальная лучистость* определялась при помощи схожих методов, представленных в [7].

Для автоматического распознавания меланомы использовался классификатор логистической регрессии (**Logistic Regression**), где предикторами являлись описанные выше характеристики новообразований. Точность диагностики меланомы при помощи такого классического метода оценивалась на основе хорошо известной процедуры перекрестной проверки с выбросом одного случая (*leave-one-out cross-validation*).

Метод диагностики на основе поиска. Второй метод компьютеризированной диагностики, предлагаемый в данной работе, реализует известную схему поиска изображений по содержанию (**Content-Based Image Retrieval – CBIR**), в которой из базы данных выбираются несколько изображений, визуально наиболее похожих на входное изображение. Метод включает в себя следующие шаги.

1. Вычисление дескриптора (вектора признаков) изображения, поданного на вход.
2. Вычисление расстояний в пространстве признаков между дескриптором входного изображения и заранее вычисленными дескрипторами изображений из базы данных.
3. Выбор из базы данных N изображений с минимальным расстоянием между их дескрипторами и дескриптором входного изображения.
4. Подсчет количества M случаев меланомы среди N выбранных изображений. Величина M используется для оценки вероятности меланомы анализируемого новообразования.

В качестве дескрипторов использованы матрицы совместной встречаемости типа «цвет–цвет–расстояние» [8]. Для численной оценки визуальной близости изображений применялась метрика городских кварталов $L1$, представляющая собой нормированную сумму разностей элементов матриц совместной встречаемости двух изображений. В рассматриваемой реализации алгоритма для каждого изображения, поданного на вход, из базы данных выбирались 4 изображения с наименьшими расстояниями $L1$ между их дескрипторами и дескриптором входного изображения.

Поскольку в нашем случае для тестирования методов и поиска в базе данных использовался один и тот же набор изображений, то поиск производился среди всех изображений базы данных, кроме входного изображения, что фактически представляет собой ту же схему *leave-one-out cross-validation*. Исследуемое новообразование относилось к классу «меланома», если среди четырех наиболее похожих изображений из базы данных находилось не менее двух изображений меланомы.

В целях эксперимента оба вышеописанных метода были скомбинированы. Для этого к набору предикторов, используемых в классическом методе, добавлялось также количество M случаев меланомы среди 4 наиболее похожих изображений, полученное методом на основе поиска. Точность распознавания комбинации методов оценивалась также при помощи схемы *leave-one-out cross-validation* и классификатора логистической регрессии, но с использованием величины M в качестве дополнительного дескриптора.

Результаты. Статистические результаты тестирования точности распознавания двух методов диагностики меланомы и их комбинации представлены в виде ROC-кривых и таблицы (рис. 4). Как видно из графиков, точность диагностики меланомы при помощи достаточно простого поиска в базе данных по содержанию сравнима с результатами, полученными при помощи довольно

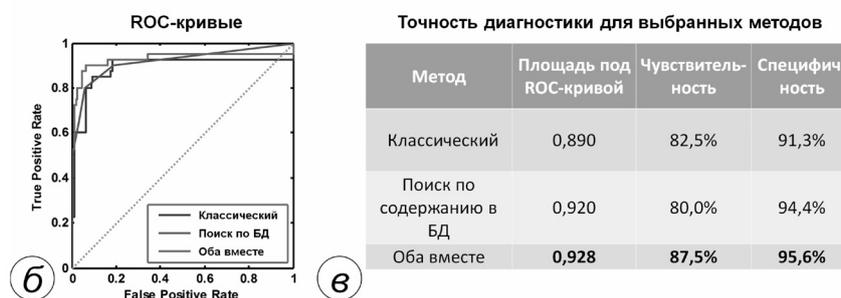
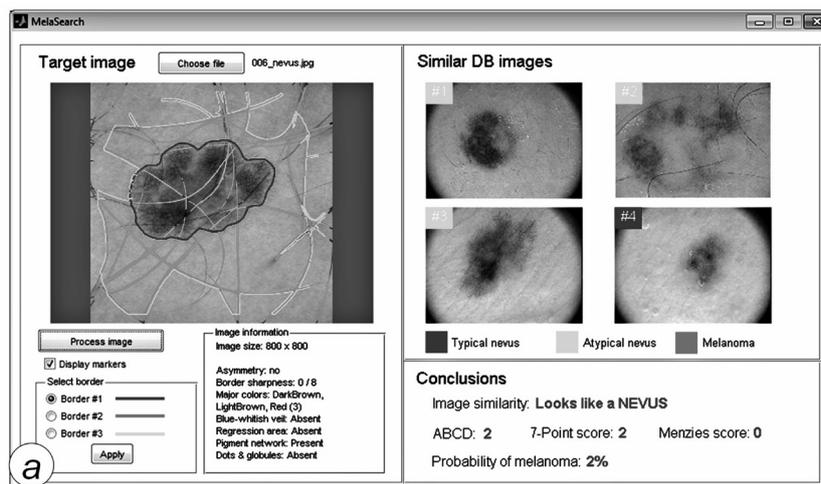


Рис. 4. Результаты оценки производительности предложенных методов: а – внешний вид программы; б – ROC-кривые; в – таблица сравнения двух методов и их комбинации

сложного классического метода, основанного на многошаговой схеме обработки и анализа изображений. Отметим, что наилучшая точность диагностики достигается при комбинировании данных методов.

Разработанные алгоритмы и методы реализованы в программном обеспечении. Программный продукт имеет графический интерфейс и позволяет пользователю контролировать процесс обработки входных данных (рис. 4, а). Программа выполняет функции обработки и описания входного изображения, поиска визуально похожих изображений в базе данных, оценки значений дерматологических критериев, оценки вероятности меланомы. В качестве базы данных изображений новообразований с известными диагнозами использовалась база РН². Онлайн-версия программы доступна по адресу [9].

Заключение. Представленные в работе экспериментальные результаты, полученные на тестовой базе из 200 дерматоскопических изображений, позволяют сделать следующие выводы.

Метод компьютеризированной диагностики меланомы кожи на базе поиска похожих дерматоскопических изображений позволяет достичь точности распознавания меланомы, сравнимой с точностью распознавания классическим методом, основанным на многоступенчатой процедуре анализа изображений; наилучшее качество распознавания наблюдается в случае комбинации методов.

Результат распознавания меланомы предложенным методом может быть использован врачом-дерматологом в качестве «второго мнения» при постановке диагноза новообразования кожи.

Представленная методика требует проведения комплексного тестирования в клинических условиях с использованием более объемной базы данных дерматоскопических снимков.

Список использованной литературы

1. *Siegel, R.* Cancer statistics, 2012 / R. Siegel, D. Naishadham, A. Jemal // *CA: Cancer Journal for Clinicians*. – 2012. – Vol. 62(1). – P. 10–29.
2. *Vestergaard, M.* Automated diagnostic instruments for cutaneous melanoma / M. Vestergaard, S. Menzies // *Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery*. – 2008. – Vol. 27(1). – P. 32–36.
3. Data mining with big data / W. Xindong [et al.] // *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions*. – 2014. – Vol. 26(1). – P. 97–107.
4. A dermoscopic image database for research and benchmarking / T. Mendonca [et al.] // *Proc. of the 35th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. – Japan, 2013. – P. 5437–5440.
5. *Barata, C.* Detecting the pigment network in dermoscopy images: a directional approach / C. Barata, J. S. Marques, J. Rozeira // *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. – 2011. – P. 5120–5122.
6. Pigment Network Detection and Analysis / M. Sadeghi [et al.] // *Computer Vision Techniques for the Diagnosis of Skin Cancer*. – Jan 2014. – P. 1–22
7. Detection and analysis of irregular streaks in dermoscopic images of skin lesions / M. Sadeghi [et al.] // *IEEE Transaction on Medical Imaging*. – 2013. – Vol 32. – P. 849–61
8. *Kovalev, V.* Color Co-occurrence Descriptors for Querying-by-Example / V. Kovalev, S. Volmer // *Proceedings of the 1998 Conference on MultiMedia Modeling*. – Switzerland, 1998. – P. 32–38.
9. ВТБДВ: Web-Services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://imlab.grid.by/appmelanoma>. – Дата доступа: 04.03.2015.

Поступила в редакцию 13.03.2015

УДК 517.977

*С. В. КРАСНОВСКАЯ, В. В. НАПРАСНИКОВ***ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ КОМПРЕССОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫХ
АГРЕГАТОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ***Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: n_v_v@tut.by*

Рассматривается задача многокритериальной оптимизации рамы компрессорно-конденсаторного агрегата. Дается краткий обзор методов и алгоритмов многокритериальной оптимизации. Приводится пример использования генетического алгоритма для поиска рациональных параметров рамы агрегата.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, многокритериальный генетический алгоритм MOGA, модуль DesignXplorer, компрессорно-конденсаторный агрегат.

*S. V. KRASNOVSKAYA, V. V. NAPRASNIKOV***OVERVIEW OF OPTIMIZATION ALGORITHMS AT FINITE ELEMENTS MODELING
OF CONDENSING UNITS DESIGN***Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus, email: n_v_v@tut.by*

A multiobjective optimization problem of a condensing unit frame is considered. Abstract of multiobjective optimization methods and algorithms is given. The article provides an example of genetic algorithm usage for seeking optimal parameters of the unit frame.

Keywords: multiobjective optimization, multiobjective genetic algorithm MOGA, DesignXplorer, condensing unit.

Введение. При решении инженерных задач возникает необходимость многокритериальной оптимизации для исследования возможных улучшений объекта проблемы. Многие инженерные задачи характеризуются NP-сложностью, поэтому в большинстве случаев основным критерием эффективности их решения является быстрое вычисление приближенных решений, что возможно за счет использования эволюционных вычислительных методов и алгоритмов.

Эволюционные методы в отличие от точных методов математического программирования позволяют находить близкие к оптимальным решения за приемлемое время, в отличие от других эвристических методов оптимизации характеризуются меньшей зависимостью от особенностей приложения и в большинстве случаев обеспечивают лучшую степень приближения к оптимальному решению. Эволюционные методы базируются на коллективном обучающем процессе внутри популяции индивидуумов, каждый из которых представляет собой поисковую точку в пространстве допустимых решений данной задачи

Важнейшим частным случаем эволюционных методов являются генетические методы и алгоритмы. Генетические алгоритмы (ГА) основаны на поиске лучших решений с помощью наследования и усиления полезных свойств множества объектов определенного приложения в процессе имитации их эволюции [1–3].

Общая постановка задачи многокритериальной минимизации. Многокритериальная оптимизация позволяет расчетным путем найти наиболее эффективное сочетание параметров изделия прежде, чем изготавливать опытные экземпляры.

Общая задача многокритериальной минимизации с m независимыми переменными, n целями, p ограничениями в виде неравенств и q ограничениями в виде равенств имеет вид

$$\begin{cases} f(x) \rightarrow \min, \\ g(x) \geq 0, \\ h(x) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $x = (x_1, \dots, x_m) \in X$, x – вектор решений (независимых переменных), X – пространство параметров, $f(x)^T = [f_1(x), \dots, f_n(x)]$ – цели, $g(x)^T = [g_1(x), \dots, g_p(x)]$ – ограничения в виде неравенств, $h(x)^T = [h_1(x), \dots, h_q(x)]$ – ограничения в виде равенств.

Результатом многокритериальной оптимизации является оптимальное по Парето множество. Вектор решений $a \in X$ является оптимальным по Парето, если и только если не существует другого такого вектора решений $b \in X$, что выполняются условия

$$\begin{cases} \forall i \in \{1, \dots, n\}, f_i(b) \leq f_i(a), \\ \exists j \in \{1, \dots, n\}, f_j(b) < f_j(a). \end{cases} \quad (2)$$

В этом случае вектор решений $a \in X$ является доминирующим над вектором $b \in X$, это обозначается как $a > b$. При многокритериальной оптимизации не представляется возможным выбрать одно единственное решение, в котором были бы оптимизированы все цели сразу. Поэтому в ходе многокритериальной оптимизации ищется рациональное (недоминируемое или оптимальное по Парето) решение, позволяющее максимально приблизиться к приоритетным целям. Недоминируемое решение означает, что улучшение одной цели достигается за счет ухудшения другой. Недоминируемые решения обозначаются как $a < > b$.

Задача многокритериальной оптимизации является задачей нахождения глобального оптимального по Парето множества решений. В настоящее время известен ряд методов многокритериальной оптимизации, опирающихся на нелинейное программирование, генетические алгоритмы и т. д. [4, 5].

Методы решения задач многокритериальной оптимизации. Одним из основных подходов к решению задач многокритериальной оптимизации и принятия решений является определение набора точек оптимальных по Парето решений. Фронт Парето – это набор оптимальных решений, которые не доминируют относительно друг друга, а улучшение одного параметра приводит к ухудшению другого. Наборы оптимальных по Парето решений могут быть любых размеров, но эти размеры обычно растут с увеличением количества целевых функций.

В большинстве эволюционных методов и алгоритмов для решения многокритериальных задач используют подход на основе обработки множества Парето. Одними из основных алгоритмов многокритериального эволюционного поиска на основе обработки множества Парето являются такие алгоритмы, как NSGA, NSGA-II, MOGA, NPGA, NPGA-II, PESA, PESA-II, SPEA, SPEA-II, PAES [6–9].

В табл. 1, 2 приведены основные особенности некоторых многокритериальных эволюционных алгоритмов [10].

Т а б л и ц а 1. Достоинства и недостатки многокритериальных эволюционных алгоритмов

Алгоритм	Достоинства	Недостатки
NSGA	Быстрая сходимость	Проблемы параметра размера ниши
NSGA-II	Единственный параметр. Проверенный и эффективный алгоритм	Групповое расстояние имеет смысл только в целевой области
MOGA	Простое расширение ГА с одной целью	Медленная сходимость. Проблемы параметра размера ниши
NPGA	Очень простой процесс турнирного отбора	Проблемы параметра размера ниши. Необходимость дополнительного параметра для турнирного отбора
SPEA	Надежный алгоритм. Отсутствие параметра для кластеризации	Сложный алгоритм кластеризации
SPEA-II	Улучшенный SPEA. Гарантировано сохранение точек экстремума	Сложные с точки зрения вычислений процедуры расчета пригодности плотности
PESA	Простая реализация. Быстрый алгоритм	Производительность зависит от размера ячеек. Необходима дополнительная информации об области решений

Т а б л и ц а 2. Особенности многокритериальных эволюционных алгоритмов

Алгоритм	Определение пригодности	Механизм разнообразия	Элитность	Внешняя популяция
NSGA	Ранжирование на основе недоминированной сортировки	Создание ниш для распределения по значениям пригодности	Нет	Нет
NSGA-II	Ранжирование на основе недоминированной сортировки	Метод группового расстояния	Да	Нет
MOGA	Ранжирование по Парето	Создание ниш для распределения по значениям пригодности	Нет	Нет
NPGA	Турнирный отбор. Отсутствует назначение пригодности	Вычисление ниш для разбиения узлов при турнирном отборе	Нет	Нет
SPEA	Ранжирование на основе внешнего сохранения недоминированных решений	Кластеризация для ограничения внешней популяции	Да	Да
SPEA-II	Мощные доминанты	Плотность, которая рассчитывается на основе данных до k -го соседа	Да	Да
PESA	Отсутствует назначение пригодности	Плотность ячеек	Да	Да

Подбор и применение определенных эволюционных методов и алгоритмов возможны в зависимости от типа задач. Как подход, основанный на популяциях, ГА хорошо подходят и для решения задач многокритериальной оптимизации и принятия решений. Стандартный ГА можно модифицировать для поиска набора нескольких недоминирующих решений за один проход. Большинство многокритериальных ГА не требуют от пользователя установки приоритетов, масштабов и весов для целей оптимизации, поэтому подход на основе ГА стал самым популярным эвристическим подходом к решению задач многокритериальной оптимизации и проектирования [11].

Методы оптимизации в среде ANSYS Workbench. В среде ANSYS Workbench также существуют средства для проведения оптимизации конструкций – модуль DesignXplorer. Отличительной особенностью его работы является возможность использования параметрических размеров из CAD-систем в качестве входных управляемых переменных в том случае, если решатель ANSYS в расчетном модуле DesignSimulation или CFD-решатель ANSYS CFX работает с геометрической моделью CAD-системы в режиме двухсторонней ассоциативной связи [12].

Если задача содержит большое число входных параметров или несколько целевых функций, можно провести оптимизацию в среде ANSYS Workbench с помощью дополнительно устанавливаемого модуля optiSLang [13]. Поддерживая двухстороннюю ассоциативную связь с CAD-системами, он позволяет проводить многокритериальную оптимизацию с учетом разброса значений входных управляемых переменных при использовании генетических алгоритмов оптимизации, эволюционных стратегий и адаптивных методов.

Для оптимизации конструкции в модуле DesignXplorer расчетной среды ANSYS Workbench 14.5 реализован ряд методов и алгоритмов [14]:

Screening (ShiftedHammersley Sampling Method) – смещенный метод Хаммерсли (скрининг, экранирование);

MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) – многокритериальный генетический алгоритм [15, 16];

NLPQL (Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian) – нелинейное программирование методом квадратичной функции Лагранжа [17];

MISQP (Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming) – частично-целочисленное последовательное квадратичное программирование [18];

Adaptive Single-Objective – адаптивный однокритериальный алгоритм;

Adaptive Multiple-Objective – адаптивный многокритериальный алгоритм.

