ВЕСЦІ
НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК 2014 № 4

ИЗВЕСТИЯ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК 2014 № 4

ЗАСНАВАЛЬНІК – НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

Часопіс выдаецца са студзеня 1956 г.

Выходзіць чатыры разы ў год

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Мулярчик В. В., Данишевский В. Н., Мазовка Е. С., Прокопчук Н. Р., Никитенко П. Г. Получение нановолокон из хитозана методом электроформования 5

Бойправ О. В., Борботько Т. В., Лыньков Л. М. Влияние влагосодержания на электродинамические параметры порошкообразного перлита. 9

Оджаев В. Б., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Турцевич А. С., Шведов С. В., Филипеня В. А., Черный В. В., Явид В. Ю., Янковский Ю. Н., Дубровский В. А. Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора 14

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Швед О. Л. Численное моделирование эффекта увеличения пластичности металла при растяжении под действием высокого гидростатического давления 18

Томило В. А., Левкович В. В. Напряженно-деформированное состояние при валковом обжиме участков толстостенных труб. 24

Филонов И. П., Лаптева Е. О., Козерук А. С., Филонова М. И. Моделирование геометрических и кинематических связей технологического оборудования для двусторонней обработки линз 31

Баштовой В. Г., Моцар А. А., Рекс А. Г. Упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром 39

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Шабуня В. В. Финишная обработка конических поверхностей плафонов светильников. 44

Национальная академия наук Беларуси

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Сорокин В. В. Расчет износа частиц в плотном вращающемся слое внутри неподвижной вихревой камеры 50

Ольшанский А. И., Ольшанский В. И., Жерносек С. В. Исследование радиационно-конвективной сушки технических тканей критериями подобия теплообмена 56

Белый О. А., Бернацкий А. Е., Крыжановский Н. К., Розанова Ф. А. Возобновляемая энергетика – эффективное направление повышения энергетической и экологической безопасности Республики Беларусь 65

Гринчик Н. Н., Харма У. М., Щелак Т. Е. К проблеме неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых средах 71

Левин М. Л., Маханёк А. А. Сравнение физико-математических моделей общей газовой криотерапии с сосредоточенными и распределенными параметрами 80

Гусаров А. М., Кузнецов А. А., Дмитракович Н. М., Данилова-Третьяк С. М. Исследование распределения температуры в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных при тепловом воздействии 87

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Дрозд Е. С., Мохаммед Салем А. А., Спиридонова О. С., Кужель Н. С., Чижик С. А. Исследование влияния температуры культивирования на морфологию, механические и адгезионные свойства раковых клеток легких человека линии А549 93

Дрозд Е. С., Мохаммед Салем А. А., Чижик С. А., Спиридонова О. С., Кужель Н. С., Мычко М. Е. Исследование методом атомно-силовой микроскопии влияния наночастиц на структурные и механические свойства клеток почки быка линии MDBK 97

Одринский А. П., Казючиц Н. М., Макаренко Л. Ф. PICTS-спектроскопия синтетического HPHT-алмаза в области температур 300–550 К 102

Тихомиров В. В., Сягло С. Э. Моделирование аксиального виркатора 108

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Бубнов В. П. Эколого-экономические показатели систем очистки газовых выбросов от сернистого ангидрида 116

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ 2014 № 4

Серия физико-технических наук

На русском и белорусском языках

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

Камп'ютарная вёрстка Н. И. К а ш у б а

Здадзена ў набор 17.11.2014. Падпісана да друку 15.12.2014. Выхад у свет 29.12.2014. Фармат 60 × 84$^1/_8$. Папера афсетная. Друк лічбавы. Ум. друк. арк. 14,88. Ул.-выд. арк. 16,4. Тыраж 92 экз. Заказ 212.
Кошт нумару: індывідуальная падпіска – 58 650 руб.; ведамасная падпіска – 141 919 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, 2014

Национальная академия наук Беларуси

PROCEEDINGS
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICO-TECHNICAL SERIES 2014 N 4

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

Mulyarchik V. V., Danishevski V. N., Mazovka Y. S., Prokopchuk N. R., Nikitenko P. G. Production of chitosan nanofiber by electroforming 5

Boiprav O. V., Borbotko. T. V., Lynkou L. M. Water content influence on the electrodynamic parameters of powdered perlite 9

Odzaev V. B., Pyatlitski A. N., Prasalovich V. S., Turtsevich A. S., Shvedau S. V., Filipenia V. A., Chorny V. V., Yavid V. Yu., Yankouski Yu. N., Dubrouski V. A. Influence of technological inpurities on electrical parameters of MOS transistor 14

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

Shved O. L. Numerical modelling of the effect of increase of metal plasticity at tension by the impact of high hydrostatic compression 18

Tamila V. A., Levkovich V. V. Stress-strain state at the process of end forming of thick walled tubes. 24

Filonov I. P., Lapteva E. O., Kozeruk A. S., Filonova M. I. Simulation of geometrical and kinematic relations of technological equipment for two-sided treatment of lenses 31

Bashtovoi V. G., Motsar A. A., Reks A. G. Elastic properties of a magnetic fluid drop with a compound magnetic core 39

Akulovich L. M., Sergeev L. E., Shabunia V. V. Finishing of conical surfaces of lampshades 44

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Sorokin V. V. Particle wear calculation in a dense rotating bed inside a static vortex chamber 50

Olshansky A. I., Olshansky V. I., Zhernosek C. V. Investigation of radiation-convective drying of fabric with the help of criterions of similarity of thermal transfer 56

Bely O. A., Bernatski A. E., Kryzhanouski M. K., Rozanowa F. A. Renewable energy is an efficient way to improve both energy and environment security of Republic of Belarus 65

Grinchik N. N., Harma U. M., Schelak T. E. To the problem of non-isothermal moisture transfer in capillary-porous media. 71

Levin M. L., Makhaniok A. A. Comparison of physical and mathematical models of whole gas cryotherapy with lumped and distributed parameters 80

Gusarov A. M., Kuznetsov A. A., Dmitrakovich N. M., Danilova-Tretiak S. M. Research of temperature distribution of a multilayered package of materials of a protective clothes of fireman during thermal impact 87

Национальная академия наук Беларуси

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

Drozd E. S., Mohammed Salem A. A., Spiridonova O. S., Kuzhel N. S., Chizhik S. A. Investigation of cultivation temperature effect on surface topography and mechanical properties of a human lung cancer cell line A549 93

Drozd E. S., Mohammed Salem A. A., Chizhik S. A., Spiridonova O. S., Kuzhel N. S., Mychko M. E. A study by atomic force microscope of effect of nanoparticles on structural and mechanical properties of cell lines MDBK . . . 97

Odrinsky A. P., Kazuchits N. M., Makarenko L. F. PICTS-spectroscopy of synthetic HPHT diamond in the temperature range 300–550 K 102

Tikhomirov V. V., Siahlo S. E. Simulation of axial vircator 108

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

Bubnov V. P. Environment and economic indicators of sulfur dioxide emissions treatment systems 116

Национальная академия наук Беларуси

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 677.469

В. В. МУЛЯРЧИК[1], В. Н. ДАНИШЕВСКИЙ[1], Е. С. МАЗОВКА[1], Н. Р. ПРОКОПЧУК[2], П. Г. НИКИТЕНКО[3]

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОВОЛОКОН ИЗ ХИТОЗАНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ

[1] Завод горного воска,
[2] Белорусский государственный технологический университет
[3] Представительство Международной инженерной Академии РФ в Беларуси

(Поступила в редакцию 26.11.2013)

Введение. Одним из самых перспективных направлений в области нанотехнологий является технология NANOSPIDER – электроформование из растворов полимеров нановолокон, отличающихся сверхразвитыми поверхностью и пористостью. Такая структура и наноразмерность волокон обусловливают их высокую эффективность использования в фильтрационных, сорбционных процессах и в биомедицинских целях: для фильтрации высокодисперсных аэрозолей в системах очистки газовоздушных выбросов и средствах защиты органов дыхания, для обеспечения антимикробных и антивирусных барьерных свойств, регулирования водо- и паропроницаемости, создания перевязочных средств при лечении обширных ожоговых поверхностей различного генеза, длительно незаживающих ран и трофических язв [1, 2].

Перспективными являются полифункциональные «раневые покрытия» нановолокнистых материалов из хитозана, полученные методом электроформования. Хитозан обладает ранозаживляющим действием и бактерицидной активностью, нетоксичный, биосовместимый, биодеградируемый, а также является промышленным природным полимером [3, 4]. Недостаток существующих технологий электроформования нановолокон из хитозана – использование высокотоксичных растворителей и большого количества технологических добавок, ухудшающих биосовместимость перевязочного материала.

Достигнуты определенные успехи в усовершенствовании технологии электроформования волокнистых материалов на основе хитозана и других полимеров [5–8].

Созданный волокнистый нетканый материал успешно прошел клинические испытания, показавшие, что средний срок заживления ожогов II-III А степени сокращается с 25–30 до 12–10 сут [8]. Технология разработчиков компании «Русмарко» содержит ноу-хау, без знания которых нельзя добиться устойчивого электроформования нановолокон требуемой структуры и свойств. Кроме того, использовалась растворно-капиллярная технология [8].

Цель данной работы – получение впервые в Республике Беларусь нановолокна из хитозана по технологии NANOSPIDER при разработке формовочного раствора хитозана и оптимизации параметров процесса электроформования.

Объекты и методы исследований. Электроформование нановолокон проводили на лабораторной установке NS LAB 5OO S производства «Элмарко» (Чешская Республика) по технологии NANOSPIDER, отличающейся рядом преимуществ от традиционной растворно-капиллярной (фильерной) технологии. Формующий электрод (цилиндрический или проволочный) вращается,

Национальная академия наук Беларуси

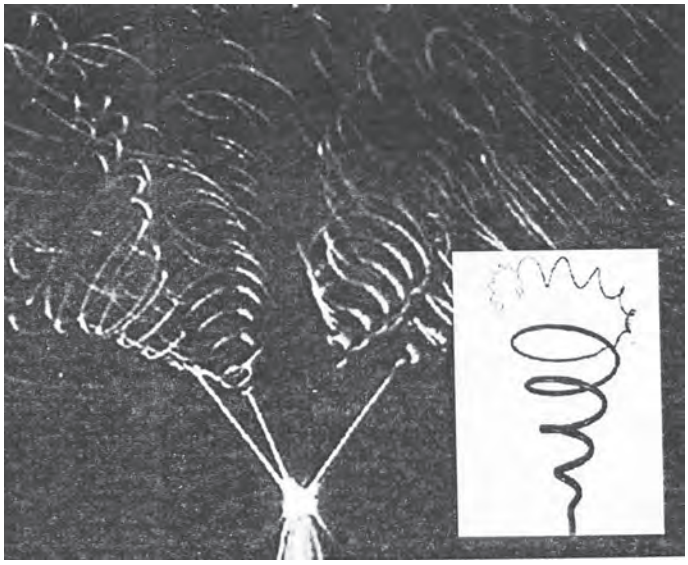


Рис. 1. Формирование нановолокон из растворов полимеров в электрическом поле

частично погружаясь в ванну с раствором полимера, расположенную внизу камеры установки. Сверху над ванной на расстоянии 150–180 мм с заданной скоростью вращается собирающий электрод, на который намотан подкладочный материал (ткань, бумага и т. п.). Между электродами создается высокое напряжение до 60 кВ. Формующий электрод заряжен положительно, а собирающий электрод – отрицательно. На поверхности формующего электрода, вышедшего из ванны с раствором полимера, находится тонкий слой. Из последнего под действием электрического поля формируются положительно заряженные струйки, которые отталкиваются друг от друга, перемещаются и вибрируют. Их движение ускоряется, диаметр струи уменьшается до наноразмеров.

Внешне это выглядит как раскручивание спирали с вершиной конуса в капле раствора (конус Тейлора) на выходе из фильеры или на струне волокнообразующего электрода (рис. 1). Растворитель испаряется из струек, макромолекулы полимера сближаются, наблюдается фазовый переход из жидкого в твердое состояние, образовавшиеся нановолокна адсорбируются на отрицательно заряженном подкладочном материале (ткань, бумага и т. п.).

Электроформованные нановолокна хаотично ориентированы на подкладочном материале, т. е. имеют типичную структуру нетканых материалов. Технические параметры NS LAB 5OO S: волокнообразующий электрод длиной 500 мм; ширина подкладочного материала 630 мм; напряжение 0–80 кВ; скорость подкладочного материала 0,13–1,56 м/мин.

Проведены исследования с хитозаном производства Республики Беларусь, Российской Федерации и Китайской Народной Республики.

В основе получения хитозана лежит реакция отщепления от структурной единицы хитина – N-ацетил-β-глюкозамина ацетильной группировки или реакция деацетилирования (рис. 2).

Реакция деацетилирования сопровождается одновременным разрывом гликозидных связей полимера. Таким образом, хитозан представляет собой полидисперсный по молекулярной массе полимер D-глюкозамина, содержащий 5–15% ацетамидных групп, а также до 1% групп, соединенных с аминокислотами и пептидами.

По внешнему виду хитозан представляет собой чешуйки размером менее 10 мм или порошки без запаха различной тонины помола, от белого до кремового цвета, часто с желтоватым, сероватым или розоватым оттенками. В процессе хранения хитозана на свету наблюдаются его потемнение до коричневого цвета, снижение растворимости. Хитозан представляет собой гигроскопичный материал, порошковый хитозан может слеживаться при хранении в помещениях с повышенной влажностью или при перепадах температур. Поэтому его хранят герметично укупоренным в светонепроницаемой упаковке. Оптимальным растворителем для хитозана является смесь уксусной кислоты и воды.

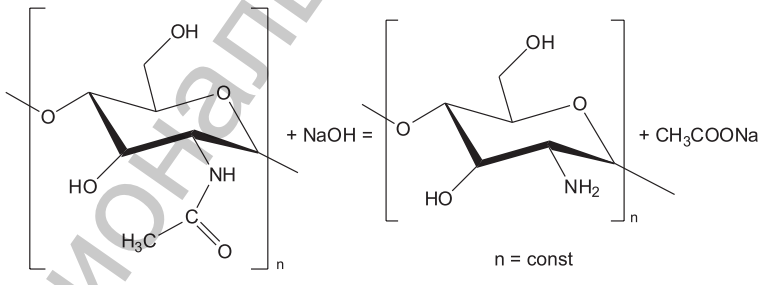


Рис. 2. Схема реакции превращения хитина в хитозан

Таким образом, молекулярная структура хитозана имеет значи-

Национальная академия наук Беларуси

тельные отличия по длине макромолекул (степени полимеризации n), по количеству функциональных NH_2-групп (степени деацетилирования хитина). Для электроформования нановолокон требуется его определенная молекулярная структура. Использовались подкладочные материалы: бинтовой материал ОАО «Лента» (г. Могилев), спанбонд РУП «СПО «Химволокно».

Результаты исследований. При создании технологии NANOSPIDER электроформования нановолокон из хитозана нами установлены следующие физико-химические и технологические аспекты:

наиболее подходящим растворителем для хитозана является смесь уксусной кислоты и воды;

концентрация хитозана в растворе может колебаться в зависимости от его молекулярной структуры (степеней полимеризации и деацетилирования) в пределах от 1,5 до 3,0 мас. %;

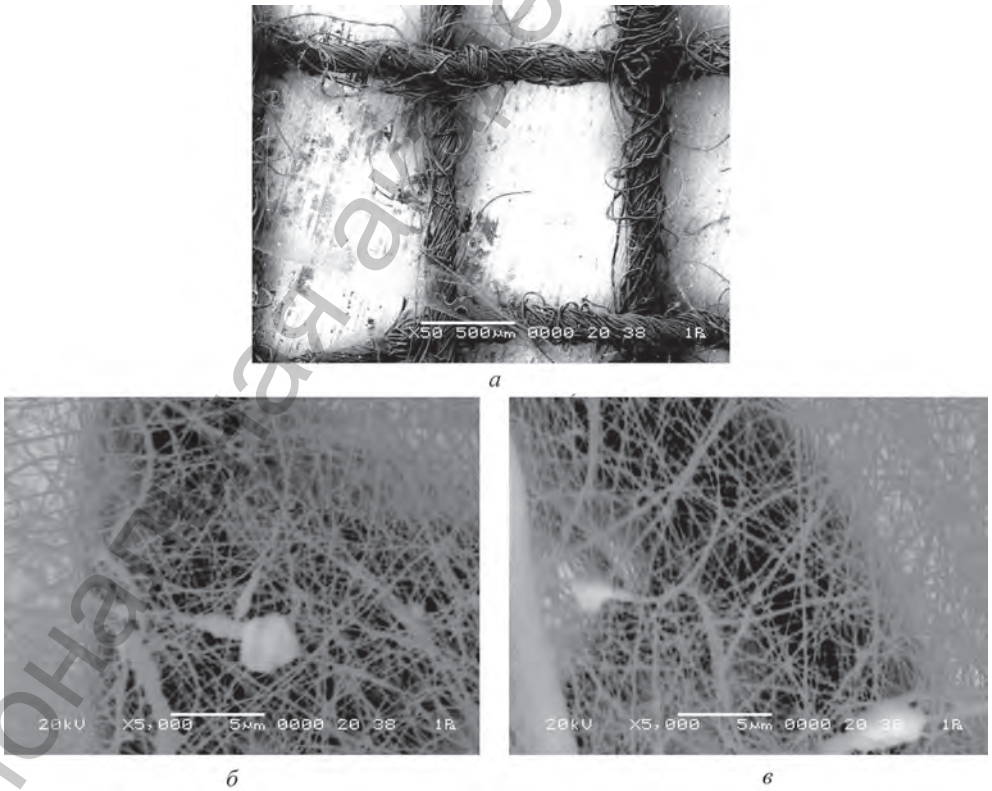
процесс растворения хитозана в смеси уксусной кислоты с водой должен быть оптимизирован (температура, время, скорость перемешивания и т. д.) и направлен на получение гомогенных, истинных растворов без флуктуаций плотности;

величины вязкости, поверхностного натяжения и электропроводности формовочного раствора оптимизированы и поддерживаются постоянными, при их завышении образуются дефекты («бусинки», «капли»);

срок хранения прядильных растворов ограничен одними сутками;

растворитель должен быть термодинамически совместимым с полимером. В «плохих» (термодинамически несовместимых) растворителях, слабовзаимодействующих с сегментами макромолекул, сольватация незначительна и макромолекулы без труда образуют плотные клубки небольшого размера, что ведет к уменьшению вязкости формовочного раствора.

В «хороших» (термодинамически совместимых) растворителях их молекулы хорошо сольватируются на звеньях полимерных цепей, препятствуют их сворачиванию в плотные клубки. Вязкость формовочного раствора увеличивается, так как макромолекулы имеют более вытянутые конформации и образуют большие рыхлые клубки. При электроформовании полимерные цепи легче вытягиваются электрическим полем из данных клубков формовочного раствора с об-



а *б* *в*

Рис. 3. Снимки поверхности хитозана: *а* – ячейка бинтового материала, *б, в* – мембраны из нановолокон хитозана производства Республики Беларусь и Китайской Народной Республики соответственно

Национальная академия наук Беларуси

разованием «хороших» конусов Тейлора. Это в свою очередь обеспечивает устойчивость процесса, равномерность нанесения нановолокон на подкладочный материал;

влажность воздуха, подаваемого в формовочную камеру, должна находиться в пределах 30–50 %, так как она влияет на электрическое поле камеры и на однородность слоя нановолокон на подкладочном материале. При завышенной влажности воздуха снижается адгезия нановолокон к подкладочному материалу;

температура воздуха в камере оптимизирована (40–60 ºС), что обеспечивает постоянную скорость испарения растворителя и одинаковое утончение струек раствора хитозана;

расстояние между формующим и собирающим электродами фиксируется: 150 или 180 мм;

диаметр нановолокон из хитозана регулируется в пределах 70–200 нм.

Структура нановолоконного слоя из хитозана, нанесенного на подкладочный бинтовой материал ОАО «Лента» (г. Могилев), исследована в Белорусском государственном технологическом университете на электронном микроскопе JSM-5610 LV Jed (Япония). На рис. 3 представлены ячейка бинтового материала (1×1,5 мм) (*а*), мембраны из нановолокон, полученных из хитозана различных производителей: Республика Беларусь (*б*), Китайская Народная Республика (*в*).

Видно, что структура нановолоконного слоя является типичной структурой нетканых материалов, нановолокна ориентированы хаотично. Их диаметр изменяется в основном в пределах 100–200 нм. Принципиальных различий в структуре нановолоконного слоя, сформированного из разных хитозанов в сравнимых условиях, не имеется. Варьируя свойства формовочного раствора хитозана и технологические параметры электроформования нановолокон, можно регулировать поверхностную плотность нановолоконной мембраны, диаметр нановолокон, величину распределения волокон по диаметру.

Заключение. Впервые в Республике Беларусь по технологии NANOSPIDER получены наномембраны из хитозана, нанесенные на бинтовой материал, – перспективная импортозамещающая продукция медицинского назначения.

Литература

1. *Филатов Ю. Н.* // Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). М., 1997.
2. *Матвеев А. Т., Афанасов И. М.* // Получение нановолокон методом электроформования: Учеб. пособие для студентов специальности «Композиционные наноматериалы». М., 2010.
3. Хитин и хитозан. Получение, свойства и применение / Под ред. К. Г. Скрябина, Г. А. Вихоревой, В. П. Варламова. М., 2002.
4. *Riccardo A. A. Muzzarelli* // Carbohydrate Polymers. 2009. Vol. 76 P. 167–182.
5. *Dalton P. D., Grafahrend D, Klinkhammer K.* et al. // Polymer, 2007. Vol. 48. P. 6823–6833.
6. *Agawal S., Wendorff H., Greiner A.* // Polymer. 2008. Vol. 49. P. 5603–5621.
7. *Bhardwaj N., Kundu S.* // Biotechnologi advances. 2010. Vol 28. P. 325–347.
8. *Дмитриев Ю. А.* Технология электроформования волокнистых материалов на основе хитозана: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06. М., 2011.

V. V. MULYARCHIK, V. N. DANISHEVSKI, Y. S. MAZOVKA, N. R. PROKOPCHUK, P. G. NIKITENKO

PRODUCTION OF CHITOSAN NANOFIBER BY ELECTROFORMING

Summary

For the first time in Belarus chitosan nanofibers are obtained using NANOSPIDER technology at the laboratory unit NS WAB 500 S produced by Elmarco s. r. o. (Czech Republic). The chemical composition is developed, rheological behavior of the forming solution is adjusted, the elecroforming technology is designed, the structure of the nanofiber layer on the backing material is examined at electronic microscope JSM-5610 LV Jeol (Japan). Potentially successful use of chitosan nanofiber membranes in filtration and sorption healthcare and biology processes, particularly in burn injuries and indolent wounds treatment stressed is discussed.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 669.112.227.322 :543.275.1

О. В. БОЙПРАВ, Т. В. БОРБОТЬКО, Л. М. ЛЫНЬКОВ

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРОШКООБРАЗНОГО ПЕРЛИТА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

(Поступила в редакцию 13.03.2014)

Применение влагосодержащих материалов для формирования конструкций экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) является весьма перспективным, ввиду того, что они обеспечивают ослабление энергии ЭМИ в широком диапазоне частот (от десятков мегагерц до сотен гигагерц) [1]. Процесс получения влагосодержащих материалов заключается в пропитывании пористых основ водными растворами. Вода состоит из свободных молекул и их конгломератов с упорядоченной гексагональной структурой, в вершинах шестиугольников которых находятся радикалы OH^- [2]. Ослабление энергии ЭМИ влагосодержащими материалами связано с потерями на электропроводность, а также с поляризационными и релаксационными потерями, возникающими при взаимодействии такого излучения с водой.

Потери энергии ЭМИ на электропроводность обусловлены протеканием во влагосодержащем материале под действием электромагнитного поля (ЭМП) электрического тока. Так как вода относится к сильнополярным диэлектрикам, то значение ее электропроводности составляет 10^3–10^5 Ом·м [2].

Во влагосодержащем материале на границе раздела воды и пористой основы накапливаются заряды, что вызывает появление в нем внутрислойной и структурной поляризаций, являющихся составляющими его суммарной поляризации. Воздействие ЭМИ на влагосодержащий материал приводит к ее изменению. Это связано с тем, что полярные молекулы переориентируются под влиянием ЭМП, преодолевая при этом силы внутреннего трения, вызванные вязкостью жидкости. В результате данного процесса энергия ЭМИ переходит в тепловую энергию, что обусловливает ее поляризационные потери. При увеличении значения частоты ЭМИ полярные молекулы не успевают переориентироваться в пространстве за полупериод изменения ЭМП и возникают релаксационные потери [2].

Влагосодержание материала влияет на величину суммарной поляризации его молекул, обусловленной функциональной связью между электродинамическими параметрами материала (значениями критической частоты, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и т. п.) и его влажностью. Такая связь наиболее выражена в диапазоне сантиметровых длин волн [3]. Поэтому, изменяя величину влагосодержания материалов, можно получать требуемые значения характеристик отражения и передачи ЭМИ экранов, формируемых на основе таких материалов.

В качестве пористых основ для получения влагосодержащих материалов в настоящее время используются порошкообразные и волокнистые матрицы. Среди порошкообразных матриц наиболее широкое применение получили силикагель и бентонит [4–6]. Один недостаток таких матриц заключается в их значительной массе, превышающей по величине массу жидкости, которую они могут впитать. Объемная насыпная масса силикагеля в зависимости от размера его фракций составляет 400–760 кг/м^3, а его влагопоглощение – 30–70 мас. % [7], объемная насыпная масса бентонита – 1750–2020 кг/м^3, влагопоглощение – 30–40 мас. % [6]. Другой существенный недостаток влагосодержащих материалов состоит в необходимости их герметизации [8]. Ис-

Национальная академия наук Беларуси

ключение указанных недостатков возможно при выборе иной пористой основы для влагосодержащих материалов.

В рамках настоящей работы в качестве такой основы предложено использовать вспученный порошкообразный перлит (далее по тексту перлит) марки М75, который характеризуется наименьшим значением объемной насыпной массы (45–75 кг/м^3) по сравнению с перлитом других существующих марок. Низкое значение объемной насыпной массы перлита марки М75 объясняется его высокой пористостью (примерно 80 %), которая характеризуется совокупностью открытых и закрытых пор. Непостоянство значения объемной насыпной массы перлита марки М75 связано с его неоднородным гранулометрическим составом: размер фракций перлита марки М75 1–3 мм. Перечень основных компонентов перлита и их содержание в нем представлены в таблице.

Состав перлита

Компонент	SiO_2	Al_2O_3	NaO	K_2O	H_2O	Fe_2O_3	CaO	MgO
Процентное содержание, мас. %	70–75	12–14	3–5	3–5	2,5–6	1–5	1–5	1–5

Наличие в перлите как открытых, так и закрытых пор обусловливает его способность не только впитывать, но и удерживать влагу. Установлено, что величина стабильного влагосодержания перлита марки М75, пропитанного водой, составляет 20 мас. %.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании свойств (интенсивности испарения влаги, величины стабильного влагосодержания) и электродинамических параметров (значений критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости) влагосодержащего перлита марки М75. Для этого были решены следующие задачи:

выбор растворов для пропитывания перлита марки М75;

выявление зависимости влагоудерживающих свойств перлита марки М75 от концентрации использованного для его пропитывания раствора;

установление взаимосвязи между интенсивностью испарения влаги из перлита марки М75 и концентрацией использованного для его пропитывания раствора;

измерение коэффициентов передачи ЭМИ влагосодержащего перлита марки М75;

получение зависимости величины критической частоты и максимального значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащего перлита марки М75 от концентрации раствора, использованного для его пропитывания.

В качестве жидкостей для пропитывания перлита были выбраны водные растворы хлорида кальция, значения концентрации которых изменялись от 10 до 40 мас. %. Хлорид кальция является гигроскопичным материалом, поэтому за счет регулирования его концентрации в водном растворе, используемом для пропитывания перлита, можно управлять изменением величины стабильного влагосодержания последнего. Согласно [9], максимальная растворимость хлорида кальция в воде в условиях комнатной температуры составляет 42,7 мас. %.

Показано, что концентрация водного раствора хлорида кальция, использованного для пропитывания перлита, влияет не только на величину его стабильного влагосодержания, но и на длительность процесса стабилизации. Например, в перлите, для пропитывания которого использовался 10 %-ный водный раствор хлорида кальция, процесс стабилизации влагосодержания в условиях комнатной температуры длился 6 сут, в перлите, для пропитывания которого использовались 20 %-, 30 %- и 40 %-ные водные растворы хлорида кальция, данный процесс протекал 11, 10 и 9 сут соответственно. Контроль величин влагосодержания перлита, пропитанного водными растворами хлорида кальция, проводился в течение 30 сут с применением гравиметрического метода. В результате проведенного эксперимента получены зависимости величин стабильного влагосодержания (W) перлита марки М75 и интенсивности испарения из него влаги (V) от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция (C). Данные зависимости представлены на рис. 1, *а*, *б*. Измерения параметров, использованных для построения представленных зависимостей, проводились при температуре окружающей среды 20 °С и относительной влажности воздуха 80 %.