Основные характеристики методов и алгоритмов представлены в табл. 3. Из представленного ряда методов и алгоритмов для многокритериальной оптимизации подходят три алгоритма – Screening, MOGA, Adaptive Multiple-Objective. Среди них для решения оптимизационной задачи выбран итеративный многокритериальный генетический алгоритм MOGA, работающий с непрерывными входными параметрами. MOGA –гибридный вариант популярного генетического

алгоритма недоминирующей сортировки NSGA-II, основанного на управляемых понятиях элитизма. Схема ранжирования решений Парето выполняется быстрым, недоминирующим методом сортировки, который на порядок быстрее обычных методов ранжирования Парето. Для обработки ограниченных выходных параметров используется тот же недоминирующий принцип, что и для целевых выходных параметров, таким образом, в штрафных функциях и множителях Лагранжа нет необходимости. Это также гарантирует, что допустимые решения имеют ранг выше ранга недопустимых решений.

Т а б л и ц а 3. Основные характеристики методов и алгоритмов оптимизации.

Метод	Один критерий	Много критериев	Локальный поиск	Глобальный поиск	Дискретные значения
Screening		X		X	X
NLPQL	X		X		
MISQP	X		X		X
MOGA		X		X	
Adaptive Single-Objective	X			X	
Adaptive Multiple-Objective		X		X	

Особенности постановки оптимизационной задачи для конструкции компрессорно-конденсаторного агрегата. В современном производстве уменьшению экономических затрат на разработку конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов способствует применение конечно-элементных методов расчета. В качестве расчетного примера компрессорно-конденсаторного агрегата была взята конструкция ограниченных габаритов, используемая в промышленности для охлаждения электроаппаратуры. Пример полной трехмерной твердотельной модели компрессорно-конденсаторного агрегата представлен на рис. 1.

Несущим и опорным элементом конструкции агрегата является рама, обеспечивающая возможность крепления агрегата на машину и удобный доступ для технического обслуживания. Она должна обладать достаточной жесткостью для сохранения целостности механической системы, предотвращая по возможности явления паразитных колебаний.

При анализе конструкции рам компрессорно-конденсаторных агрегатов встает вопрос о допустимой степени упрощения модели. Рациональная упрощенная конечно-элементная модель рамы компрессорно-конденсаторного агрегата [19] представлена на рис. 2.

Для облегчения создания конечно-элементной модели на основе подготовленной геометрической модели определялись элементы конструкции, существенно не влияющие на распределение частот собственных колебаний компрессорно-конденсаторного агрегата. Произведены следующие упрощения:

гидравлические и электрические элементы типа жгутов и шлангов исключены из расчетной схемы;

конденсатор исключен из расчетной схемы, так как расположение зон его крепления находится непосредственно над зонами крепления самой рамы компрессорно-конденсаторного агрегата, благодаря чему конденсатор не будет влиять на распределение частот собственных колебаний всей конструкции;

компрессор и электродвигатель заменены присоединенными равнозначными массами

Конструкция рамы изготовлена из профилей прочных как на изгиб, так и на кручение. В качестве конструктивных элементов рамы были выбраны уголки стальные горячекатаные, швеллеры стальные горячекатаные. Конструкция рамы компрессорно-конденсаторного агрегата сваривается (сварка по ГОСТ 5264–80) [20]. Вид рамы без дополнительных элементов представлен на рис. 3.



Рис. 1. Пример полной трехмерной твердотельной модели компрессорно-конденсаторного агрегата

Габариты компрессорно-конденсаторного агрегата жестко ограничены. В качестве оптимизируемых параметров были взяты геометрические размеры упоров рамы, толщины ее лонжеронов и поперечин. При ограничении размеров необходимо было исключить нарушение целостности геометрической модели. Функциональным ограничением являлся предел текучести материала рамы. Эквивалентные напряжения рассчитывались для статически нагруженной конструкции в режиме простоя. Для проведения многокритериальной оптимизации задавалось два критерия оптимальности: масса конструкции и коэффициент запаса прочности конструкции. Требовалось минимизировать массу конструкции при максимальной рабочей нагрузке и максимизировать коэффициент запаса прочности конструкции.

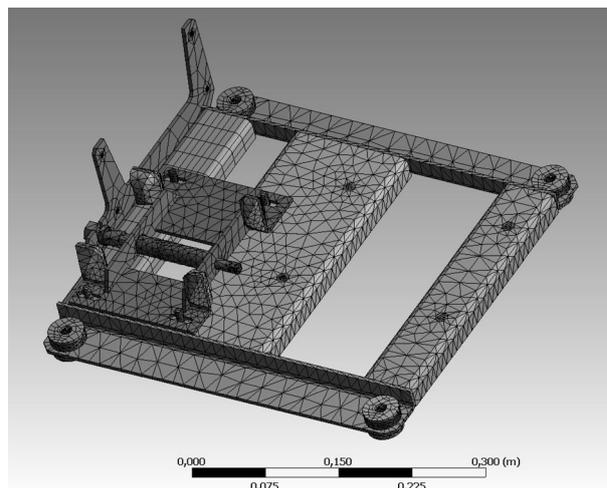


Рис. 2. Упрощенная конечно-элементная модель рамы и агрегатов в виде присоединенных масс

Параметрическая модель рамы компрессорно-конденсаторного агрегата строилась посредством модуля DesignModeler расчетной среды ANSYS Workbench 14.0, чтобы избежать возможных конфликтов при передаче оптимизируемых параметров из других CAD-сред.

При оценке чувствительности оптимизируемых параметров была построена диаграмма, отображающая влияние входных параметров на выходные параметры (рис. 4). Масса конструкции главным образом реагирует на изменения толщин срединной поперечины, правого и левого упоров, а эквивалентные напряжения в конструкции – на изменения толщины и ширины левого и правого упоров.

При исследовании возможных улучшений в конструкции компрессорно-конденсаторного агрегата использовался многокритериальный генетический алгоритм MOGA, встроенный в модуль DesignXplorer. Число индивидов начальной популяции 100, число индивидов за итерацию 100. Для наглядности полученных результатов данным алгоритмом также выполнялась оптимизация смещенным методом Хаммерсли, число индивидов 10000.

Для представления результатов среди параметров оптимизации были выбраны толщины левого упора и правого упора рамы, ширина срединного лонжерона и крайнего лонжерона под двигателем, толщина крайнего лонжерона. Результаты оптимизации представлены в табл. 4. При однокритериальной оптимизации по критерию минимума массы наилучшим является вариант с параметрами во второй строке таблицы. В этом случае масса конструкции снижается на 18,5% при уменьшении значения коэффициента запаса прочности материала по сравнению с исходным вариантом.

В случае многокритериальной оптимизации, когда вторым критерием является коэффициент запаса прочности, алгоритм MOGA в модуле DesignXplorer предоставляет пользователю несколько наилучших кандидатов среди конечного множества решений по Парето. Из этого набора

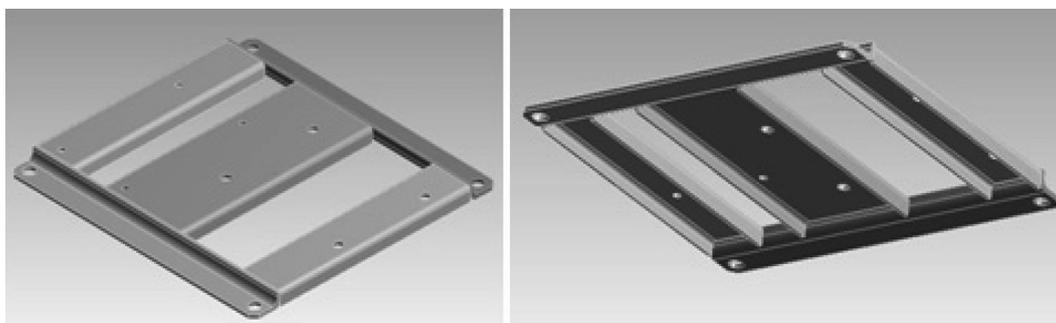


Рис. 3. Вид рамы без дополнительных элементов

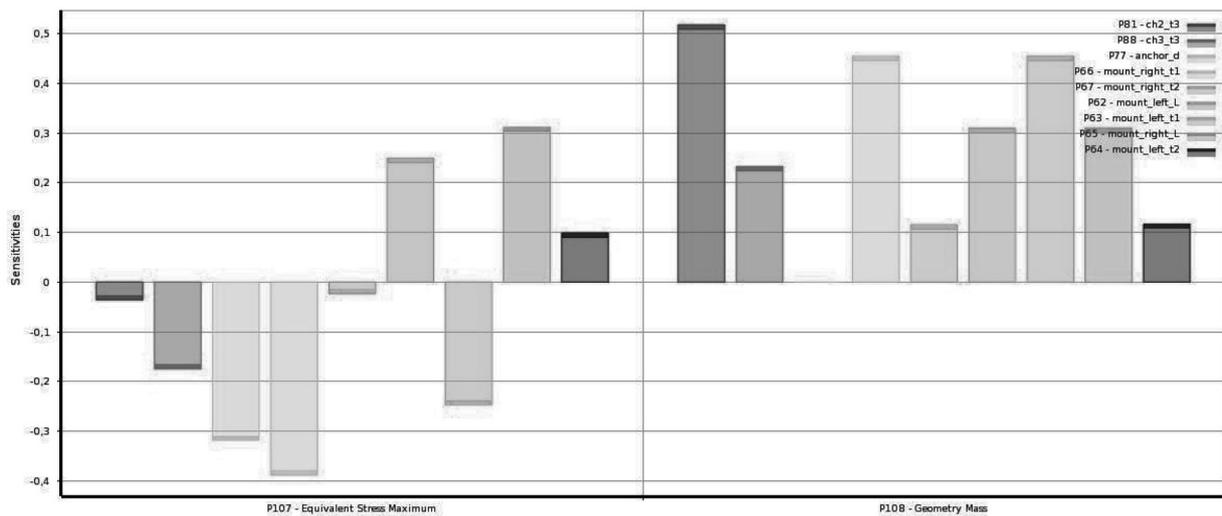


Рис. 4. Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров

Таблица 4. Результаты оптимизации рамы

Вариант конструкции	P1	P2	P3	P4	P5	M	σ
Исходный вариант	0,005	0,005	0,005	0,005	0,05	8,57	18,55
Вариант с минимальной массой	0,003027	0,003014	0,003015	0,003006	0,04505	6,98	27,42
Лучший кандидат (MOGA)	0,00300	0,00302	0,00301	0,0053	0,0451	7,47	15,92
Лучший кандидат (Хаммерсли)	0,00356	0,003085	0,00358	0,0048	0,0546	7,85	16,66

Примечание. P1 – толщина левого упора, м; P2 – толщина правого упора, м; P3 – толщина срединного лонжерона, м; P4 – толщина крайнего лонжерона под генератором, м; P5 – ширина правого упора, м; M – масса конструкции рамы, кг; σ – эквивалентное максимальное напряжение по Мизесу, МПа.

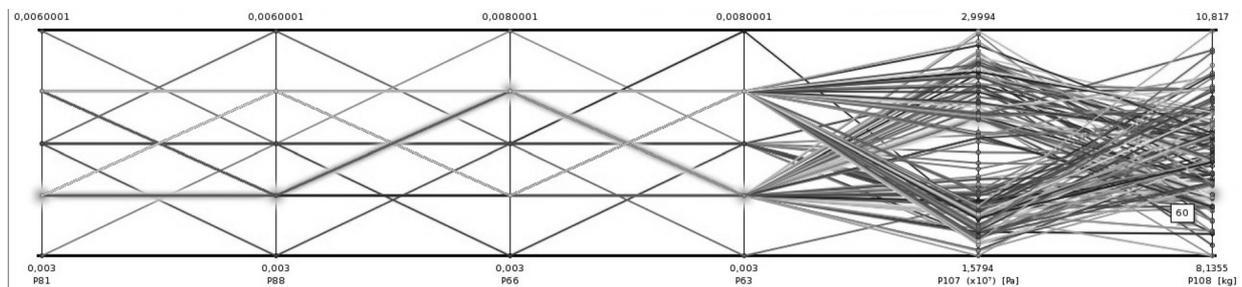


Рис. 5. Схема корреляции параметров оптимизации

выбирался один вектор решения с учетом приоритета критерия массы. Данный вариант, представленный в третьей строке табл. 4, позволяет уменьшить массу на 9,6%, а коэффициент запаса прочности – увеличить на 16,8% по сравнению с исходным вариантом.

На базе построенного множества проектных решений создана схема корреляции параметров (рис. 5). Каждое проектное решение представлено ломаной линией, вершины которой находятся в точках пересечения с вертикалями, отвечающими следующим параметрам: толщина срединной поперечины, толщина крайней поперечины, толщина правого упора, толщина левого упора, напряжение по Мизесу, масса конструкции. Минимальные и максимальные значения параметров лежат на горизонтальных нижней и верхней линиях соответственно.

Заключение. Исследование возможных улучшений модели поможет снизить затраты на разработку и изготовление конструкции без потери качества, сократить сроки практического испытания.

Для решения многокритериальных задач выполнен краткий обзор методов и алгоритмов оптимизации. Один из наиболее эффективных алгоритмов многокритериальной оптимизации

с ограничениями – многокритериальный генетический алгоритм MOGA. Оптимизация рамы компрессорно-конденсаторного агрегата проводилась с использованием метода MOGA в среде ANSYS Workbench. Недостатком данного метода является медленная сходимость.

Платформа ANSYS Workbench позволяет использовать сторонние модули оптимизации (например, optiSLang) за счет хорошей интеграции с другими системами разработки моделей и представления результатов.

В дальнейшем имеет смысл разработать и подключить пользовательский метод оптимизации, подходящий для нахождения рациональных параметров модели данного типа конструкции. Методика взаимодействия файлов и модулей программ позволит сократить время на генерирование оптимизационных моделей технических систем.

Список использованной литературы

1. *Норенков, И. П.* Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов: 4-е изд., перераб. и доп. / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
2. *Норенков, И. П.* Эволюционные методы для решения задач проектирования и логистики: учеб. пособие / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
3. Эволюционные методы моделирования и оптимизации сложных систем: конспект лекций / Е. С. Семенкин [и др.]. – Красноярск: СФУ, 2007.
4. *Liu, G. P.* Multiobjective Optimization and Control: Research Studies Press Ltd / G. P. Liu [et al.]. – Baldock, Hertfordshire, England, 2003.
5. *Зеленков, Ю. А.* Метод многокритериальной оптимизации на основе приближенных моделей исследуемого объекта. / Ю. А. Зеленков // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 92–102.
6. *Fonseca, C. M.* Genetic algorithms for multi-objective optimization: Formulation, discussion and generalization / C. M. Fonseca, P. J. Fleming // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms. – 1993. – P. 416–423.
7. *Fonseca, C. M.* Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms—Part II: Application example / C. M. Fonseca, P. J. Fleming // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. – 1998. – Vol. 28, N 1. – P. 38–47.
8. *Deb, K.* Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test Functions. / **K. Deb** // Evolutionary Computation. – 1999. – Vol. 7, N 3. – P. 205–230.
9. *Deb, K.* A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimisation: NSGA-II. / **K. Deb** // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6, N 2. – P. 182–197.
10. *Konak, A.* Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. / A. Konak, D. W. Coit, A. E. Smith // Reliability Engineering and System Safety. – 2006.— Vol. 91, N 9. – P. 992–1007.
11. *Гожий, А. П.* Многокритериальные эволюционные методы и алгоритмы в задачах принятия решений сценарного планирования / А. П. Гожий // Системные технологии. – 2012. – Т. 2, № 79. – С. 20–28.
12. Ansys.com – Официальный сайт компании ANSYS.
13. Brochure optiSLanginside ANSYS Workbench.
14. ANSYS Help, Design Exploration User Guide.
15. *Azarm, S.* Comparison of two multiobjective optimization techniques with and withingenic algorithms / S. Azarm, B. J. Reynolds, S. Narayanan // ASME Design Engineering Technical Conferences. – 1999, DETC99/DAC-8584.
16. *Kurpati A.* Constraint handling improvements for multiobjectivegeneticalgorithms / A. Kurpati, S. Azarm and J.Wu // Struct Multidisc Optim. – 2002. – Vol. 23. – P. 204–213.
17. *Wierzbicki, A. P.* A Quadratic Approximation Method Based on Augmented Lagrangian Functions for Nonconvex Nonlinear Programming Problems / A. P. Wierzbicki // IIASA Working Paper WP-78-061.
18. *Exler, O.* A trust region SQP algorithm for mixed integer nonlinear programming / **O.Exler, K. Schittkowski** // Optimization Letters. – 2007. – Vol. 1, N 3. – P. 269–280.
19. *Напрасников, В. В.* Влияние упрощающих предположений в конечно-элементных моделях компрессорно-конденсаторных агрегатов на спектр собственных частот / В. В. Напрасников, С. В. Красновская // Системный анализ и прикладная математика. – 2014. – № 1-3. – С. 51–55.

Поступила в редакцию 20.03.2015

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793:621.3.049.77

В. Е. ОБУХОВ¹, Е. П. ШПАК¹, С. П. ЖВАВЫЙ², В. А. АЗАРКО³**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР
В СЛОЯХ ВАКУУМНОГО РЕЗИСТА**¹Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск Беларусь,
e-mail: obukhov@tut.by, ket27051973@gmail.com²Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: zhvavyi@inel.bas-net.by³Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: mixa@ichnm.basnet.by

Изучены методом моделирования процессы формирования топологических структур с 3D-элементами различных размеров и конфигурации в слоях вакуумного резиста импульсным лазерным излучением с разной плотностью энергии. Экспериментально установлено, что моделирование позволяет прогнозировать реальные параметры работы установок лазерной вакуумной микролитографии для качественного формирования 3D-элементов топологии в слоях вакуумного резиста при создании масок.