Национальная академия наук Беларуси

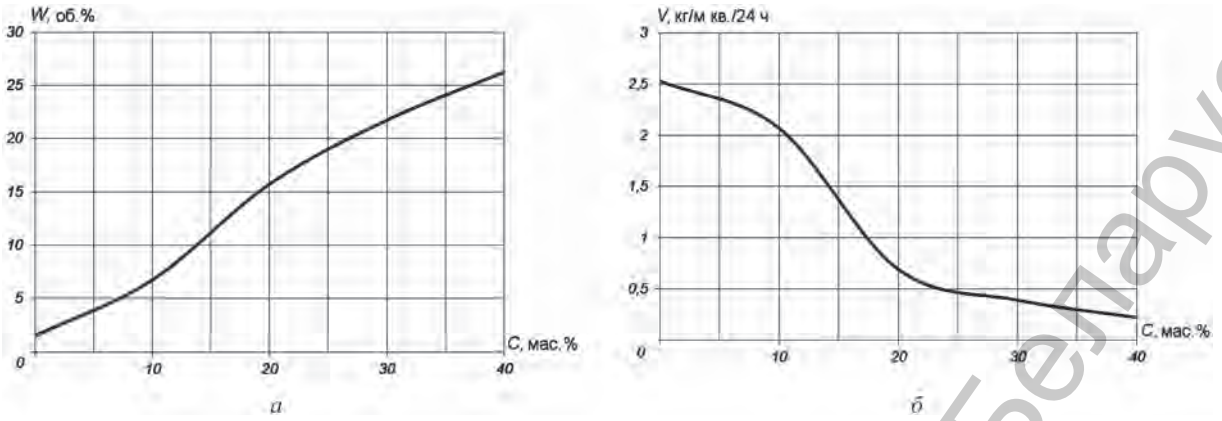


Рис. 1. Зависимости величины стабильного влагосодержания перлита марки М75 (*а*) и интенсивности испарения из него влаги (*б*) от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция

Установлено, что объемная насыпная масса 1 м^3 влагосодержащего перлита марки М75, для пропитывания которого использовался 10 %-ный водный раствор хлорида кальция, составляет 85,5–142,5 кг, а перлита, для пропитывания которого применялись 20 %-, 30 %- и 40 %-ные водные растворы хлорида кальция, – 139,5–232,5, 175,5–292,5 и 202,5–337,5 кг соответственно. Таким образом, значения объемной насыпной массы влагосодержащего перлита марки М75 превышают значения объемной насыпной массы сухих силикагеля и бентонита.

В [3] показано, что величина влагосодержания материала влияет на его характеристики передачи ЭМИ, а значит, и на электродинамические параметры (значения критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости). Для определения указанных параметров влагосодержащего перлита марки М75 в рамках настоящей работы проведены измерения его коэффициентов передачи ЭМИ в диапазоне сантиметровых длин волн (3–17 ГГц) с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18 согласно методике [10]. При этом в процессе измерений влагосодержащий перлит засыпался в кюветы с твердыми стенками, изготовленными из радиопрозрачного материала. Расстояние между передней и задней стенками кювет составляло 40 мм. При таком расстоянии обеспечивались малые значения коэффициентов отражения ЭМИ от задней стенки кюветы, что необходимо для увеличения точности определения электродинамических параметров влагосодержащего материала [3]. На основании частотных зависимостей коэффициентов передачи ЭМИ влагосодержащего перлита получены значения его критической частоты (f_0). Им соответствовали величины частот взаимодействующего с перлитом ЭМИ, при которых коэффициент передачи последнего был минимальным (так как на критической частоте значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости материала, а значит, и уровни поглощенной им энергии ЭМИ максимальные).

Показано, что увеличение влагосодержания перлита марки М75 приводит к уменьшению величины его критической частоты. Например, значение f_0 влагосодержащего перлита, для пропитывания которого использовался 10 %-ный водный раствор хлорида кальция, составило 11 ГГц, а перлита, для пропитывания которого применялись 20 %-, 30 %- и 40 %-ные водные растворы хлорида кальция, – 6 , 4,8 и 4 ГГц соответственно. При этом значение коэффициента передачи ЭМИ влагосодержащего перлита марки М75 на частоте f_0 состав-

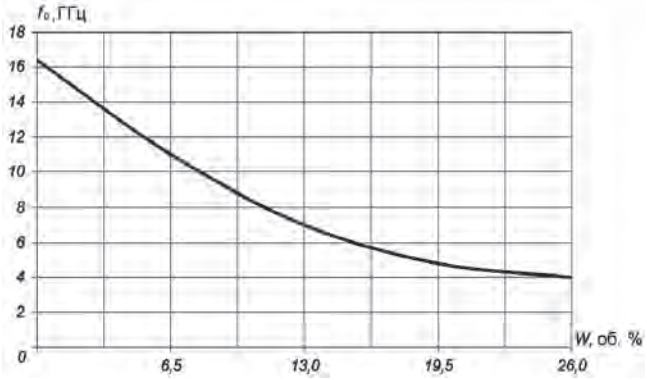


Рис. 2. Зависимость значений критической частоты влагосодержащего перлита марки М75 от величины его влагосодержания

Национальная академия наук Беларуси

ляло в зависимости от величины влагосодержания от –25 до –35 дБ. Зависимость значений критической частоты перлита от величины его влагосодержания приведена на рис. 2.

С использованием значений коэффициентов передачи ЭМИ влагосодержащего перлита, полученных в результате проведенных измерений, рассчитаны максимальные величины мнимой части (ε″) его комплексной диэлектрической проницаемости [3]:

$$\alpha = \frac{8,68d}{K_{\text{пер}}}, \tag{1}$$

где α – затухание ЭМИ в образце; d – толщина образца; $K_{\text{пер}}$ – модуль коэффициента передачи ЭМИ на резонансной частоте;

$$\alpha = \frac{\pi\varepsilon''}{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}. \tag{2}$$

Здесь λ – длина волны, соответствующая частоте f_0;

$$\varepsilon' + \varepsilon'' = \varepsilon_0 \tag{3}$$

(ε′ – значение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости материала на частоте f_0; ε_0 – статическая диэлектрическая проницаемость). Представленное соотношение справедливо только для значений ε′ и ε″ на частоте f_0:

$$\varepsilon_0 = W\varepsilon_1 + (1-W)\varepsilon_2 \tag{4}$$

(ε_1 и ε_2 – значения статической диэлектрической проницаемости воды и перлита, равные соответственно 81 и 2,8).

На основании результатов расчета получена зависимость максимального значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащего перлита (ε''_{max}) от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция. Данная зависимость представлена на рис. 3. Установлено, что если для пропитывания перлита марки М75 используется водный раствор хлорида кальция с концентрацией 0–13 мас. %, то значение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости получаемого в результате данного процесса влагосодержащего материала нелинейно возрастает от 1 до 2 по мере увеличения концентрации. Если используется водный раствор хлорида кальция с концентрацией 13–40 мас. %, то аналогичное значение линейно возрастает от 2 до 9.

Таким образом, результаты исследований могут быть использованы в процессе получения влагосодержащих материалов с требуемыми значениями критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, а значит, и характеристиками передачи ЭМИ. При этом данные характеристики будут определяться концентрацией водного раствора хлорида кальция. Расширение области значений электродинамических параметров влагосодержащего перлита возможно путем изменения его марки (например, при использовании перлита марки М150 или агроперлита, которые характеризуются иными гранулометрическим составом, пористостью и характеристиками влагопоглощения).

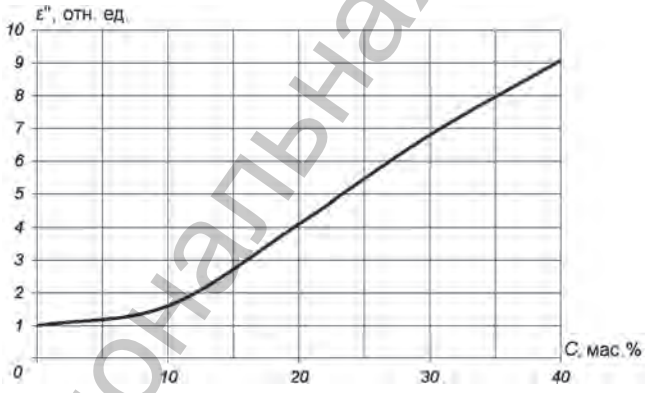


Рис. 3. Зависимость максимального значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащего перлита марки М75 от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция

При использовании влагосодержащего перлита могут формироваться специальные модули, экранирующие ЭМИ. При этом в процессе формирования таких модулей влагосодержащий перлит следует засыпать в контейнеры (например, формируемые на основе листового сотового поликарбоната). Кроме

Национальная академия наук Беларуси

того, на основе влагосодержащего перлита можно изготавливать композиты для экранирующих ЭМИ модулей, применяя в качестве связующего вещества цементные либо гипсовые растворы. Величина влагосодержания перлита в этих случаях будет определяться требованием к диапазону частот, в котором должно обеспечиваться необходимое значение коэффициента передачи ЭМИ таких модулей, а толщина последних – требованием, предъявляемым к параметрам их характеристик отражения и передачи ЭМИ. Данные модули не будут нуждаться в герметизации, что позволит увеличить их технологичность и уменьшить стоимость. Они могут использоваться в экранируемых помещениях.

Литература

1. *Колбун Н. В., Лыньков Л. М., Богуш В. А.* и др. // Вестн. ПГУ. Серия В. Прикладные науки. 2004. № 12. С. 30–35.
2. *Семихина Л. П.* Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. Тюмень, 2005.
3. *Федюнин П. А., Дмитриев Д. А., Воробьев А. А.* и др. Микроволновая термовлагометрия. М., 2004.
4. *Украинец Е. А., Колбун Н. В.* // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 4. С. 118–122.
5. *Колбун Н. В., Фан Н. Занг, Лыньков Л. М.* и др. // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: Материалы докл. Междунар. науч.-техн. семинара. Мн., 2004. С. 78–84.
6. *Колбун Н. В., Фан Н. Занг, Лыньков Л. М.* // Докл. БГУИР. 2005. № 5. С. 51–54.
7. ГОСТ 3956–76. Силикагель технический. Технические условия.
8. *Колбун Н. В., Фан Н. Занг* // Изв. БИА. 2004. № 2 (18)/2. С. 158–159.
9. *Позин М. Е.* Технология минеральных солей. Л., 1974.
10. *Бойправ О. В., Неамах М. Р., Соколов В. Б.* // Докл. БГУИР. 2012. № 1 (63). С. 70–75.

O. V. BOIPRAV, T. V. BORBOTKO, L. M. LYNKOU

WATER CONTENT INFLUENCE ON THE ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF POWDERED PERLITE

Summary

The dependences of critical frequency and imaginary part of complex permittivity of the expanded powdered perlite brand M75 from its water content is researched. It's proposed to use the investigated results in the creation process of shielding modules on the basis of water-containing expanded powdered perlite with the required electromagnetic radiation transmission coefficients.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 621.382

В. Б. ОДЖАЕВ[1], А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ[2], В. С. ПРОСОЛОВИЧ[1], А. С. ТУРЦЕВИЧ[2], С. В. ШВЕДОВ[2], В. А. ФИЛИПЕНЯ[2], В. В. ЧЕРНЫЙ[3], В. Ю. ЯВИД[1], Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ[1], В. А. ДУБРОВСКИЙ[1]

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОП-ТРАНЗИСТОРА

[1] Белорусский государственный университет,
[2] Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
[3] Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 13.03.2014)

Введение. При производстве КМОП-структур требуется большое число технологических операций, особенно при использовании МДП-технологии [1–3]. Производственный контроль качества является составной частью типового технологического процесса и сводится к определению двух составляющих: явных дефектов, характеризующих процент выхода годных изделий, и скрытых дефектов, снижающих их надежность. Цели производственного контроля – получение требуемого качества приборов, своевременная отбраковка дефектных изделий на различных этапах изготовления. Важными являются выбор химических реактивов и такая последовательность технологических (особенно высокотемпературных) операций, которая в максимальной степени исключала бы попадание в структуру неконтролируемых (технологических) примесей. В связи с вышесказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик МОП-транзисторов для установления факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров интегральных микросхем.

Объекты и методы исследований. В работе на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500 A с применением зондовой станции Cascide Summit 11000 (минимальный возможный измеряемый ток составлял примерно 10^{-15} А) исследованы вольт-амперные (ВАХ) характеристики МОП-транзисторов, изготовленных в разное время по эпитаксиально-планарной технологии по аналогичным технологическим маршрутам при идентичных используемых технологических материалах (далее серии А и В). Карманы размером 70×70 мкм создавались на пластинах кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см ионным легированием бора для *p*-кармана, ионным легированием фосфора и мышьяка для *n*-кармана. Поликремниевый затвор, легированный до вырождения, имел размеры 10×10 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика (SiO_2) равнялась 7 нм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Сравнение выходных ВАХ МОП-структур (рис. 1, *а*, *б*) показало, что приборы серии В обладают как более высокими значениями тока стока в режиме насыщения ($I_с$), так и более высокими напряжениями отсечки. При напряжении на затворе $U_з = 3{,}3$ В $I_с = 0{,}3$ мА для приборов серии В, $I_с = 0{,}14$ мА для приборов серии А. Напряжение отсечки составляет соответственно 2,1 и 1,4 В. Если подвижность электронов μ_n не зависит от напряженности электрического поля, то $I_с$ в канале шириной W полевого транзистора с изолированным затвором будет определяться следующим образом [4]:

$$I_с = \frac{1}{2}\mu_n \frac{W}{L} C_д (U_з - U_{пор})^2 , \quad (1)$$

где $C_д$ – удельная емкость диэлектрика, $U_{пор}$ – пороговое напряжение.

Национальная академия наук Беларуси

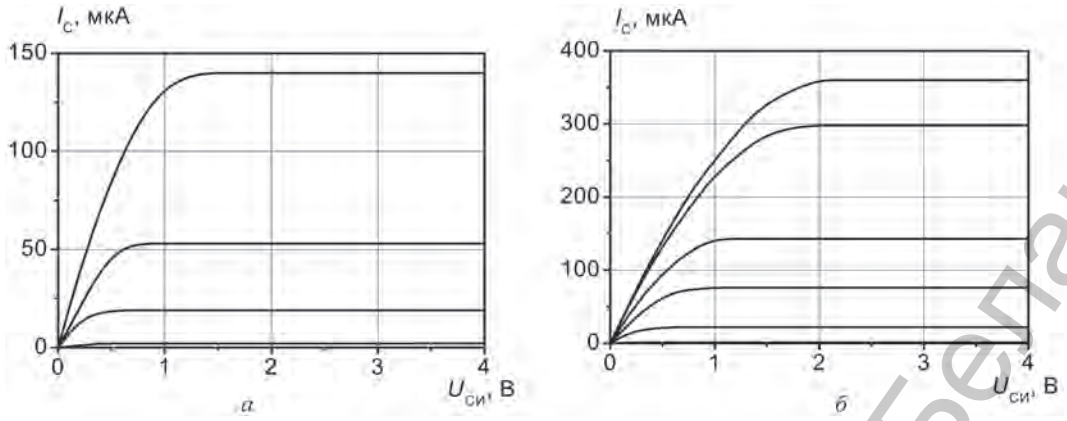


Рис. 1. Выходные характеристики МОП-структур с каналом *n*-типа серий А (*а*) и В (*б*) ($U_з$ = 0–6 В, шаг 1 В)

Из выражения (1) видно, что при $U_з$ = const и при *W*/*L* = const наблюдаемые различия в величине $I_с$ в первую очередь можно связать с изменением напряжения отсечки $U_р = U_з - U_{пор}$. Поскольку отношения экспериментальных значений $I_с^В / I_с^А = 0{,}30\text{мА} / 0{,}14\text{мА} = 2{,}14$ и $\left(U_р^В / U_р^А\right)^2 = (1{,}7\text{В} / 1{,}2\text{В})^2 = 2{,}01$ ($U_з$ = 3,3 В) хорошо коррелируют между собой и согласуются с формулой (1), то можно сделать вывод, что отличия $I_с$ и $U_р$ для приборов серий А и В обусловлены одной и той же причиной, которая, по-видимому, определяет величину порогового напряжения $U_{пор}$:

$$U_{пор} = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A (2\psi_B)}}{C_д}, \qquad (2)$$

где ψ_B – разность между уровнем Ферми в используемом материале и в собственном полупроводнике, N_A – концентрация легирующей примеси *p*-подложки. Из выражения (2) следует, что причиной изменения $U_{пор}$ (при условии однородного легирования подложки) является непостоянство $C_д$, связанное с неконтролируемым зарядом, локализованным в области МОП-конденсатора (затвора). Из анализа ВАХ определен также ряд других важных параметров МОП-структуры: ток насыщения, ток стока, проводимость МОП-транзистора в линейной области ВАХ, крутизна характеристики МОП-транзистора в линейной области, крутизна характеристики МОП-транзистора в области насыщения (табл. 1). Видно, что для транзисторов из серии А (табл. 1) значение тока и напряжения насыщения, крутизна в линейной области и в области насыщения, проводимость в линейной области меньше, чем у транзисторов из серии В. В то же время значение порогового напряжения у транзисторов из серии А выше, чем у транзисторов из серии В. Одна из возможных причин отличия параметров транзисторов, вероятно, также связана с величиной емкости подзатворного диэлектрика и его качеством, обусловленными наличием встроенного заряда. Для проверки данного предположения проведено сравнение отношения емкостей подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов из серий А и В ($C_{i\text{А}}/C_{i\text{В}}$), определенных на различных участках ВАХ [5, 6] исходя из проводимости в линейной области, крутизны характеристики в линейной области, величины тока насыщения, крутизны в области насыщения (табл. 2).

Т а б л и ц а 1. **Параметры МОП-транзисторов, определенные из анализа вольт – амперных и стоковых характеристик**

Параметр МОП-транзистора	Серия А	Серия В
Ток насыщения $I_{с\,нас}$ при $U_з$ = 3,3 В, мкА	138	280
Напряжение насыщения $U_{си\,нас}$, В	1,20	1,90
Пороговое напряжение $U_{пор}$, В	1,25	0,76
Крутизна характеристики МОП-транзистора в линейной области при $U_{си}$= 0,2 В, мкА/В	19	22,1
Крутизна характеристики МОП-транзистора в области насыщения при $U_{си}$= 2,9 В, мкА/В	100,3	175
Проводимость МОП-транзистора в линейной области при $U_{зи}$= 0,2 В, мкА/В	174	274

Национальная академия наук Беларуси

Таблица 2. **Отношение удельных емкостей подзатворного диэлектрика транзисторов в сериях А и В**

Метод определения	Напряжение на затворе и стоке	C_{iA}/C_{iB}
По проводимости	$U_{си} = 0{,}2$ В, $U_{зи} = 3{,}3$ В	0,79
По крутизне в линейной области	$U_{си} = 0{,}2$ В	0,86
По току насыщения	$U_{зи} = 3{,}3$ В	0,76
По крутизне в области насыщения	$U_{си} = 3{,}5$ В, $U_{зи} = 2{,}9$ В	0,75

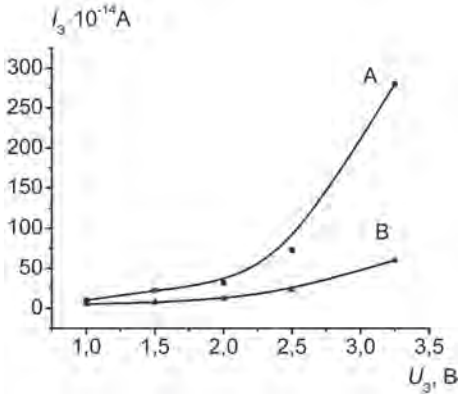


Рис. 2. Зависимость тока утечки затвора МОП-структуры от напряжения на затворе

Из табл. 2 следует, что вне зависимости от метода оценки отношения C_{iA}/C_{iB} значение емкости C_{iB} выше величины емкости C_{iA} приблизительно на 20%, что однозначно свидетельствует о дополнительном заряде [2, 4, 5, 7] встроенном в слой окисла подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов серии А. Это обусловлено тем, что на границе раздела $Si–SiO_2$, полученной термическим окислением кремния, всегда присутствуют четыре различных по своей природе источника заряда: заряд быстрых поверхностных состояний в полупроводнике, постоянный заряд в окисле, заряд на ловушках в слое окисла и заряд подвижных ионов.

Энергетическая плотность быстрых поверхностных состояний непосредственно на границе $Si–SiO_2$ сильно зависит от режима получения окисла. Величина постоянного заряда в окисле зависит от режима окисления, условий отжига и вида предокислительных обработок кремниевых пластин и загрязнения системы $Si–SiO_2$ катионными примесями. Заряд на ловушках в слое окисла представляет собой объемный заряд, захваченный на энергетические уровни дефектов в SiO_2. Этот тип заряда ассоциируется с медленными поверхностными состояниями. Заряд подвижных ионов связан с присутствием в окисле ионов щелочных (Na^+, K^+, Li^+) и тяжелых металлов, попадающих в окисел из окружающей среды, и материалов, используемых в технологическом процессе.

Исследованиями тока утечки (рис. 2) установлено, что величина тока через подзатворный диэлектрик для структур из серии В ниже соответствующего тока для структур из серии А примерно в 5 раз. Это свидетельствует о том, что электрическое сопротивление пленок подзатворного диэлектрика у структур серии В выше, чем у аналогичных структур серии А. Причиной наблюдаемых различий, вероятно, является существенное загрязнение подзатворного диэлектрика приборов серии А технологическими примесями в процессе их изготовления. Такими загрязнениями могут быть ионы щелочных металлов (Na^+, K^+, Li^+) и тяжелых металлов, адсорбированные на поверхности, кислородные вакансии, ловушки в окисле, полярные молекулы, попадающие в окисел из окружающей среды во время технологического процесса изготовления приборов. Действительно, исследования на рентгенофлуоресцентном спектрометре Rigaku TXRF 3750 содержания металлических примесей на поверхности пластин методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения [8, 9] показали, что вся поверхность пластин из серии А покрыта слоем Fe со средней концентрацией $3{,}4 \cdot 10^{11}$ ат/см^2. Наблюдаются также пятна Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn. На пластинах серии В наблюдаются только пятна Cl по периферии пластины. Содержание всех остальных примесей было ниже предела обнаружения (по Fe < $4{,}0 \cdot 10^9$ ат/см^2).

Заключение. Установлено, что электрофизические характеристики МОП-транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела $Si–SiO_2$ приводит как к увеличению порогового напряжения, так и снижению тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и в области насыщения, проводимости структуры в линейной области. Возрастают также токи утечки затвора. Наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров МОП-тран-

Национальная академия наук Беларуси

зисторов является загрязнение материала технологическими примесями (Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

Литература

1. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии / Под ред. А. С. Турцевича. В 3 т. Мн., 2013. С. 302–504.
2. *Лебедев А. И.* Физика полупроводниковых приборов. М., 2008. С. 239–294.
3. *Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И.* Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. М., 1986. С. 20–39.
4. *Зи С. М.* Физика полупроводниковых приборов (перевод с английского) в двух частях. М., 1984. С. 5–90.
5. *Денисенко В. В.* // Компоненты и технологии. 2009. № 12. С. 35–48.
6. *Бочаров Л. Н.* Полевые транзисторы. М., 1984 С. 42–59.
7. *Зи С. М.* Технология СБИС. В 2 кн. М., 1986. С. 120–127.
8. SEMI M33-0988
9. *Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U.*// Fresnius Z. Anal. Chem. 1989. Vol. 333. P. 524–526.

V. B. ODZAEV, A. N. PYATLITSKI, V. S. PRASALOVICH, A. S. TURTSEVICH, S. V. SHVEDAU, V. A. FILIPENIA, V. V. CHORNY, V. Yu. YAVID, Yu. N. YANKOUSKI, V. A. DUBROUSKI

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL IMPURITIES ON ELECTRICAL PARAMETERS OF MOS TRANSISTOR

Summary

It is shown that the quality of gate dielectric has a determinative impact on electrical physical parameters of MOS transistors. Contamination of material by technological impurities during the manufacturing process is the reason for the deterioration of electrical physical parameters of MOS transistors. Sources of contamination can be components of technological equipments, as well as the materials and reagents.

Национальная академия наук Беларуси

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

УДК 539.3

О. Л. ШВЕД

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

(Поступило в редакцию 30. 01. 2014)

Уточненные по результатам исследований определяющие соотношения нелинейной упругопластичности предложены в [1, 2]. Активный упругопластический процесс представлен попеременным чередованием пластического и упругого состояний. Модель нелинейной упругости обобщается на упругопластическую. Сохраняется потенциальная природа упругой деформации. Используется концепция поверхности текучести. В пластическом состоянии (при течении) материал предполагается несжимаемым. Формулируются критерии текучести и разрушения. Введены параметры упрочнения и выбраны базовые эксперименты. В упрощающем предположении, что материал является идеально упругопластическим, получены решения модельных задач, в которых реализуются все три возможных случая при формулировке дифференциальных определяющих соотношений.

В данной работе рассматривается явление прерывистости деформации [3]. В опыте Дж. Ф. Белла оно проявляется при мягком простом растяжении алюминиевого образца в виде ступенчатой диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$ (рис. 1), состоящей из вертикальных и горизонтальных участков упругости и пластичности ([3], с. 279). Предполагаем, что диаграмма заканчивается при разрушении образца. Модель первоначально изотропного материала [1, 2], который становится трансверсально-изотропным, используем для описания одноосного растяжения и указанной диаграммы. Определим момент начала макроразрушения, который будет зависеть от величины дополнительного гидростатического давления сжатия. Получим сначала необходимые для моделирования соотношения.

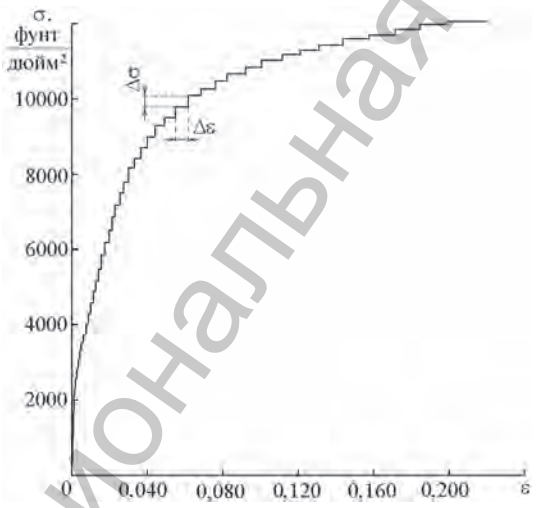


Рис. 1. Диаграмма растяжения σ~ε из опыта Дж. Ф. Белла [3]

Пусть $\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$, $\mathbf{c}_3$ – неподвижный ортонормированный триэдр. Введем удельную потенциальную энергию упругой деформации (потенциал напряжений) в форме Мурнагана [4, 5] $э = э_0 + э_2 + э_3$, где $э_2 = \delta_1(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{c}_1)^2 + \ldots$, $э_3 = \delta_{22}(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{c}_1)^3 + \ldots$ анизотропные структуры второй и третьей степени по компонентам тензора упругой деформации Коши – Грина. Начальные значения 77 параметров анизотропии $\delta_j = 0$ и тогда $э$ совпадает с изотропным потенциалом $э_0$. Переходя к мере $\mathbf{G} = 2\mathbf{C} + \mathbf{E}$, получаем

Национальная академия наук Беларуси

$$э = э_0 + 4^{-1}(\delta_1 \mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 (\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 2) + ...) + 8^{-1}(\delta_{22}((\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)^3 + 1) + ...) + c, \quad (1)$$

где c – минимальная постоянная, такая что $э \geq 0$.

Для трансверсально-изотропного материала с осью $\mathbf{c}_2$, выбранной направлением растяжения, ненулевыми в (1) могут быть только параметры анизотропии δ_j, где $j \in \{1-3, 7-11, 15, 22-34\}$, и выполняются равенства [2]

$$\begin{gathered} \delta_{11} = 2\delta_1 - \delta_{10}, \delta_7 = \delta_{15}, \delta_1 = \delta_3, \quad \delta_9 = \delta_8, \delta_{22} = \delta_{24} = \delta_{26} = \delta_{29}, \\ \delta_{27} = \delta_{28}, \delta_{25} = \delta_{30} = \delta_{31}, \delta_{33} = \delta_{25}, \delta_{32} = \delta_{34} = 2\delta_{22}. \end{gathered} \quad (2)$$

Доказательство этого утверждения проводится средствами символьных вычислений. Опуская для краткости в дальнейшем слагаемые с параметрами δ_j ($j = 11,\ 15,\ 32,\ 33,\ 34$), первоначально получаем

$$\begin{gathered} э = э_0 + 4^{-1}\left(\sum_{\kappa,l;j=1,2,3,8,9,10} \delta_j((\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_k - 1)(\mathbf{c}_l \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_l - 1) - 1) + \delta_7(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2)^2 + \delta_{11}(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_3)^2 + \delta_{15}(\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_3)^2 \right) + \\ + 8^{-1}\left(\sum_{m,n;j=1,2,...,9} \delta_{21+j}((\mathbf{c}_m \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_m - 1)^2 (\mathbf{c}_n \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_n - 1) + 1) + \delta_{31}\left(\prod_i (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_i - 1) + 1 \right) + (\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_3)^2 \sum_i \delta_{31+i}(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_i - 1) \right) + c \\ (k = 1,2,3,1,2,3;\ \ l = 1,2,3,2,3,1;\ \ m = 1,2,3,1,1,2,2,3,3;\ \ n = 1,2,3,2,3,1,3,1,2;\ \ i = 1,2,3), \\ э_0 = 4^{-1}(4^{-1}(-12\lambda - 8\mu + 9\nu_1 + 18\nu_2 + 8\nu_3)I_1 + 4^{-1}(2\lambda + 4\mu - 3\nu_1 - 10\nu_2 - 8\nu_3)I_1^2 + \\ + (-2\mu + 3\nu_2 + 4\nu_3)I_2 - (\nu_2 + 2\nu_3)I_1 I_2 + 12^{-1}(\nu_1 + 6\nu_2 + 8\nu_3)I_1^3 + 2\nu_3 I_3), \end{gathered} \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_3 – первый, второй и третий главные инварианты меры $\mathbf{G} = \mathbf{F}_e^{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{F}_e$ и меры упругой деформации Фингера $\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{F}_e^{\mathbf{T}}$, λ, μ – постоянные Ляме второго и ν_1, ν_2, ν_3 – третьего порядков. Указанные слагаемые с параметрами анизотропии δ_j в рассматриваемых нагружениях и при построении кривых пластичности являются нулевыми, хотя сами параметры будут определяться по соотношениям (2).

Пусть $\mathbf{F}_e$ – неособенный тензор, заменяющий в упругопластичности деформационный градиент $\overset{0}{\nabla}\mathbf{R}^{\mathbf{T}}$ ($\mathbf{F}_e = \mathbf{V} \cdot \mathbf{O}^{\mathbf{T}}$ согласно полярному разложению), $L_3 = \sqrt{I_3}$ – третий главный инвариант меры упругих искажений $\mathbf{V}$. Из уравнения (3) находим соотношение для тензора напряжений Коши

$$\mathbf{T} = 2L_3^{-1}\mathbf{F}_e \cdot \frac{\partial э}{\partial \mathbf{G}} \cdot \mathbf{F}_e^{\mathbf{T}} = \mathbf{T}_0 + \sum_j \delta_j \mathbf{T}_j,$$

$$\begin{gathered} \mathbf{T}_0 = 2(\sqrt{I_3})^{-1}(\varphi_0 \mathbf{E} + \varphi_1 \mathbf{F} + \varphi_2 \mathbf{F}^2)(\varphi_0 = a_0 I_3, \varphi_1 = b_0 + b_1 I_1 + b_2 I_1^2 + b_3 I_2, \varphi_2 = c_0 + c_1 I_1), \\ a_0 = 2^{-1}\nu_3,\ b_0 = 16^{-1}(-12\lambda - 8\mu + 9\nu_1 + 18\nu_2 + 8\nu_3),\ b_1 = 8^{-1}(2\lambda - 3\nu_1 - 4\nu_2), \\ b_2 = 16^{-1}(\nu_1 + 2\nu_2),\ b_3 = -4^{-1}(\nu_2 + 2\nu_3),\ c_0 = 4^{-1}(2\mu - 3\nu_2 - 4\nu_3),\ c_1 = -b_3, \\ \mathbf{T}_i = L_3^{-1}(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_i - 1)\mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_i \mathbf{C}_i \cdot \mathbf{V}, \mathbf{T}_8 = L_3^{-1}2^{-1}\mathbf{V} \cdot ((\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2 - 1)\mathbf{C}_1\mathbf{C}_1 + \\ + (\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{V}), \mathbf{T}_9 = L_3^{-1}2^{-1}\mathbf{V} \cdot ((\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2 - 1)\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3 + (\mathbf{c}_3 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_3 - 1)\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{V}), \\ \mathbf{T}_{10} = L_3^{-1}2^{-1}\mathbf{V} \cdot ((\mathbf{c}_3 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_3 - 1)\mathbf{C}_1\mathbf{C}_1 + (\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3) \cdot \mathbf{V}), \\ \mathbf{T}_7 = L_3^{-1}2^{-1}\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2 \mathbf{V} \cdot (\mathbf{C}_1\mathbf{C}_2 + \mathbf{C}_2\mathbf{C}_1) \cdot \mathbf{V}, \mathbf{T}_{21+i} = 4^{-1}3L_3^{-1}(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_i - 1)^2 \mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_i\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{V}, \\ \mathbf{T}_{25} = 4^{-1}L_3^{-1}(2(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)(\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2 - 1)\mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_1\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{V} + (\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)^2 \mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_2\mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{V}), \\ \mathbf{T}_{26} = 4^{-1}L_3^{-1}(2(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)(\mathbf{c}_3 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_3 - 1)\mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_1\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{V} + (\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)^2 \mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_3\mathbf{C}_3 \cdot \mathbf{V}), \\ \mathbf{T}_{27} = 4^{-1}L_3^{-1}(2(\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_1 - 1)(\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2 - 1)\mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_2\mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{V} + (\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{c}_2 - 1)^2 \mathbf{V} \cdot \mathbf{C}_1\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{V}), \end{gathered} \quad (4)$$

Национальная академия наук Беларуси

$$\mathbf{T}_{28} = 4^{-1}L_3^{-1}(2(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}+(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)^2\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}),$$
$$\mathbf{T}_{29} = 4^{-1}L_3^{-1}(2(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}+(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)^2\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}),$$
$$\mathbf{T}_{30} = 4^{-1}L_3^{-1}(2(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}+(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)^2\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}),$$
$$\mathbf{T}_{31} = 4^{-1}L_3^{-1}((\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}+(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-$$
$$-1)\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}+(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V})\ (\mathbf{C}_i=\mathbf{O}^{\mathbf{T}}\cdot\mathbf{c}_i=\mathbf{c}_i\cdot\mathbf{O},\ i=1,2,3).$$

Уравнения (3), (4) справедливы для упругого и пластического состояний материала.

Обозначим: $\overset{\Omega}{\mathbf{T}}=\dot{\mathbf{T}}-\mathbf{\Omega}\cdot\mathbf{T}+\mathbf{T}\cdot\mathbf{\Omega}$ ($\Omega=\mathbf{O}^{\mathbf{T}}\cdot\dot{\mathbf{O}}$ – тензор упругого спина [6], точка над символом означает материальную производную) – О-производная тензора $\mathbf{T}$, $\mathbf{D}$ – тензор скорости деформаций, $\nabla\mathbf{v}^{\mathbf{T}}$ – градиент скорости, $\mathbf{W}$ – тензор вихря. Введем девиатор-оператор $\mathbf{Q}=\mathbf{Q}(\mathbf{D})$ как О-производную девиатора $\operatorname{dev}\mathbf{T}$ (4), вычисленную при условии несжимаемости $\nabla\cdot\mathbf{v}=0$ по соотношению $\dot{\mathbf{F}}_e=\nabla\mathbf{v}^{\mathbf{T}}\cdot\mathbf{F}_e$. Последнее уравнение задает тензор $\mathbf{F}_e$ в упругом состоянии. Имеем:

$$\mathbf{Q}(\mathbf{D})=(\mathbf{W}-\Omega)\cdot\mathbf{T}-\mathbf{T}\cdot(\mathbf{W}-\Omega)+\mathbf{Q}_0(\mathbf{D})+\mathbf{Q}_1(\mathbf{D})+\mathbf{Q}_2(\mathbf{D}),$$
$$\mathbf{Q}_0=\operatorname{dev}(\mathbf{T}\cdot\mathbf{D}+\mathbf{D}\cdot\mathbf{T}+4L_3^{-1}((b_1+(2b_2-c_1)I_1)\mathbf{F}\cdot\cdot\mathbf{D}+c_1\mathbf{F}^2\cdot\cdot\mathbf{D})\mathbf{F}+c_1\mathbf{F}\cdot\cdot\mathbf{D}\mathbf{F}^2-$$
$$-\varphi_0\mathbf{D}+\varphi_2\mathbf{F}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{F})),$$
$$\mathbf{Q}_1=L_3^{-1}\operatorname{dev}(\mathbf{V}\cdot((2\delta_1\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+\delta_8\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+\delta_{10}\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3)\mathbf{C}_1\mathbf{C}_1+$$
$$+(2\delta_2\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+\delta_8\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+\delta_9\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3)\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2+$$
$$+(2\delta_3\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3+\delta_9\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+\delta_{10}\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1)\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3+$$
$$+\delta_7\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2(\mathbf{C}_1\mathbf{C}_2+\mathbf{C}_2\mathbf{C}_1))\cdot\mathbf{V}),$$
$$\mathbf{Q}_2=L_3^{-1}\operatorname{dev}(\mathbf{V}\cdot((3\delta_{22}(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+\delta_{27}(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+$$
$$+\delta_{29}(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3+\delta_{25}((\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1- \quad (5)$$
$$-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2)+\delta_{26}((\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3)+$$
$$+\delta_{31}2^{-1}((\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3+(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2)))\mathbf{C}_1\mathbf{C}_1+$$
$$+(3\delta_{23}(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+\delta_{25}(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+$$
$$+\delta_{30}(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3+\delta_{27}((\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-$$
$$-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2)+\delta_{28}((\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3)+$$
$$+\delta_{31}2^{-1}((\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3+(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1)))\mathbf{C}_2\mathbf{C}_2+$$
$$+(3\delta_{24}(\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3+\delta_{26}(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+$$
$$+\delta_{28}(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+\delta_{29}((\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-$$
$$-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3)+\delta_{30}((\mathbf{c}_3\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_3-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2+(\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_3\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_3)+$$
$$+\delta_{31}2^{-1}((\mathbf{c}_2\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_2-1)\mathbf{C}_1\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_1+(\mathbf{c}_1\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{c}_1-1)\mathbf{C}_2\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}\cdot\mathbf{C}_2)))\mathbf{C}_3\mathbf{C}_3)\cdot\mathbf{V}).$$

В рассматриваемых нагружениях выполняются равенства $\mathbf{O}=\mathbf{E}$, $\mathbf{W}=\Omega=0$, $\mathbf{C}_i=\mathbf{c}_i$. Критерий текучести будет $\mathbf{Q}\cdot\cdot\mathbf{N}>0$, где $\mathbf{N}=-(\sqrt{6})^{-1}\mathbf{c}_1\mathbf{c}_1+2(\sqrt{6})^{-1}\mathbf{c}_2\mathbf{c}_2-(\sqrt{6})^{-1}\mathbf{c}_3\mathbf{c}_3$ – вектор внешней нормали к девиаторному сечению поверхности текучести, на котором находится точка процесса в пространстве напряжений, $\mathbf{N}\cdot\cdot\mathbf{N}=1$. Реализуется первый случай в формулировке дифференциальных определяющих уравнений [1]. Запишем дифференциальные определяющие уравнения при течении. Девиаторы $\mathbf{N}$, $\mathbf{D}$ и $\mathbf{Q}$, согласно (5), являются пропорциональными. Для тензора $\mathbf{T}$ имеем

Национальная академия наук Беларуси

$$\dot{\mathbf{T}} = \overset{\Omega}{\mathbf{T}} = K(\mathbf{Q} - \mathbf{Q}\cdot\cdot\mathbf{NN}) = 0, \tag{6}$$

где малый скаляр K, определяемый в эксперименте по двухосному растяжению, не зависит от $\mathbf{D}$. Определяющее уравнение для потенциала напряжений э имеет вид

$$(L_3^{-1}э)^{\cdot} = (1-\alpha)\mathbf{T}\cdot\cdot\mathbf{D} \quad (\mathbf{T}\cdot\cdot\mathbf{D} > 0). \tag{7}$$

Здесь α – относительная часть рассеиваемой работы деформации. Введем определяющее уравнение для параметров анизотропии

$$\dot{\delta}_j = k_j \beta \mathbf{N}\cdot\cdot\mathbf{T}_j (\sqrt{\mathbf{T}_j\cdot\cdot\mathbf{T}_j})^{-1} \quad (\mathbf{T}_j \neq 0), \tag{8}$$

где $k_j = \pm 1$, скаляр $\beta \geq 0$ характеризует скорость изменения анизотропии. В случае $\mathbf{T}_j = 0$ используем отмеченные выше соотношения (2) для δ_j. Параметр δ_7 полагаем следующим:

$$\delta_7 = \delta_{15} = \gamma\delta_{11} = \gamma(2\delta_1 - \delta_{10}), \tag{9}$$

где γ – постоянный коэффициент. Независимых параметров δ_j при растяжении по второй оси имеется 8, $j \in \{1, 2, 8, 10, 22, 23, 25, 27\}$. По всем наборам величин k_j из системы уравнений (3), (4), (6)–(8) выбирается набор, обеспечивающий минимальное значение β. Эта процедура несложно реализуется.

При построении девиаторного сечения удобно применить векторное представление девиаторов симметричных тензоров второго ранга в пятимерном векторном пространстве. Для этого задается ортонормированный тензорный базис пространства девиаторов $\mathbf{W}_1 = (\sqrt{6})^{-1}(\mathbf{E} - 3\mathbf{c}_3\mathbf{c}_3)$, $\mathbf{W}_2 = (\sqrt{2})^{-1}(\mathbf{c}_2\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_1\mathbf{c}_1)$, $\mathbf{W}_3 = (\sqrt{2})^{-1}(\mathbf{c}_1\mathbf{c}_2 + \mathbf{c}_2\mathbf{c}_1)$, $\mathbf{W}_4 = (\sqrt{2})^{-1}(\mathbf{c}_1\mathbf{c}_3 + \mathbf{c}_3\mathbf{c}_1)$, $\mathbf{W}_5 = (\sqrt{2})^{-1}(\mathbf{c}_2\mathbf{c}_3 + \mathbf{c}_3\mathbf{c}_2)$. Скалярное произведение таких векторов здесь понимается как двойное скалярное произведение тензоров. Любой такой девиатор $\mathbf{N}$ представляется в векторном виде $\mathbf{N} = \sum w_i \mathbf{W}_i$. В силу симметрии, связанной с условием трансверсальной изотропии, можно ограничится рассмотрением трехмерного подпространства девиаторов $\{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3\}$. Вектор нормали $\mathbf{N}$ к текущему девиаторному сечению поверхности текучести (содержащему точку процесса в пространстве напряжений) выбирается из двух взаимно ортогональных собственных векторов оператора (5), который имеет вид [1]

$$\begin{pmatrix} p_1 + 2p_2 & \sqrt{3}p_2 & p_3 \\ \sqrt{3}p_2 & -p_1 + 2p_2 & p_4 \\ p_3 & p_4 & p_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix}. \tag{10}$$

Третий вектор физического смысла не имеет. Существуют два семейства поверхностей, и искомая поверхность образуется соединением в сингулярных точках двух представителей этих семейств. Для построения текущего сечения достаточно двух точек на этих поверхностях: точки процесса и точки, определяемой по величине эффекта Баушингера. Перемещением из этих точек по поверхности девиаторного сечения в подпространстве $\{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3\}$ находятся еще две точки в плоскости $\{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2\}$. По этим четырем точкам с учетом симметрии строится кривая пластичности.

Если на текущем сечении появляется критическая точка, в которой собственное значение оператора (10), определяющее собственный вектор, являющийся вектором нормали в данной точке поверхности, становится кратным, то однозначный и обоснованный выбор вектора нормали из несчетного множества собственных векторов становится невозможным. Критерий текучести в этой точке теряет смысл, и именно этот факт является основанием для введения предлагаемого критерия разрушения. Текущее девиаторное сечение вырождается. Следовательно, возникает макротрещина, поскольку альтернативой деформации является разрушение. Появление

Национальная академия наук Беларуси

точки, названной критической, в данном случае впервые происходит в плоскости $\{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2\}$ на кривой пластичности, где выполняется условие $p_3 = p_4 = 0$ (10). Наличие кратного собственного значения равносильно существованию нуля функции

$$f(\varphi) = (2p_1^2 + 6p_2^2)^{-1}(p_2^2 + p_5^2 - p_1^2 - 4p_2p_5), \tag{11}$$

где первый множитель взят для нормировки. Угол φ ($0 \le \varphi \le 2\pi$) отвечает положению точки на кривой пластичности с учетом ее замкнутости, перемещение происходит по кривой из точки процесса по часовой стрелке.

Численное моделирование при течении проводилось на основе вариационного принципа [7], в квазистатическом режиме. После нахождения поля скоростей из системы уравнений (3)–(8) определяются β и **V**. В упругом состоянии использовался принцип стационарности в варьируемой актуальной конфигурации [4]. В обоих случаях применялось обращение закона (4).

Ввиду недостатка информации о постоянных Ляме исходные данные об алюминии заменяем данными о сплаве D54S [4]: $\lambda = 0,49,\ \mu = 0,26,\ \nu_1 = -3,8,\ \nu_2 = -2,0,\ \nu_3 = -0,8$ (10^5 МПа).

Результаты расчета представлены на рис. 2 для последней ступеньки диаграммы (рис. 1). Напряжение текучести σ составляет 83,4 (МПа) и значение α выбрано 0,99998785. Функция α взята монотонно убывающей и постоянной на каждой ступеньке диаграммы, согласно которой находим $\gamma = 11$ (9).

Наряду с простым растяжением рассмотрено растяжение при наложении в промежуточном состоянии в начале последней ступеньки давления всестороннего равномерного сжатия величиной $-3^{-1}\sigma P\ \ (P > 0)$. Учитывалось дополнительное упрочнение, связанное с высоким гидростатическим давлением в размере $0,2P\sigma$.

На рис. 2, *а* кривые *1* и *2* отвечают промежуточной и конечной деформациям. Кривые *3* и *4* соответствуют растяжению под давлением для $P = 10$ и 100, эти кривые не приводим, так как они расположены в других девиаторных сечениях поверхности текучести. Стрелками обозначены проекции базисных диад $\mathbf{c}_i\mathbf{c}_i$. Проекция $\mathbf{c}_2\mathbf{c}_2$ направлена вверх, на ней отмечена точка процесса.

На рис. 2, *б* приведены графики функции $f(\varphi)$ (11) для обозначенных кривых пластичности. На оси абсцисс отмечены малые и большие вертикальные штрихи, соответствующие приращениям угла $\pi/6$ и сингулярным точкам кривых. На графике видно, что на соответствующем участке кривой *1* имеются нули функции, т. е. оператор (6) имеет кратное собственное значение. Однако вектор нормали к кривой пластичности определяется собственным вектором, который находится по простому собственному значению. На графике (кривая *2*) участки кривой меняются, там впервые появляется критическая точка при переходе нуля функции на соседний участок. При наложении гидростатического давления замедляется рост параметров анизотропии, нули функции удаляются от границы участка и при тех же удлинениях материал не разрушается (кривые *3, 4*). Таким образом, пластичность материала увеличивается.

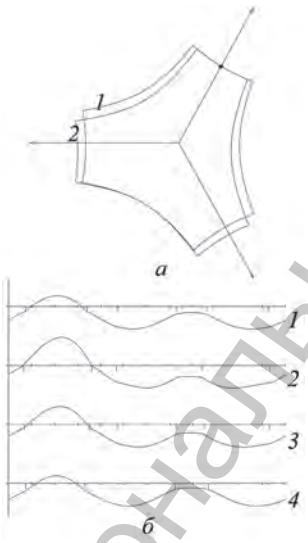


Рис. 2. Результаты расчета для последней ступеньки диаграммы (рис. 1): *а* – кривые пластичности, *б* – графики функции *f*

Диаграмма рис. 1 описывается предложенной в рассмотренных нагружениях моделью. Формально устанавливается момент начала разрушения при вырождении текущего девиаторного сечения. Причиной разрушения является деформационная анизотропия материала. Описываются явления залечивания поврежденности и увеличения пластичности материала под высоким гидростатическим давлением сжатия при учете анизотропных структур второй и третьей степени по компонентам тензора **C**. Естественным параметром поврежденности можно считать меру близости нулей функции $f(\varphi)$ к границам соответствующего участка кривой пластичности. Для изотропного материала нули находятся в центрах второго и пятого участков.

Национальная академия наук Беларуси

Литература

1. *Швед О. Л.* // Тр. VII Всерос. (с международным участием) конф. по механике деформируемого твердого тела. г. Ростов-на-Дону, 2013. Ростов-на-Дону, 2013. Т. II. С. 219–223.

2. *Швед О. Л.* // Тр. VII Всерос. (с международным участием) конф. по механике деформируемого твердого тела. г. Ростов-на-Дону, 2013. Ростов-на-Дону, 2013. Т. II. С. 224–228.

3. *Белл Дж. Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. II. Конечные деформации. М., 1984.

4. *Лурье А. И.* Нелинейная теория упругости. М., 1980.

5. *Murnaghan F. D.* Finite deformation of an elastic solid. N. Y., 1951.

6. *Швед О. Л.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2009. № 1. С. 52–58.

7. *Швед О. Л.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2008. № 2. С. 66–72.

O. L. SHVED

NUMERICAL MODELING OF THE EFFECT OF INCREASE OF METAL PLASTICITY AT TENSION BY THE IMPACT OF HIGH HYDROSTATIC COMPRESSION

Summary

Based on the model of nonlinear elastic-plastic material the phenomenon of breakup of deformation by. F. Bella at soft simple stretching is described. The effects of increase of plasticity and healing of material damage at additional hydrostatic compression are modelled.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 621.774.353

В. А. ТОМИЛО, В. В. ЛЕВКОВИЧ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ВАЛКОВОМ ОБЖИМЕ УЧАСТКОВ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ

Физико-технический институт НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 10.07.2014)

Технология валкового обжима концевых участков толстостенных труб основана на поперечно-винтовой прокатке (ПВП). Первоначальные попытки определения напряженно-деформированного состояния (НДС) связаны с большим количеством упрощений. Широко известен метод линий скольжения (линий Чернова–Людерса), при котором дуга касания металла с валком заменялась на прямую линию, а процесс ПВП рассматривался как интегральный результат элементарных процессов ковки с кантовкой на малый угол [1]. При этом прокатка в двухвалковом стане рассматривалась как ковка между плоскими бойками, а в трехвалковом стане – как ковка с применением нижнего вырезного бойка. Метод верхних оценок предполагает замену действительного поля линий скольжения более простым кинематически возможным полем, состоящим из отдельных жестких блоков [2].

Оба этих метода характеризуются следующими допущениями: объемная деформация заменяется плоской деформацией, инструмент принимается абсолютно жестким, обрабатываемый металл – однородным, изотропным, абсолютно жестким в упругом состоянии и абсолютно пластичным в пластическом состоянии.

Поляризационно-оптический метод исследования НДС на прозрачных моделях основан на свойстве некоторых прозрачных изотропных материалов при деформации становиться оптически анизотропными. Применительно к трехмерным деталям данный метод является трудоемким [3]. В настоящей статье для исследования НДС используется метод конечных элементов.

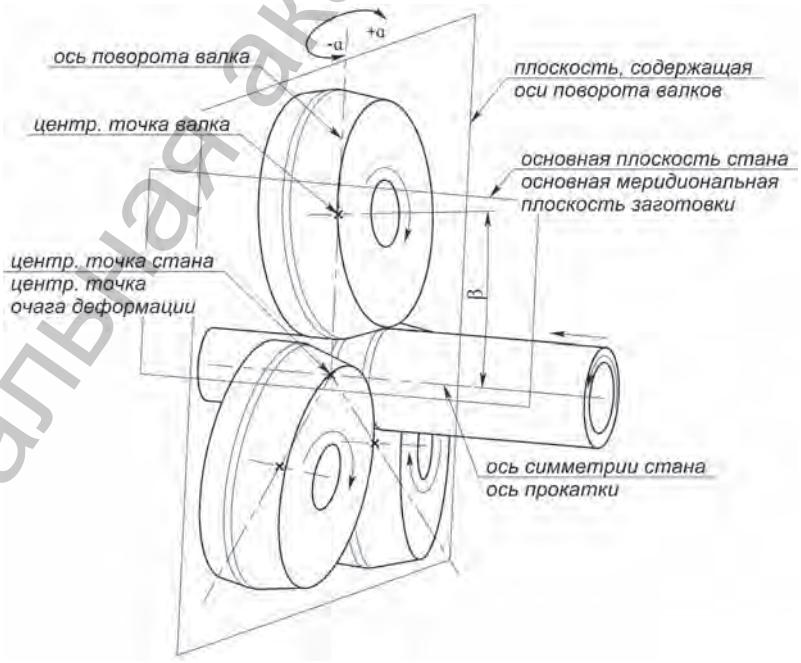


Рис. 1. Схема ПВП

Национальная академия наук Беларуси

Схема ПВП представлена на рис. 1, где также приведены геометрические элементы, определяющие тип стана. Угол раскатки β определяется при угле подачи α, равном нулю. Ось симметрии стана представляет собой линию, удаленную от осей валков на одинаковое расстояние. В данном случае она совпадает с осью прокатки (ось заготовки). Ось поворота валка – прямая линия, вокруг которой осуществляется поворот валка на угол подачи. Центральная точка валка – точка, в которой пересекаются ось валка и плоскость, содержащая оси поворота валков.

Основная плоскость стана – плоскость, содержащая ось симметрии стана и центральную точку валка. Основная меридиональная плоскость обрабатываемого тела проходит через ось заготовки и параллельна основной плоскости стана или совпадает с ней. В трехвалковом стане имеются три основные плоскости и три основные меридиональные плоскости. Центральная точка стана (очага деформации) – точка пересечения оси симметрии (прокатки) с плоскостью, содержащей оси поворота валков.

Исходный материал для моделирования процесса трехвалковой ПВП методом конечных элементов – трубная заготовка с внешним диаметром 121 мм, толщиной стенки 18 мм, длиной 300 мм. Ее эскиз с обжатым концом представлен на рис. 2.

Валки приняты абсолютно жесткими и равномерно зафиксированы вокруг оси прокатки (рис. 1). Наклон осей валков на угол α способствует перемещению заготовки вдоль оси прокатки при вращении валков. При расчетах учтен теплообмен заготовки с валками и окружающей средой. Материал заготовки – сталь 40Х, температура обработки 1250 °С. На рис. 3 приведены зависимости напряжения текучести выбранного материала, учитывающие степень и скорость деформации, а также температуру протекания процесса.

Скорость вращения валков 20 об/мин, максимальный диаметр валков 300 мм, угол наклона образующей конуса входного участка валка по отношению к оси валка составляет 12,76° при $\alpha = 5°$ и $\beta = 6°$. Коэффициент трения принят постоянным по всей поверхности контакта и равным 0,7 (по закону трения Кулона).

В данной работе определены радиальные, тангенциальные и осевые нормальные напряжения. Радиальное и тангенциальное направления указаны на рис. 4, где b – длина дуги контакта, ψ– угол меридионального сечения заготовки (угол между основной меридиональной плоскостью заготовки и меридиональной плоскостью, в которой лежит рассматриваемая точка).