Ключевые слова: микролитография, вакуумная проекционная литография, вакуумный резист, технологии ИМС

V. E. OBUKHOV¹, E. P. SHPAK¹, S. P. ZHVAVYI², V. A. AZARKO³**SIMULATION OF FORMATION OF TOPOLOGICAL STRUCTURES IN VACUUM RESIST LAYERS**¹Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: obukhov@tut.by, ket27051973@gmail.com,²B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: zhvavyi@inel.bas-net.by,³The Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: mixa@ichnm.basnet.by

The modeling of formation of topological structures with 3D elements of various sizes and configurations in a vacuum resist exposed to pulsed laser radiation with different energy density was carried out. It was found experimentally that the simulation allows predicting the actual parameters of lithography laser systems for high-quality formation of 3D topology elements in layers of vacuum resist when creating masks.

Keywords: microlithography, vacuum resist, vacuum projection lithography, microelectronic circuit technology.

Введение. Современные мировые производства стремятся к максимальной автоматизации технологических процессов, оставляя все меньшую роль человеческому фактору. В наибольшей степени эти тенденции развиваются и в микроэлектронике. Автоматизированные минипроизводства интегральных микросхем (ИМС) особенно выгодны при мелкосерийном производстве заказных и полузаказных ИМС, не требующих максимальной минимизации размеров формируемых элементов и изготавливаемых на основе базовых матричных кристаллов, создаваемых по традиционной крупносерийной технологии. Наименее поддаются автоматизации процессы традиционной «мокрой» микролитографии, состоящие из более десятка операций и требующие больших количеств химических растворов, деионизованной воды, участков по утилизации вредных химических отходов.

Альтернативой традиционной «мокрой» микролитографии является «сухая» лазерная вакуумная микролитография, где прямое формирование рельефных (3D) структур в слоях вакуумного резиста (ВР) происходит по абляционному процессу лазерным излучением, прошедшим через фотшаблон и оптическую систему литографической установки. Дальнейшие процессы формирования топологических структур на поверхности полупроводниковых пластин или в технологических слоях на их поверхности выполняются «сухим» способом методами плазмохимического, реактивно-ионного или ионного травлений, ионного легирования. «Сухая» микролитография состоит всего из четырех операций: нанесения в вакууме на полупроводниковую пластину слоя ВР; лазерного формирования в нем топологического 3D-рисунка; выполнения необходимой технологической операции через маску из ВР и последующего снятия слоя ВР в кислородосодержащей плазме [1]. Формирование 3D-рисунков в слоях ВР выполняется с помощью установки вакуумной лазерной литографии [2]. Производство заказных ИМС при использовании процесса «сухой» лазерной микролитографии может быть полностью автоматизировано в замкнутом технологическом процессе на минифабрике в виде кластера оборудования [1]. Над этой проблемой усиленно работают такие передовые фирмы мира как Alcatel CIT (Франция), General Signal (США), Lam Research (США), Ulvac and Vactronic (Япония), MARATHON Cluster Tool Integration Platforms (США) и др.

Однако отработка процесса качественного формирования 3D-структур в слоях ВР – трудоемкая задача, требующая больших временных и энергетических затрат, а также длительного непроизводительного использования дорогостоящей литографической установки. Вследствие этого в настоящее время большое внимание уделяется разработке программ моделирования литографических процессов с последующим их применением для оценки условий формирования в пленке ВР элементов различных форм и размеров. Использование программ, моделирующих различные литографические процессы, актуально, так как позволяет заранее прогнозировать параметры процесса и качество формирования масок.

Моделирование процессов микроэлектроники успешно развивается в целом ряде зарубежных фирм [3–5], однако в области моделирования процессов микролитографии основное внимание уделяется определению условий, при которых при экспонировании в слоях ВР не происходит образования стоячих волн, препятствующих формированию топологических структур с субмикронными размерами элементов. В резистах, используемых в процессах лазерной вакуумной литографии, стоячие волны отсутствуют, так как эти резисты имеют высокий коэффициент поглощения экспонирующего излучения (порядка 10^5 см^{-1}). Поэтому в настоящей работе методами моделирования изучались закономерности формирования лазерными импульсами в слоях ВР по абляционному механизму 3D-изображений тестовых рисунков в зависимости от условий экспонирования и физико-химических свойств материала резиста.

В качестве ВР могут быть использованы неполимерные органические материалы, обладающие рядом специфических свойств: сублимация в вакууме при нагревании, высокий коэффициент поглощения лазерного излучения и низкий коэффициент теплопроводности, высокие защитные свойства при технологических операциях плазмохимического, реактивно-ионного или ионного травлений, ионного легирования, полное удаление с полупроводниковой пластины в кислородосодержащей плазме.

Цель настоящей работы – изучение методом компьютерного моделирования закономерностей процесса формирования в слоях ВР тестовых 3D-структур с субмикронными размерами элементов и определение оптимальных параметров экспонирования в зависимости от параметров лазерного экспонирующего излучения, реальных характеристик оптических систем литографических установок, геометрических размеров и расположения формируемых элементов, величины дефокусировки объектива.

При моделировании в расчеты закладывались параметры ВР на основе перилентетракарбонной кислоты [6].

Алгоритм расчета процесса лазерной микролитографии. В настоящей работе модель лазерной вакуумной литографии представлена как совокупность трех последовательных процессов:

построение проекционной системой установки микролитографии с фиксированным коэффициентом редукиции топологического рисунка фотошаблона (миры) в плоскости поверхности пленки ВР на полупроводниковой пластине (оптическая задача);
 поглощение энергии экспонирующего излучения пленкой ВР;
 удаление материала ВР с экспонируемых лазерным излучением областей пленки, т. е. формирование 3D-рисунка в слое ВР (тепловая задача).

С целью определения оптимальных условий создания масок в пленках ВР методами лазерной микролитографии разработана программа моделирования процессов формирования в них 3D-структур, основанная на модели процесса испарения пленки ВР под действием импульсного лазерного излучения, которая учитывала характеристики изображения топологического рисунка в плоскости пленки ВР и строилась при следующих допущениях:

теплофизические параметры ВР не зависят от его температуры;
 начальное распределение температуры по площади пленки ВР повторяет распределение по ней освещенности лазерного излучения вследствие практически мгновенного перехода энергии излучения в тепловую энергию;

процесс удаления материала с поверхности пленок ВР под действием лазерного излучения имеет термическую природу (вкладом фотохимических реакций пренебрегалось);

процесс абляции резиста под действием лазерного излучения имеет пороговый характер, т. е. при величине плотности энергии излучения в импульсе ниже некоторого порогового значения абляции материала ВР не происходит [7].

В [7] предполагалось, что ввиду низкой теплопроводности материала ВР (порядка 10^{-4} Вт/(см·К)) и короткой длительности лазерного импульса (порядка 10^{-7} с), а также наличия энергетического порога процесса абляции материала ВР граница формируемого в нем элемента совпадает с границей освещенности лазерным излучением. Однако это предположение требовало теоретической (методом моделирования) и экспериментальной проверки.

В данной работе результаты расчетов для наглядности представлены в графическом виде. Параллельно с моделированием процессов лазерной литографии проводилась экспериментальная проверка результатов расчетов путем их внесения в параметры экспонирования литографической установки.

С помощью разработанной ранее программы [7] выполнялся расчет дифракционных структур изображения элементов миры в плоскости поверхности пленки ВР при различных длинах волн. В настоящей работе алгоритм решения данной задачи дополнен решением тепловой задачи абляции материала ВР.

При моделировании учитывались реальные параметры оптических систем экспериментальных установок лазерной вакуумной проекционной микролитографии ЭМ-594 и ЭМ-5094 [2] с длинами волн экспонирующего излучения $\lambda \sim 266$ и 532 нм соответственно, характеристики волнового фронта, коэффициент пропускания и др. Толщина d пленки ВР принималась порядка $0,5$ мкм (экспериментально установлено [6], что данной толщины достаточно, чтобы слой ВР мог выполнять роль защитной маски при технологических операциях плазмохимического и реактивно-ионного травления). Апертура NA объективов литографических установок принималась равной $0,4$.

Решение тепловой задачи построения 3D-изображений элементов миры в слое ВР с помощью лазерного излучения, прошедшего через оптическую систему литографической установки, представлено ниже.

Уравнение теплопроводности для интенсивно поглощающей излучение лазера пленки ВР на технологическом слое диоксида кремния и кремниевой подложке, нагреваемой под действием наносекундных лазерных импульсов, согласно [8], приведено в следующем виде:

$$\rho_i \{c_i + L_s \delta(T - T_s)\} \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + F(x, t), \quad x > S(t), \quad (1)$$

$$T(x, t = 0) = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=S(t)} = 0, \quad T|_{x \rightarrow \infty} = T_0,$$

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=d_1} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=d_1}, \quad T_1 \Big|_{x=d_1} = T_2 \Big|_{x=d_1},$$

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=d_2} = k_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=d_2}, \quad T_2 \Big|_{x=d_2} = T_3 \Big|_{x=d_2}, \quad \begin{cases} \frac{dS}{dt} \geq 0 & \text{при } T(S(t), t) = T_s, \\ \frac{dS}{dt} = 0 & \text{при } T(S(t), t) < T_s, \end{cases}$$

$$F(x, t) = (1 - R) \frac{E(t)}{\tau} \alpha_i \exp(-\alpha_i x) \quad \text{при } x \geq S(t),$$

$$I_1 = 1, \quad x \leq d_1,$$

$$I_2 = \exp(-\alpha_1(d_1 - S(t)) + \alpha_2 d_1), \quad d_1 < x \leq d_2,$$

$$I_3 = I_2 \exp((\alpha_3 - \alpha_2)d_2), \quad d_2 < x,$$

где $i = 1, 2, 3$ (1 – пленка ВР, 2 – пленка SiO₂, 3 – Si-подложка), ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, L_s – удельная теплота сублимации материала ВР, δ – функция Дирака, T_0 – начальная температура ВР, T_s – температура сублимации ВР, T – текущая температура ВР, t – время, k – коэффициент теплопроводности, $S(t)$ – координата фронта испарения, $F(x, t)$ – тепловой источник, R – коэффициент отражения пленки ВР, $E(t)$ – плотность энергии, τ – длительность импульса излучения, α – коэффициент поглощения, d – толщина пленки.

При решении поставленной задачи предполагалось, что при достижении на поверхности пленки ВР температуры сублимации материал ВР удаляется и граница фазового перехода перемещается по координате x с температурой, близкой к температуре сублимации.

Такая постановка задачи несколько отличается от рассматриваемых ранее задач абляции твердых тел [например, 9, 10]. В данном случае учитывается нестационарность процесса сублимации под действием объемного источника тепла, так как глубина проникновения оптического излучения в пленку ВР (порядка 0,1 мкм) сравнима с толщиной пленки (порядка 0,5 мкм).

Для численного решения задачи Стефана в данной постановке применялся метод сглаживания [11]: δ -функция заменялась δ -образной функцией вида (2)

$$\delta(T - T_s, \Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left[-\frac{(T - T_s)^2}{2\Delta^2}\right] \quad (2)$$

с начальной полушириной $\Delta = 10$ К, которая в зависимости от градиента температуры изменялась с условием, чтобы область определения δ -образной функции приходилась не менее чем на три счетные точки. Уравнение (1) решалось методом прогонки [12] с применением итерационного процесса. Начальный шаг по времени равен 0,2 нс и в зависимости от сходимости итераций в процессе счета мог изменяться. При описании теплового источника $F(x, t)$ форма лазерного импульса $E(t)$ полагалась гауссовой с длительностью по полувысоте $\tau \sim 100$ нс, что соответствовало параметрам лазера ЛТИ 701М установок литографии.

Программа расчета позволяет представить результаты исследований графически в виде 3D-изображений. В данной статье 3D-изображения результатов расчетов представляются в плоском формате, где клин проявления определяется как отношение ширины прорисовки краев элементов к толщине пленки резиста.

Ранее [13] нами показано, что для лазерной абляции материала ВР целесообразно использовать многоимпульсные режимы экспонирования, так как для достижения одинаковых результатов при многоимпульсных режимах экспонирования энергетические затраты лучистой энергии приблизительно в 20 раз ниже, чем при одноимпульсных режимах. Поэтому методом моделирования изучалось качество формирования в слоях ВР толщиной порядка 0,5 мкм элементов линейки специально разработанных микроструктур под воздействием лазерного излучения при количестве лазерных импульсов в одну точку $n = 8$, длительности импульсов $\tau \sim 10^{-7}$ с, частоте следования

импульсов $f \sim 7000$ Гц. Доза излучения, израсходованная на проработку единицы площади экспонируемых участков вакуумного резиста, рассчитывалась как плотность энергии излучения в лазерном импульсе, умноженная на число импульсов в одну точку поверхности.

В процессе расчетов, подкрепленных экспериментальными исследованиями, установлено, что лазерным излучением с $\lambda \sim 532$ нм качественное формирование 3D-элементов возможно только при их размерах не менее 0,8–1,0 мкм, однако при этом доза лазерного излучения требуется несколько меньшая, чем для формирования элементов того же размера излучением с $\lambda \sim 266$ нм.

Подготовка и проведение исследований. На первом этапе выполнения исследований разработаны тестовые миры с одновременным набором квадратных элементов, имеющих стороны 12, 10, 8, 6 и 4 мкм, которые при проекционном переносе изображений в плоскость пленки ВР с фиксированной редуцией 0,1 должны обеспечить формирование в ней элементов с размерами сторон 1,2; 1,0; 0,8; 0,6 и 0,4 мкм соответственно. Для исключения влияния взаимного расположения элементов на их формирование они располагались на расстояниях, в несколько раз превышающих их собственные размеры.

Методом моделирования проведено исследование влияние дозы лазерного излучения с $\lambda \sim 266$ нм на качество формирования элементов указанной миры. На основании проведенных исследований установлено следующее:

лазерным излучением с длиной волны порядка 266 нм при реальных параметрах оптической системы установки микролитографии возможно формирование в слоях ВР 3D-структур с минимальными размерами вплоть до 0,4 мкм;

для каждого номинала размеров элемента существует своя оптимальная доза лазерного излучения, при которой возможно его качественное формирование в слое ВР;

с уменьшением размера элементов оптимальная доза излучения для их качественного формирования в слоях ВР возрастает, но при этом происходит растравливание элементов более крупных размеров;

при апертуре объектива $NA \sim 0,4$ и наличии на фотошаблоне элементов с размерами в области 4–12 мкм (в плоскости ВР элементов с размерами 0,4–1,2 мкм) невозможно подобрать условия экспонирования для качественного формирования элементов всех размеров одновременно.

Представляется интересным изучение влияния величин энергии лазерных импульсов на формирование ансамбля 3D-структур, состоящих из элементов одной ширины, но разной длины и с расстояниями между элементами, равными их ширине. Для этого разработана соответствующая линейка мир. Данные миры различались между собой лишь шириной составляющих их элементов. Моделировались процессы формирования 3D-рисунков масок с наборами элементов, номинальные размеры ширины которых составляли 1; 0,8; 0,6; и 0,5 мкм. Наибольший интерес представляла собой мира для формирования элементов с шириной порядка 0,5 мкм лазерным излучением с $\lambda \sim 266$ нм. Результаты данных исследований проиллюстрированы рис. 1. При относительно низких дозах излучения порядка 0,44 Дж/см² (рис. 1, а) отмечаются слабая проработка внутренних углов элементов и взаимное влияние на форму друг друга.

Повышение дозы излучения до порядка 0,72 Дж/см² позволяет практически устранить взаимное влияние элементов на их форму (рис. 1, б), однако их внутренние углы прорабатываются недостаточно, из-за чего квадратные на мире элементы являются еще не вполне квадратами в слое резиста.

Дальнейшее повышение дозы излучения до порядка 1,2 Дж/см² приводит к уменьшению клина проявления элементов (рис. 1, в), но внутренние углы элементов все еще проработаны недостаточно, отмечается ухудшение проработки внешних углов Т-образного элемента.

Увеличение дозы излучения до порядка 1,6 Дж/см² приводит к качественному формированию как протяженных, так и квадратных элементов (рис. 1, г). При этом отмечаются взаимное влияние протяженных элементов друг на друга и дальнейшее ухудшение проработки внешних углов у Т-образного элемента.

Повышение дозы излучения выше 1,6 Дж/см² становится нецелесообразным, так как увеличивается клин проявления элементов, усиливается влияние на процесс формирования друг на друга близко расположенных элементов, наблюдается дальнейшее ухудшение проработки внешних углов элементов Т-образной формы.