Согласно теоретическим данным, проекции векторов сил трения на ось прокатки во всех точках очага деформации имеют направление, противоположное направлению перемещения металла. Следовательно, в осевом направлении по всему очагу деформации наблюдается только отставание металла. Проекции векторов сил трения на плоскость, перпендикулярную оси прокатки, направлены против вращения заготовки по всей длине очага деформации, за исключением небольшого участка в его начале [4]. Следовательно, в тангенциальном направлении на данном участке присутствуют зоны отставания и опережения, на оставшейся длине очага деформации наблюдается только отставание металла (коэффициент тангенциальной скорости $\eta_т$, равный отношению скорости выхода заготовки из валков к линейной скорости на бочке валка, согласно экспериментальным данным, находится в пределах 0,9–0,95). На рис. 5 приведена схема расположения зон отставания и опережения металла в начале очага деформации (T – сила трения, N –

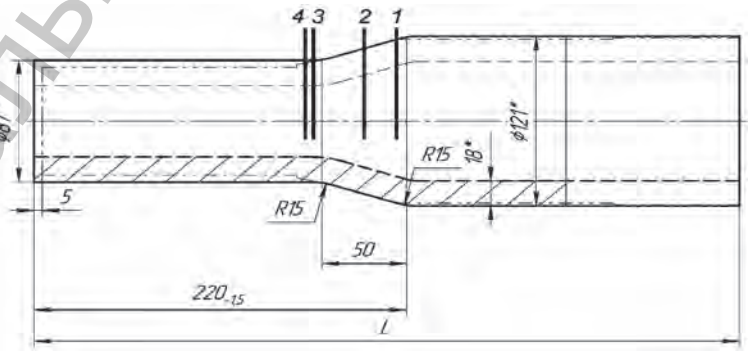


Рис. 2. Эскиз обжатой трубной заготовки: *1, 2, 3, 4* – номера сечений

Национальная академия наук Беларуси

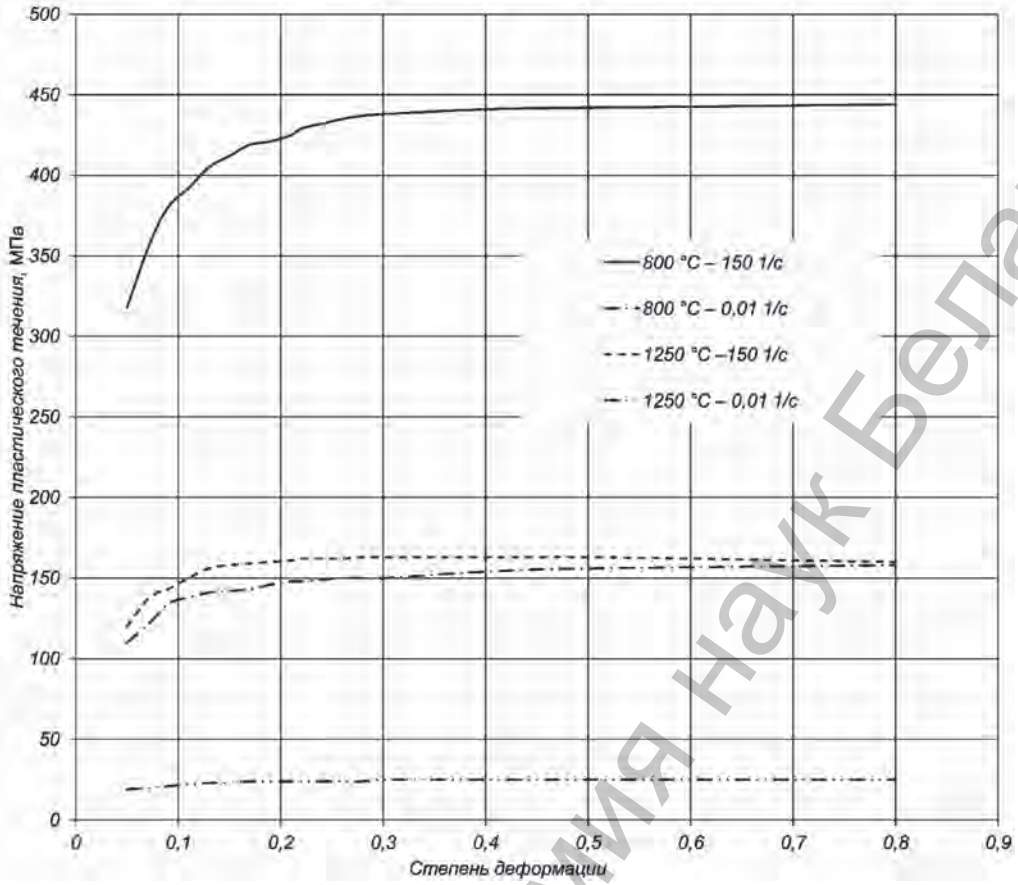


Рис. 3. Зависимости сопротивления деформации стали обрабатываемой заготовки от степени деформации, температуры и скорости деформации

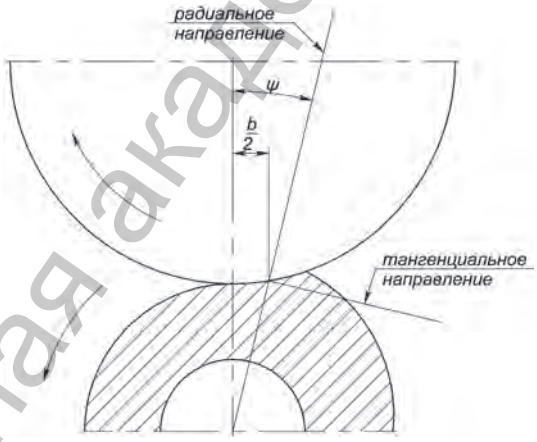


Рис. 4. Схема с радиальным и тангенциальным направлениями при ПВП

сила нормального давления, Q – результирующая сила). Сила Q раскладывается на тангенциальную силу Q_y и силу Q_z, действующую в радиальном направлении:

$$\overline{Q} = \overline{Q}_y + \overline{Q}_z.$$

Силы Q_y способствуют появлению растягивающих напряжений в тангенциальном направлении в начале очага деформации, а силы Q_z – появлению сжимающих напряжений в радиальном направлении.

На рис. 6 приведены кривые изменения коэффициентов тангенциальной и осевой скоростей по длине очага деформации для прошивки сплошной заготовки в гильзу. В случае прокатки труб

Национальная академия наук Беларуси

и сплошных заготовок характер изменения направления вектора сил трения является идентичным [5]. Таким образом, согласно известным теоретическим данным, в случае прокатки труб на всей длине очага деформации в зоне контакта заготовки с валками радиальные, тангенциальные и осевые напряжения являются сжимающими.

Распределение напряжений в деформируемой заготовке при установившемся процессе исследовали в четырех сечениях, перпендикулярных оси прокатки (рис. 2):

первое сечение – в начале обжимаемого участка (диаметр заготовки 116 мм);

второе сечение – в середине очага деформации (диаметр заготовки 104 мм);

третье сечение – в зоне пережима (диаметр заготовки 87 мм);

четвертое сечение – на выходе из пережима на расстоянии 5 мм от него.

Зависимости распределения напряжений по сечениям стенки заготовки представлены на рис. 7.

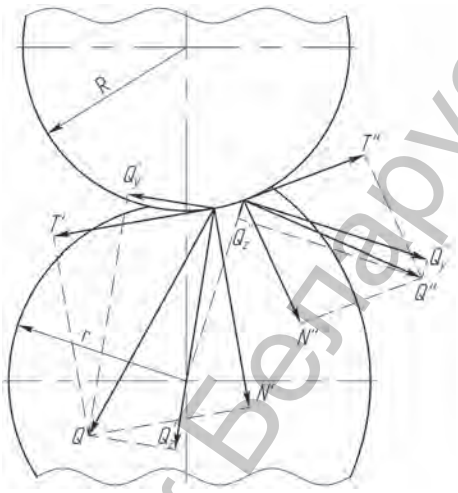


Рис. 5. Схема действия сил трения, нормального давления и их результирующих, а также проекций результирующих сил в тангенциальном и радиальном направлениях

Анализ распределения напряжений обжимаемого участка заготовки длиной 50 мм показал, что в первом сечении в зоне контакта заготовки с валками преобладают сжимающие напряжения, на внутренней поверхности трубной заготовки только радиальные напряжения являются растягивающими.

В середине обжимаемого конусного участка в области контакта заготовки с валками все виды напряжений имеют значения, увеличивающиеся по модулю, остающиеся сжимающими. На внутренней поверхности трубной заготовки величины всехисследуемых напряжений увеличиваются, причем осевые напряжения переходят в растягивающие.

В зоне пережима сохраняются прежние тенденции по увеличению напряжений при движении от внешней поверхности заготовки к внутренней.

В четвертом сечении на внешней поверхности напряжения остались сжимающими, а их значения уменьшились по модулю. На внутренней поверхности заготовки напряжения близки к нулю.

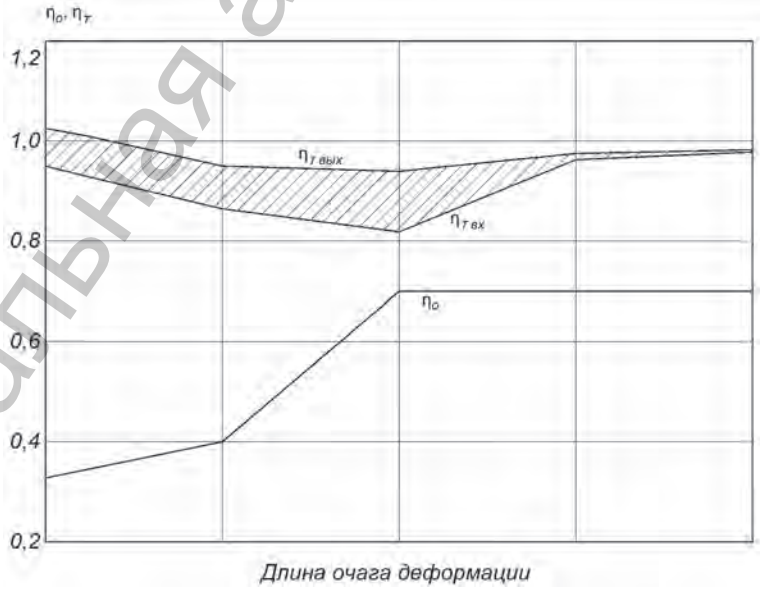


Рис. 6. Распределение коэффициентов скорости по длине очага деформации

Национальная академия наук Беларуси

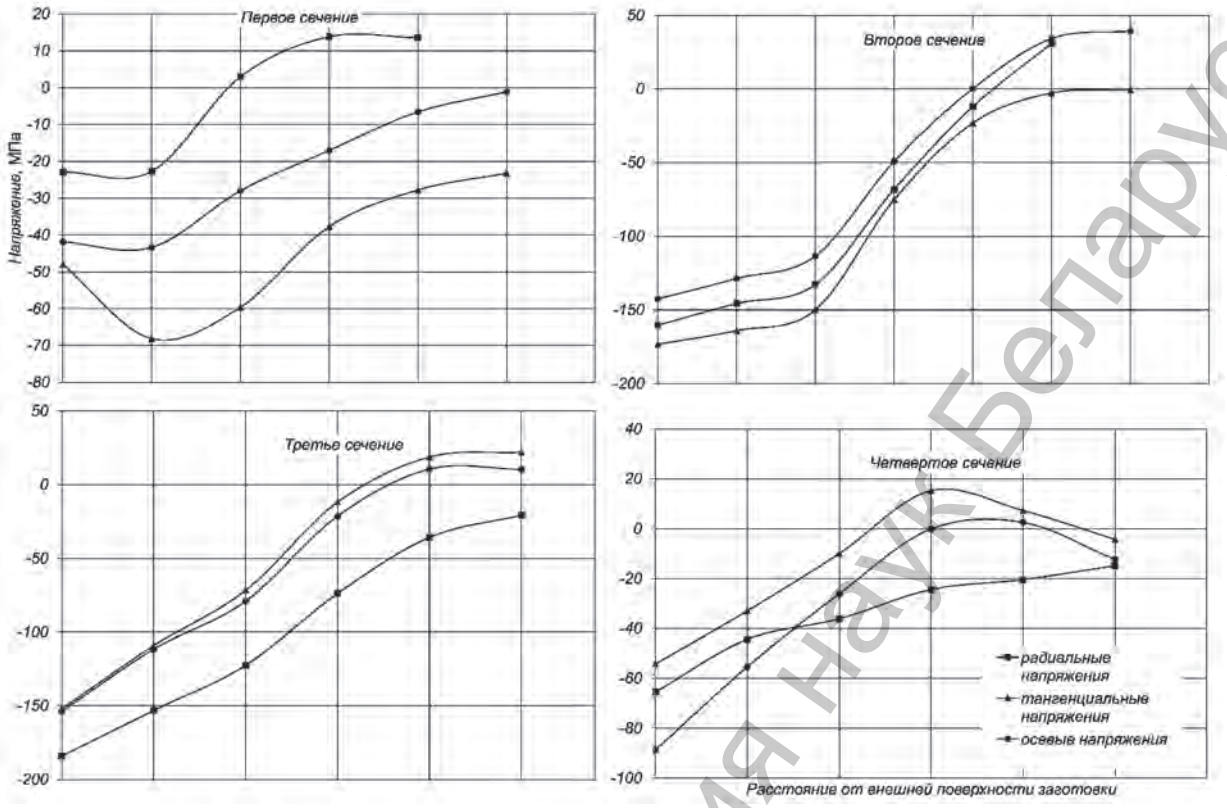


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений по толщине стенки в четырех сечениях

Во всех исследованных сечениях при удалении от внешней поверхности заготовки происходит уменьшение сжимающих напряжений, что вызвано увеличением объема металла, подвергаемого деформации.

Распределение нормальных напряжений по длине очага деформации на внутренней и внешней поверхностях трубной заготовки показано на рис. 8. На внутренней поверхности заготовки значения напряжений остаются относительно стабильными и близкими нулю. На внешней по-

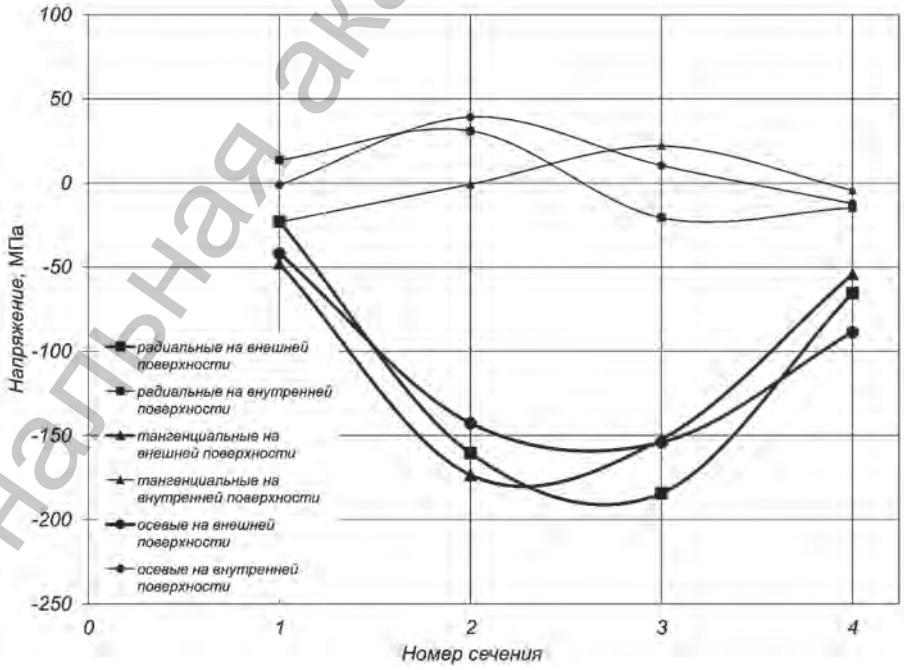


Рис. 8. Распределение нормальных напряжений по длине очага деформации

Национальная академия наук Беларуси

верхности в зоне контакта заготовки с валками нормальные напряжения достигают минимума, т. е. максимального по модулю сжимающего напряжения, между вторым и третьим сечениями (середина очага деформации и точка пережима соответственно).

Известно, что при ПВП возникает сложное НДС, близкое к схеме всестороннего сжатия, при котором напряжения в зоне контакта заготовки с валками и в зоне между валками имеют разный знак. Данный циклический характер возникающих напряжений позволяет активно влиять на свойства обрабатываемых заготовок. На рис. 9 отчетливо видны чередующиеся зоны растягивающих и сжимающих напряжений, которые находятся между зонами контакта валков с заготовкой и в этих зонах соответственно. Напряжения измерены в середине очага деформации (второе сечение) на поверхности трубной заготовки. Начало графика соответствует зоне контакта между заготовкой и валком.

Основной деформационный эффект проработки структуры металла в обжимаемой заготовке достигается за счет макросдвиговых процессов. При ПВП угол α влияет на траекторию тангенциального сдвига и глубину проникновения сдвиговой деформации во внутренние объемы металла [6, 7].

В литературе известны работы, где показано измельчение кристаллов кремния в силуминах с отметки примерно 40 мкм до 15–20 мкм при ПВП со степенью деформации 50 % (например, [8, 9]). Это существенно превосходит результат применения прессования, при котором даже при значительных степенях деформации (87,2 %) измельчения кристаллов кремния практически не происходит (размер кристаллов уменьшается до 35 мкм, что соответствует 32 % при ПВП).

Основными видами нагрузок на оси являются изгиб, кручение и совместное действие изгиба и кручения [10]. При любом способе деформации образуется макроструктура, характерная только для данного процесса обработки давлением. Эта сформированная макроструктура в последующем и будет определять уровень служебных свойств изделия. Производство изделий способами, которые позволяют создавать в них макроструктуру в соответствии с функциональным предназначением, предоставляет большие возможности по улучшению потребительских свойств. Особенности приложения деформирующих усилий при ПВП формируют в заготовке макроструктуру, которая придаст осям конструктивную анизотропию, способную повысить ресурс работоспособности при эксплуатации [7].

Зависимость коэффициента осевой скорости η_o металла заготовки при прохождении через очаг деформации, полученная в результате расчета, представлена на рис. 10. Как видно из рисунка, характер изменения коэффициента осевой скорости соответствует графику рис. 6. При диаметре валка в пережиме 300 мм и частоте вращения 20 об/мин линейная скорость на бочке валка

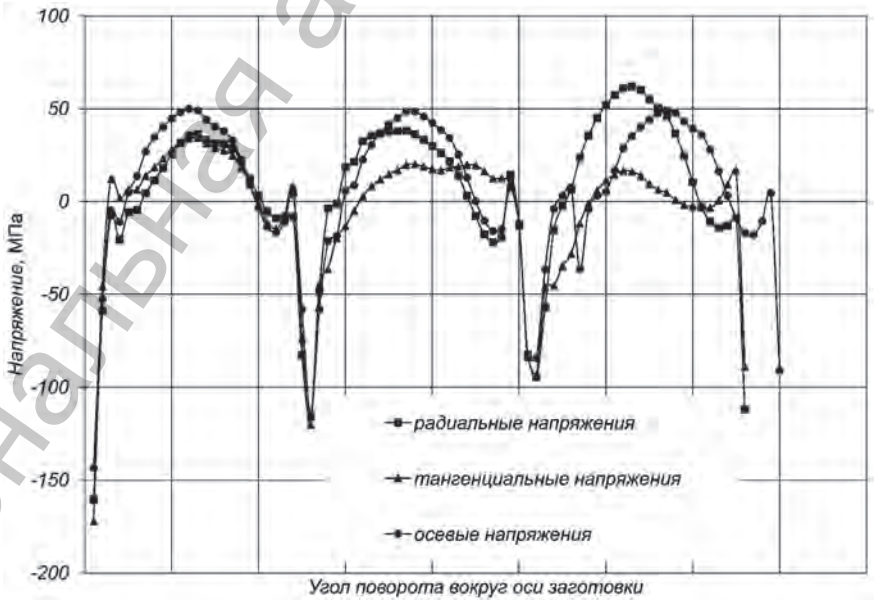


Рис. 9. Изменение нормальных напряжений на поверхности заготовки по окружности во втором сечении

Национальная академия наук Беларуси

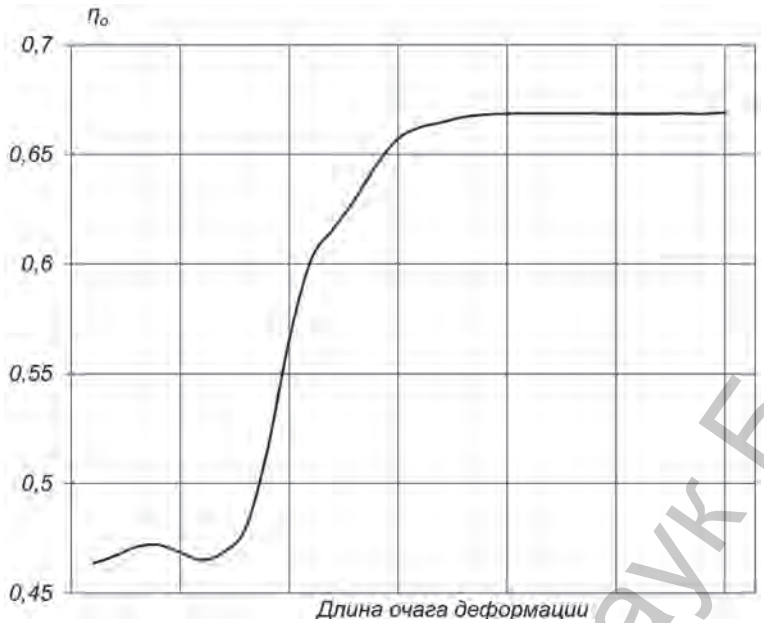


Рис. 10. Характер изменения коэффициента осевой скорости η_o по длине очага деформации

равна 314 мм/с. При $\alpha = 5°$ осевая составляющая равна 27,37 мм/с. При моделировании осевая скорость заготовки до очага деформации составляет 12,7 мм/с ($\eta_o = 0,46$), за очагом деформации она равна 18,3 мм/с ($\eta_o = 0,67$).

Соответствие построенной модели реальному процессу является ее важным параметром. В данном случае характер полученных зависимостей отвечает теоретическим представлениям, базирующимся на многочисленных экспериментах.

Литература

1. *Луговский В. М., Третьяков Е. М.* // Исследования в области обработки металлов давлением. М., 1960. С. 25–37.
2. *Тетерин П. К.* Теория поперечно-винтовой прокатки. М., 1971.
3. *Александров А. Я., Ахметзянов М. Х.* Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М., 1973.
4. *Потапов И. Н., Полухин П. И.* Технология винтовой прокатки. М., 1990.
5. *Потапов И. Н., Полухин П. И.* Новая технология винтовой прокатки. М., 1975.
6. *Романенко В. П., Фомин А. В., Бегнарский В. В.* и др. // Металлург. 2012. № 10. С. 51–56.
7. *Романенко В. П., Фомин А. В., Никулин А. Н.* // Металлург. 2013. № 4. С. 63–68.
8. *Богатов А. А., Панов Е. И.* // Металлург. 2013. № 5. С. 75–81.
9. *Панов Е. И.* // Металлург. 2006. № 4. С. 69–75.
10. *Школьник Л. М.* Полые оси и валы. М., 1968.

V. A. TAMILA, V. V. LEVKOVICH

STRESS-STRAIN STATE AT THE PROCESS OF END FORMING OF THICK WALLED TUBES

Summary

The paper is focused on using the finite element method to simulate and analyze the process of end forming of thick walled tubes with three-roll mill. First, a geometric model of the process that considers roll profiles, offset angle and inclined angle of the rolls was constructed. Then, a three-dimensional finite element simulation was conducted to obtain stress distribution in the reduced workpiece.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 681.7.023.72

И. П. ФИЛОНОВ, Е. О. ЛАПТЕВА, А. С. КОЗЕРУК, М. И. ФИЛОНОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКИ ЛИНЗ

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 21.12.2013)

При обработке линз на финишных операциях по классической технологии их поочередно закрепляют за рабочие поверхности на металлическое наклеечное приспособление с помощью смолы. Из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения металла, смолы и стекла происходит деформация линзы, что в конечном итоге приводит к возникновению погрешностей на ее обработанной поверхности. Во избежание этого явления предложены способ одновременной двусторонней обработки деталей данного типа [1], исключающей их крепление за исполнительные поверхности, и станок для реализации этого способа [2]. Кинематическая схема такого станка приведена на рис. 1. Он состоит из двух секций, каждая из которых обеспечивает независимое и гибкое регулирование ее наладочных параметров в широких пределах при закреплении заготовки линзы за боковую нерабочую поверхность.

Рассмотрим секцию станка, предназначенную для обработки выпуклой поверхности линзы.

Для изучения движения верхнего инструмента *7* по обрабатываемой поверхности (например, выпуклой) вращающейся линзы *8* введем систему координат *O′xyz*, ось *O′x* которой проходит через центр кривизны *O* сопряженных поверхностей детали и верхнего инструмента параллельно плоскости *D′x′y′* шарнирного четырехзвенника *1–4*, а центр *O′* является точкой пересечения этой оси с осью вращения звена *4*.

Введем также вектор $\vec{l}_{AC}$, положение которого вместе с центром *C* рабочей поверхности верхнего инструмента будем определять углом ψ_C в горизонтальной плоскости и углом θ_C в вертикальной плоскости (рис. 2). На рисунке символами *A′*, *B′*, *C′*, *F′* обозначены проекции точек *A*, *B*, *C*, *F* на плоскость *O′xy*. Точки *A′*, *B′*, *F′* расположены на одной прямой, так как точки *A*, *B*, *F* находятся в одной вертикальной плоскости. Точка *B′* может быть расположена левее или правее точки *F′* в зависимости от угла φ_5 между осью *O′x* системы координат *O′xyz* и осью выходного звена исполнительного механизма станка (штанги, рис. 2, *б*), который в свою очередь зависит от геометрических параметров рабочей зоны технологического оборудования, инструмента и заготовки. В случае обработки сферических поверхностей угол φ_5 меняется с изменением положения инструмента относительно детали, т. е. является функцией времени или обобщенной координаты φ_2, которая представляет собой угол поворота входного звена *2* исполнительного механизма станка (кривошипа; выходное звено отмеченного механизма – штанга *5*).

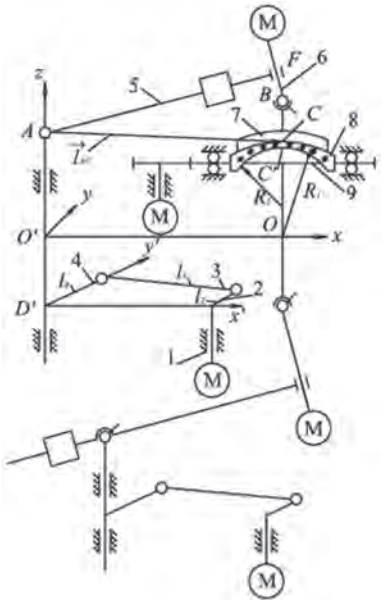


Рис. 1. Кинематическая схема станка для одновременной двусторонней обработки линз

Введем углы θ_5, θ_C и ψ_C, первые два из которых (рис. 2, *а*) – углы между плоскостью, проходящей через шарнир *A* и парал-

Национальная академия наук Беларуси

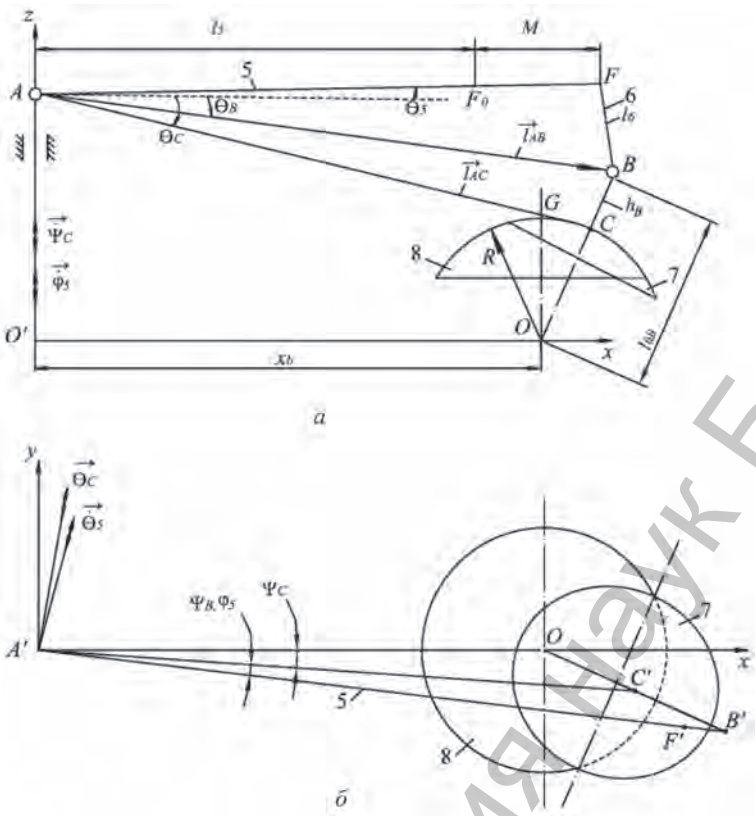


Рис. 2. Рабочая зона станка ШП: *а* – вид сбоку, *б* – вид сверху

лельной плоскости $x'y'$, в которой находится шарнирный четырехзвенник *1–4* (рис. 1), и соответственно осью штанги 5 и вектором $\vec{l}_{AC}$, а ψ_C – угол между $\vec{l}_{AC}$ и Ox (рис. 2, *б*).

Установим зависимости углов θ_5, θ_C, ψ_C от обобщенной координаты φ_2 и законы $\dot{\theta}_5$, $\dot{\theta}_C$, $\dot{\psi}_C$ их изменения. Используя вид функции φ_5 [3], можно выявить связь углов θ_5, θ_C и ψ_C с углом φ_5. Тем самым будет установлена искомая связь по схеме

$$\psi_C = \psi_C(\varphi_5) = \psi_C(\varphi_5(\varphi_2)) = \psi_C(\varphi_2).$$

Аналогично вектору $\vec{l}_{AC}$ введем вектор $\vec{l}_{AB}$, положение которого в горизонтальной плоскости будем определять углом ψ_B, а в вертикальной – углом θ_B (рис. 2). Так как штанга *5* и вектор $\vec{l}_{AB}$ расположены в одной вертикальной плоскости (рис. 2, *а*), то для любого положения исполнительного механизма станка

$$\psi_B = \varphi_5. \tag{1}$$

Звенья *5* и *6* длиной соответственно l_5 и l_6 (рис. 2, *а*) не меняют взаимного положения в процессе обработки, причем

$$\theta_B = \operatorname{arctg}\frac{l_6}{l_5 + M} - \theta_5, \tag{2}$$

где M – величина смещения поводка от нулевого положения F_0 на выходном звене исполнительного механизма станка.

Как видно из соотношений (1) и (2), для решения поставленной задачи необходимо установить зависимости углов θ_B, θ_C, ψ_C от угла ψ_B. С этой целью определим координаты x_B, y_B, z_B центра B шарового наконечника поводка верхнего инструмента (рис. 3).

Для точки B известными являются расстояния l_{AB} и l_{OB} (рис. 2, *а*):

$$l_{AB} = \sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2},$$

Национальная академия наук Беларуси

$$l_{OB} = l_{OC} + l_{CB} = R + h_B ,$$

где h_B – длина хвостовика верхнего инструмента; R – радиус обрабатываемой сферической поверхности линзы.