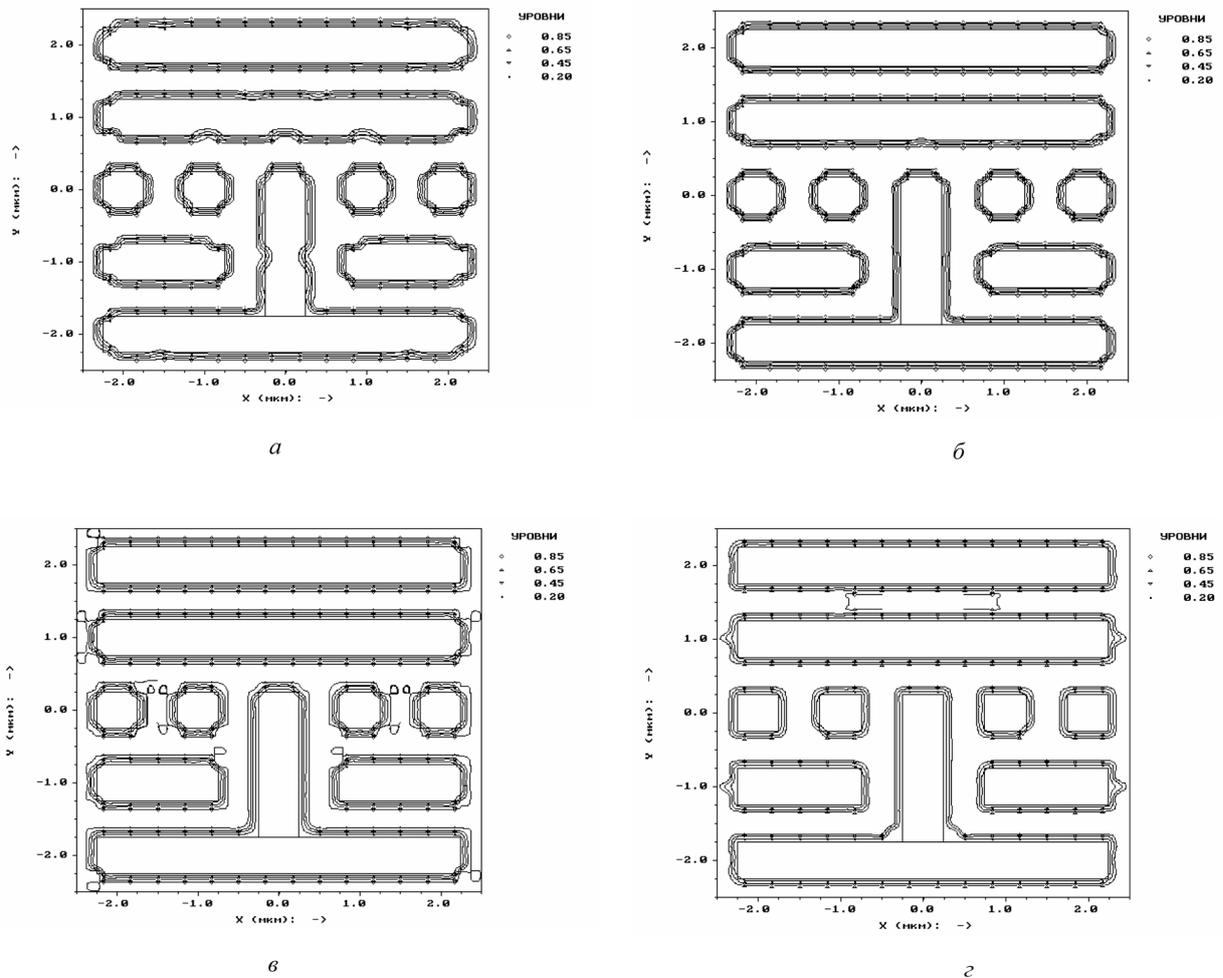


Рис. 1. 3D-структура в слоях ВР с номинальным значением ширины элементов 0,5 мкм, сформированная лазерным излучением с различными значениями дозы ($\text{Дж}/\text{см}^2$): 0,44 (а); 0,72 (б); 1,2 (в); 1,6 (г)

Проведенные исследования с мирами, содержащими элементы разной ширины, показывают, что для качественного формирования группы элементов с номинальными размерами ширины 0,5 мкм требуются дозы излучения, следовательно, и общие затраты лучистой энергии, почти в 4 раза большие, чем затраты для формирования элементов с номиналом ширины 0,8 мкм и приблизительно в 2–2,5 раза большие, чем затраты для формирования элементов с номинальными размерами ширины порядка 0,5 мкм. Как свидетельствуют результаты моделирования процессов формирования элементов с номинальным размером порядка 0,6 мкм:

лазерным излучением с длиной волны 266 нм возможно качественное формирование в слоях вакуумного резиста 3D-структур с элементами шириной до порядка 0,5 мкм;

эффект взаимного влияния одних элементов на формирование других (эффект близости) проявляется наиболее сильно при низких дозах излучения;

минимально эффект близости элементов проявляется при оптимальных значениях дозы излучения;

с увеличением дозы излучения (ниже оптимальной) качество проработки элементов возрастает, клин проявления уменьшается, но внутренние углы элементов прорабатываются недостаточно, в то время как внешние углы Т-образных элементов прорабатываются удовлетворительно;

при оптимальных условиях экспонирования клин проявления элементов имеет минимальную величину, внутренние углы элементов прорабатываются удовлетворительно, но внешние углы Т-образных элементов прорабатываются недостаточно;

превышение дозы излучения выше оптимальной для данного номинального размера элемента приводит к увеличению его реальных размеров выше номинального значения и искажению формы, клин проявления элементов возрастает и начинается растрав поверхности ВР;

растрав поверхности ВР начинает проявляться, в первую очередь, между протяженными, параллельными, рядом расположенными элементами.

Известно, что для качественного формирования 3D-структур в слоях вакуумного резиста изображения элементов микроскопа должны быть точно сфокусированы в плоскости поверхности слоя ВР, т. е. плоскость Гаусса объектива должна совпадать с плоскостью поверхности ВР или вели-

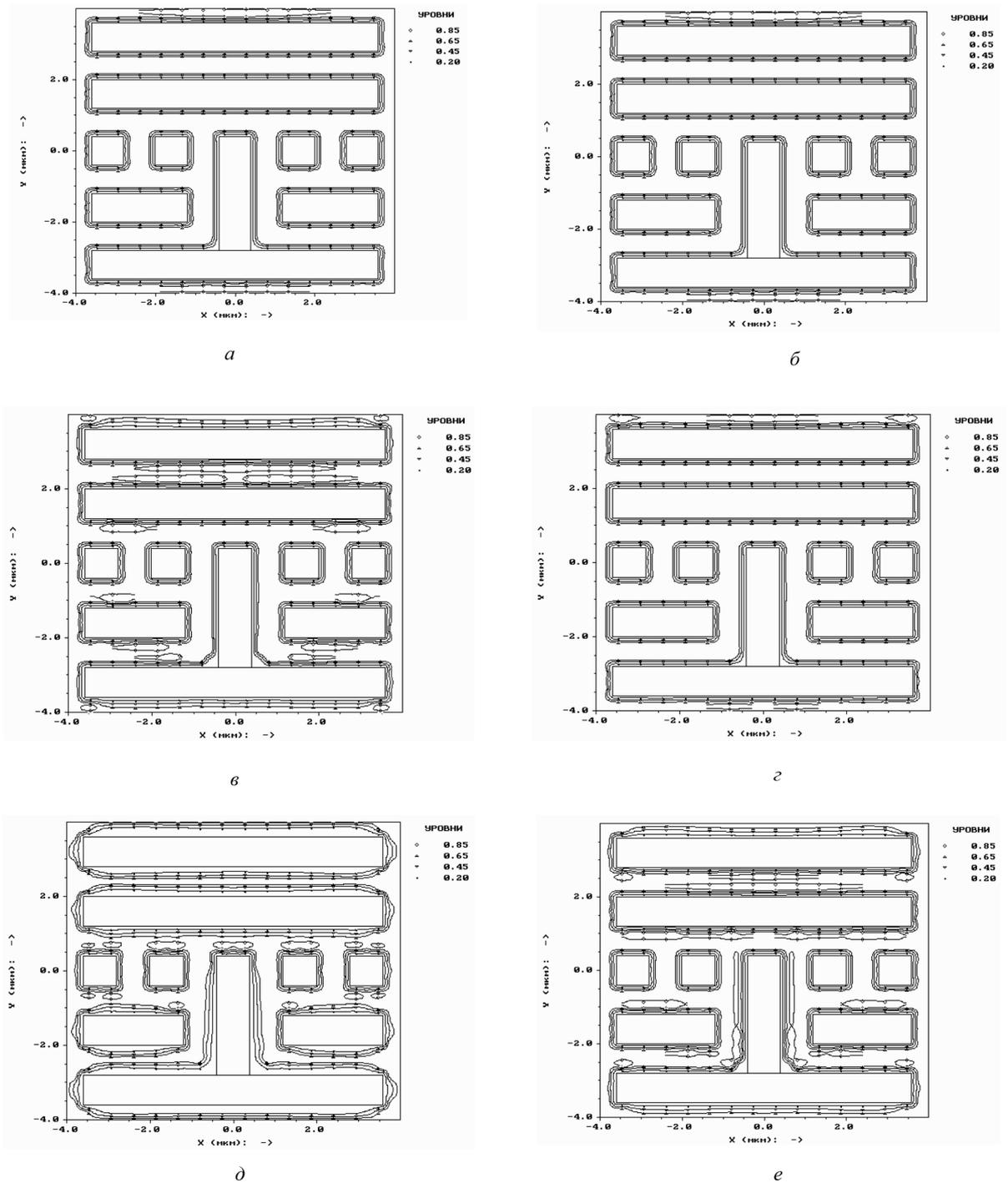


Рис. 2. Зависимость качества формирования элементов с номинальной шириной 0,8 мкм при разных степенях расфокусировки объектива Δf (мкм): 0 (а); $\pm 0,25$ (б); $+ 0,5$ (в); $- 0,5$ (г); $+ 1,0$ (д); $- 1,0$ (е)

чина расфокусировки объектива $\Delta f = 0$. На практике всегда существует ошибка в точности фокусировки объектива (инструментальная, человеческий фактор и др.). Задача исследований данного раздела – оценка величины допустимой расфокусировки объектива Δf , при которой заметного ухудшения качества проработки элементов не происходит.

Для проведения испытаний выбраны мира с номинальной шириной элементов 8 мкм (0,8 мкм в плоскости ВР), лазерное некогерентное излучение с $\lambda \sim 266$ нм и оптимальной дозой излучения порядка 0,48 Дж/мкм².

Недофокусировка, т. е. случай, когда плоскость Гаусса объектива была выше поверхности ВР, отмечалась знаком «-», а перефокусировка, т. е. когда плоскость Гаусса объектива была ниже плоскости поверхности ВР, – знаком «+». Результаты исследований приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что при величине расфокусировки объектива $\Delta f = \pm 0,25$ мкм заметной разницы в качестве формирования элементов в сравнении со случаем, когда $\Delta f = 0$ мкм, не наблюдается (рис. 2, а, б). Повышение Δf до + 0,5 мкм приводит к заметному увеличению клина проявления протяженных элементов, ухудшению проработки их внутренних углов (рис. 2, в), в то время как при $\Delta f = - 0,5$ мкм качество проработки элементов изменяется незначительно (рис. 2, г).

Дальнейшее увеличение расфокусировки объектива до $\Delta f = + 1,0$ мкм приводит к искажению формы и размеров протяженных элементов (квадратные элементы воспроизводятся нормально) и внутренних углов Т-образного элемента (рис. 2, д), в то время как при величине расфокусировки $\Delta f = - 1,0$ мкм наблюдается только увеличение клина проявления элементов при сохранении номинальных размеров у их дна (рис. 2, е).

Из результатов данных исследований следует:

для точного воспроизведения элементов мира при их формировании излучением с $\lambda \sim 266$ нм и апертуре объектива $NA = 0,4$ дефокусировка объектива (отклонение плоскости Гаусса от поверхности слоя вакуумного резиста) не должна превышать величину $\pm 0,25$ мкм;

при $\Delta f = \pm 0,5$ мкм недофокусировка объектива (плоскость Гаусса выше поверхности слоя ВР) меньше влияет на точность воспроизведения элементов, чем перефокусировка объектива (плоскость Гаусса ниже поверхности слоя ВР).

В качестве экспериментальной проверки соответствия реальных и рассчитанных методом моделирования режимов экспонирования при формировании маски из ВР они закладывались в управляющий комплекс экспериментальной литографической установки ЭМ-5094 ($\lambda \sim 532$ нм).

Маски формировались в пленках ВР на основе перилентетракарбоновой кислоты толщиной порядка 0,5 мкм, нанесенных на подложку из кремния, поверхность которой была предварительно закрыта пленкой SiO₂ толщиной порядка 0,3 мкм. Номинальный размер ширины протяженных элементов масок составлял 0,8 мкм. Далее проводились плазмохимическое травление пленок оксида кремния до кремниевой подложки через маски из ВР и их последующее удаление

в кислородосодержащей плазме.

Результаты эксперимента иллюстрируются рис. 3, который свидетельствует о близком соответствии оптимальных параметров экспонирования, определенных путем моделирования, и реальных оптимальных параметров установок литографии при формировании масок.

Теоретически методом моделирования показано [13] и практически подтверждено, что в процессе лазерной абляции в окнах маски всегда остается тончайший (порядка 0,02 мкм) прозрачный для лазерного излучения и неудаляемый им слой ВР. Последний образуется за счет того, что энергия лазерного излучения с его некоторой толщины начинает расходоваться на разогрев подложки и температура ВР уже не достигает температуры его субли-

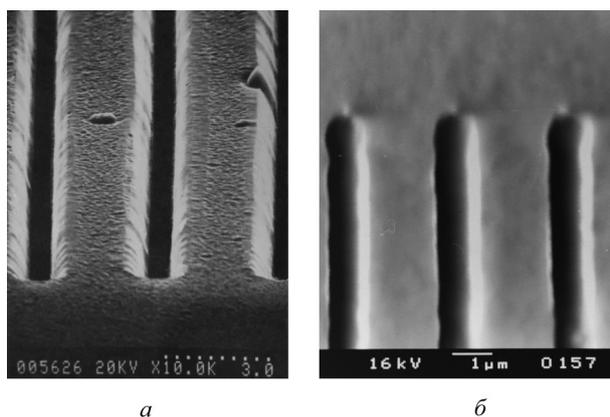


Рис. 3. Фрагмент маски в слое ВР, содержащий 3D-элементы шириной порядка 0,8 мкм (а); фрагмент топологии, сформированной методом плазмохимического травления в слое SiO₂ через маску из ВР (маска из ВР удалена в кислородосодержащей плазме) (б)

мации. На практике этот слой легко удаляется кратковременной обработкой маски (несколько секунд) в кислородосодержащей плазме, не влияющей на ее защитные свойства.

Заключение. Проведено моделирование процессов «сухой» лазерной вакуумной микролитографии импульсным лазерным излучением в слоях вакуумного резиста. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Установлено, что этот метод позволяет реально оценивать возможность качественного формирования 3D-элементов топологии разрабатываемых ИМС, возможные сочетания элементов разных размеров и форм, а также заранее прогнозировать оптимальные параметры импульсного лазерного экспонирования в вакууме слоев вакуумного резиста при создании масок. Показано, что на этапе подготовки производства новых изделий микроэлектроники данный метод позволяет значительно сократить временные и материальные затраты на отработку технологических процессов лазерной вакуумной микролитографии.

Список использованной литература

1. Green technological process of dry laser vacuum microlithography and equipment cluster for its realisation in ASIC manufacturing / V. E. Obukhov [et al.] // Proc. of the Joint Intern. Congress «Electronics Goes Green 2004 +». – Германия – Берлин, 2004. – P. 803–806.
2. A Submodule For The Laser Vacuum Projection Lithography / V. A. Azarko [et al.] // Proc. SPIE. – 1994. – Vol. 2336. – P. 227–232.
3. Iterative methods in semiconductor device simulation / C. S. Rafferty [et al.] // IEEE Trans. Elec. Dev. – 1985. – Vol. ED-32, N 10. – P. 2018–2027.
4. Dutton, R. W. Modeling and simulation for VLS / R. W. Dutton // Intern. Electron Devices Meeting. Technical Digest. – 1986. – P. 2–7.
5. Dutton, R. W. Perspectives on technology and technology-driven CAD / R. W. Dutton, A. J. Strojwas // IEEE Trans. CAD-ICAS. – 2000. – Vol. 19, N 12. – P. 1544–1560.
6. Lithographic Properties of Perylenetetracarboxylic Acid Derivatives Films / V. A. Azarko [et al.] // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 3179. – P. 99 – 102.
7. Dry patterning of resistive masks and topological structures / V. V. Boksha [et al.] // Proc. SPIE. – 1993. – Vol. 2091. – P. 101–111.
8. Лазерная обработка электрохромных пленок WO_3 в полосе собственного поглощения / Б. А. Будкевич [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1988. – № 1. – С. 39–43.
9. Любов, Б. Я. Развитие тепловой модели поверхностного испарения металлов под действием концентрированных потоков энергии / Б. Я. Любов, Э. Н. Соболев // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 6. – С. 12 – 19.
10. Углов, А. А. Расчет абляции пластины конечной толщины / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, Ю. Н. Лохов // Физика и химия обработки материалов. – 1982. – № 1. – С. 3–7.
11. Самарский, А. А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана / А. А. Самарский, Б. Д. Моисеенко // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816 – 827.
12. Годунов, С. К. Разностные схемы / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
13. Обухов, В. Е. Моделирование процессов абляции пленок органических материалов под воздействием импульсного лазерного излучения / В. Е. Обухов, Е. П. Шпак, С. П. Жвавый // Сб. матер. IV МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». – Беларусь – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 183–188.

Поступила в редакцию 10.01.2015

УДК 621.317.785(085)(476)

П. К. НАГУЛА, М. Н. КОЗЕЛ, С. В. РЫБЧАК, К. В. ЮРГАНОВ

**СРЕДСТВА УЧЕТА ОБЪЕМНОГО И МАССОВОГО РАСХОДА,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫЕ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ. ОПЫТ ПОВЕРКИ
И КАЛИБРОВКИ НА УСТАНОВКЕ «ЭТАЛОН»**

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

Одной из важнейших технических задач промышленности Республики Беларусь является измерение массового и объемного расхода как основы для обеспечения технологического учета в энергосберегающих и ресурсосберегающих технологиях. Для решения этой задачи разрабатывается множество средств измерений, которые подлежат обязательному метрологическому контролю. В данной статье приводятся анализ основных типов средств измерений расхода, которые применяются на промышленных предприятиях Республики Беларусь, современные требования, предъявляемые к расходомерам, а также оценка метрологической надежности во времени для некоторых типов расходомеров.

Ключевые слова: массовый и объемный расход, метрологическая надежность, метрологические характеристики, поправочный коэффициент, средство измерений.

P. K. NAHULA, M. N. KOZEL, S. V. RYBCHAK, K. V. YURGANOV

ACCOUNTING MEANS OF VOLUME- AND MASS FLOW, OPERATING IN THE REPUBLIC OF BELARUS. EXPERIENCE VERIFICATION AND CALIBRATION AT «ETALON»

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

One of the major technical problems of industry of the Republic of Belarus is the measurement of mass and volume flow rate, as the basis for technological consideration in energy-saving and resource-saving technologies. To solve this task many measuring instruments subject to metrological control are developed. This article provides an analysis of the main types of means of discharge measurements, which are used at the industrial enterprises of the Republic of Belarus, the modern requirements for flow meters, as well as assessment of the metrological reliability in time for some types of flowmeters.

Keywords: mass and volume flow rate, metrological reliability, metrological characteristics, correction factor, measuring instrument.

Введение. В современной промышленности и повседневной жизни вопросы измерения расхода различных жидкостей, газов и веществ имеют большое значение. Их роль в настоящее время существенно возрастает в связи с коммерциализацией учета энергоносителей и необходимостью максимальной экономии энергетических и водных ресурсов страны, которые все больше дорожают.

Без расходомеров невозможно обеспечить управление и оптимизацию технических и/или технологических режимов в энергетике, металлургии, химической и нефтехимической, газовой, целлюлозно-бумажной, пищевой и в других отраслях промышленности. Без этих средств измерений невозможны и автоматизация производства, и достижение его максимальной эффективности [1].

На территории Республики Беларусь номенклатура применяемых средств учета объемного и массового расхода в настоящее время значительно расширилась за счет освоения расходомеров и счетчиков как отечественного, так и импортного производства. В Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь внесено 221 наименование средств измерений расхода разных типов (включая исключенные из реестра и просроченные средства измерений расхода) [2].

Однако сложности конструкций, алгоритмов работы, монтажа и эксплуатации средств измерений создают возможность некорректной работы, фальсификации показаний и некачественного сервисного обслуживания данных средств измерений. В результате проблема учета газа и различных жидкостей переросла из чисто государственной в коммерческо-потребительскую.

Часто результаты государственных испытаний на надежность при утверждении типа средства измерений, проводимых в лабораторных условиях, не дают объективной информации о деградации измерительных каналов средств измерений в реальных условиях эксплуатации под воздействием внешних факторов. В существующей на данный момент нормативной документации, устанавливающей требования к межповерочным интервалам, рассматривается тип средства измерения, а не конкретный экземпляр, при этом характер временных изменений метрологических характеристик может быть весьма разнообразным даже у однотипных средств измерений. Поэтому для повышения достоверности исследований необходимо учитывать как индивидуальные особенности средства измерений расхода, так и условия его эксплуатации.

Цель данной статьи – оценка работ по периодической поверке расходомеров на установке «Исходный эталон единиц массового и объемного расхода воды № ИЭ РБ 9–05» в период с 2008 по 2015 г. Проанализированы основные типы средств измерений расхода, которые применяются на промышленных предприятиях Республики Беларусь, определены современные требования, предъявляемые к расходомерам, а также представлены результаты оценки метрологической надежности для некоторых типов расходомеров в плане дальнейшего повышения точности и универсальности их применения.

Современные требования, предъявляемые к средствам измерений объемного и массового расхода, многочисленны и разнообразны. Одно средство измерений не может удовлетворять всем требованиям, поэтому при выборе того или иного типа средства следует исходить из сравнительной важности тех или иных требований, предъявляемых к измерению расхода или количества в каждом случае.

Рассмотрим базовые требования [3], предъявляемые к расходомерам и счетчикам:

1. **Точность средства измерений.** Характеристика качества средства измерений, отражающая близость его погрешности к нулю. Это важно, когда необходимо измерять не мгновенный расход, а количество (массу или объем) прошедших через расходомер веществ. Если раньше погрешность измерения в 1,5–2% считалась приемлемой, то теперь нередко требуется иметь погрешность не более 0,05–0,5%.

2. **Метрологическая надежность.** Подразумевается надежность средств измерений в части сохранения его метрологической исправности. Она оценивается временем, в течение которого средство измерений сохраняет работоспособность и все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям. Она зависит от типа средства измерений и от условий его эксплуатации. Некоторые расходомеры и их элементы, не имеющие движущихся частей, могут надежно работать продолжительное время. Тахометрические расходомеры и счетчики с движущимся ротором имеют много меньший срок службы, зависящий от степени чистоты измеряемого вещества и его смазывающей способности.

3. **Малая зависимость точности измерения от изменения плотности вещества.** Лишь тепловые и силовые расходомеры, измеряющие массовый расход, обладают этим ценным свойством. У других типов приборов надо иметь устройства, автоматически вводящие коррекцию на изменение плотности или хотя бы температуры и давления измеряемого вещества. Это особенно необходимо при измерении расхода газа.

4. **Быстродействие прибора или его высокие динамические характеристики.** Это важно, когда расходомер применяют в системах автоматического регулирования и при измерении быстроменяющихся расходов. Быстродействие удобно оценивать значением постоянной времени T прибора, т. е. временем, в течение которого его показания при скачкообразном изменении расхода от Q_1 до Q_2 изменяются приблизительно на две трети от значения $Q_2 - Q_1$. Имеется большая градация быстродействия T , которая измеряется в пределах сотых и тысячных долей секунды у турбинных расходомеров, и величины T , измеряемая десятками секунд у тепловых расходомеров. Для улучшения быстродействия последних применяют особые (дифференцирующие) измерительные схемы.

5. **Широкий диапазон измерений Q_{\max}/Q_{\min} .** Область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

6. **Обеспеченность метрологической базой.** В настоящее время в состав метрологической базы по обслуживанию средств измерений расхода на территории Республики

Беларусь входит 125 проливных установок, которые прошли метрологический контроль в РУП «БелГИМ». Они обеспечивают осуществление метрологического контроля расходомеров и счетчиков воды, в том числе из состава теплосчетчиков. Только 68 проливных установок реализуют измерение массового и объемного расхода методом статического взвешивания, что составляет порядка 54% от их общего количества.

7. **Ш и р о к и й д и а п а з о н п о к а з а н и й.** Область значений шкалы, ограниченная начальной и конечной величинами. Для жидкостей требуется измерять расходы в пределах от 10^{-2} до 10^5 – 10^6 кг/ч, а для газов – в пределах от 10^{-4} до 10^7 – 10^8 кг/ч, т. е. расходы, значения которых отличаются на десять порядков. Особые трудности возникают при измерении как малых, так и больших расходов, здесь нередко приходится применять особые методы измерения, например, парциальный (при больших расходах).

8. **Э к с т р е м а л ь н ы е у с л о в и я э к с п л у а т а ц и и.** Необходимость измерения расхода не только в нормальных, но и в экстремальных условиях при очень низких или высоких температурах и давлениях. Расход криогенных жидкостей (например, сжиженного водорода) надо измерять при низких температурах (до -255 °С), а расход перегретого пара сверхвысокого давления и расход расплавленных металлов теплоносителей – при температурах, достигающих $+600$ °С. Подобные условия создают дополнительные трудности для обеспечения надежного измерения расхода.

9. **Ш и р о к а я н о м е н к л а т у р а и з м е р я е м ы х в е щ е с т в.** Вещества могут быть не только однофазными и однокомпонентными, но также многофазными и многокомпонентными. Основные методы измерений расхода разрабатывались в основном для однофазных сред, т. е. для жидкости, газа и пара.

При этом необходимо учитывать как параметры (давление, температура), так и особые свойства (агрессивность, абразивность, токсичность, взрывоопасность и т. д.) веществ внутри каждой из этих сред. Особая задача – измерение расхода расплавленных металлов-теплоносителей при высоких температурах. Все актуальнее становится процесс измерения двухфазных и иногда трехфазных сред. К ним относятся гидросмеси или пульпы, смеси твердой и газообразной фаз, смеси жидкости с газом (нефтегазовая смесь) или с паром (влажный пар) и газированная пульпа, представляющая собой смесь всех трех фаз [3].

Опыт работы по периодической поверке и калибровке средств измерений расхода. На производственных площадях Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси в рамках ГНТП «Эталоны Беларуси» в 2003 г. создан «Исходный эталон единиц массового и объемного расхода воды № ИЭ РБ 9-05» (далее установка «Эталон»), основными задачами которого являются воспроизведение, хранение, передача единицы расхода нижестоящим средствам измерений и подтверждение их характеристик требованиям установленных норм точности.

На белорусском рынке средств учета объемного и массового расхода представлены средства измерений импортного и отечественного производства. Рассматриваемый рынок условно можно разделить на семь сегментов по отраслям экономики (материального производства и социально-культурной ориентации, так называемой сферы услуг):

- пищевая промышленность занимает порядка 38% в количественном выражении всего рынка;
- топливная промышленность (для РБ в основном это газовая и нефтеперерабатывающая) занимает порядка 25% в количественном выражении всего рынка;
- машиностроение и металлообработка 3%;
- химическая и нефтехимическая промышленность 4%;
- электроэнергетика 2%;
- сфера услуг (наука, ЖКХ, торговля и др.) занимает порядка 27% в количественном выражении всего рынка;
- прочие виды деятельности 2%.

На целевом рынке представлены преимущественно средства учета зарубежного производства с рыночной долей 86% в количественном и стоимостном выражении всего рынка средств учета массового и объемного расхода. Лидерами по объемам поставок являются такие известные компании, как Endress+Hauser Flowtec AG (Швейцария), Krohne (Германия), Yokogawa Electric Corporation (Япония), Emerson Process Management (Германия), SIEMENS AG (Германия)

и ABB Automation Systems (Германия) [2], которые уже прочно закрепились на рынке и нашли своего потребителя, хотя конкуренция между ними все еще существует.

Средства учета расхода отечественного производства занимают на рынке долю в 14% (количественная оценка) и характеризуются умеренными темпами роста производства. Основными белорусскими производителями на рынке средств учета можно назвать такие компании, как ООО «АРВАС», НП ООО «Белсимет», УП «Минсккоммунтеплосеть», РУП «БЕЛТЭИ», СП ООО «Термо-К», НП ООО «Гран-Система-С», ООО «ТЭМ-энерго», ООО «ВОГЕЗ ЭНЕРГО», ООО «ФАКОМТЕХНОЛОДЖИЗ» и др. [2].

В целом спрос на все средства учета определяется проводимой политикой государства по переходу к энергосберегающим и ресурсосберегающим технологиям. В коммунальном хозяйстве измеренный расход жидкости лежит в основе расчетов за потребление воды, за водоотведение и за тепловую энергию, в нефтегазовой промышленности расход жидкости является одним из основных технологических параметров, контролирование которых обеспечивает управляемость производственными процессами.

Все эксплуатируемые расходомеры можно четко разделить по принципу действия, причем каждый тип расходомеров имеет свои особенности и занимает соответствующую нишу на рынке Республики Беларусь.

Как видно на рис. 1, белорусский рынок представлен следующими типами расходомеров:

электромагнитные расходомеры 38% (среди них наиболее распространены Promag 10/30/33/50/53H (Endress+Hauser) 56%, Sitrans F M Magflo MAG5000/MAG6000 (SIEMENS) 39% от общего количества электромагнитных расходомеров);

массовые (кориолисовы) расходомеры 34% (Micro Motion (модели датчиков ELIT, R, T, F, H, D, CNG) (Emerson Process Management) 49%, Optimass 2000/7000/9000 (KROHNE) 22%, PROMASS исполнение F/E (Endress+Hauser) 15% и расходомеры-счетчики массовые Sitrans F C Massflo Mass3000/Mass6000 (SIEMENS) 11% от общего количества массовых (кориолисовых) расходомеров); ротаметры 15%;

вихревые расходомеры 9% (Prowirl 72F/72W/73F/73W (Endress+Hauser) 51%, FS 4000/FV 4000 (ABB) 28%, YEFWLO серии DY (Yokogawa Electric) 21% от общего количества вихревых расходомеров);

турбинные расходомеры 2% (компаний «Рошар», Шлюмберже», «Метер-Флоу», «Турбоквант»);

ультразвуковые расходомеры 1% (FLUXUS ADM 6725/ Altometr/ PORTAFLOW 216/АКРОН 01);

расходомеры с другими принципами действия 1% (например, магнитно-индукционные расходомеры).

Несмотря на то, что рассмотренные средства учета энергоресурсов применяются уже не один десяток лет, их поверка и калибровка до настоящего времени вызывают определенные трудности и являются весомыми статьями затрат в процессе эксплуатации. Поэтому потребитель должен быть уверен в том, что средства учета расхода метрологически надежны на протяжении не только всего межповерочного интервала (МПИ), но и всего срока службы.

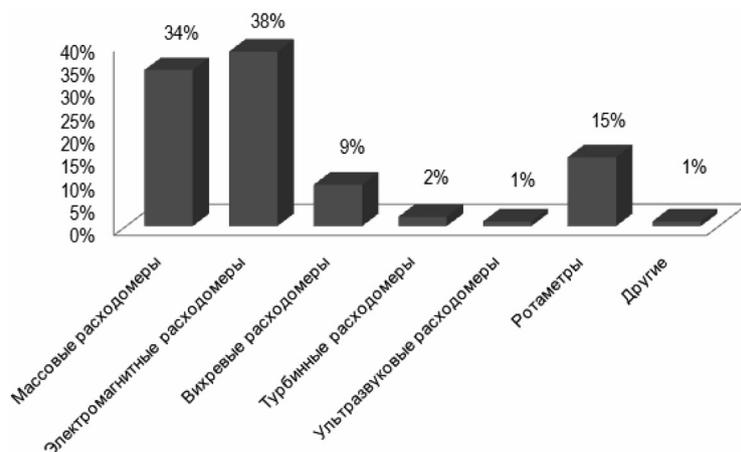


Рис. 1. Соотношение средств измерений расхода по используемому принципу измерений

Оценка метрологической надежности средств учета объемного и массового расхода. Одним из основных показателей качества средств измерений расхода является метрологическая надежность [4] – свойство измерений сохранять во времени метрологические характеристики в пределах установленных норм.

Метрологическая надежность определяется характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик. Чем выше показатели метрологической надежности (вероятность работы без метрологического отказа, метрологический ресурс, интенсивность отказов и т. д.), тем реже приходится поверять средства измерений и тем меньший риск использования неисправного прибора в течение межповерочного интервала. Сведения о метрологической надежности средств измерений необходимы потребителю для правильной организации его метрологического обслуживания, а также назначения сроков очередной поверки или ремонта [5].

Наиболее точными, надежными, универсальными по совокупности эксплуатационных характеристик [6] и распространенными в Республике Беларусь являются электромагнитные расходомеры. Их показания практически не зависят от изменения физических свойств измеряемой среды (плотности, вязкости, электропроводности т. д.) [7] и незначительно зависят от распределения скорости потока в канале [6].

Характер изменения метрологических характеристик на примере электромагнитных расходомеров в межповерочном интервале представлен на рис. 2.

Проанализированы показания 20 однотипных электромагнитных расходомеров, поступивших на периодическую поверку после эксплуатации (МПИ 4 г.) на одном предприятии в схожих условиях окружающей и рабочей среды.

На рис. 2 изображена прямая усредненных показаний откалиброванного расходомера (1), которая находится в пределах допускаемой основной относительной погрешности $\Delta = \pm 0,2\%$ (2, 3).

Анализ показал, что 81% (количественная оценка) расходомеров не удовлетворяет требованиям по метрологической надежности: на практике основная относительная погрешность измерения превышает допускаемую на 0,62, 0,54 и 0,48% на 10, 50 и 90% номинального расхода – прямая усредненных показаний расходомера после эксплуатации (4).

Калибровка такого типа расходомеров, как правило, осуществляется при помощи настройки нулевой точки (zero) [7] и установки поправочного коэффициента (*K*-фактор).

K-фактор – коэффициент, выражающий соотношение между единицей объема пропускаемой жидкости (1 л) к объему, пропускаемому расходомером за один оборот:

$$V_R = \Delta V_R \cdot K_R, \quad (1)$$

где V_R – объем, прошедший через расходомер, ΔV_R – объем жидкости, отмеряемый за один оборот измерительного узла расходомера, K_R – количество оборотов, приходящееся на 1 л (1 м³ и т. д.) [8].