Запишем координаты точек A и O:

$$A = A(0, 0, z_A),$$

$$O = O(x_G, 0, 0),$$

где z_A – расстояние от оси $D'x'$ до шарнира A (рис. 1), x_G – расстояние между осями вращения вала *4* штанги верхнего инструмента и обрабатываемой линзы (рис. 2, *а*).

Выразим длины векторов $\vec{l}_{AB}$ и $\vec{l}_{OB}$ через координаты точек соответственно A, B и O, B:

$$x_B^2 + y_B^2 + (z_B - z_A)^2 = l_{AB}^2. \tag{3}$$

$$(x_B - x_G)^2 + y_B^2 + z_B^2 = l_{OB}^2 . \tag{4}$$

Также можно записать (рис. 3)

$$y_B = x_B \operatorname{tg} \psi_B. \tag{5}$$

Решив систему нелинейных уравнений (3)–(5), получим

$$x_B^2 + (x_B \operatorname{tg}\psi_B)^2 + (z_B - z_A)^2 = l_{AB}^2,$$

$$(x_B - x_G)^2 + x_B^2 \operatorname{tg}^2 \psi_B + z_B^2 = l_{OB}^2 .$$

Если из данных уравнений найти z_B и в этом выражении провести соответствующие преобразования, введя обозначения $A = x_G$, $B = l_{OB}^2 - x_G^2 + z_A^2 - l_{AB}^2$, то получим квадратное уравнение относительно x_B:

$$x_B^2(A^2 + 4z_A^2 + 4z_A^2 \operatorname{tg}^2\psi_B) + 2x_B(AB - 4z_A^2 x_G) + B^2 - 4z_A^2(l_{OB}^2 - x_G^2) = 0 ,$$

корнями которого являются

$$x_B^{(1)} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \qquad x_B^{(2)} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \tag{6}$$

где $a = A^2 + 4z_A^2(1 + \operatorname{tg}^2\psi_B)$, $b = 2(AB - 4z_A^2 x_G)$, $c = B^2 - 4z_A^2(l_{OB}^2 - x_G^2)$.

Таким образом, система уравнений (3)–(5) дает два решения: $(x_B^{(1)}, y_B^{(1)}, z_B^{(1)})$ и $(x_B^{(2)}, y_B^{(2)}, z_B^{(2)})$. Проанализируем полученные решения, дав им геометрическую интерпретацию. Побочное решение появилось оттого, что с точки зрения математики анализируемой системе уравнений удовлетворяет еще одно гипотетическое положение центра B шарового наконечника поводка ниже координатной плоскости $O'xy$. Для этого побочного решения $z_B < 0$. Поэтому из двух решений выбираем то, для которого $z_B > 0$. Кроме того, из рис. 3 видно, что для побочного решения величина x_B меньше, чем искомое значение. Следовательно, x_B необходимо выбрать из условия:

$$x_B = \max\left\{x_B^{(1)}, x_B^{(2)}\right\}. \tag{7}$$

Таким образом, для любого значения обобщенной координаты φ_2 представляется возможным определить ψ_B, а зная ψ_B, с помощью выражений (5)–(7) можно рассчитать координаты центра B шарового наконечника поводка. Определив эти координаты, легко вычислить искомые величины θ_B, θ_C и ψ_C. В частности, из рис. 2, *а* можно записать, что

Национальная академия наук Беларуси

$$\theta_B = \arcsin\frac{z_A - z_B}{l_{AB}}, \tag{8}$$

$$\theta_C = \arcsin\frac{z_A - z_C}{l_{AC}}. \tag{9}$$

При этом, как следует из подобия треугольников *OBB′* и *OCC′* на рис. 3:

$$z_C = \frac{z_B R}{R + h_B}.$$

Получим значение угла ψ_C. Первоначально из треугольника *OO′B′* по теореме синусов найдем угол *O′OB′* в виде

$$\sin\angle O'OB' = \frac{l_{O'B'}\sin\psi_B}{l_{OB'}}.$$

Величины $l_{O'B'}$ и $l_{OB'}$ определим следующим образом:

$$l_{O'B'} = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = x_B\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\,\psi_B} = \frac{x_B}{\cos\psi_B},\ \ l_{OB'} = \sqrt{(x_B - x_G)^2 + y_B^2}.$$

С учетом отмеченного

$$\sin\angle O'OB' = \frac{x_B\,\mathrm{tg}\,\psi_B}{\sqrt{(x_B - x_G)^2 + y_B^2}}.$$

Тогда из треугольника *O′OC′* можно записать

$$\sin\psi_C = \frac{l_{OC'}\sin\angle O'OB'}{l_{O'C'}}. \tag{10}$$

Величину $l_{OC'}$ найдем из подобия треугольников *OBB′* и *OCC′*:

$$l_{OC'} = \frac{l_{OB'}R}{R + h_B} = \frac{R\sqrt{(x_B - x_G)^2 + y_B^2}}{R + h_B}, \tag{11}$$

а величину $l_{O'C'}$ – из треугольника *O′OC′* по теореме косинусов:

$$l_{O'C'}^2 = l_{OC'}^2 + x_G^2 - 2l_{OC'}x_G\cos\angle O'OB'. \tag{12}$$

В результате получена совокупность выражений, устанавливающих взаимосвязь между значениями обобщенной координаты φ_2 и углами φ_5, θ_5 и θ_C, ψ_C, характеризующими соответственно положения штанги станка и центра *C* рабочей поверхности инструмента.

Для моделирования кинематических связей рассматриваемого станка необходимо определить законы движения выходного звена его исполнительного механизма $\dot{\theta}_5$ и радиуса-вектора $\vec{l}_{AC}$ центра *C* рабочей поверхности инструмента $\dot{\psi}_C$ и $\dot{\theta}_C$. Из выражения (2) видно, что закон $\dot{\theta}_5$ движения штанги совпадает с законом $\dot{\theta}_B$ движения вектора $\vec{l}_{AB}$.

Определим выражение для скорости $\dot{\theta}_B$. С этой целью векторное равенство $\vec{l}_{AB} = \vec{l}_{AO} + \vec{l}_{OB}$ (рис. 3) спроецируем последовательно на оси *O′z*, *O′x*, *O′y* и продифференцируем полученные уравнения по обобщенной координате φ_2. В результате получим

$$l_{AB}\theta'_B\cos\theta_B = -l_{OB}\Delta'\sin\Delta,$$

Национальная академия наук Беларуси

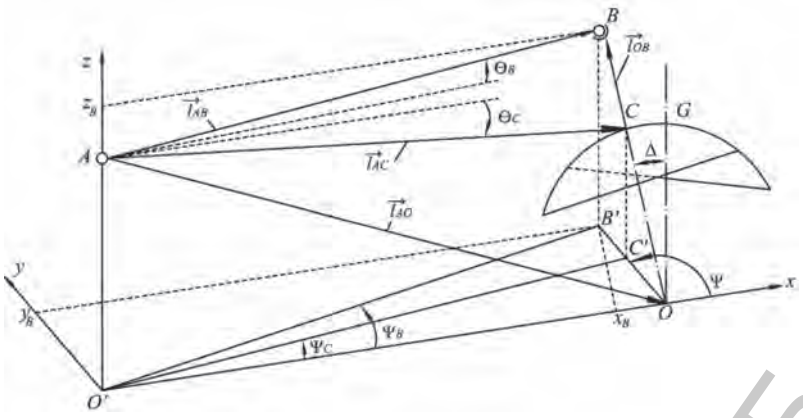


Рис. 3. К определению координат центра шарового наконечника поводка

$$-l_{AB}\theta'_B \sin\theta_B \cos\psi_B - l_{AB}\psi'_B \cos\theta_B \sin\psi_B = -l_{DE}\psi'_B \sin\psi_B + l_{OB}\Delta' \cos\Delta\cos\psi - l_{OB}\psi' \sin\Delta\sin\psi\,,$$

$$-l_{AB}\theta'_B \sin\theta_B \sin\psi_B + l_{AB}\psi'_B \cos\theta_B \cos\psi_B = l_{DE}\psi'_B \cos\psi_B + l_{OB}\Delta' \cos\Delta\sin\psi + l_{OB}\psi' \sin\Delta\cos\psi\,,$$

где ψ'_B, θ'_B, Δ', ψ' – аналоги угловых скоростей $\dot{\psi}_B$, $\dot{\theta}_B$, $\dot{\Delta}$, $\dot{\psi}$. Аналог ψ'_B угловой скорости $\dot{\psi}_B$ известен [3]:

$$\psi'_B = \varphi'_5 = \varphi'_4 = i_{42}. \tag{13}$$

Следовательно, имеем систему из трех уравнений относительно трех неизвестных θ'_B, Δ' и ψ'. Решив ее относительно θ'_B, получим

$$\theta'_B = \frac{\psi'_B (l_{AB}\cos\theta_B - l_{DE})(\sin\psi_B - \cos\psi_B)}{l_{AB}\begin{pmatrix} -\sin\theta_B \sin\psi_B + \operatorname{ctg}\Delta\cos\theta_B \sin\psi - \\ -\operatorname{ctg}\psi\left[\sin\theta_B \cos\psi_B - \operatorname{ctg}\Delta\cos\theta_B \cos\psi\right] \end{pmatrix}}. \tag{14}$$

В результате искомая угловая скорость принимает вид

$$\dot{\theta}_B = \theta'_B \omega_2.$$

Установим аналоги скоростей ψ'_C и θ'_C центра C рабочей поверхности верхнего инструмента, для этого векторное равенство $\vec{l}_{AC} = \vec{l}_{AO} + \vec{l}_{OC}$ спроецируем на оси системы координат $O'xyz$. Продифференцировав полученную систему уравнений по обобщенной координате φ_2 и решив ее относительно ψ'_C, можно записать

$$\psi'_C = \frac{\begin{pmatrix} +R\Delta'(\cos\Delta\cos\psi - \operatorname{tg}\theta_C \sin\Delta\cos\psi_C) - \\ -R\psi'\sin\Delta\sin\psi \end{pmatrix}}{-l_{AC}\cos\theta_C \sin\psi_C}. \tag{15}$$

В случае известных аналогов ψ'_C и θ'_C угловых скоростей $\dot{\psi}_C$ и $\dot{\theta}_C$ их значения определяются из соотношений $\dot{\psi}_C = \psi'_C \omega_2$ и $\dot{\theta}_C = \theta'_C \omega_2$.

Скорость υ_C центра C рабочей поверхности верхнего инструмента можно получить из выражения

$$\vec{\upsilon}_C = \left(\vec{\dot{\psi}}_C + \vec{\dot{\theta}}_C\right)\vec{l}_{AC}, \tag{16}$$

где

$$\vec{\dot{\psi}}_C = (0\ 0\ \dot{\psi}_C)^T,$$

Национальная академия наук Беларуси

$$\dot{\vec{\theta}}_C = (\dot{\theta}_C \sin\psi_C \;\; \dot{\theta}_C \cos\psi_C \; 0)^T,$$

$$\vec{l}_{AC} = (l_{AC}\cos\theta_C \cos\psi_C \;\; l_{AC}\cos\theta_C \sin\psi_C \;\; l_{AC}\sin\theta_C)^T.$$

Вектор $\dot{\vec{\psi}}_C + \dot{\vec{\theta}}_C$ имеет следующие проекции на оси системы координат *O'xyz:* $\dot{\theta}_C \sin\psi_C$, $\dot{\theta}_C \cos\psi_C$, $\dot{\psi}_C$. При учете равенства (16) вектор $\vec{\upsilon}_C$ запишем в виде линейной комбинации ортов:

$$\vec{\upsilon}_C = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{\theta}_C \sin\psi_C & -\dot{\theta}_C \cos\psi_C & \dot{\psi}_C \\ l_{AC}\cos\theta_C \cos\psi_C & l_{AC}\cos\theta_C \sin\psi_C & l_{AC}\sin\theta_C \end{vmatrix} =$$

$$= (-\dot{\theta}_C l_{AC}\cos\psi_C \sin\theta_C - l_{AC}\dot{\psi}_C \cos\theta_C \sin\psi_C)\vec{i} - (\dot{\theta}_C l_{AC}\sin\psi_C \sin\theta_C - l_{AC}\dot{\psi}_C \cos\theta_C \cos\psi_C)\vec{j} +$$

$$+(\dot{\theta}_C l_{AC}\sin^2\psi_C \cos\theta_C + l_{AC}\dot{\theta}_C \cos^2\psi_C \cos\theta_C)\vec{k}$$

и введем обозначения

$$\upsilon_X = -\dot{\theta}_C l_{AC}\cos\psi_C \sin\theta_C - l_{AC}\dot{\psi}_C \cos\theta_C \sin\psi_C,$$

$$\upsilon_Y = -\dot{\theta}_C l_{AC}\sin\psi_C \sin\theta_C + l_{AC}\dot{\psi}_C \cos\theta_C \cos\psi_C,$$

$$\upsilon_Z = \dot{\theta}_C l_{AC}\sin^2\psi_C \cos\theta_C + l_{AC}\dot{\theta}_C \cos^2\psi_C \cos\theta_C. \qquad (17)$$

Тогда $\vec{\upsilon}_C = (\upsilon_X \;\; \upsilon_Y \;\; \upsilon_Z)^T$, $\upsilon_C = |\vec{\upsilon}_C| = \sqrt{\upsilon_X^2 + \upsilon_Y^2 + \upsilon_Z^2}$.

Проделав аналогичные операции, можно получить выражения для составляющих скорости $\upsilon_{C'}$ центра C' рабочей поверхности нижнего инструмента *9* (рис. 1).

Таким образом, выполненное математическое моделирование геометрических и кинематических связей технологического оборудования для одновременной двусторонней обработки линз позволило разработать методику расчета законов возвратно-вращательных движений инструментов в виде следующего алгоритма.

Шаг 1. Ввод геометрических параметров станка: l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, x_G.

Шаг 2. Ввод параметров инструмента, заготовки и режимов обработки: h_B, M, L, ω_2.

Шаг 3. Ввод параметра моделирования K, который представляет собой выбранное количество положений кривошипа в пределах его поворота на угол 2π.

Шаг 4. Расчет длины кривошипа l_2:

$$\varphi_4^{\text{сим}} := \arccos\frac{l_1^2 + l_1^2 - l_3^2}{2l_1 l_4},$$

$$l_2 := \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos\left(\varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin\frac{L}{2R}\right)} - l_3.$$

Шаг 5. Выбор положения механизма:

$$k := 1.$$

Шаг 6. Расчет обобщенной координаты в положении k:

$$\varphi_2^{(k)} = \frac{2\pi}{K}(k-1).$$

Национальная академия наук Беларуси

Шаг 7. Расчет угла φ_3:

$$\varphi_S^{(k)} := \operatorname{arctg}\frac{l_2 \sin\varphi_2^{(k)}}{l_1 + l_2\cos\varphi_2^{(k)}},$$

$$s^{(k)} := \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos\varphi_2^{(k)}},$$

$$\varphi_{3S}^{(k)} := \arccos\frac{l_3^2 + (s^{(k)})^2 - l_4^2}{2l_4 s^{(k)}},$$

$$\varphi_3^{(k)} := \varphi_{3S}^{(k)} + \varphi_S^{(k)}.$$

Шаг 8. Расчет угла $\varphi_4^{(k)}$:

$$\varphi_{4S}^{(k)} := \arccos\frac{l_4^2 + (s^{(k)})^2 - l_3^2}{2l_4 s^{(k)}},$$

$$\varphi_4^{(k)} := \varphi_{4S}^{(k)} + \varphi_S^{(k)}.$$

Шаг 9. Расчет значения кинематической передаточной функции исполнительного механизма в *K*-том положении:

$$i_{42}^{(k)} := \frac{l_2 \sin(\varphi_2^{(k)} - \varphi_3^{(k)})}{l_4 \sin(\varphi_4^{(k)} - \varphi_3^{(k)})}.$$

Шаг 10. Расчет момента времени t_k: если ω_2 = const, то

$$T_2 := \frac{2\pi}{\omega_2},$$

$$t^{(k)} := \frac{T_2}{K}k;$$

в общем случае $\varphi_2 = f(t)$ и

$$t^{(k)} := f^{-1}(\varphi_2^{(k)}).$$

Шаг 11. Расчет скорости $\upsilon_C^{(k)}$:

$$\upsilon_C^{(k)} := i_{42}^{(k)}\omega(t^{(k)})/R.$$

Шаг 12. Запись в файл значений $t^{(k)}$ и $\upsilon_C^{(k)}$.

Шаг 13. Переход к следующему положению механизма:

$$k := k + 1.$$

Шаг 14. Проверка на завершение расчетов: если $k \le K$, то перейти к **шагу 6.**

Шаг 15. Вывод на печать результатов расчета.

Шаг 16. Проверка на необходимость повторного расчета при новых режимах обработки: если необходим повторный расчет, то перейти к **шагу 2.**

Шаг 17. Окончание процесса.

Литература

1. Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: Пат. 7911 Респ. Беларусь, МПК B 24B 13/00/ А. С. Козерук, И. П. Филонов; заявитель – БНТУ. № a 20030242; заявл. 18.03.2003; опубл. 30.04.2006 // Офиц. бюл. / Нац. центр интел. собственности. 2006. № 2. С. 158.

2. Станок для одновременной двусторонней обработки линз с крутыми вогнутыми поверхностями: Пат. 10726 Респ. Беларусь, МПК B 24B 13/00/ А. С. Козерук, И. П. Филонов, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович, Е. С. Таболина; заявитель – БНТУ. № a 20060589; заявл. 14.06.2006; опубл. 30.06.2008 // Офиц. бюл. / Нац. центр интел. собственности. 2008. № 3. С. 76.

3. *Артоболевский И. И.* Теория механизмов и машин. 4-е изд. М., 1988.

Национальная академия наук Беларуси

I. P. FILONOV, E. O. LAPTEVA, A. S. KOZERUK, M. I. FILONOVA

SIMULATION OF GEOMETRICAL AND KINEMATIC RELATIONS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR TWO-SIDED TREATMENT OF LENSES

Summary

A kinematic scheme of the machine for simultaneous bilateral processing of lenses is provided and a mathematical description of its working zone is executed. The mathematical model of geometrical and kinematic relationship of input and output links of the executive mechanism of the mentioned machine is developed. Analytical expressions for the figurative speed of the top and lower tools are obtamed and a method of calculation of laws of their returnable rotary motion is offered.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 537.84:621.03

В. Г. БАШТОВОЙ, А. А. МОЦАР, А. Г. РЕКС

УПРУГИЕ СВОЙСТВА КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ЯДРОМ

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 15.05.2014)

Введение. Капля магнитной жидкости с магнитным ядром является важным объектом изучения, в первую очередь, из-за возможности практического применения такой системы в различных магнитожидкостных устройствах (опоры, подвесы и демпферы). Например, капля магнитной жидкости с постоянным магнитом используется в качестве инерционного элемента в магнитожидкостных демпферах [1, 2].

Возможность использования данной системы в качестве инерционного элемента связана с некоторыми особенностями статики магнитных тел в магнитной жидкости. Если магнит поместить в немагнитный контейнер, заполненный магнитной жидкостью, то под действием объемной магнитной силы он будет плавать в магнитной жидкости, не касаясь ограничивающих твердых стенок. Приближение же магнита к стенкам будет вызывать асимметрию сил давления, действующих на него со стороны магнитной жидкости, и приводить к возникновению результирующей силы, отталкивающей магнит от стенок контейнера [3, 4].

Возможен случай, когда жидкость, притягиваясь к магниту, формирует каплю с преобладающей свободной поверхностью. Такая капля может перемещаться как единое целое и благодаря легкой подвижности обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Деформация капли также приводит к перераспределению давления в жидкости и возникновению объемной магнитной силы, препятствующей этой деформации, т. е. можно утверждать, что капля обладает упругостью.

Упругость инерционного элемента является одной из важнейших технических характеристик магнитожидкостных гасителей колебаний. Именно величина упругих сил определяет амплитуду колебаний инерционного элемента. Чем больше эта амплитуда, тем больше величина вязкой диссипации энергии в системе. Поэтому для конструирования такого рода устройств необходимо знать, какие факторы влияют на упругие свойства капли магнитной жидкости с магнитным ядром. Кроме того, способы управления упругими характеристиками такой капли представляют технический интерес для создания адаптивных виброзащитных устройств, способных подстраиваться под параметры вибраций в процессе своей работы. К одному из таких способов относится изменение магнитного поля магнитного ядра капли.

Упругие свойства капли магнитной жидкости с магнитным ядром, в качестве которого использован постоянный магнит, исследованы в каналах различной конфигурации в [5]. В [6] исследована капля магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром, конструкция которого предполагает возможность изменения собственного результирующего магнитного поля. Изучено влияние намагниченности магнитной жидкости, магнитного поля ядра, а также геометрии рассматриваемой системы на статику такой капли в канале клиновидной формы.

В данной статье рассмотрены упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром в канале клиновидной формы. Дана оценка влияния магнитного поля комбинированного источника, намагниченности жидкости, объема капли и геометрии канала на коэффициент упругости и силу упругости, возникающую в такой капле.

Национальная академия наук Беларуси

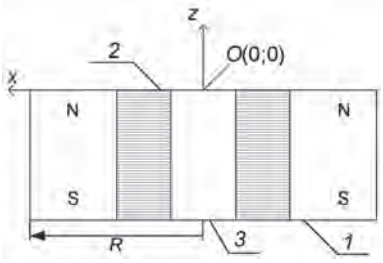


Рис. 1. Комбинированный источник магнитного поля

Комбинированный источник магнитного поля. Управление конфигурацией поля магнитного ядра может быть реализовано путем замещения части постоянного магнита электромагнитом с сердечником из намагничивающегося материала.

В настоящем исследовании комбинированный магнит составлен из постоянного кольцевого магнита *1*, в отверстие которого помещен электромагнит *2* с сердечником *3* из намагничивающегося материала. Изменение результирующего поля комбинированного источника осуществлялось подачей напряжения на электромагнит (рис. 1).

В качестве постоянного магнита выбран кольцевой ферритбариевый магнит. Величина напряженности магнитного поля H на поверхности магнита по модулю доходила до 90 кА/м. Внешний радиус магнита 18 мм, внутренний радиус 9 мм, высота магнита 16 мм. Диаметр электромагнита 17 мм, высота 14 мм, число витков 822. Материал сердечника – сталь Ст. 3, диаметр 6 мм, высота 14 мм.

Для оценки возможности изменения величины магнитного поля измерена вертикальная составляющая его индукции на вертикальной оси симметрии комбинированного магнита, а также в точке, удаленной от вертикальной оси симметрии на величину 3/4 R (рис 1). Измерения проводились с помощью тесламетра с точностью до 0,1 мТл с последующим расчетом напряженности магнитного поля H. В зависимости от направления протекающего тока результирующее магнитное поле источника либо усиливалось (в данном случае условно обозначим такое направление тока как положительное), либо ослабевало (отрицательное направление тока).

Результаты измерений поля на оси симметрии представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, включение электромагнита приводит к изменению напряженности поля. На оси симметрии магнита у его поверхности при токах $I = 0$, + 350 и –350 мА напряженность магнитного поля составляла 84, 112 и 58 кА/м соответственно. Измерение магнитного поля вдоль вертикальной оси в точке 3/4 R показало, что величина результирующего поля в этой области остается практически неизменной. Поле, генерируемое электромагнитом, вносит существенный вклад в результирующее поле в ограниченной области, не превышающей размеров самого электромагнита.

Экспериментальная установка и методика измерений. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Капля магнитной жидкости *1* известного объема V, внутри которой расположен комбинированный магнит *2*, помещена в канал клиновидной формы *3* с заданным значением угла раствора канала γ. Геометрия комбинированного магнита описана ранее. Канал

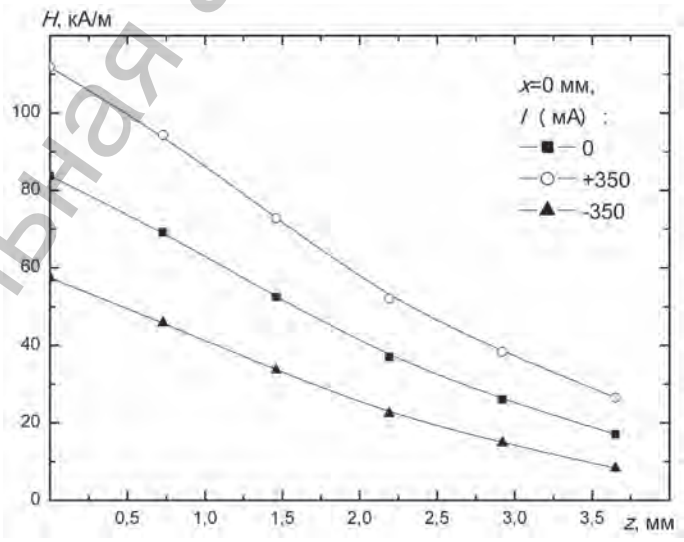


Рис. 2. Напряженность поля комбинированного магнита при различной величине тока, протекающего через электромагнит

Национальная академия наук Беларуси

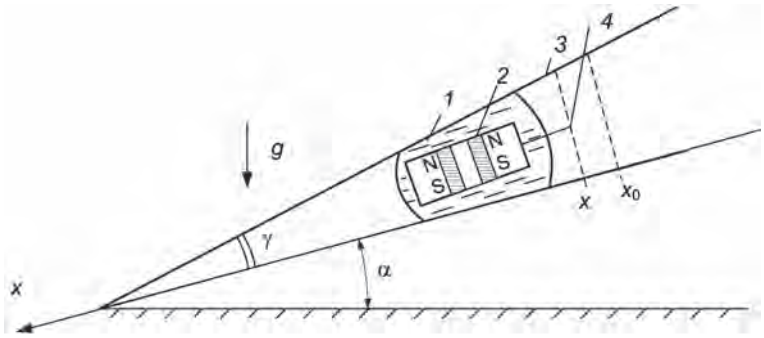


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

выполнен из двух пластин, изготовленных из плексигласа, расположенных друг от друга под углом γ. Для определения положения магнита к его стенке был приклеен немагнитный маячок *4*.

При наклоне канала на угол α (угол наклона нижней пластины канала к горизонту) магнит с объемом магнитной жидкости под действием силы тяжести из начального положения x_0 смещается в узкую часть канала. Этому смещению препятствует сила упругости капли, возникающая вследствие ее деформации и уравновешивающая составляющую силы тяжести, в этом случае магнит принимает положение *x*.

В начальном положении магнита x_0 электромагнит отключен, угол наклона канала к горизонту α = 0 град, капля *1* не деформирована и касается верхней пластины канала. За начало координат принята вершина угла раствора клиновидного канала. Координата максимального перемещения магнита определялась при касании поверхностью магнита стенок канала.

Положение маячка измерялось с точностью до 0,5 мм. Составляющая силы тяжести, действующая на каплю с магнитом, рассчитывалась исходя из угла наклона канала α к горизонту. Угол наклона канала измерялся с точностью до 0,05 град.

В эксперименте использовались магнитные жидкости на основе трансформаторного масла с намагниченностью насыщения M_s = 23,1, 43,8 кА/м и плотностью 1180, 1400 кг/м^3 и на основе керосина с намагниченностью насыщения M_s = 72,5 кА/м и плотностью 1650 кг/м^3. В ходе эксперимента для различных образцов магнитных жидкостей варьировались объем капли, угол раствора канала γ, а также величина магнитного поля, генерируемого электромагнитом.

Результаты эксперимента. Получены зависимости силы упругости, действующей на каплю, от ее положения в канале (рис. 4). Магнит покрывался магнитными жидкостями с различной величиной M_s. Объем капли магнитной жидкости составлял 10 мл, γ = 2,5 град. Измерения проводились при отключенном электромагните, а также для случаев, когда через электромагнит протекал постоянный ток различного направления, равный по модулю 350 мА.

Сила упругости при перемещении капли изменяется практически линейно почти во всем диапазоне исследованных перемещений. Только вблизи области максимально возможного перемещения капли происходит резкое нелинейное изменение силы упругости. Для полученных зависимостей нелинейный конечный участок хорошо прослеживается для жидкости с M_s = 23,1 кА/м. Для жидкостей с M_s = 43,8 и 72,5 кА/м в выбранном диапазоне перемещений магнит не приближался к области максимально возможного перемещения, поэтому для этих жидкостей нелинейного роста силы упругости не наблюдалось.

Как видно из рис. 4, для жидкостей с большей величиной намагниченности насыщения интенсивность роста силы упругости увеличивалась. При этом величина максимально возможного перемещения и длина линейного участка зависимостей также повышаются с ростом намагниченности насыщения жидкости.

Подача тока на электромагнит давала возможность контроля положения капли в канале. Перераспределение магнитного поля магнитной системы вызывало изменение силы упругости, действующей на магнитную систему. При увеличении результирующего поля источника капля вытеснялась в более широкое сечение канала. При этом изменялась и форма самой капли: объем жидкости увеличивался в центре магнитной системы. В случае уменьшения магнитного поля

Национальная академия наук Беларуси

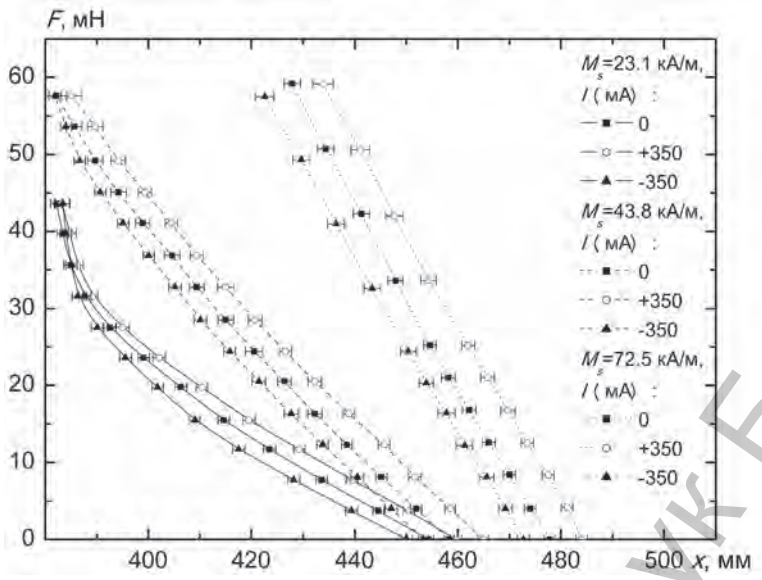


Рис. 4. Зависимости силы упругости от положения капли в канале, объем капли $V = 10$ мл, угол раствора канала $\gamma = 2{,}5$ град

капля, наоборот, перемещалась в более узкую область канала, при этом наблюдались отток жидкости к краям магнита и общее понижение ее уровня в центре системы. Таким образом, на рис. 4 зоны, заключенные между зависимостями при $I = +350$ и -350 мА, для каждой жидкости могут быть рассмотрены как возможный диапазон регулирования положения капли в канале x для каждой отдельно взятой силы упругости. Как видно из рисунка, с уменьшением намагниченности насыщения жидкости диапазон регулирования в абсолютном значении снижался незначительно и на начальном участке составлял 10,9, 11,5, 11,9 мм для жидкостей с $M_s = 23{,}1$, 43,8 и 72,5 кА/м соответственно. Диапазон изменения силы упругости при фиксированном положении капли в канале составлял 4,6, 7,4 и 12,7 мН для жидкостей с вышеуказанной намагниченностью насыщения соответственно.

Для жидкости с $M_s = 43{,}8$ кА/м при $\gamma = 2{,}5$ град также получены зависимости силы упругости от положения капли в канале при разных объемах магнитной жидкости. Для капли с меньшим объемом наблюдалась большая интенсивность роста силы упругости. Абсолютный диапазон регулирования положения капли на начальном участке составил 11,5 и 10,6 мм, а диапазон изменения силы – 7,4 и 5,2 мН для объемов капли 10 и 20 мл соответственно. Такое отличие объясняется тем, что на начальном участке зависимости для капли большего объема расстояние между поверхностью магнита и стенкой канала больше. Соответственно область соприкосновения жидкости со стенкой канала находится в полях меньшей величины, что приводит к уменьшению силы упругости, действующей на каплю, а также к снижению диапазона ее регулирования.

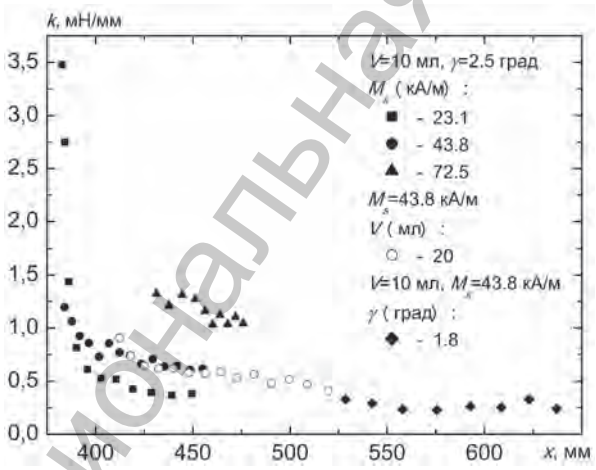


Рис. 5. Зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале

Для жидкости с $M_s = 43{,}8$ кА/м получены зависимости силы упругости от положения капли в канале при различных углах γ и объеме капли 10 мл. При меньшем угле раствора канала сила упругости возрастает медленнее при перемещении капли. Для $\gamma = 2{,}5$ и 1,8 град абсолютный диапазон регулирования положения капли в канале на начальном участке зависимости составил 11,5 и 20,4 мм, а диапазон изменения силы – 7,4 и 5,3 мН соответственно.

Национальная академия наук Беларуси

Определение коэффициентов упругости капли. Полученные результаты позволяют рассчитать коэффициент упругости k системы магнит – магнитная жидкость как отношение изменения силы упругости ΔF, действующей на каплю, к ее перемещению вдоль канала Δx: $k = \Delta F/\Delta x$.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале для жидкостей с разной величиной намагниченности насыщения для различных объемов капли и углов раствора канала при отключенном электромагните.

Среднее значение коэффициентов упругости капли магнитной жидкости на начальном участке при одинаковом объеме капли и γ = 2,5 град составляло 0,42, 0,64, 1,1 мН/мм для жидкостей с M_s = 23,1, 43,8 и 72,5 кА/м соответственно. Для жидкости с M_s = 43,8 кА/м коэффициент упругости равен 0,49 мН/мм при объеме капли 20 мл и 0,26 мН/мм при γ = 1,8 град.

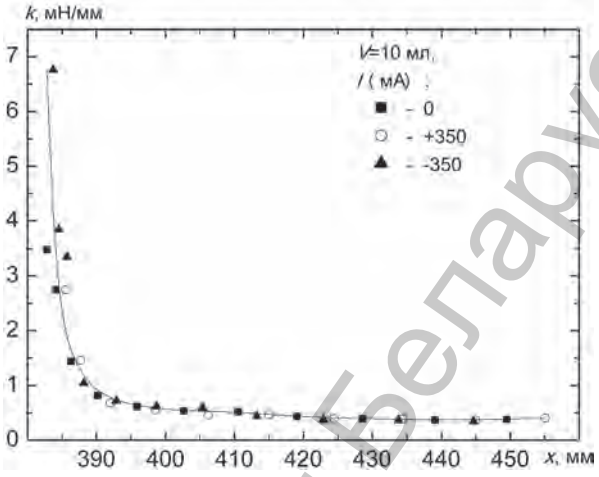


Рис. 6. Зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале для жидкости с намагниченностью насыщения 23,1 кА/м при различной величине тока, подаваемого на электромагнит

Зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале для жидкости с M_s = 23,1 кА/м при различной величине тока, подаваемого на электромагнит, представлена на рис. 6. Как видно из рисунка, подача тока на электромагнит в исследованном диапазоне параметров не влияет на коэффициент упругости капли.

Выводы

1. Магнитное поле ядра капли в значительной степени определяет величину упругих сил, действующих на каплю магнитной жидкости. Изменяя это поле, можно управлять положением такой капли в канале клиновидной формы. Сила упругости, а также диапазон регулирования перемещения капли зависят от разных факторов (величина намагниченности насыщения жидкости, объем капли, угол раствора канала и др.).

2. Уменьшение намагниченности жидкости снижает возможный диапазон регулирования перемещения капли и коэффициент ее упругости. Капли меньшего объема также обладают большим диапазоном регулирования перемещения. Экспериментальные данные показывают, что в исследованном диапазоне параметров варьирование конфигурации поля комбинированного магнита приводит к изменению действующей на каплю силы упругости, коэффициент упругости при этом не меняется.

3. Капля с комбинированным источником поля может быть использована в качестве инерционного элемента магнитожидкостных виброзащитных устройств. Контроль перемещения рассматриваемой системы дает возможность оптимизации ее амплитуды колебаний и реализации управления процессами диссипации энергии в таких устройствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ.

Литература

1. *Moskowitz R., Stahl P., Reed W. R.* Pat. US 4.123.675, USA pabl. 31.10.1978.
2. *Bashtovoi V., Reks A., Kuzhir P.* et al. Pat. 0512012 , France, publ. 01.06.07, bul.№ 07/22.
3. *Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н.* Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М., 1985.
4. *Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С.* Магнитные жидкости. М., 1989.
5. *Bashtovoi V., Kuzhir P.* // J. Magn. Magn. Mater. 1999 Vol. 201. P. 328–331.
6. *Bashtovoi V., Reks A., Klimovich S.* et al. // Journal of nano- and electronic physics. 2013. Vol. 5, N 4. P. 04012.

V. G. BASHTOVOI, A. A. MOTSAR, A. G. REKS

ELASTIC PROPERTIES OF A MAGNETIC FLUID DROP WITH A COMPOUND MAGNETIC CORE

Summary

Elastic properties of a magnetic fluid drop with a compound source of magnetic field in a wedge-shaped channel with regard to vibroprotective devices are examined experimentally. A possibility to alter an elastic force and a position of such drop by means of electromagnetic field has been shown. Obtained data allowed to calculate elastic coefficients of the observed system. Control ranges of the position and the elastic force of the drop are evaluated.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 621.923

Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ, В. В. ШАБУНЯ

ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛАФОНОВ СВЕТИЛЬНИКОВ

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступила в редакцию 12.07.2014)

Детали с коническими наружными и внутренними поверхностями широко применяются в машино-, приборостроении и в других отраслях техники. К ним относятся пальцы шаровых опор и рулевого управления автомобилей, инструментальные оправки, шпиндели станков, центры для металлорежущего оборудования, дроссельные клапаны гидроаппаратуры, плафоны светильников и т. д. Из указанной номенклатуры деталей специфичными являются плафоны светильников, к поверхностям которых помимо таких показателей качества, как шероховатость поверхности, предъявляются требования высокой светоотражательной способности. Плафоны функционально должны гарантировать высокий коэффициент отражения падающего светового потока. Параметры качества поверхностного слоя являются определяющим фактором при формировании требуемых эксплуатационных свойств изделий на стадии их изготовления.

Перспективный способ финишной обработки, обеспечивающий высокое качество поверхности, – магнитно-абразивная обработка (МАО) [1, 2]. Контур режущего инструмента (ферроабразивная щетка) в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируется из ферроабразивного порошка (ФАП) силами электромагнитного поля (ЭМП), образуемого соленоидами электромагнитной системы (ЭМС). Рабочую технологическую среду образуют магнитная индукция B, ФАП и смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

Известно [3], что плотность магнитного потока определяется величиной магнитной индукции и площадью поперечного сечения поверхности, через которую проходят магнитные силовые линии. Технологическая проблема МАО конической поверхности плафонов заключается в том, что на участках с меньшим диаметром при применении обычной для цилиндрических поверхностей схемы обработки будет меньшая величина градиента плотности магнитного потока, которая является силовой характеристикой процесса МАО. Плотность магнитного потока зависит также и от магнитной проницаемости материала ФАП, находящегося в рабочем зазоре между полюсным наконечником и деталью. Управлять градиентом магнитной индукции можно изменением профиля (профилированием) поверхности полюсных наконечников, что позволяет легко адаптировать ЭМС к конкретным размерам и форме обработки внешних поверхностей. Полюсные наконечники являются сменными, однако увеличение их количества как технологической оснастки приводит к повышению себестоимости выпускаемой продукции.

Поэтому для снижения номенклатуры технологической оснастки должен быть создан универсальный тип полюсного наконечника для обработки нескольких видов поверхностей. При этом необходимо учитывать давление ФАП в процессе обработки деталей, величина которого варьируется в определенных пределах для обеспечения требуемых выходных показателей по производительности обработки и качеству поверхности. Следовательно, если выявить эти пределы для МАО деталей с коническими поверхностями, то можно уменьшить номенклатуру необходимой технологической оснастки за счет использования полюсных наконечников с определенной конусностью для обработки методом МАО некоторой группы деталей. Так, например, целе-

Национальная академия наук Беларуси

сообразно при небольшой конусности поверхности использовать полюсные наконечники, предназначенные для цилиндрических поверхностей.

Коническая поверхность детали, помещенной в магнитное поле, согласно закону Ампера, окружена кольцевыми токами. На более удаленных от конической поверхности окружностях с кольцевым током величина магнитной индукции уменьшается. Это приводит к снижению давления ФАП на коническую поверхность детали и ухудшению качества обработанной поверхности.

Поскольку давление ФАП, являющееся силовой характеристикой процесса МАО, зависит от величины магнитной индукции, то ее необходимо определить аналитически, а затем рассчитать профиль полюсного наконечника. При МАО конических поверхностей деталей машин (например, шпинделя станка) [4] требуются максимально приближенная эквидистантность профиля полюсного наконечника к конфигурации детали и соответственно более точные методы расчета топографии магнитного поля – типа коллокаций или преобразований Фурье [5]. Для плафонов светильников главным требованием является декоративный вид изделия. Поэтому при МАО плафонов топографию ЭМП и границы профиля полюсного наконечника можно рассчитать с использованием методов, допускающих бóльшую степень погрешности (например, применение степенных рядов с неопределенными коэффициентами, используя функции Бесселя, в которых они затабулированы).

Решение предполагает наличие двумерной задачи при учете влияния осевого и радиального полей. Приближенный расчет распределения плотности тока приведен в [5] при условии, что представлен соленоид бесконечной длины, токовый контур характеризуется сплошностью и не является разделенным, как в реальном масштабе. Подобные условия приводят к тому, что нелинейность распределения тока учитывается только в радиальном направлении. Для проводника малого сечения и зоны небольших геометрических размеров данное представление дает допустимую погрешность. Однако с увеличением размеров этой зоны указанный расчет приведет к значительным погрешностям. Следовательно, обязательным является определение плотности тока в отдельных витках, что позволит учитывать фактор осевого направления напряженности магнитного поля (МП). Исходя из основного уравнения Максвелла

$$rdH = \delta$$

(H – напряженность МП, А/м) и используя цилиндрическую систему координат, можно получить дифференциальное уравнение для плотности тока в отдельном витке:

$$\frac{\partial^2\delta}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\delta}{\partial r}-\left(\boldsymbol{jk}^2+\frac{1}{r^2}\right)\delta=-\frac{\partial^2\delta}{\partial z^2}, \qquad (1)$$

где δ – плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$, $\boldsymbol{j}$ и $\boldsymbol{k}$ – единичные векторы декартовой системы координат.

Напряженность МП можно представить в виде уравнения $H = \boldsymbol{i}H_x + \boldsymbol{j}H_y + \boldsymbol{k}H_z$, в котором необходимо учитывать знак, отражающий приращение или уменьшение функции на элементарных площадках. Выбор цилиндрической системы координат обусловлен тем, что из-за наличия симметрии плотность тока имеет только тангенциальную, а напряженность МП – осевую и радиальную составляющие:

$$H_r=\frac{1}{\boldsymbol{jk}^2}\frac{\partial\delta}{\partial z}, \qquad (2)$$

$$-H_z=\frac{1}{\boldsymbol{jk}^2}\left[\frac{\partial\delta}{\partial z}+\frac{1}{\gamma}\delta\right], \qquad (3)$$

где γ – удельная электрическая проводимость. При учете $\text{div}H = 0$ можно получить дифференциальные уравнения для обеих составляющих напряженности МП.

Исходя из предположения, что плотность тока распределена в осевом направлении симметрично относительно оси витка с током, можно получить решение в форме произведения:

Национальная академия наук Беларуси

$$\delta = f(r)\cos mz\,. \tag{4}$$

Если подставить уравнение (4) в дифференциальное уравнение (1) и обозначить

$$a^2 = \boldsymbol{jk}^2 + m^2\,, \tag{5}$$

то получим дифференциальное уравнение Бесселя

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{df}{dz} - \left(a^2 + \frac{1}{r^2}\right) f = 0, \tag{6}$$

которое в рассматриваемой области имеет конечное решение

$$f = A' I_1(jar) + B' Y_1(jar), \tag{7}$$

где $I_1(jar)$ и $Y_1(jar)$ – функции Бесселя мнимого аргумента, A'_n, B'_n – постоянные интегрирования.

Разделительная постоянная *m* может иметь любое значение, которое будет определено из решения краевой задачи. С учетом уравнения (4) плотность тока будет иметь следующий вид:

$$\delta = \sum_n \left[A'_n I_1(jar) + B_n{}' Y_1(jar) \right] \cos mz\,. \tag{8}$$

Напряженности МП в осевом направлении получаем из уравнений (3), (8):

$$H_z = -\frac{a}{k^2} \sum_n \left[A'_n I_0(jar) + B'_n Y_0(jar) \right] \cos mz. \tag{9}$$

Аналогично для радиальной составляющей

$$H_r = -\frac{m}{jk^2} \sum_n \left[A'_n I_1(jar) + B'_n Y_1(jar) \right] \sin mz\,. \tag{10}$$

Для определения постоянных интегрирования A'_n и B'_n необходимо решить краевую задачу, в которой предполагаем, что осевая составляющая МП H_z, соответствующая участкам r_p и r_{p+1} рассматриваемого *p*-го уровня, постоянная по высоте витка. Осевая составляющая напряженности МП линейно уменьшается в направлении поверхности (рис. 1), где ее с достаточной степенью точности можно принять равной 0.

Для *p*-го значения напряженности МП осевая составляющая будет иметь следующее выражение:

на участке r_p

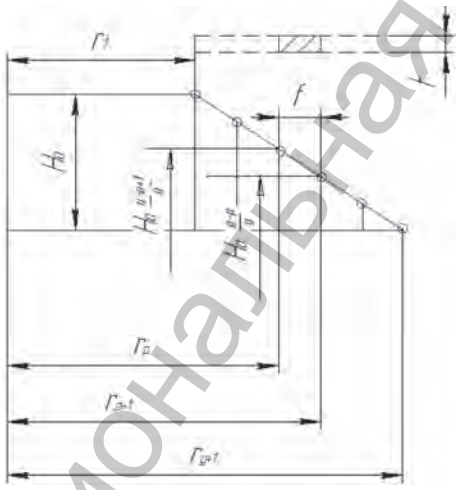


Рис. 1. Распределение напряженности МП в зоне обработки конических поверхностей плафонов светильников

$$H_z\left(r = r_p\right) = H_0 \frac{g - p + 1}{g},$$

на участке r_{p+1}

$$H_z\left(r = r_{p+1}\right) = H_0 \frac{g - p}{g},$$

где *g* – число слоев.

Тогда для конической поверхности в слое от r_p до r_{p+1} из уравнения (9) следует

$$H_0 \frac{g - p + 1}{g} = \frac{4}{\pi k^2} \sum_n \left[A_n I_0\left(jar_p\right) + B_n Y_0\left(jar_p\right) \right] a \cos mz, \tag{11}$$

$$H_0 \frac{g - p}{g} = \frac{4}{\pi k^2} \sum_n \left[A_n I_0\left(jar_{p+1}\right) + B_n Y_0\left(jar_{p+1}\right) \right] a \cos mz \tag{12}$$

при условии, что $A'_n = \frac{4}{\pi} A_n$, $B'_n = \frac{4}{\pi} B_n$.

Национальная академия наук Беларуси

Выразим напряженность МП в осевом направлении по всей высоте витка $-\frac{t}{2} < z < +\frac{t}{2}$ путем сопоставления левых частей уравнений (11) и (12):

$$H_0 \frac{g - p_1 + 1}{g} = \frac{4}{\pi} H_0 \frac{g - p + 1}{g} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^{n-1}}{n} \cos \frac{n\pi}{t} z, \tag{13}$$

$$H_0 \frac{g - p}{g} = \frac{4}{\pi} H_0 \frac{g - p}{p} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^{n-1}}{n} \cos \frac{n\pi}{t} z, \tag{14}$$

Сопоставив правую и левую части уравнений (13) и (14), получим

$$m = \frac{n\pi}{t},$$

а для постоянных A_n и B_n будем иметь

$$A_n = \frac{k^2 H_0}{g a_n} \frac{(g - p + 1)}{I_0(j a_n r_p)} \frac{(g - p + 1) Y_0(j a_n r_{p+1}) - (g - p) Y_0(j a_n r_p)}{Y_0(j a_n r_{p+1}) - I_0(j a r_{p+1}) Y_0 j a_n r_p}, \tag{15}$$

$$B_n = \frac{k^2 n H_0}{g a_n} \frac{(g - p) I_0(j a_n r_p) - (g - p + 1) I_0(j a_n r_{p+1})}{I_0(j a r_p) Y_0(j a_n r_{p+1}) - I_0(j a_n r_{p+1}) Y_0(j a_n r_p)}, \tag{16}$$

где a_n – комплексная постоянная, которая из уравнения (5) равна

$$a_n^2 = \boldsymbol{jk}^2 + \left(\frac{n\pi}{t}\right)^2.$$

Для больших величин аргумента можно использовать приближенные значения функций Бесселя:

$$I_0(jx) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}},$$

$$I_1(jx) \approx j \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}},$$

$$Y_0(jx) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x},$$

$$Y_1(jx) \approx -j \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x}.$$

Используя данные соотношения в уравнениях (15), (16) и (8), получаем уравнение плотности тока в виде

$$\delta = \frac{4k^2 H_0}{\pi g} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^n}{n a_n} \left[\frac{(g - p + 1) \mathrm{ch} a_n (r_{p+1} - r)}{\mathrm{sh} a_n v} \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g - p) \mathrm{ch} a_n (r_p - r)}{\mathrm{sh} a_n v} \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \cos \frac{n\pi}{t} z. \tag{17}$$

Аналогично получим уравнения для осевой и радиальной составляющих напряженности МП:

$$H_z = \frac{4H_0}{gt} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^n}{n} \left[\frac{(g - p + 1) \mathrm{ch} a_n (r_{p+1} - r)}{\mathrm{sh} a_n v} \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g - p) \mathrm{ch} a_n (r_p - r)}{\mathrm{sh} a_n v} \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \cos \frac{n\pi}{t} z, \tag{18}$$

$$H_r = \frac{4H_0}{gt} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{(g - p + 1) \mathrm{ch} a_n (r_{p+1} - r)}{\mathrm{sh} a_n r} \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g - p) \mathrm{ch} a_n (r_p - r)}{\mathrm{sh} a_n v} \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \sin \frac{n\pi}{t} z. \tag{19}$$

Национальная академия наук Беларуси

По уравнениям (18), (19) можно представить численные расчеты напряженности МП для конусной формы рабочего зазора.

Для экспериментального подтверждения достоверности полученных результатов расчета проведены исследования МАО поверхности плафонов (материал Л63 ГОСТ 15527–2004). Конусообразность плафонов составляет 1:0,5 (что соответствует углу конуса α = 45°). Параметры и режимы МАО следующие: величина магнитной индукции B = 0,25–1 Тл; скорость резания $V_{рез}$ = 0,75–3 м/с; скорость осцилляции V_o = 0,1 м/с; амплитуда осцилляции A = 1–5 мм; величина рабочего зазора δ = 1 мм при эквидистантном профиле по отношению к детали; коэффициент заполнения рабочего зазора $K_з$ = 1; размерность частиц ФАП Δ = 63/100 мкм; ФАП – Полимам–Т ТУ 06459–81 и МАП АСМ; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.59.01176–91, 3%-ный водный раствор; скорость подачи СОТС w = 0,55 м/с; время обработки t = 120 с (черновая обработка плафонов производилась ФАП Полимам-Т в течение 60 с, чистовая обработка плафона – МАП АСМ также в течение 60 с).

Величину светоотражательной способности определяли блескомером БФ5-20/20 по ГОСТ 896–69. Углы конусов плафонов и профилированных полюсных наконечников определяли синусной линейкой ГОСТ 4046–80. Изменение величины магнитной индукции измерялось тесламетром Т-3.

Конфигурация плафона (полый усеченный конус) позволяет использовать три варианта схемы рабочей зоны для его обработки. Они связаны с профилированием полюсных наконечников, в первом варианте угол данного профиля α= 15°, во втором варианте α= 30°, в третьем варианте α= 45°.

Результаты исследований представлены на рис. 2. При их анализе, установлено, что при использовании профилированого полюсного наконечника с углом конуса 15° обработка происходит не по всей площади поверхности конуса плафона. Часть ФАП концентрируется и уплотняется в зоне с меньшей величиной рабочего зазора, чему способствует увеличение скорости резания и амплитуды осцилляции. Измерения магнитной индукции показывают, что уменьшение величины B приводит к снижению качества обработки при применении данного варианта схемы.

При использовании второго варианта схемы (α = 30°) разница величины рабочего зазора по краям полюсного наконечника составляет от 3 до 5 мм, в результате достигается равномерность обработки по всей поверхности плафона и светоотражательная способность составляет 65–70%.

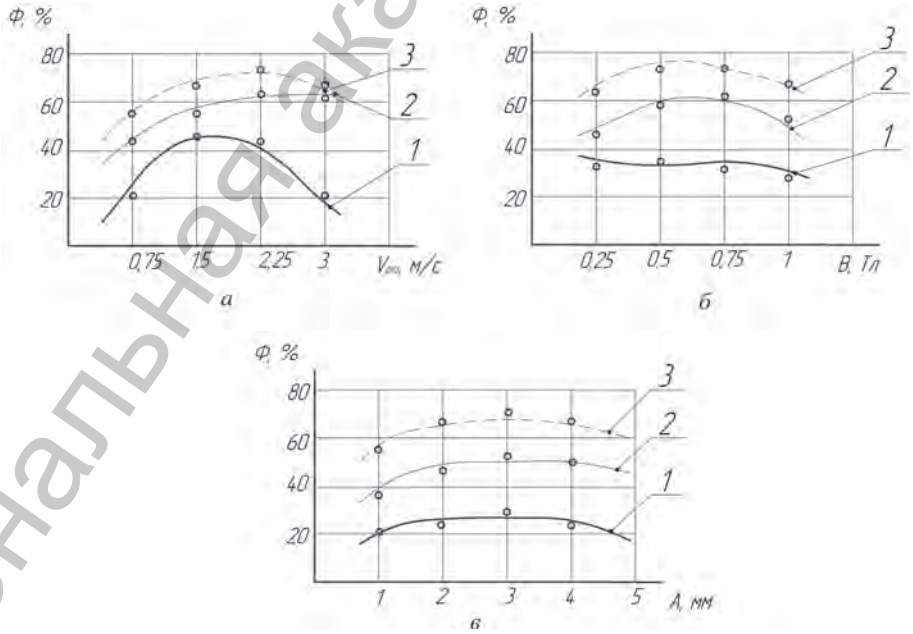


Рис. 2. Зависимость показателя светоотражательной способности Ф плафонов от скорости резания $V_{рез}$ (*а*), величины магнитной индукции B (*б*), амплитуды осцилляции A (*в*) при различных значениях угла профилирования полюсных наконечников: *1*, *2*, *3* – α= 15°, 30°,45° соответственно

Национальная академия наук Беларуси

Однако при увеличении скорости резания и магнитной индукции возрастает и значение давления ферроабразивной щетки в области с меньшим показателем величины рабочего зазора. Это приводит к снижению подвижности частиц ФАП и светоотражательной способности на данных участках в среднем на 20%.

Процесс обработки методом МАО плафонов при профилировании полюсных наконечников по третьему варианту ($\alpha = 45°$) производится на требуемом качественном уровне, но при обязательном условии использования «мягких» режимов.

По результатам теоретического и экспериментального исследований определена эффективность использования процесса МАО для финишной обработки конических поверхностей плафонов светильников. Установлены режимы МАО поверхности плафонов ($V_{рез} = 2{,}25$ м/с, $B = 0{,}75$ Тл, $A = 3$мм), при которых светоотражательная способность составляет 75–80%.

Литература

1. *Скворчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Ящерицын П. И.* Эффективность магнитно-абразивной обработки. Мн., 1991.
2. *Барон Ю. М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. Л., 1986.
3. *Евдокимов Ф. Е.* Теоретические основы электротехники. М., 2004.
4. *Акулович, Л. М.* и др // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. 2012. Вып. 122. С. 204–212.
5. *Ламмеранер И, Штафль М.* Вихревые токи. М.; Л., 1967.

L. M. AKULOVICH, L. E. SERGEEV, V. V SHABUNIA

FINISHING OF CONICAL SURFACE OF LAMPSHADES

Summary

A variant of the gradient calculation of the magnetic induction at magnetic abrasive machining of taper lampshades and manner of its exercise, by changing profiles (profiling) of the surface of the pole pieces. The optimal regimes of magnetic abrasive machining, which provide high light reflectivity of surfaces of lampshades, are determined.

Национальная академия наук Беларуси

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

УДК 539.538::621.039.542.84

В. В. СОРОКИН

РАСЧЕТ ИЗНОСА ЧАСТИЦ В ПЛОТНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ СЛОЕ ВНУТРИ НЕПОДВИЖНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 15.10.2013)

Внутри короткой вихревой камеры с неподвижными стенками в потоке капельной жидкости может быть создан стационарный толстый плотный вращающийся слой частиц [1–3]. Он размещается между боковой и торцевыми стенками камеры и имеет четкую внутреннюю границу. Жидкость поступает в камеру через направляющий аппарат, размещенный на боковой стенке, приобретая радиальную и окружную составляющие скорости. Далее, обтекая частицы, проходит через слой, его внутреннюю границу и покидает камеру через центральное отверстие в торцевой крышке. Радиус границы слоя может лишь незначительно превышать радиус центрального отверстия.