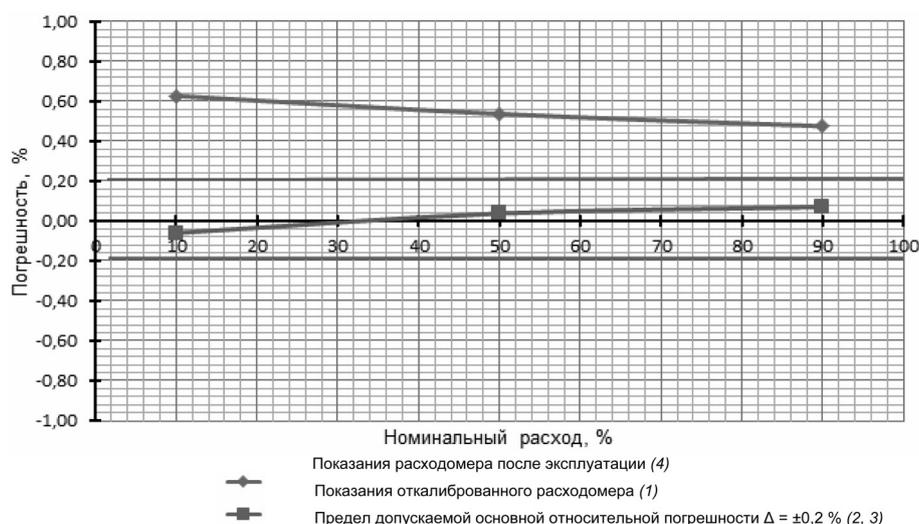


Рис. 2. Изменение метрологических характеристик электромагнитного расходомера

Проще говоря, K -фактор – множитель, используемый в расходомерах.

Все расходомеры после изготовления проходят этап калибровки и получают калибровочный сертификат, где указываются диапазон измерений расхода и средний поправочный коэффициент (K -фактор) для данного расходомера. Например, K -фактор задается в количестве импульсов, соответствующем конкретному объемному расходу (200 имп/л и т. д.)

Данный коэффициент используют для преобразования импульсного сигнала, пропорционального расходу, в технические единицы [9].

Основной причиной метрологического отказа у расходомеров является неучет условий эксплуатации, которые существенно влияют на измеряемую величину, параметры применяемых средств измерений расхода и деградацию измерительных каналов. Среди таких условий необходимо отметить аэрацию жидкости, пульсацию измеряемого расхода в реальных условиях, «зарастание» стенок трубопровода и др.

Установлено несанкционированное вмешательство оператора в работу средства измерений (в 54% расходомеров был изменен K -фактор), что противоречит требованиям технической и нормативной документации и приводит к искажению результатов. Тем не менее, когда расходомеру задавались настройки предыдущей поверки (паспортные «zero» и K -фактор), основная относительная погрешность измерения превышала предел допускаемой основной относительной погрешности. Поэтому в настоящее время актуальной для электромагнитных расходомеров остается проблема степени накопления нестабильности показаний расходомера на межповерочном интервале.

В процессе эксплуатации расходомеров важно гарантировать также соблюдение правил установки, корректную настройку нулевой точки и исключить вмешательство оператора в процесс функционирования приборов (изменение без надобности корректировочных и калибровочных коэффициентов).

На предприятиях Республики Беларусь, особенно в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, благодаря своим конструктивным особенностям, стабильности метрологических характеристик и возможности эксплуатации в агрессивных средах, без потери точности и стабильности показаний широко применяются массовые (кориолисовы) расходомеры, их доля рынка на текущий момент составляет 34%.

Насколько точно и надежно работают такие расходомеры в межповерочном интервале отражено на рис. 3.

Изменение конфигурации кривых (1, 2, 3) на рис. 3 во времени зависит от состояния поверочной среды и метрологических характеристик поверочной установки. С течением времени (МПИ 2 г.) существенных изменений в показаниях рассматриваемого расходомера не наблюдается. Все кривые

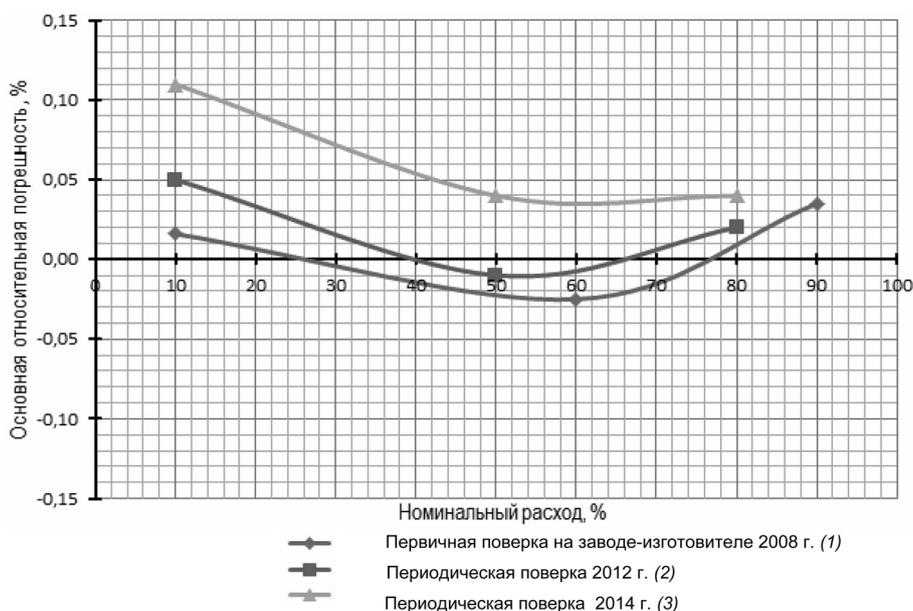


Рис. 3. Оценка метрологической надежности кориолисова массового расходомера во времени

(1, 2, 3) находятся в пределах допустимой основной относительной погрешности, которая определяется, как $\Delta = \pm 0,1\% \pm [(2,76/Q_{\max})100\%]$. Смещение первой точки на кривых (2, 3) обусловлено лишь измерением нулевой точки, которая настраивается оператором при каждой установке расходомера.

После настройки нулевой точки для сохранения качества измерений монтаж расходомера не должен претерпевать никаких изменений. Это означает, что после любых изменений в системе (монтаж / демонтаж датчика или изменение фактора калибровки) необходимо проводить повторную калибровку нулевой точки.

В массовых расходомерах фактор калибровки используется только для случаев, когда расходомер существенно завышает либо занижает показания. Исследования показали, что в 24% случаев существует необходимость подобных манипуляций, а именно при занижении показаний вводить погрешность измерений в процентах с положительным значением, а при завышении – погрешность с отрицательной величиной.

Для данного типа расходомеров правильно выбран межповерочный интервал, в пределах которого расходомер сохраняет свою метрологическую исправность.

При работе с любым массовым расходомером необходимо соблюдать общие принципы монтажа и корректно проводить настройку нулевой точки. Если при этом погрешность измерений имеет высокое значение, то настройка прошла некорректно по следующим причинам: имеет место протечка клапанов либо наличие газовых включений, либо имеются некоторые отложения на трубе.

Заключение. Разнообразие конструкций и типов расходомеров на рынке Республики Беларусь обусловлено постоянным совершенствованием методов и средств измерений расхода и количества вещества, а также стремлением к достижению высокой точности и метрологической надежности измерений.

На основании приведенной классификации и оценки метрологических характеристик выявлено, что наиболее перспективными в плане дальнейшей работы по повышению метрологической надежности являются электромагнитные и массовые расходомеры. Они наиболее распространены на территории Республики Беларусь (их доля на рынке составляет 38 и 34%) и обладают набором важных эксплуатационных характеристик и возможностью эксплуатации и в нормальных, и в экстремальных условиях.

Анализ результатов поверок в период 2008–2015 гг. показал, что межповерочный интервал для электромагнитных расходомеров, назначенный на основании требований действующих нормативных документов, является завышенным. Это приводит к снижению метрологической надежности таких расходомеров во времени и получению недостоверных результатов измерений на практике в процессе их эксплуатации на рабочих местах.

Список использованной литературы

1. Епанчинцева, О. М. Методы измерений и приборы: учебное пособие / О. М. Епанчинцева. – Кемерово: ОАО «КЕМПК», 2009. – 303 с.
2. Поиск по реестру СИ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://www.belgim.by/grsi_default – Дата доступа: 19.03.2015.
3. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. Изд. 5-е переработ. и доп. под ред. Е. А. Шорникова / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 410 с.
4. РМГ 74–2004. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – Введ. 2005-03-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 38 с.
5. Грубо, Е. О. Алгоритмическое обеспечение повышения метрологической надежности средств измерений: дис. ... канд. техн. наук / Е. О. Грубо. – СПб, 2011. – 137 с.
6. Акимова, О. Ю. Математическое моделирование влияния профиля скорости потока на сигнал электромагнитного расходомера / О. Ю. Акимова [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: http://www.giab-online.ru/files/Data/2006/3/10_Akimova9.pdf. – Дата доступа: 11.03.2015.
7. Контрольно-измерительные приборы Endress+Hauser / ООО «Новосибирская электротехническая компания» [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: http://catalog.novosibirsk.ru/index.php?page=kip_endress_hauser. – Дата доступа: 03.03.2015.
8. К-фактор – определение, область использования и расчет [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://ker-products.ru/flow-control-and-regulation/63-gde-primenjajut-summatori/332-k-factor-opredelenie-i-raschet.html>. – Дата доступа: 05.03.2015.
9. О погрешностях измерений расходомеров [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://darkont.ru/support/staty/o-tochnosti-raschodomerov>. – Дата доступа: 05.03.2015.

Поступила в редакцию 10.04.2015

УДК [543.318.3+546.33'131]:666.9

С. Э. САВАНОВИЧ, Т. В. БОРБОТЬКО

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА НАТРИЯ, ВВЕДЕННОГО В ПОРЫ КЕРАМЗИТА, НА ЕГО РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,
e-mail: svetasav@bsuir.by*

Установлено влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, вводимого в керамзит, на его значения коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 0,9–17 ГГц. Определены оптимальные величины концентраций водного раствора. Предложено использование полученных результатов исследования при разработке конструкций экранов электромагнитного излучения для создания экранированных помещений.

Ключевые слова: экран, электромагнитное излучение, керамзит, хлорид натрия, водный раствор, вязкость, размер фракций, коэффициент отражения, коэффициент передачи.

S. E. SAVANOVICH, T. V. BORBOTKO

EFFECT OF VISCOSITY OF AQUEOUS SODIUM CHLORIDE SOLUTION, INTRODUCED INTO PORES OF EXPANDED CLAY, ON ITS RADIOABSORBING PROPERTIES*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
e-mail: svetasav@bsuir.by*

Agency of viscosity of an aqueous solution of chloride of the sodium inducted into expanded clay, on its values of coefficients of reflexion and transfer over the range frequencies of 0,9–17 GHz is determined. Optimum values of concentrations of an aqueous solution are spotted. Use of the gained effects of examination is offered by working out of constructions of shields of an electromagnetic radiation for making shielding premises.

Keywords: screen, electromagnetic radiation, expanded clay, sodium chloride, aqueous solution, viscosity, size fractions, reflection coefficient, transfer coefficient.

Ведение. Для создания конструкций экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) широко применяются металлы и их сплавы ввиду их технологичности и коррозионной стойкости. Однако использование таких материалов ограничивается диапазоном рабочих частот, влиянием на экранируемый объект и стоимостью. Наиболее перспективными для формирования конструкций экранов ЭМИ представляются влагосодержащие материалы, характеризующиеся широким рабочим диапазоном частот, высокой эффективностью экранирования и невысокой стоимостью. Формирование влагосодержащих материалов основано на фиксации водных растворов в капиллярах и порах матрицы методом ее пропитки [1].

Применение воды в качестве поглощающей среды в конструкциях экранов обусловлено ее значительными диэлектрическими потерями, связанными с механизмом дипольной релаксации молекул воды под воздействием внешнего электромагнитного поля. Введение в воду примесей в виде солей, спиртов, кислот изменяет ее характеристики (электропроводность, диэлектрическую проницаемость, вязкость и т. д.), что позволяет синтезировать на ее основе растворы с определенными значениями коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения.

Формирование конструкций экранов ЭМИ на основе влагосодержащих материалов, в поровых пространствах которых содержатся водные растворы, позволяет получать экраны, радиопоглощающие свойства которых определяются конструктивным исполнением, влагосодержанием, примесями и их концентрациями в водном растворе, структурой и свойствами матрицы. В качестве матрицы для создания конструкций экранов ЭМИ предпочтительно для использования капиллярно-пористых (волокнистых, тканых и нетканых, порошкообразных и гранулированных) материалов с различными растворными наполнителями [2–5].

Получение необходимых значений коэффициентов отражения и передачи в таких конструкциях характеризуется объемным содержанием в порах матрицы растворного наполнителя. Показано, что увеличение объемного влагосодержания повышает эффективность экранирования таких конструкций [6]. Однако их существенными недостатками являются большой вес, обусловленный в основном высоким влагосодержанием растворного наполнителя (до 70%), а также необходимость стабилизации влагосодержания на длительный временной промежуток для сохранения радиоэкранирующих характеристик. Герметизация таких конструкций экранов ЭМИ достигается путем применения полимерных пленок и связующих веществ, позволяющих снизить испарение влаги [7].

Требуемые значения радиопоглощающих характеристик конструкций экранов ЭМИ на основе влагосодержащих материалов без существенного увеличения их влагосодержания и соответственно веса таких конструкций возможны при изменении вязкости растворного наполнителя, вводимого в поры матрицы, в качестве которой предложено использовать керамзит с размером фракций до 4 мм. Перспективность применения такого материала в конструкциях экранов ЭМИ обоснована в [8, 9].

Цель данной работы – определение влияния вязкости водного раствора хлорида натрия (NaCl), вводимого в керамзит, на его значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц.

Обоснование выбора композитного материала. В качестве растворного наполнителя предложено использовать водный раствор NaCl с концентрацией растворенного вещества 20%. Выбор хлорида натрия обусловлен его широким распространением и невысокой стоимостью. Его водный раствор обладает высокой степенью электролитической диссоциации (около 1), т. е. является «сильным» электролитом. Растворимость хлорида натрия в воде составляет до 36,0 г на 100 г воды при 20 °С, при этом диэлектрическая проницаемость (ϵ') раствора равна 23.

Как показано в [10], 20%-ный водный раствор NaCl в СВЧ-диапазоне обеспечивает максимум диэлектрических потерь при незначительной зависимости их от температуры. Диэлектрические потери представляют собой результат взаимодействия электромагнитной волны с водным раствором соли и обуславливаются процессами ионной проводимости растворенного вещества (хлорида натрия) и дипольного вращения молекул растворителя (молекул воды).

Ионная проводимость раствора хлорида натрия определяется электрофоретической миграцией ионов Na⁺ и Cl⁻ в растворе при воздействии электромагнитного поля. Потери, связанные с движением ионов, зависят от их размера, заряда и удельной электропроводности [11].

С увеличением концентрации ионов Na⁺ и Cl⁻ в водном растворе NaCl повышается величина его электропроводности, которая уменьшается со снижением подвижности ионов и расстояния между ними. Для данного эффекта характерно увеличение диэлектрической проницаемости водного раствора NaCl (ϵ') в области средних и больших концентраций, что обуславливает рост коэффициента диэлектрических потерь (ϵ'').

Вращательное движение диполей H₂O возникает вследствие того, что с увеличением интенсивности электромагнитного излучения молекулы воды, имеющие постоянный дипольный момент, приобретают определенную ориентацию, что приводит к ослаблению ЭМИ. Благодаря большому значению дипольного момента молекул ($6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м), вода может в 80 раз ослабить внешнее ЭМИ. При отсутствии воздействия ЭМИ на водные растворы NaCl за время релаксации τ в результате теплового движения молекулы возвращаются в беспорядочное состояние с выделением тепловой энергии [12].

Ослабление ЭМИ водными растворами хлорида натрия в значительной степени определяется подвижностью и концентрацией ионов в растворе, степенью взаимодействия ионов Na⁺ и Cl⁻ с молекулами H₂O, временем релаксации диполей воды, частотой электромагнитного излучения и вязкостью раствора, так как последняя определяет подвижность ионов растворенного вещества и диполей растворителя.

Методика эксперимента. Для проведения исследования изготовлены конструкции экранов ЭМИ, выполненные в виде модулей с плоской формой поверхности, внутренний объем которых заполнялся влагосодержащим керамзитом с размерами фракций до 4 мм при толщине слоя 10 мм. Линейный размер модулей составлял 470×360 мм.

Водные растворы, инкорпорированные в поры керамзита, представляли собой 20% -ный раствор хлорида натрия (далее по тексту раствор № 1). Для изменения значений вязкости в водный раствор NaCl вводилась натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (Na-карбоксиметилцеллюлоза) в виде 1%- и 3%-ного водного раствора (далее по тексту раствор № 2 и № 3).

Влагосодержание конструкций экранов ЭМИ, пропитанных водными растворами № 1, № 2 и № 3, оценивали гравиметрическим методом и варьировали в пределах 24–26, 35–37 и 52–53% соответственно [13]. Относительная погрешность измерений составляла $\pm 2\%$.

Измерения значений динамической вязкости η образцов водных растворов проводили на ротационном вискозиметре Реотестат 2.1 с использованием цилиндрических измерительных устройств по Сирле (Searle) при скорости сдвига $\dot{\gamma}_r = 27 \text{ c}^{-1}$ согласно инструкции по эксплуатации. При реологических исследованиях образцов водных растворов хлорида натрия их температуру поддерживали с помощью термостата СС1 фирмы Huber (Германия). Относительная погрешность измерений составляла не более 1%.

Для измерения коэффициентов отражения и передачи исследуемых конструкций экранов ЭМИ в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн, и антенны П6-23М. Измерения проводили по методике [14].

Результаты и их обсуждение. По результатам измерений определены следующие значения вязкости водных растворов хлорида натрия: раствор № 1 – $1,6 \cdot 10^{-3}$ Па·с; раствор № 2 – $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с; раствор № 3 – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

В рассмотренном диапазоне частот можно выделить три области, в которых отличие значений коэффициентов отражения и передачи зависит от величины вязкости вводимого в керамзит водного раствора.

Диапазон частот 0,9–3 ГГц. Повышение вязкости водного раствора NaCl от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в поры керамзита позволяет:

увеличить значения коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, от $-7,7$ до $-0,4$ дБ и от $-11,0$ до $-1,0$ дБ при закреплении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 1, а, б);

снизить значения коэффициента передачи исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на основе влагосодержащего керамзита, с $-5,0$ до $-25,5$ дБ (рис. 2).

Диапазон частот 3–9 ГГц. Повышение вязкости водного раствора NaCl от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в поры керамзита, позволяет повысить значения коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, от $-12,8$ до $-3,0$ дБ и от $-12,6$ до $-3,0$ дБ при закреплении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 3, а, б). Следует отметить, что указанная закономерность, обусловленная повышением вязкости водного раствора NaCl, вводимого в керамзит, наблюдается при изменении частоты электромагнитных колебаний от 3 до 6,5 ГГц. На частотах свыше 6,5 ГГц рассматриваемого диапазона частот происходит

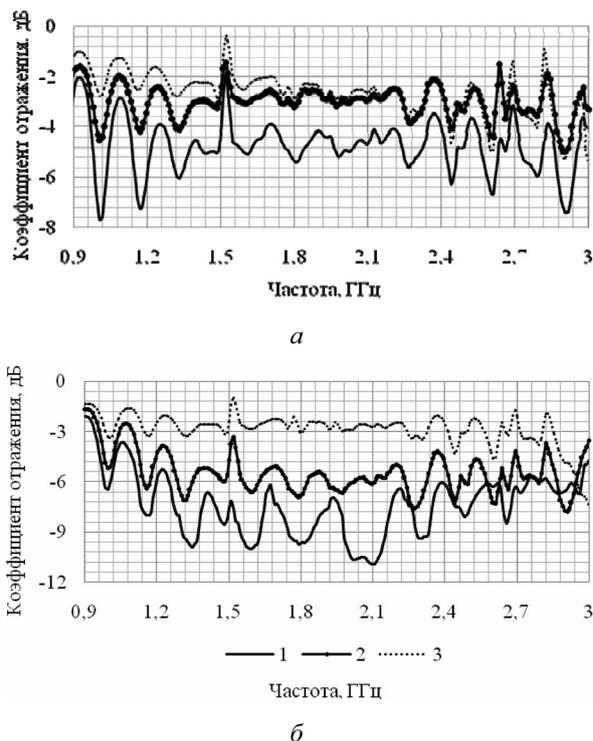


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения (а) и коэффициента отражения с металлом (б) конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 0,9–3 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия: 1 – раствор № 1; 2 – раствор № 2, 3 – раствор № 3

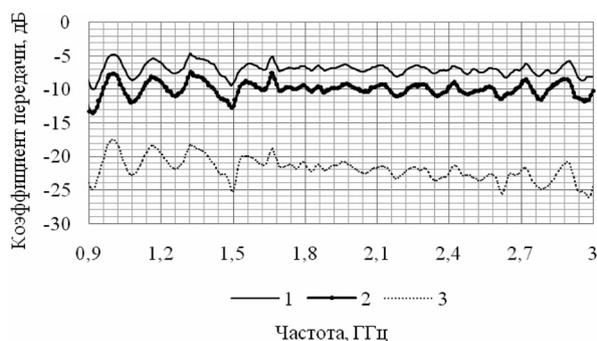


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента передачи конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 0,9–3 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия: 1 – 3 см. на рис. 1

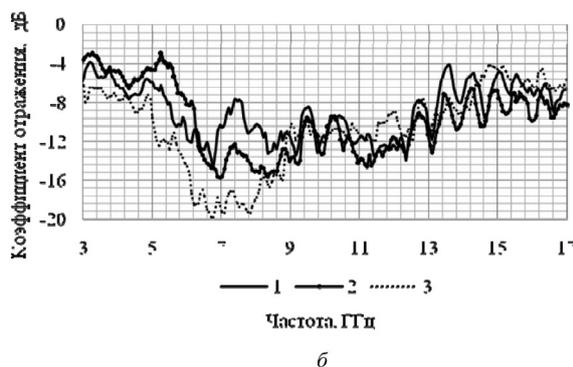
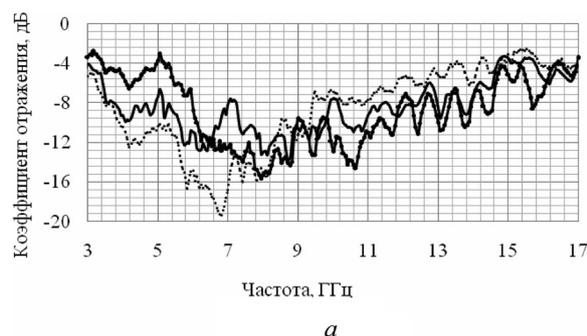


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения (а) и коэффициента отражения с металлом (б) конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия: 1 – 3 см. на рис. 1

ного раствора хлорида натрия в указанных выше пределах не оказывает существенного влияния на значения коэффициента передачи конструкций экранов ЭМИ.

Можно предположить, что в диапазоне частот 0,9–3,0 ГГц снижение значений коэффициента отражения ЭМИ обусловлено в большей степени влиянием ионной проводимости раствора NaCl, введенного в керамзит, а на частотах 3,0–17 ГГц – дипольно-релаксационной поляризацией молекул воды в вязкой среде [15].

Показано, что повышение вязкости 20%-ного водного раствора хлорида натрия в пределах $3,0\text{--}5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, введенного в поры керамзита, на основе которого выполнены конструкции экранов ЭМИ, позволяет обеспечить более высокое ослабление ЭМИ в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц, что обуславливает перспективность применения в конструкциях экранов ЭМИ вязких водных растворов хлорида натрия.

снижение значений коэффициента отражения для исследуемой конструкции экрана ЭМИ с $-12,8$ до $-15,0$ дБ и с $-13,8$ до $-15,6$ дБ при размещении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 3, а, б).

Увеличение вязкости водного раствора NaCl от $3,0 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, введенного в керамзит, приводит к снижению значений коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, с $-3,0$ до $-19,4$ дБ и с $-3,0$ до $-19,8$ дБ при закреплении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 3, а, б).

Установлено, что повышение вязкости водного раствора хлорида натрия от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в керамзит, позволяет снизить значения коэффициента передачи конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, в рассматриваемом диапазоне частот с $-6,2$ до $-26,7$ дБ (рис. 4).

Диапазон частот 9–17 ГГц. Рост вязкости водного раствора хлорида натрия от $3,0 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в керамзит, позволяет увеличить значения коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на основе влагосодержащего керамзита, от $-14,6$ до $-2,6$ дБ (рис. 3, а).

Изменение вязкости водного раствора хлорида натрия в указанных выше пределах не оказывает существенного влияния на значения коэффициента отражения в диапазоне частот 9–17 ГГц исследуемой конструкции экрана ЭМИ в случае ее закрепления на металлической подложке (рис. 3, б).

Показано, что значения коэффициента передачи исследуемой конструкции экрана ЭМИ снижаются с $-12,7$ до $-28,6$ дБ (рис. 4) с повышением вязкости водного раствора хлорида натрия от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с при частоте электромагнитных колебаний 9–11 ГГц. На частотах свыше 11 ГГц изменение вязкости вод-

Заключение. В результате исследований, установлено, что для снижения значений коэффициента отражения в диапазоне частот 0,9–3 ГГц конструкций экранов ЭМИ (толщина 10 мм), выполненных на основе керамзита с размерами фракции до 4 мм, предпочтительно использовать для его пропитки водные растворы NaCl, величина динамической вязкости которых не превышает $1,6 \cdot 10^{-3}$ Па·с, в диапазоне частот 3,0–9,0 ГГц – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, а в диапазоне частот 9,0–17 ГГц – $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Для снижения значений коэффициента передачи в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц конструкций экранов ЭМИ, выполненных на основе керамзита, предпочтительно использовать для его пропитки водные растворы хлорида натрия, динамическая вязкость которых находится в пределах $3,0$ – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Таким образом, практическое использование указанных выше закономерностей позволяет формировать конструкции экранов ЭМИ, характеризующиеся значениями коэффициентов отражения от $-0,4$ до $-19,4$ дБ и передачи от $-5,0$ до $-28,6$ дБ в диапазоне частот 0,9–17 ГГц, что позволяет рекомендовать их для применения при создании экранированных помещений.

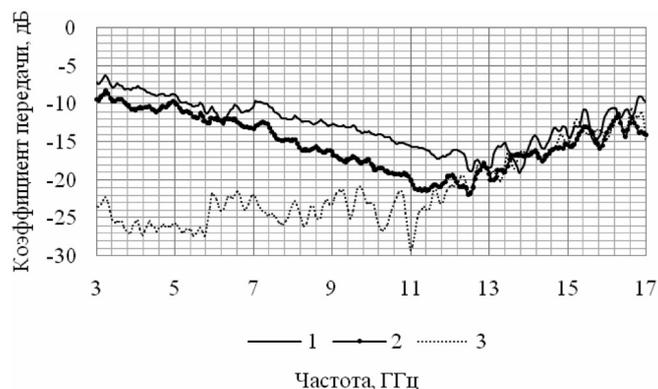


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия: 1 – 3 см. на рис. 1

Список использованной литературы

1. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.] // Докл. БГУИР. – 2004. – № 3 (7). – С. 152–157.
2. Влияние природы растворных наполнителей на характеристики гибких радиопоглощающих покрытий / В. А. Богуш [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 15-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, Украина, 12–16 сент. 2005 г. в 2 т. / СевНТУ; редкол.: д-р техн. наук, проф. М. П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2005. – Т. 2. – С. 718–719.
3. Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения / Колбун Н. В. [и др.] // Вестн. ПГУ, Сер. В. «Прикладные науки». – 2004. – № 12. – С. 30–35.
4. Казанцева, Н. Е. Перспективные материалы для поглотителей ЭМВ СВЧ-диапазона / Н. Е. Казанцева, Н. Г. Рывкина, И. А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 2. – С. 196–209.
5. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: БГУИР, 2000. – 284 с.
6. Пухир, Г. А. Использование органических влагоудерживающих компонентов в качестве основы экранирующих конструкций СВЧ-диапазона / Г. А. Пухир, Насонова Н. В., Пулко Т. А. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 23-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, Украина, 8–13 сент. 2013 г. в 2 т. / СевНТУ; редкол.: д-р техн. наук, проф. М. П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2013. – Т. 2. С. 718–719.
7. Колбун, Н. В. Технология изготовления экранов электромагнитного излучения на основе влагосодержащих капиллярно-пористых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06 / Н. В. Колбун; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2005. – 24 с.
8. Саванович, С. Э. Радиоэкранирующие свойства электромагнитных экранов на основе влагосодержащего керамзита / С. Э. Саванович, В. Б. Соколов // Докл. БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 48–52.
9. Влияние размеров фракций влагосодержащего керамзита на его коэффициенты отражения и передачи электромагнитного излучения / С. Э. Саванович [и др.] // Докл. БГУИР. – 2014. – № 8 (86). – С. 36–41.
10. Анциферов, Е. А. Диэлектрические свойства водных растворов солей щелочных металлов, галогеноводородных кислот и щелочей: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01 / Е. А. Анциферов. – Иркутск, 2006. – 24 с.
11. Пробоподготовка в микроволновых печах. Теория и практика: пер. с англ. / Л. Б. Джесси [и др.]; под ред. Г. М. Кингстона. – М.: Мир, 1991. – 336 с.
12. Равич-Щербо, М. И. Физическая и коллоидная химия: учебник для мед. ин-тов / М. И. Равич-Щербо, В. В. Новиков – М.: Высшая школа, 1975. – 255 с.
13. Гравиметрическое исследование временной стабильности жидкостносодержащих поглотителей ЭМИ / Л. М. Лыньков [и др.] // Технические средства защиты информации: материалы II Белор.-рос. науч.-техн. конф., Нарочь, 17–21 мая 2004 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: д-р техн. наук, проф. В. Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2004. – С. 42–44.
14. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / М. Р. Немах [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2013. – 184 с.
15. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тарев – Изд. 7-е. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

Поступила в редакцию 09.07.2015

УДК 621.396.96

А. С. ХРАМЕНКОВ, С. Н. ЯРМОЛИК, М. В. СВИНАРСКИЙ

СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОСТАНОВКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: xras.tech@mail.ru

Для повышения достоверности классификации радиолокационных объектов предлагается использовать последовательный байесовский алгоритм распознавания, обеспечивающий минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения. С целью обеспечения возможности последовательного уточнения информации при реализации последовательного алгоритма предложено использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага.

Ключевые слова: последовательный байесовский алгоритм распознавания, минимум среднего риска, последовательное уточнение априорной информации.

A. S. KHRAMIANKOU, S. N. YARMOLIK, M. V. SVINARSKI

SYNTHESIS OF A RADAR RECOGNITION DEVICE WITH POSSIBILITY TO STOP THE SEQUENTIAL PROCEDURE

Military academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: xras tech@mail.ru

For increase of reliability of radar objects classification it is offered to use sequential Bayesian recognition algorithm, providing minimisation risk of accepted decisions on an object class and further supervision continuation. For sequential specification of data it is proposed to use a posteriori probability of solving statistics of the previous step of classification as a priori information for the following step.

Keywords: sequential Bayesian algorithm of recognition, minimum average risk, sequential specification of the prior information.

Введение и постановка задачи. Задача радиолокационного распознавания заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1–3]. Процесс распознавания радиолокационных объектов осуществляется в условиях сложной помеховой обстановки: наличие активных, пассивных и имитирующих помех, преднамеренное использование ложных целей [1, 3, 4]. Принятие решения о классе наблюдаемого объекта носит статистический характер и решается соответствующими методами [1–6].

Общее решение задачи радиолокационного распознавания класса объекта при использовании байесовского критерия оптимальности известно [1–3]. На практике наибольшее распространение получил алгоритм максимального правдоподобия [1]. Решающее правило устройства распознавания M классов объектов предполагает формирование M отношений правдоподобия $\Lambda(\xi|A_l)$, $l = \overline{1, M}$, и сравнение их между собой:

если $\Lambda(\xi|A_k) \geq \Lambda(\xi|A_l)$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается решение в пользу k -го класса,

где $\Lambda(\xi|A_k) = \frac{p(\xi|A_k)}{p(\xi|A_0)}$ $\left(\Lambda(\xi|A_l) = \frac{p(\xi|A_l)}{p(\xi|A_0)} \right)$ – отношение правдоподобия, сформированное при условии наблюдения объекта k (l -го) класса; $p(\xi|A_k)$ ($p(\xi|A_l)$) – многомерная плотность вероятности (функция правдоподобия) дискретных отсчетов аддитивной смеси сигнала и фона при условии наблюдения объекта k (l -го) класса; $p(\xi|A_0)$ – многомерная плотность вероятности дискретных отсчетов радиолокационного фона.

© Храменков А. С., Ярмолик С. Н., Свинарский М. В., 2016

Следует отметить, что, несмотря на значительные успехи и достижения в теоретической и экспериментальной областях [1–5], на пути практической реализации разработанных методов и способов распознавания в современных и перспективных радиолокаторах встречаются значительные трудности. Основной причиной этого является сравнительно низкая достоверность решений, принимаемых при наличии интенсивного и сложного радиолокационного фона особенно в условиях ограниченного времени наблюдения объектов. Кроме того, в настоящее время отсутствует оптимальная процедура выбора наиболее информативных признаков классификации, что заставляет разработчиков переходить к квазиоптимальным алгоритмам, используя различные комбинации отличительных признаков. Важным вопросом при решении задачи классификации объектов является также преодоление априорной неопределенности о параметрах обрабатываемых сигналов [6].

Для повышения достоверности принимаемых решений при классификации определенный интерес представляет увеличение времени наблюдения радиолокационного объекта [1]. Однако непосредственное увеличение времени контакта с целью не всегда возможно. Вместе с этим в ряде практически важных случаев радиолокатор имеет возможность последовательного многократного обращения к цели [7]. Использование последовательных процедур при решении задач распознавания объектов позволяет осуществлять адаптацию решающего правила к условиям наблюдения [6] и открывает возможности изменения границ признакового пространства путем исключения из рассмотрения наименее вероятных классов [8].

В связи с тем, что существует определенная связь между количеством извлекаемой информации о наблюдаемом объекте и длительностью интервала наблюдения в последовательных процедурах, неизбежно возникает задача оптимизации длительности процедуры обработки [6]. При этом важно обеспечить рациональное соотношение между требуемым качеством распознавания и продолжительностью процедуры принятия решения.