При пористости около 0,5 слой демонстрирует высокую устойчивость в широком диапазоне толщин: существует десятки часов без потерь частиц, нечувствителен к ориентации относительно вертикали и различным возмущениям (удары, вибрация, переменность расхода жидкости, внедрение предметов в слой), допускает догрузку или выгрузку частиц на ходу. Несмотря на то, что частицы опираются на стенки камеры и вращаются с постоянной угловой скоростью, слой в целом похож на жидкость: способен обтекать препятствия, тела в нем могут тонуть, всплывать или диффундировать.

Важным техническим аспектом использования подвижного слоя является износ частиц и стенок устройств. Наибольшая относительная скорость и нагрузка взаимодействующих элементов характерны для области направляющего аппарата и части торцевых крышек вблизи боковой стенки. В этих областях скорость слоя относительно стенки составляет 5–15 м/с, давление частиц 0,02–0,15 МПа [3], наблюдается заметный износ. Взаимодействие между частицами происходит при скорости $v \sim 0{,}6$ м/с ($l \sim \delta$, $t \sim 2\pi/\Omega n$, $v = \delta/t$), износ проявляется слабее, чем в области у стенки камеры, δ – ширина щели, Ω – угловая скорость слоя, $с^{-1}$, n – число щелей. Трущиеся элементы изнашиваются равномерно.

Местный износ возникает вблизи технологических отверстий и неровностей внутреннего объема вихревой камеры в зонах локализации слоя (примыкание трубопроводов для загрузки и выгрузки частиц, вводы средств измерения), уступов боковой стенки (щели подачи теплоносителя, эрозионные дефекты). Эрозия развивается в основном равномерно, однако если по внешней причине возникнет локальный дефект, то по достижении им определенного большого масштаба наблюдается ускорение его роста с положительной обратной связью. Пример местного износа возле сопловой щели на боковой стенке приведен на рис. 1, *а*. На боковой стенке также могут образовываться канавки, как показано на рис. 1, *б*.

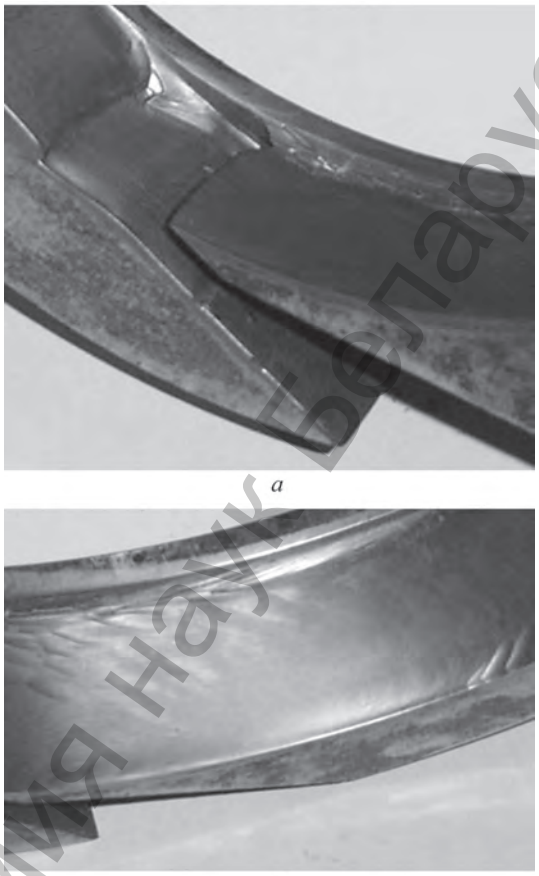
Основная пара трения – стенка аппарата и поверхность частицы. За времена порядка часов истирается около сотой доли процента материала. Износ частиц может быть скомпенсирован их

Национальная академия наук Беларуси

периодической перегрузкой, аппарат заменен (полностью или в части наиболее изношенных элементов). Износ частиц легко контролировать, поскольку уменьшение их размера при истирании приводит к изменению баланса объемных и поверхностных сил. В слое такие частицы всплывают к свободной поверхности или собираются возле направляющего аппарата.

Экспериментально исследовался износ частиц олова диаметром 2,5 мм в камере из полиметилметакрилата (оргстекло) диаметром 350 мм. Навеска частиц вращалась в течение 1 ч, в результате обнаружена убыль массы в размере 0,055% от первоначальной массы [1]. Энергия для поддержания движения обеспечивалась напором водопроводной воды. Температура воды 20 ºС.

Вычислим теоретическую и экспериментальную величины интенсивности изнашивания и сравним их. Используем метод [4, 5]. Рассматривается пара трения олово и полиметилметакрилат. Трение считается сухим при коэффициенте 0,17, характерном для олова [5]. Механические свойства материалов взяты из справочной литературы [6–8] и приведены в табл. 1. Поскольку значения твердости и предельных напряжений у олова значительно меньше, чем у полиметилметакрилата, принимаем, что в контакте пары изнашивается олово.



а

б

Рис. 1. Локальные эрозионные дефекты за отверстием ввода воды (*а*) и типа канавки на боковой стенке (*б*)

Интенсивность изнашивания определяется [4] как отношение толщины слоя δ_{tr} утраченного материала к длине L_{tr} пройденного пути:

$$I = \delta_{tr}/L_{tr}. \quad (1)$$

Толщину слоя установим балансом масс, принимая износ частиц равномерным:

$$\delta_{tr}\pi d_s^2 = \Delta e\, \pi d_s^3/6, \quad (2)$$

где $\Delta e = 5{,}5\cdot10^{-4}$ (0,055%) – относительная потеря материала в процессе износа, $\delta_{tr} = 4{,}2\cdot10^{-4}$ мм, d_s – диаметр частицы.

Длина пройденного пути зависит от скорости вращения слоя ΩR и затраченного времени t с учетом следующих факторов: взаимодействие частицы и стенки осуществляется в пределах площадки контакта; частицы вдали от стенки не изнашиваются; частицы, контактирующие и не контактирующие со стенкой, меняются местами; R – радиус камеры.

Таблица 1. **Механические характеристики материалов**

Характеристика	Полиметилметакрилат	Олово
Модуль упругости E, МПа	3300	55000
Коэффициент Пуассона, ν_P	0,37	0,3
Предельное напряжение при однократном растяжении σ_0, МПа	60–90	20
Твердость по Бринеллю HB, МПа	170–240	50
Напряжение текучести σ_t, МПа	–	12

Национальная академия наук Беларуси

Поскольку давление слоя и трение уменьшаются с удалением от боковой стенки, то изнашиваются преимущественно частицы в контакте с боковой стенкой. Для упрощения анализа принято, что износ идет только в контакте с боковой стенкой:

$$L_{tr} = \Omega R t/M/K, \tag{3}$$

где M – число слоев частиц; K – отношение площади поверхности частицы к площади пятна контакта.

Расчет параметров слоя с исходными данными: $D = 2R = 350$ мм; высота слоя $h_0 = 30$ мм; радиус центрального отверстия $R_{ц.о} = 40$ мм; давление воды в ресивере $p_{рес} = 0{,}33$ МПа; $m = 0{,}07$, число щелей $n = 36$, высота слоя $H_1 = 50$ мм; доля твердой фазы в слое $\tau = 0{,}5$; $\mu = 0{,}17$; $\rho_{Sn} = 7{,}3$ г/см^3; $\rho_l = 1$ г/см^3; $d_s = 2{,}5$ мм по методике [3] дает давление за слоем $p_2 = 0{,}2$ МПа; $\Omega = 61{,}2$ с$^{-1}$ (экспериментальное значение 59,5 с$^{-1}$); давление слоя на боковую стенку $P = 0{,}027$ МПа; скорость воды во входных отверстиях $W_{щ} = 10{,}8$ м/с; $\Omega R = 9{,}3$ м/с; скорость свободной границы $W_2 = 6{,}3$ м/с; скорость фильтрации $U = 0{,}76$ м/с.

Число частиц n_1, одновременно контактирующих с боковой стенкой, определяется выражением $k_1 \pi D h_0 = n_1 \pi d_s^2/4$, где k_1 – параметр укладки, числовой коэффициент, учитывающий долю пустот между шарами. Принята величина $k_1 = 0{,}846$ как среднее между значениями для треугольной (0,906) и квадратной (0,785) укладок [1]. Тогда $n_1 = 5690$, а сила $\pi D h_0 P$, приходящаяся на площадку контакта между шаром и боковой стенкой, составит 0,157 Н. При общем числе частиц n_2, определенном выражением $\tau\pi D h_0 H_1 = n_2 \pi d_s^3/6$, $n_2 = 10^5$, число слоев составит

$$M = n_2/n_1, \tag{4}$$

$M = 17{,}6$.

Поскольку олово – металл мягкий, а нагрузка на контакт значительная, то контакт будет пластического типа. Среднее давление на контакте p_c определим равным напряжению текучести, площадь контакта $S_к$ составит $\pi D h_0 P/\sigma_t = 0{,}013$ мм^2. По критерию $p_c/HB = 0{,}24 > 0{,}0625$ контакт классифицируем как пластический насыщенный, а характеристику шероховатости h/r вычисляем по формуле $h/r = 5{,}4(HB/E)^2$ [5]. Зная площадь контакта, находим

$$K = \pi d_s^2/S_к. \tag{5}$$

Вычисления дают $K = 1510$. Интенсивность изнашивания, согласно формуле (1), составит $3{,}3 \cdot 10^{-7}$, что характеризует износ, наблюдавшийся в эксперименте [1].

Для расчета теоретического значения интенсивности изнашивания $I_т$ рекомендовано выражение [4, 5]

$$I_т = 0{,}2\ (h/r)^{1/2}/n,\ n = (\sigma_0/\mu\sigma_t)^3. \tag{6}$$

Совпадение рассчитанной по выражению (6) $I_т = 4{,}5 \cdot 10^{-7}$ и наблюдавшейся $I = 3{,}3 \cdot 10^{-7}$ величин следует признать удовлетворительным, особенно при учете нетрадиционности рассматриваемой пары трения, с чем связана некоторая неопределенность коэффициентов в уравнении (6). Удовлетворительное совпадение расчетного и экспериментального значений интенсивности изнашивания подтверждает, что развитая теория плотного вращающегося слоя частиц [3] верно отражает основные причинно-следственные связи между гидродинамическими и механическими характеристиками процессов, приводит к адекватным количественным оценкам.

Для этого же устройства и массы навески частиц олова на рис. 2 приведены расчетные данные зависимости износа от нагрузки (давления в ресивере). Безразмерный износ Δ определен как отношение убыли объема частиц при рассматриваемом давлении в ресивере к убыли их объема при давлении 0,33 МПа за 1 ч вращения. С увеличением величин нагрузки, давления частиц и скорости вращения уровень износа возрастает примерно пропорционально давлению слоя частиц на боковую стенку.

Представляет интерес вопрос о влиянии материла наружной поверхности микротвэла на уровень износа. Рассмотрим случай частиц с оболочкой из стали, движущихся в стальной каме-

Национальная академия наук Беларуси

ре, остальные параметры задачи прежние. Пусть механические свойства стали соответствуют параметрам стали 45.

Среднее давление на упругом контакте составит $p_a = p_c = 0{,}368(N/\Theta^2 r^2)^{1/3}$ [5], где $2r = d_s$; $\Theta = 2(1-\nu_p^2)/E$; N – сила, прижимающая частицу к стенке. Расчеты дают $p_c = 3{,}86\cdot10^8$ Па, площадь контакта $N/p_c = 4\cdot10^{-10}$ м^2, $E = 2\cdot10^{11}$ Па, свойства материала приняты по [5].

Интенсивность изнашивания для приработанного контакта [4, 5] выражается формулой

$$I_т = C\alpha_г\, p_c\, \tau_0^{\,t/2}(E/2)^{t/2-1}(kf/\sigma_0)^t, \qquad (7)$$

где τ_0 – сдвиговое напряжение, $\tau_0 = 1{,}5\cdot10^7$ Па; σ_0 – разрушающее напряжение при однократном растяжении, $\sigma_0 = 7\cdot10^8$ Па; f – коэффициент трения, $f = 0{,}13$; числовые коэффициенты $C = 1{,}33$, $\alpha_г = 0{,}02$, $t = 7{,}9$, $k = 3$. Отсюда $I_т = 6{,}2\cdot10^{-6}$.

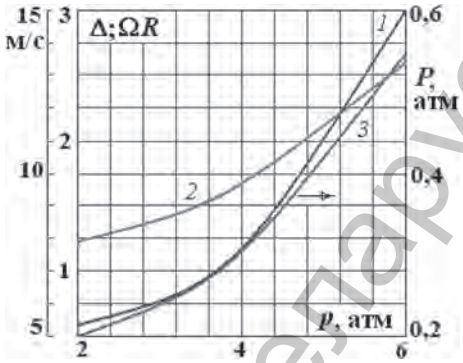


Рис. 2. Зависимость износа от нагрузки: *1* – износ; *2* – скорость вращения слоя; *3* – давление слоя частиц на боковую стенку

При числе контактов частиц с боковой стенкой 50 000 и общем количестве слоев 17,6 $L_{tr} = 38$ мм износ за 1 ч составит $\delta_{tr} = I_т L_{tr} = 2{,}36\cdot10^{-4}$ мм, или в 9,7 раза меньше, чем для олова в тех же условиях. Таким образом, как и в классических узлах трения [4], в нашем случае повышение твердости и прочности материала пары трения приводит к возрастанию износостойкости. В этой паре целесообразно увеличивать прочность материала устройства, поскольку его замена более сложная, чем перегрузка частиц.

Наиболее тяжелые нагрузки испытывает боковая стенка. Поэтому усилению, прежде всего, подлежит именно эта деталь. Боковая стенка может быть набрана из одинаковых твердосплавных пластин с сопловыми щелями. Показано, что установка пластинок снижает уровень эрозии (рис. 3). Более экономичный вариант упрочнения включает в себя этапы эксплуатации вихревой камеры с толстым слоем до появления значительного износа; восстановление геометрии деталей твердыми и прочными материалами (например, наплавкой износостойкого сплава, как показано на рис. 4). Дальнейшая эксплуатация восстановленного изделия не приводит к заметному износу в течение длительного времени.

В паре трения из материалов, сильно отличающихся по износостойкости, преимущественно изнашивается самый слабый материал [4]. Поскольку наиболее тяжелые нагрузки испытывает боковая стенка, то выбор мягкого материала частиц значительно снизит эрозию. Выбор материала оболочки частиц существенно ограничен имеющейся технологией изготовления. Однако квазижидкие свойства толстого слоя позволяют использовать для изоляции частицы инертного материала, имеющие бóльшую плотность, чем частицы исходного материала. Концентрируясь у стенки, частицы инертного материала минимизируют износ. Кроме того, они могут отличаться большим диаметром.

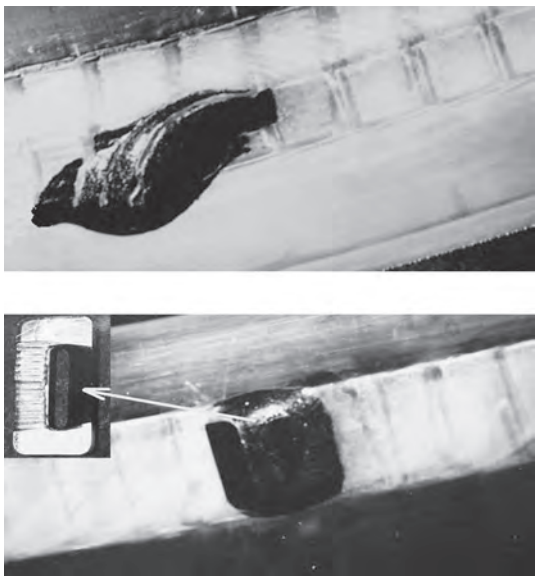


Рис. 3. Отсутствие локального эрозионного дефекта за отверстием ввода воды после установки твердосплавной пластины

Произведем расчет варианта толстого слоя с изолирующим слоем. Выберем устройство и слой со следующими параметрами: диаметр камеры 300 мм, центральное отверстие 80 мм, начальная высота 30 мм, число щелей 36, ширина щелей 1,8 мм (относительное проходное сечение направляющего аппарата $m = 0{,}07$), диаметр частиц 2 мм, плотности материала шара 10 г/см^3, жидкости 1 г/см^3; толщина слоя 80 мм при пористости 0,49. Давление в ресивере 0,6 МПа, коэффициент трения 0,15.

Национальная академия наук Беларуси

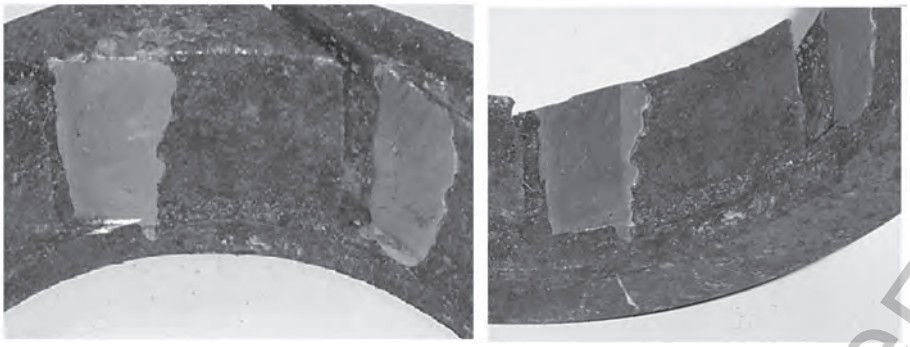


Рис. 4. Повышение износостойкости боковой стенки путем наплавки участков эрозии износостойким материалом

Рассмотрим вращающийся слой частиц плотностью 10 г/см^3 у боковой стенки. Скорость радиального движения частицы можно оценить величиной $w = n\Omega\delta/2\pi$. По аналогии с одноатомным газом, где на молекулу приходится энергия E, а температура определяется выражением $E = 3/2\ kT$, можно ввести температуру частицы $E = EK = mw^2/2 = 3/2\ kT$, где масса частицы $m = \rho Vol$, Vol – объем частицы. Пусть в слой попадает одна частица с плотностью 12 г/см^3 и тем же объемом. По отношению к основной массе частиц она будет обладать повышенной потенциальной энергией $EP = \Delta\rho Vol\Omega^2 Rh$, где $\Delta\rho$ – разница плотностей, h – расстояние до стенки. Если можно применить статистику Больцмана, то вероятность обнаружения частицы на расстоянии h от стенки пропорциональна $\exp(-EP/kT)$. Положив вероятность обнаружения тяжелой частицы на стенке равной единице, вычислим вероятности ее нахождения на расстоянии 2 и 4 мм, получим соответственно 0,18 и 0,03. Тяжелая частица в большинстве случаев окажется на стенке или в ее непосредственной близости. Наблюдения подтверждают этот вывод.

Фотография распределения частиц во вращающемся слое приведена на рис. 5. В засыпку частиц из олова (плотность 7,3 г/см^3) введены в небольшом количестве частицы свинца (плотность 11,3 г/см^3), отличающиеся большей плотностью. Наблюдается скопление тяжелых частиц у боковой стенки. Если тяжелых частиц достаточно много, то контакт между легкими частицами и стенкой может быть прекращен. Тяжелые частицы можно вводить в любой зоне слоя. По мере износа их запас можно пополнять.

Рассчитаем изменение свойств слоя при организации у боковой стенки нескольких рядов более тяжелых частиц. Данные расчета камеры с загрузкой однородных частиц плотностью 10 г/см^3 сравниваются с аналогичными результатами при загрузке двух слоев частиц плотностью 12 г/см^3 и остальных слоев (до полной толщины слоя) плотностью 10 г/см^3 (табл. 2).

Как следует из табл. 2, наличие двух слоев более плотных частиц незначительно влияет на характеристики системы: кинематические параметры практически не меняются, давление слоя

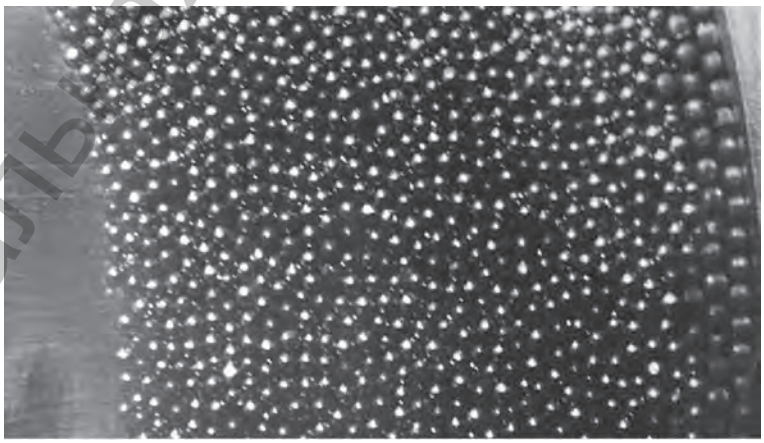


Рис. 5. Фрагмент слоя из частиц разной плотности возле боковой стенки: доли более плотных частиц достаточно для образования двух изолирующих слоев возле боковой стенки

Национальная академия наук Беларуси

Таблица 2. **Сравнение свойств однородных и неоднородных слоев**

Параметр слоя	Ω, $с^{-1}$	ΩR, м/с	W_1, м/с	p_2, КПа	P, КПа	U, м/с
Загрузка однородная	91,8	13,8	16,2	160	105	1,13
Загрузка неоднородная	92,0	13,8	16,3	155	109	1,14

возрастает на 1%. При этом площадь контакта легких частиц и боковой стенки оказывается нулевой, что в соответствии с развитой моделью приведет к полному прекращению износа слоя.

Частицы в толстом вращающемся плотном слое в вихревой камере и стенки устройства изнашиваются с течением времени. Количественно износ удовлетворительно описывается на основе имеющихся инженерных методик. Наиболее подвержена износу боковая стенка камеры. С увеличением нагрузки, давления частиц и скорости вращения износ возрастает.

На основе проведенных расчетов и экспериментов показано, что интенсивность износа может быть снижена применением прочных материалов стенок и оболочек частиц (включая пластины для футеровки стенок или наплавки), использованием «жертвенного» материала. Последний представляет собой частицы, введенные в слой специально для подавления износа. Материал данных частиц отличается большей мягкостью и плотностью.

Литература

1. *Гольдштик М. А.* Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск, 2005.
2. *Сорокин В. В.* // IV Конгресс физиков Беларуси. Мн., 2013. С. 35–36.
3. *Сорокин В. В.* // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т.53, № 5. С. 100–103.
4. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2 кн./ Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М., 1978. Кн. 1.
5. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М., 1977.
6. *Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. М., 1974.
7. *Барацихин Е. А., Шульгина Э. С.* Технология пластических масс. Л., 1982.
8. Механические свойства олова [электронный ресурс]. Режим доступа: www. shtockman. com/products/ Олово_01пч. Дата доступа: 12.12.2012.

V. V. SOROKIN

PARTICLE WEAR CALCULATION IN A DENSE ROTATING BED INSIDE A STATIC VORTEX CHAMBER

Summary

Particle wear in a dense rotating bed inside static vortex chamber is calculated. The known engineering method is shown to be good enough for it. Lateral wall of the chamber is exposed to the most wear. Wear is proportional to pressure on lateral wall.

Wear intensity may be diminished by the use of hard materials for walls and particles or applying a special sacrificial interlayer.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 66.047:3.085.1

А. И. ОЛЬШАНСКИЙ, В. И. ОЛЬШАНСКИЙ, С. В. ЖЕРНОСЕК

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ КРИТЕРИЯМИ ПОДОБИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Витебский государственный технологический университет

(Поступила в редакцию 10.01.2014)

Введение. Радиационно-конвективный перенос энергии широко используется в различного рода теплотехнических и технологических процессах. Важными задачами радиационного теплообмена являются расчет теплообмена в топках, высокотемпературный нагрев изделий в промышленных печах, расчет тепловых экранов, термообработка и сушка влажных материалов. [1–3].

Сушка тканей термоизлучением является одним из эффективных методов термического обезвоживания материалов. За счет интенсификации процесса сушки и возникающих больших удельных тепловых потоков получают значительный технологический и экономический эффект [3]. Эффективность радиационной сушки заключается в обеспечении высокотемпературного нагрева ткани, значительном уменьшении миграции красителей и аппретов, создании высокой интенсивности испарения влаги с поверхности материала за счет максимальной глубины проникновения лучей в ткань, что способствует высокому качеству обрабатываемого продукта [3].

Постановка задачи. Сушка тканей термоизлучением проводилась на металлической поверхности стола экспериментальной установки при вынужденном теплообмене. Ткань располагалась параллельно близкорасположенным (250 мм) излучающим светлым источникам излучения. В качестве излучателей использовались лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома $\varepsilon_1 \approx 0{,}85 - 0{,}9$, стекла $\varepsilon_2 \approx 0{,}82 - 0{,}9$.

При принятом расположении ткани от излучателей угловые коэффициенты излучения φ, определяющие эффективность поверхности излучения, равны 1. Степень черноты натуральных тканей $\varepsilon_м \approx 0{,}75 - 0{,}8$. Исследование комбинированной конвективно-терморадиационной сушки тканей проводилось с пятикратной повторяемостью эксперимента для каждого режима для получения достоверных результатов.

Сушка тканей проводилась при режимах: 1. Температура источника излучения $t_{изл} = 150\,^{\circ}\mathrm{C}$; 2. $t_{изл} = 190\,^{\circ}\mathrm{C}$; 3. $t_{изл} = 250\,^{\circ}\mathrm{C}$. 1. Температура теплоносителя (среды) $t_c = 80\,^{\circ}\mathrm{C}$; 2. $t_c = 100\,^{\circ}\mathrm{C}$; 3. $t_c = 120\,^{\circ}\mathrm{C}$; скорость воздуха для всех режимов $\nu = 0{,}8 - 1{,}1$ м/с.

Математическая формулировка задачи по радиационно-кондуктивно-конвективному теплообмену вытекает из решения дифференциального уравнения энергии для сложного теплообмена в плоском слое поглощающей и излучающей среды с непрозрачными серыми границами [1]. В результате решения нелинейного интегродифференциального уравнения энергии с численным решением на ЭВМ методом Ньютона получено безразмерное число [1]

$$\Phi = \frac{\varepsilon_г^* \sigma_0 T_*^3 \delta}{\lambda_*}, \qquad (1)$$

где T_* – абсолютная температура излучающей среды по толщине излучающего слоя δ; λ_* — теплопроводность излучающей непрозрачной среды; $\varepsilon_г^*$ – степень черноты газового слоя; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\sigma_0 = 5{,}7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$К^4).

Национальная академия наук Беларуси

Отношение $1/\Phi$ представляет критерий Больцмана Bo, который характеризует радиационно-конвективный теплообмен. А. Н. Пехович [2] использует критерий Bo для расчета температуры при нагреве и охлаждении твердых тел в прозрачной непоглощающей среде. Для случая радиационного теплообмена критерий Bo имеет вид:

$$\mathrm{Bo} = \frac{\lambda}{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 T_{\text{изл}}^3 \delta}, \tag{2}$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы тел; λ – коэффициент теплопроводности твердого тела.

При использовании критерия Bo для расчета кинетики процесса сушки влажных материалов и построения расчетных графиков необходимо задать дополнительные условия, характеризующие процесс радиационного теплообмена. Расчетный график для определения температуры в процессе нагрева влажного тела представляет зависимость $T^* = f(\mathrm{Fo})$ при заданных значениях безразмерных координаты $x/\delta = 1$ и температуры $T_{\text{ом}} / T_{\text{изл}}$ [2].

Начальная температура материала $T_{\text{ом}}$ для процесса сушки тканей принимается равной температуре окружающей среды $T_{\text{о.с}}$, а относительная температура влажного материала задается отношением

$$T^* = \frac{t_{\text{с}} - \overline{t}}{t_{\text{с}} - \overline{t}_0}, \tag{3}$$

где $\overline{t}$ — среднеинтегральная текущая температура; $\overline{t}_0$ — температура материала в первом периоде.

За определяющую температуру при сушке тканей принимается температура теплоносителя (среды) $t_{\text{с}}$. Степень черноты системы излучатель–материал определяется уравнением

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \tag{4}$$

Критерий Bo для тонких абсолютно сухих тканей толщиной $\delta = 0{,}8 - 1{,}2$ мм при заданных значениях степени черноты системы $\varepsilon_{\text{пр}}$ и коэффициента теплопроводности сухих тканей λ_0 является функцией только температуры излучателя $T_{\text{изл}}$, поскольку значение λ_0 сухих тканей от температуры практически не зависит [4].

Критерий Bo для сухих тканей запишется в виде:

$$\mathrm{Bo}_0 = \frac{\lambda_0}{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 T_{\text{изл}}^3 \delta}. \tag{5}$$

Для влажных тканей коэффициент теплопроводности λ_W, теплоемкость c_W, плотность ρ_W в значительной степени зависят от влажности материала.

Для влажной ткани критерий Bo_W запишется в виде:

$$\mathrm{Bo}_W = \frac{\lambda_W}{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 T_{\text{изл}}^3 \delta}, \tag{6}$$

где λ_W, c_W, ρ_W – теплопроводность, теплоемкость и плотность влажного тела.