Следует отметить, что в технической литературе детально рассматривают последовательные правила применительно к двум гипотезам [6, 8]. Последовательные методы решения многоальтернативных задач часто рассматриваются в обобщенном виде [6], а приведенные результаты носят эмпирический характер [8]. Определенный интерес представляет задача синтеза байесовского многошагового алгоритма последовательной классификации радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения.

Синтез решающего правила последовательной классификации объектов. Задача последовательного радиолокационного распознавания объекта k -го класса A_k ($k = 1, M$) на каждом шаге наблюдения сводится к принятию решения о принадлежности наблюдаемой цели к одному из l классов A_l^* ($l = 1, M$) или к вынесению решения о продолжении наблюдения A_{M+1}^* . Очевидно, что событиям $l = k$ соответствуют правильные решения, а событиям $l \neq k$ – ошибочные решения. Оптимальным в смысле байесовского последовательного критерия распознавания будет правило, обеспечивающее минимизацию среднего значения потерь (риска), связанных с последовательной процедурой, при принятии решения о классе наблюдаемого объекта или о продолжении наблюдения. При этом процесс минимизации значения среднего риска последовательной процедуры сводится к минимизации среднего риска на каждом шаге наблюдений [6].

Средний риск принятия решения на n -м шаге наблюдения можно представить в виде суммы среднего риска за принятые решения в пользу определенного класса и среднего риска за решение о продолжении наблюдения:

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ki}^n P_n(A_k^* | A_i) + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1,i}^n P_n(A_{M+1}^* | A_i), \quad (1)$$

где $P_n(A_i)$ – априорная вероятность наличия объекта i -го класса на n -м шаге; C_{ki}^n – цена за принятое решение в пользу k -го класса при наличии объекта i -го класса на n -м шаге; $P_n(A_k^* | A_i)$ – условная вероятность принятия решения в пользу k -го класса при наличии объекта i -го класса на n -м шаге; $C_{M+1,i}^n$ – цена за принятое решение о продолжении наблюдения ($(M + 1)$ -я гипотеза) при наличии объекта i -го класса на n -м шаге; $P_n(A_{M+1}^* | A_i)$ – условная вероятность принятия ре-

шения о продолжении наблюдения (($M + 1$)-я гипотеза) при наличии объекта i -го класса на n -м шаге.

Последовательное байесовское распознавание предполагает на каждом шаге наблюдения разбиение области принятия решения $\Gamma(n) = \Gamma_1(n) \cup \Gamma_2(n) \cup \dots \cup \Gamma_{M+1}(n)$ таким образом, чтобы обеспечить минимум среднего риска (1). При этом условные вероятности принимаемых решений находятся путем интегрирования распределения решающей статистики по требуемой области $\Gamma_k(n)$:

$$P_n(A_k^* | A_i) = \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n, \quad (2)$$

где ξ_n – наблюдаемый вектор принятого сигнала на n -м шаге, представляющий собой аддитивную смесь сигнальной составляющей радиолокационного портрета объекта и фона; $p(\xi_n | A_i)$ – многомерная плотность вероятности (функция правдоподобия) дискретных отсчетов смеси сигнала, отраженного от объекта i -го класса и фона на n -м шаге.

При расчете среднего риска за принятые решения в пользу определенного класса отдельно выделим слагаемое, определяющее средний риск за правильно принятые решения ($i = k$):

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) C_{ki}^n \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma_i(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1, i}^n \int_{\Gamma_{M+1}(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n. \quad (3)$$

Поскольку области принятия решений на каждом шаге процедуры являются непересекающимися, каждую из них можно представить в следующем виде:

$$\Gamma_k(n) = \Gamma(n) - \bigcup_{i=1, i \neq k}^{M+1} \Gamma_i(n), \quad k = \overline{1, M+1}. \quad (4)$$

Подставим значения областей принятия решений (4) в выражение для риска за правильно принятые решения ($i = k$) (3):

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) C_{ki}^n \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n - \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n - \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma_{M+1}(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1, i}^n \int_{\Gamma_{M+1}(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n.$$

После группировки слагаемых и с учетом того, что $\int_{\Gamma(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n = 1$, выражение для среднего риска (3) примет вид (5)

$$R_n = \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n + \sum_{k=1}^M \int_{\Gamma_k(n)} \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) (C_{ki}^n - C_{ii}^n) p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \int_{\Gamma_{M+1}(n)} \sum_{i=1}^M P_n(A_i) (C_{M+1, i}^n - C_{ii}^n) p(\xi_n | A_i) d\xi_n. \quad (5)$$

Первое слагаемое в выражении (5) является постоянной величиной, поэтому решению о принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу или о продолжении процедуры на n -м шаге соответствует гипотеза, характеризующаяся минимальным значением подынтегрального выражения:

$$R_n^k(\xi_n) = \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n | A_i), \quad k = \overline{1, M}, \quad R_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1,i}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n | A_i), \quad (6)$$

где $R_n^k(\xi_n)$ – значение апостериорного риска, характеризующее принадлежность наблюдаемого объекта к k -му ($k = \overline{1, M}$) классу на n -м шаге процедуры распознавания; $R_n^{M+1}(\xi_n)$ – значение апостериорного риска, характеризующее продолжение наблюдения на n -м шаге процедуры распознавания.

Очевидно, что если минимальным оказывается одно из M значений $R_n^k(\xi_n)$, $k = \overline{1, M}$, то принимается решение о принадлежности цели к k -му классу A_k^* и процедура распознавания прекращается. Если же минимальным оказывается $R_n^{M+1}(\xi_n)$, то принимается решение о продолжении наблюдения A_{M+1}^* .

Выражения для апостериорного риска можно представить в несколько иной форме. Разделим $R_n^k(\xi_n)$ и $R_n^{M+1}(\xi_n)$ на плотность вероятности шума $p(\xi_0 | A_0)$:

$$J_n^k(\xi_n) = \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad k = \overline{1, M},$$

$$J_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1,i}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad (7)$$

где $\Lambda(\xi_n | A_i) = \frac{p(\xi_n | A_i)}{p(\xi_0 | A_0)}$ – отношение правдоподобия объекта i -го класса на n -м шаге процедуры распознавания.

Таким образом, решающее правило последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию среднего риска принимаемых решений, включает в себя предварительное решение о наблюдении объекта k -го класса A_k^* и окончательное решение в пользу объекта k -го класса A_k^* или о продолжении наблюдения A_{M+1}^* . Если $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^l(\xi_n)$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается предварительное решение о наблюдении объекта k -го класса A_k^* . После принятия предварительного решения A_k^* проверяется возможность остановки последовательной процедуры наблюдения. Если $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^{M+1}(\xi_n)$, то принимается окончательное решение о принадлежности наблюдаемой цели к k -му классу A_k^* . Если указанное условие не выполняется (риск продолжения наблюдения меньше риска принимаемого решения), то принимается решение о продолжении наблюдения A_{M+1}^* и осуществляется переход к $(n + 1)$ -му шагу процедуры распознавания.

Обобщенная структурная схема, реализующая полученное последовательное решающее правило, минимизирующее средний риск принимаемых решений, представлена на рисунке.

При необходимости контроля процесса классификации существует возможность после каждого контакта с целью совместно с окончательным решением о классе цели либо о продолжении наблюдения выдавать предварительное решение только о классе цели по минимальному значению $J_n^l(\xi_n)$, $l = \overline{1, M}$.

С учетом выражения (7) решающее правило при последовательном распознавании может быть представлено с использованием значений отношения правдоподобия:

если

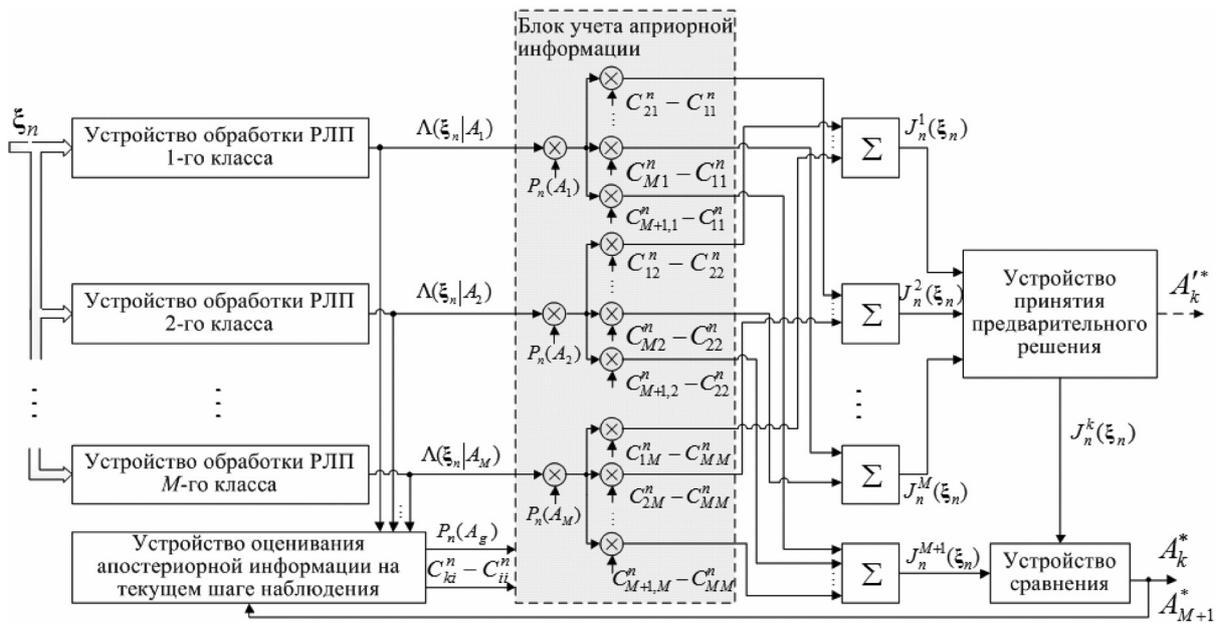
$$\Lambda(\xi_n | A_k) \geq \frac{1}{P_n(A_k)(C_{lk}^n - C_{kk}^n)} \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{li}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq k,$$

то предварительное решение A_k^* ;

если

$$\Lambda(\xi_n | A_k) \geq \frac{1}{P_n(A_k)(C_{M+1,k}^n - C_{kk}^n)} \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{M+1,i}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad (8)$$

то окончательное решение A_k^* , иначе – продолжение наблюдения.



Структурная схема устройства распознавания объектов с возможностью остановки последовательной процедуры

В ряде практических случаев удобнее использовать монотонную функцию (например, логарифм) от апостериорного риска $U_n^k(\xi_n) = \ln[J_n^k(\xi_n)]$, $k = \overline{1, M+1}$.

Рассмотренный подход позволяет обеспечить минимизацию среднего риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения.

Таким образом, использование последовательной процедуры с минимизацией среднего риска принимаемых решений позволяет повысить эффективность классификации радиолокационных объектов по сравнению с одноэтапными процедурами. Ценой за повышение качества распознавания является увеличение времени на принятие решения. При этом длительность процедуры определяется имеющимися условиями наблюдения объектов.

Реализация байесовского алгоритма, минимизирующего средний риск принимаемых решений, предполагает использование полного комплекта априорных данных [2]. Полученное байесовское решающее правило (8) в процессе формирования решающей статистики на каждом шаге классификации предполагает использование следующих величин:

априорные вероятности появления объектов различных классов ($P_n(A_l)$, $l = \overline{1, M}$);

цены за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания (C_{kl}^n , $C_{M+1,l}^n$, $k, l = \overline{1, M}$).

Проведенные исследования позволяют сформулировать некоторые рекомендации по выбору требуемых значений априорных данных.

Рекомендации по нахождению априорных вероятностей появления объектов различных классов. Исходя из максимальной априорной неопределенности, на первом шаге процедуры априорные вероятности появления распознаваемых объектов принято считать одинаковыми $P_{n=1}(A_l) = 1/M$, $l = \overline{1, M}$ [1–3].

При учете взаимосвязи последовательно наблюдаемых процессов и возможности последовательного уточнения информации в качестве априорных вероятностей для последующих шагов целесообразно использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Очевидно, что выражение для априорной вероятности l -го класса на $(n+1)$ -м шаге можно представить следующей рекуррентной формулой:

$$P_{n+1}(A_l) \cong P_n(A_l | \xi_n) = \frac{P_n(A_l) p(\xi_n | A_l)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) p(\xi_n | A_i)}, \quad (9)$$

где $P_n(A_l | \xi_n)$ – апостериорная вероятность принадлежности цели к l -му классу на n -м шаге; $P_n(A_l)$ – априорная вероятность принадлежности цели к l -му классу на n -м шаге; $p(\xi_n | A_l)$ – ус-

ловная плотность вероятности (функция правдоподобия) принятой реализации сигнала на входе l -го канала обработки на n -м шаге.

Если числитель и знаменатель выражения (9) разделить на плотность вероятности шума $p(\xi_0 | A_0)$, то априорную вероятность l -го класса на $(n + 1)$ -м шаге можно представить через отношение правдоподобия:

$$P_{n+1}(A_l) \cong P_n(A_l | \xi_n) = \frac{P_n(A_l) \Lambda(\xi_n | A_l)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) \Lambda(\xi_n | A_i)}. \quad (10)$$

Рассмотренный подход позволяет при формировании решения на текущем шаге процедуры классификации учитывать информацию о распределении статистики с предыдущих этапов наблюдения. Последовательное уточнение априорной информации в ряде случаев позволяет сократить длительность процедуры принятия решения и повысить качество принимаемых решений.

Рекомендации по выбору цен за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания. Значения цен за принятые решения при последовательном распознавании определяются физической природой наблюдаемых процессов. Использование последовательных процедур позволяет улучшить достоверность классификации за счет увеличения времени наблюдения объекта. На первых этапах классификации в связи с небольшим количеством сведений о наблюдаемом объекте принятие ошибочных решений наиболее вероятно, однако нежелательно. Компромиссом является возможность продолжения наблюдения. Исходя из этого, цены за ошибочные решения целесообразно выбирать больше стоимостей продолжения наблюдения, а последние больше цен за правильные решения $C_{kl}^n > C_{M+1,l}^n > C_{ll}^n$, $k, l = 1, M$, $k \neq l$ [6].

Следует отметить, что определенным выбором на каждом шаге соотношения между ценами за ошибочные решения и за продолжение наблюдения можно добиться усечения последовательной процедуры классификации. Если все цены одинаково зависят от номера шага процедуры распознавания n , отличаясь лишь величиной коэффициента пропорциональности, то их можно представить в виде произведения $C_{kl}^n = C_{kl} f(n)$, $C_{M+1,l}^n = C_{M+1,l} f(n)$. Данное представление позволяет упростить расчет значений решающей статистики (7), исключив зависимость значений цен от номера шага процедуры распознавания. При этом длительность последовательной процедуры распознавания будет случайной величиной.

Для дальнейшего упрощения оптимизации алгоритма распознавания по аналогии с критерием идеального наблюдателя стоимость правильных решений может быть принята равной нулю $C_{ll}^n = 0$, $l = 1, M$, а цены ошибочных решений – равными единице $C_{kl}^n = 1$, $l = 1, M$. Стоимость продолжения наблюдения может быть выбрана $C_{M+1,l}^n = 0,5$, $l = 1, M$.

Другим способом упрощения алгоритма распознавания является замена штрафов за неправильные решения «премиями» за правильные решения, т. е. $C_{kk}^n \neq C_{ll}^n \neq 0$ и $C_{kl}^n = 0$, $k, l = 1, M$. Учет неравнозначности различных правильных решений в этом случае сохраняется.

Таким образом, исходя из технических возможностей и требований, предъявляемых к устройству распознавания, с помощью вариации цен за принятые решения можно получить различные варианты квазиоптимальных алгоритмов последовательной классификации.

Заключение. Повышение достоверности решений о классе радиолокационных объектов, принимаемых при наличии интенсивного и сложного радиолокационного фона в условиях ограниченного времени наблюдения, в ряде случаев может достигаться путем перехода к использованию последовательных процедур обработки. При этом обеспечение большей информативности процедур классификации наблюдаемых объектов неизбежно приводит к увеличению длительности процесса принятия решений. Использование предложенного алгоритма последовательной классификации радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения, позволяет обеспечить рациональное соотношение между требуемым качеством распознавания и продолжительностью процедуры принятия решения. При этом использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага обеспечивает возможность последовательного уточнения информации.

Список использованной литературы

1. *Охрименко, А. Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации: учеб. для высших училищ ПВО / А. Е. Охрименко. – М.: Воен. изд-во, 1983. – 456 с.
2. Радиолокационное распознавание: учеб. пособие по курсу «Теоретические основы радиолокации» / Я. Д. Ширман [и др.]; под. общ. ред. Я. Д. Ширмана. – Харьков: ХВУ, 1994. – 122 с.
3. *Курлович, В. И.* Основы теории радиосистем / В. И. Курлович, С. В. Шаляпин. – Минск: Военная академия РБ, 1999. – 343 с.
4. *Tait, P.* Introduction to Radar Target Recognition / P. Tait. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2009. – 404 p.
5. *Blacknell, D.* Radar Automatic Target Recognition (ATR) and Non-Cooperative Target Recognition (NCTR) / D. Blacknell, H. Griffiths. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2013. – 279 p.
6. *Репин, В. Г.* Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
7. *Шишов, Ю. А.* Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов / Ю. А. Шишов, В. А. Ворошилов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
8. *Фу, К.* Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М.: Наука, 1971. – 256 с.

Поступила в редакцию 04.10.2015

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.