Влияние влажности тканей на теплопроводность и теплоемкость значительно и выражается зависимостями

$$\lambda_W = \lambda_0 + 0{,}0014\, W, \ \text{Вт}/(\text{м} \cdot °\text{C}); \tag{7}$$

$$c_W = \frac{c_0 + c_{\text{в}} \frac{W}{100}}{1 + \frac{W}{100}}, \ \ \text{Дж}/(\text{кг} \cdot °\text{C}), \tag{8}$$

где $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды.

Национальная академия наук Беларуси

Плотность влажной ткани ρ_W измерялась в процессе сушки весовым способом. Коэффициент температуропроводности a влажной ткани вычислялся по следующей формуле:

$$a = \frac{\lambda_W}{c_W \rho_W},\ \text{м}^2/\text{ч}. \tag{9}$$

Критерий Фурье Fo определяется по зависимости:

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{\delta^2}, \tag{10}$$

где τ – время сушки ткани; δ – толщина ткани.

Весь комплекс параметров уравнения (9) изменяется таким образом, что коэффициент температуропроводности a в процессе сушки меняется несущественно (табл. 1).

Таблица 1. **Зависимость коэффициентов переноса тепла от влажности натуральных тканей**

Вискоза: $\lambda_0 = 0{,}058$ Вт/(м·°С); $c_0 = 1600$ Дж/(кг·°С)					Лен: $\lambda_0 = 0{,}046$ Вт/(м·°С); $c_0 = 1500$ Дж/(кг·°С)				
W, %	λ, Вт/(м·°С)	ρ, кг/м^3	c, Дж/(кг·°С)	$a\cdot10^4$, м^2/ч	W, %	λ, Вт/(м·°С)	ρ, кг/м^3	c, Дж/(кг·°С)	$a\cdot10^4$, м^2/ч
90	0,187	759	2825	3,14	160	0,276	675	3150	4,67
80	0,173	713	2750	3,17	140	0,248	637	3060	4,58
60	0,144	640	2569	3,15	120	0,219	587	2960	4,537
50	0,13	600	2462	3,16	100	0,19	537	2840	4,49
40	0,116	556	2339	3,24	80	0,161	482	2690	4,48
20	0,087	488	2031	3,16	60	0,132	430	2500	4,47
10	0,072	453	1835	3,11	40	0,104	374	2260	4,41
–	–	–	–	–	20	0,075	321	1946	4,32
–	–	–	–	–	10	0,06	294	1744	4,27

Для построения графической зависимости $\text{Bo}_W = f(\text{Fo})$ необходимо знание закономерностей изменения коэффициентов теплопереноса от влажности и температуры материала. Значения коэффициентов переноса тепла, вычисленные по зависимостям (7)–(9), даны в табл. 1.

Длительность сушки можно определить по ее экспериментальным кривым из следующей зависимости:

$$\bar{U} = \frac{W - W_\text{р}}{W_0 - W_\text{р}} = f(\tau), \tag{11}$$

где $\bar{U}$ – безразмерное влагосодержание; W_0, W, $W_\text{р}$ – начальное, текущее и равновесное влагосодержание материала.

Обработка и анализ экспериментальных данных. На рис. 1 изображены кривые сушки $W=f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t}=f(\tau)$ для комбинированной сушки тканей из вискозы и льна при различных режимах. Видно, что кинетика сушки тканей термоизлучением принципиально не отличается от кинетики конвективной сушки.

Наблюдаются периоды постоянной и уменьшающейся скорости на кривых сушки и на температурных кривых. Однако комбинированная терморадиационная сушка отличается от конвективной более высокой интенсивностью испарения влаги с поверхности материала [3].

Температура в первом периоде сушки термоизлучением за счет интенсификации влагообмена оказывается выше, чем при конвективной сушке при одинаковых режимных параметрах процесса. Обработкой опытных данных по терморадиационной сушке тканей получена зависимость для указанных режимов сушки:

$$\bar{t} = \frac{t_\text{с}}{0{,}01 t_\text{с} + 1{,}1}. \tag{12}$$

Национальная академия наук Беларуси

Установлено [3], что максимальная глубина проникновения инфракрасного излучения зависит от свойств материала. Для натуральных тканей, обладающих высокой пористостью и воздухопроницаемостью, тепловые лучи проникают на глубину более четырех слоев. Влажность материала снижает глубину проникновения только в периоде постоянной скорости сушки [3], и поглощение излучения происходит поверхностью материала.

Терморадиационный критерий Bo_W влажного материала зависит не только от температуры излучателя, но и в значительной степени от коэффициента теплопроводности влажного тела λ_W (табл. 1). На рис. 2 представлены зависимости относительной температуры T^*, задаваемой отношением (3), от отношения критериев $\mathrm{Bo}_W / \mathrm{Bo}_0$ и $T^* = f(\mathrm{Bo}_W)$ в процессе сушки вискозы при различных режимах. Представленные линейные зависимости описываются следующими уравнениями:

$$T^* = 0{,}18 + 0{,}22 \frac{\mathrm{Bo}_W}{\mathrm{Bo}_0}, \qquad (13)$$

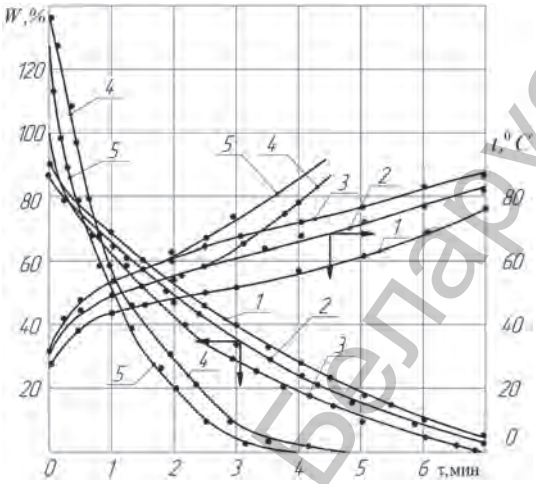


Рис. 1. Кривые сушки $W = f(\tau)$ и температурные кривые $\overline{t} = f(\tau)$ для комбинированной сушки тканей при разных режимах: вискоза: *1* – t_c=80 °С, $t_{изл}$=150 °С, υ = 0,8 м/с; *2* – t_c=100 °С, $t_{изл}$=190 °С, υ = 0,8 м/с; *3* – t_c=120 °С, $t_{изл}$= 250°С, υ = 0,8 м/с; лен: *4* – t_c=100 °С, $t_{изл}$=190 °С, υ = 1,2 м/с; *5* – t_c=120 °С, $t_{изл}$= 250°С, υ = 1,2 м/с

$$T^* = b + 0{,}013\,\mathrm{Bo}_W, \qquad (14)$$

$$b = 1{,}35 \cdot 10^{-3} T_{изл} - 0{,}42. \qquad (15)$$

Зависимость (15) представлена рис. 2, *б*.

Средняя по объему температура влажных тканей в процессе сушки вычисляется из уравнения (3):

$$\overline{t} = t_c - T^* \left(t_c - \overline{t}_0 \right). \qquad (16)$$

Температура $\overline{t}_0$ вычисляется по зависимости (12).

Анализ экспериментов по сушке тканей термоизлучением показал, что отсчет температуры при определении среднеинтегральной температуры $\overline{t}$ удобнее вести от температуры теплоносителя t_c.

Критерий Fo по физическому смыслу представляет обобщенное время, где существенное значение имеет не каждая из величин a, τ, δ в отдельности, а их сочетание в виде комплекса $a\tau/\delta^2$. Поэтому зависимость $T^* = f(\mathrm{Fo})$ справедлива для сушки льняной и вискозной тканей при различных режимах.

Данное сочетание физических параметров является важной обобщенной переменной и при заданном начальном распределении температуры в двух телах все последующие распределения температуры для них будут подобны [5] и величина комплекса $a\tau/\delta^2$ должна иметь одинаковое значение.

На рис. 3 представлены зависимости критерия $\mathrm{Bo}_W = f(\mathrm{Fo})$ и относительной температуры $T^* = f(\mathrm{Fo})$.

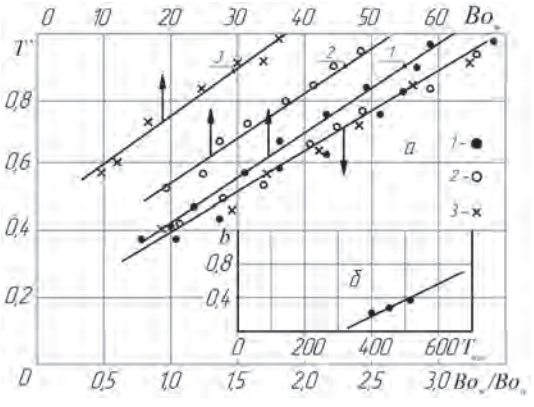


Рис. 2. Зависимости относительной температуры $T^* = f\left(\frac{\mathrm{Bo}_W}{\mathrm{Bo}_0}\right)$ и $T^* = f(\mathrm{Bo}_W)$ (*а*) и коэффициента $b = fT_{изл}$ в уравнении (15) (*б*) в процессе сушки тканей при режимах (рис. 1) и следующих отношениях: $1 - T_{ом} / T_{изл} = 0{,}71$; $2 - T_{ом} / T_{изл} = 0{,}65$; $3 - T_{ом} / T_{изл} = 0{,}57$

Национальная академия наук Беларуси

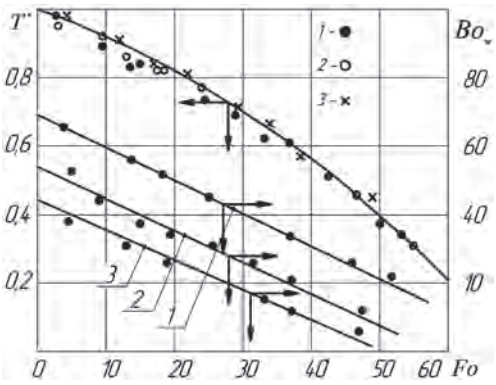


Рис. 3. Зависимость относительной температуры $T^* = f(\mathrm{Fo})$ и $\mathrm{Bo}_W = f(\mathrm{Fo})$ для процесса сушки вискозной ткани при режимах: *1* – t_c=80 °С, $t_{изл}$=150 °С; *2* – t_c=100 °С, $t_{изл}$=190 °С; *3* – t_c=120 °С, $t_{изл}$= 250°С, скорость воздуха υ = 0,8 м/с

Зависимость $T^* = f(\mathrm{Fo})$ для тканей из вискозы и льна при заданных режимах сушки, выражается уравнением

$$T^* = \exp(-0{,}013\,\mathrm{Fo}). \qquad (17)$$

Обработка экспериментов (рис. 3) показала сложный характер зависимости критерия Bo для влажного тела Bo_W от критерия Fo, отношения температур $T_{ом}$ / $T_{изл}$ и критерия Bo для сухого тела Bo_0.

Данные зависимости Bo_W можно выразить таким образом:

$$\mathrm{Bo}_W = D - \mathrm{Fo}, \qquad (18)$$

$$D = C\frac{T_{ом}}{T_{изл}} + 25, \qquad (19)$$

$$C = 5{,}5\,\mathrm{Bo}_0 - 37. \qquad (20)$$

Критерий Bo_W является также функцией влагосодержания материала. Поэтому если известны достоверные значения теплофизических констант для влажного материала, то с достаточной точностью можно определить длительность сушки по критерию Bo_W.

Из решения уравнения (18) получим зависимость для определения времени сушки тканей

$$\tau = \frac{(D - \mathrm{Bo}_W)\,\delta^2}{a}. \qquad (21)$$

Более точно время сушки находится из решения зависимости (11):

$$\lg\bar{U} = \lg\frac{W - W_p}{W_0 - W_p} = f(\tau). \qquad (22)$$

Зависимость $\lg\bar{U} = f(\tau)$ для процесса сушки тканей при различных режимах представлена на рис. 4. Обработкой эксперимента получено уравнение для определения времени сушки тканей:

$$\tau = -\frac{1}{k}\lg\frac{W - W_p}{W_0 - W_p}. \qquad (23)$$

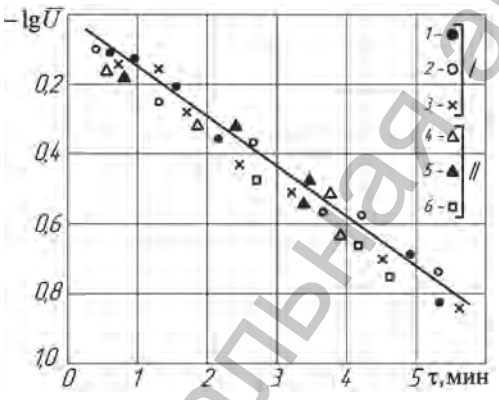


Рис. 4. Зависимость относительного влагосодержания $\lg\bar{U} = f(\tau)$ для процесса сушки тканей при различных режимах: I – вискоза: *1* – t_c=80 °С, $t_{изл}$=150 °С; *2* – t_c=100 °С, $t_{изл}$=190 °С; *3* – t_c=120 °С, $t_{изл}$= 250°С; II – лен: *4* – t_c=80 °С, $t_{изл}$=150 °С; *5* – t_c=100 °С, $t_{изл}$=190 °С; *6* – t_c=120 °С, $t_{изл}$= 250°С

Коэффициент сушки k зависит от начального влагосодержания тканей и в интервале $W_0 \approx 85-135\%$ находится из следующего соотношения:

$$k = 5\cdot10^{-3}W_0 - 0{,}3. \qquad (24)$$

Если воспользоваться зависимостью критерия $\mathrm{Bo}_W = f(T_{изл}, W, \tau)$, то длительность процесса сушки можно вычислить таким образом:

$$\tau = \frac{B - \mathrm{Bo}_W}{8}. \qquad (25)$$

На рис. 5, *а* изображены зависимости $\mathrm{Bo}_W = f(\tau)$ и $\mathrm{Bo}_W = f(T_{ом}/T_{изл})$ для различных режимов сушки тканей, описываемые уравнением

Национальная академия наук Беларуси

$$\mathrm{Bo}_W = B - 8\tau. \qquad (26)$$

Коэффициент B определяется следующей формулой:

$$B = 176\frac{T_{\text{ом}}}{T_{\text{изл}}} - 55. \qquad (27)$$

Из уравнений (26) и (27) находится время сушки по зависимости (25).

Критерий Bo_W для влажного тела и плотность тепловых потоков $q_{\text{изл}}$ являются функциями влагосодержания W. Представляет интерес установить связь тепловых потоков $q_{\text{изл}}$ с критерием Bo_W и тем самым избежать определения коэффициентов теплообмена.

Для расчета теплообмена при терморадиационной сушке тканей воспользуемся формулой излучения Стефана–Больцмана [1–3]:

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\frac{T_{\text{изл}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100}\right)^4 \varphi\left(\frac{W}{W_{\text{кр}}}\right)^{0,5}, \qquad (28)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

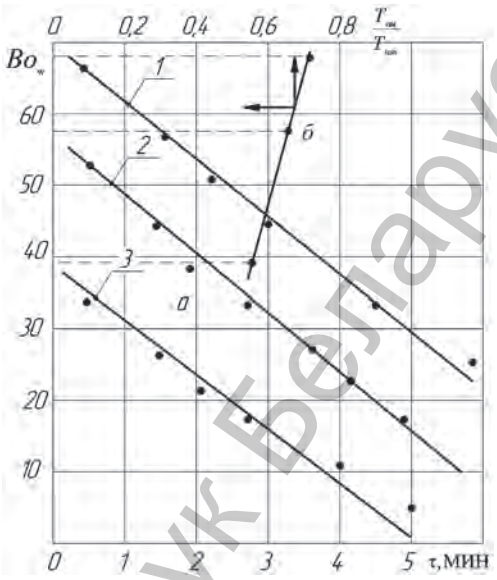


Рис. 5. Зависимости критерия $\mathrm{Bo}_W = f(\tau)$ (*а*) и $\mathrm{Bo}_W = f(T_{\text{ом}}/T_{\text{изл}})$ (*б*) в процессе сушки вискозы при различных режимах. Режимы сушки указаны на рис. 2

Угловой коэффициент излучения φ при принятом расположении материала от излучателей равен 1. Поправка $\left(W/W_{\text{кр}}\right)^{0,5}$ учитывает изменение тепловых потоков с уменьшением влагосодержания. Приведенная степень черноты системы определяется формулой (4).

Зависимость $\mathrm{Bo}_W/\mathrm{Bo}_0 = f(W)$ представлена на рис. 6. В результате обработки опытных данных получено уравнение

$$\mathrm{Bo}_W = 1,43\mathrm{Bo}_0 \exp(0,013W). \qquad (29)$$

Звисимости $\mathrm{Bo}_W = f(W)$ и $q_{\text{изл}} = f(W)$ для процесса сушки технических тканей показаны на рис. 7. Зависимости $q_{\text{изл}} = f(W)$ представляют экспоненциальные кривые, выражаемые следующим уравнением:

$$q_{\text{изл}} = m\exp(0,014W). \qquad (30)$$

Константа m зависит от отношения $T_{\text{ом}}/T_{\text{изл}}$ и вычисляется таким образом:

$$m = 10^3\left(1,6 - 1,7\frac{T_{\text{ом}}}{T_{\text{изл}}}\right).$$

Зависимость $\mathrm{Bo}_W = f(W, t_{\text{с}})$ выражается следующей формулой:

$$\mathrm{Bo}_W = 0,19t_{\text{с}} + 0,5W. \qquad (31)$$

При исследовании теплообмена при комбинированной сушке тканей тепловым излучением использовались также критериальные уравнения теплообмена с поправками на излучение [3]:

$$\mathrm{Nu} = 0,87\,\mathrm{Re}^{0,5}\left(\frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{м}}}\right)^2\left(\frac{T_{\text{изл}}}{T_{\text{с}}}\right)^{0,45}\left(\frac{W}{W_{\text{кр}}}\right)^{0,5}, \qquad (32)$$

где $\mathrm{Nu} = \bar{\alpha}l/\lambda_{\text{с}}$ – критерий Нуссельта; $\mathrm{Re} = \upsilon l/\nu_{\text{с}}$ – критерий Рейнольдса; $T_{\text{с}}$, $T_{\text{изл}}$,

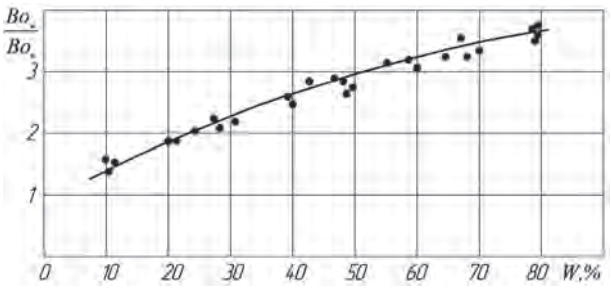


Рис. 6. Зависимость $\mathrm{Bo}_W/\mathrm{Bo}_0 = f(W)$ в процессе сушки тканей для всех режимов (рис. 1)

Национальная академия наук Беларуси

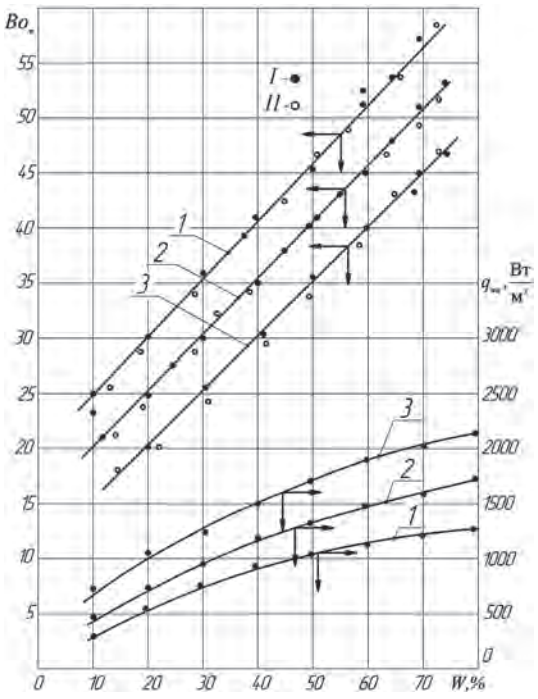


Рис. 7. Зависимости критерия Больцмана влажного материала $\mathrm{Bo}_W = f(W)$ и плотности теплового потока $q_{изл} = f(W)$ при режимах, указанных на рис. 2: I – вискозная ткань; II – льняная ткань

$T_м$ – соответственно абсолютные температуры среды, излучателя, мокрого термометра; $W_{кр}$, W – критическое и текущее влагосодержание материала; l – длина образца ткани по набеганию потока воздуха; λ_c, ν_c – теплопроводность и кинематическая вязкость среды (воздуха) воздуха; υ – скорость набегающего потока.

Плотность потока тепла определялась по уравнению теплообмена

$$q = \bar{\alpha}\left(t_c - t_п\right), \tag{33}$$

где $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена; $t_п$ – температура поверхности материала.

В табл. 2 дано сравнение расчетных значений тепловых потоков по эмпирическим уравнениям, полученным при различных способах обработки экспериментальных данных.

Разброс значений по формулам (28), (30), (33) находится в пределах точности обработки опытных данных.

В стадии регулярного режима нагревания твердых тел для малоинтенсивных процессов теплообмена ($\mathrm{Bi} < 1$) и неравномерности распределения температуры по объему материала $\psi \to 1$ темп нагревания тела m_t имеет вид [6]:

$$m_t = \frac{\bar{\alpha}}{c_W \rho_W R_V}. \tag{34}$$

Коэффициент неравномерности распределения температуры $\psi = t_c - t_п / t_c - \bar{t}$ характеризует отношение избыточной температуры по поверхности к избыточной температуре по объему. Коэффициент ψ при сушке тонких тканей уже с первых 10–15 с процесса принимал значения $\psi \to 1$. По данным табл. 1 и уравнению (32) вычислялся критерий $\mathrm{Bi} = \bar{\alpha}\,\mathrm{R}_V / \lambda_W$ для всех режимов сушки тканей. Значения критерия Bi, характеризующего условия переноса тепла внутри влажного тела, при всех режимах $\mathrm{Bi} < 0{,}3$. В условиях $\mathrm{Bi} < 1$ и значениях $\psi = 1$ происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объему. Выражение (34) при $\psi = 1$ можно записать в следующем виде [6]:

$$m_t = \frac{a}{\mathrm{R}_V^2}\mathrm{Bi}. \tag{35}$$

Таким образом, темп нагревания влажного тела m_t при заданной форме и $\psi = 1$ зависит только от теплофизических характеристик материала и интенсивности теплообмена поверхности

Таблица 2. **Сравнение расчетных значений тепловых потоков по эмпирическим уравнениям (28), (30), (33) для процесса сушки вискозной ткани при режиме: $t_c = 80\,°C$, $t_{изл} = 150\,°C$, $\upsilon = 0{,}8$ м/с**

W, %	$\bar{\alpha}$, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$ (32)	τ, мин (3)	q, $\frac{Вт}{м^2}$ (28)	q, $\frac{Вт}{м^2}$ (30)	q, $\frac{Вт}{м^2}$ (33)
60	28,4	44	1090	960	1026
50	27,2	47	950	835	940
40	26,5	52	795	779	758
20	23,4	58	540	542	567
10	20,9	67	290	410	255

Национальная академия наук Беларуси

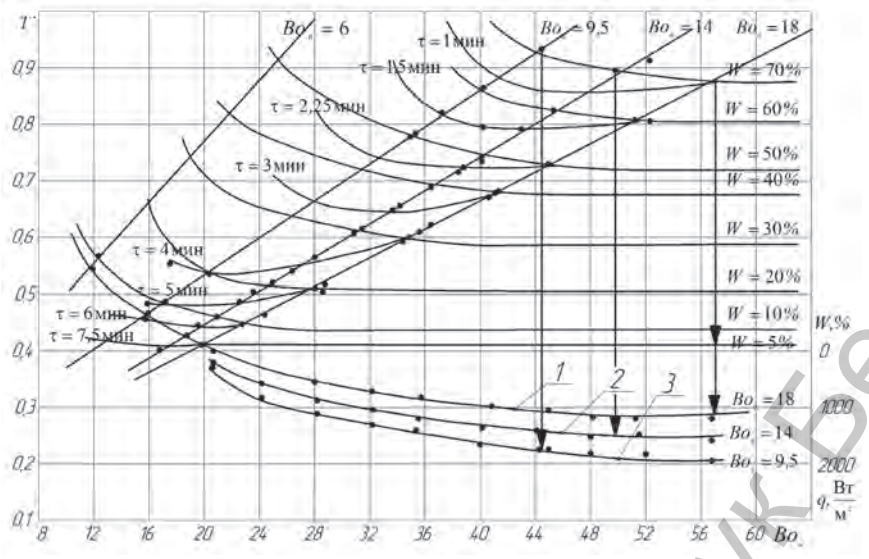


Рис. 8. Результаты расчета кинетики терморадиационной сушки технических тканей для исследуемых режимов: *1, 2, 3* – $T_{ом}/T_{изл}$ = 0,71; 0,65; 0,57 соответственно

тела с внешней средой [6]. В стадии регулярного режима темп нагревания влажного тела оказывается величиной постоянной и не зависит от режима сушки.

Анализ экспериментальных данных по сушке тканей излучением на базе радиационного критерия Во позволяет предложить метод расчета кинетики сушки тканей по графику, построенному на основе обработки экспериментов для всех режимов сушки. Расчетный график (рис. 8) строится в такой последовательности. По заданному режиму $T_{изл}$ и отношению $T_{ом} / T_{изл}$ определяется критерий Bo_0 для сухой ткани. Для каждого значения влагосодержания W находятся относительная температура материала T^*, интегральная температура $\overline{t}$ и критерий для влажного тела Bo_W. При построении графика фиксируются точки пересечения значений Bo_0 с влагосодержанием W, затем строятся линии $\mathrm{Bo}_0 = \mathrm{const}$, $W = \mathrm{const}$ Точки пересечения $\mathrm{Bo}_0 = \mathrm{const}$, $W = \mathrm{const}$ определяют относительную температуру T^* и критерий Больцмана для влажной ткани Bo_W.

По значениям критерия для сухого тела Bo_0 для заданных режимов сушки по кривым процесса (рис. 1) строятся линии постоянного времени сушки τ при разных значениях влагосодержания. В нижней части графика рис. 8 наносятся зависимости плотности тепловых потоков $q = f(W, \mathrm{Bo}_W)$.

Таким образом, все основные параметры кинетики сушки рассчитываются графически, что позволяет достаточно просто, точно и быстро проводить необходимые расчеты. График рис. 8 представляет расчетную номограмму.

Сопоставление численных величин параметров кинетики сушки для вискозы и льна, найденных графическим путем, с расчетными и экспериментальными значениями представлено в табл. 3, 4. Все значения параметров находятся в интервале возможной точности проведения эксперимента.

Таблица 3. **Сравнение расчетных значений параметров кинетики сушки с экспериментом для процесса сушки вискозы при режиме: $T_{изл} = 423\,\mathrm{K}$, $t_c = 80\,^\circ\mathrm{C}$, $\mathrm{Bo}_0 = 18$, $\frac{T_{ом}}{T_{из}} = 0{,}71$**

W, %	τ, мин (21)	τ, мин (23)	τ, мин (25)	τ, мин экс	τ, мин (рис. 8)	T^* экс (3)	T^* (13)	Bo_W экс (6)	T^* (рис .8)	t, °С (15)	t, °С экс
80	0,57	0,51	0,5	0,5	0,5	0,25	0,22	67,6	0,22	34	35
60	1,38	1,34	1,6	1,55	1,6	0,37	0,35	56,2	0,36	43	44
40	3	2,85	3,15	3	3	0,44	0,45	45	0,47	46,5	46
20	4,56	4,72	4,35	4,74	4,4	0,53	0,54	35	0,57	54	53
10	6,2	6,4	6,5	6,2	5,7	0,64	0,63	28,4	0,66	58,5	58

Национальная академия наук Беларуси

Таблица 4. **Сравнение расчетных значений параметров кинетики сушки с экспериментом для процесса сушки льна при режиме:** $T_{изл} = 463\,К$, $t_c = 100\,°C$, $Bo_0 = 10$, $\frac{T_{ом}}{T_{из}} = 0,65$

W, %	τ, мин (21)	τ, мин (23)	τ, мин (25)	τ, мин экс	τ, мин (рис. 8)	T^* экс (3)	T^* (13)	Bo_W экс (6)	T^* (рис .8)	t,°C (16)
80	0,77	0,75	0,74	0,8	0,34	0,38	41,5	0,38	47	46
60	1,15	1,12	1,14	1,12	0,35	0,41	38,1	0,4	48	48
40	1,75	1,69	1,7	1,65	0,41	0,49	28,7	0,45	52	52
20	2,27	2,8	2,25	2,25	0,51	0,58	22	0,59	61	60
10	2,82	3,3	2,87	2,85	0,63	0,63	18	0,67	70,4	71

Заключение. Исследование сушки тканей термоизлучением на основе радиационного критерия Больцмана позволяет предложить метод расчета основных параметров кинетики сушки тканей. В результате обработки и анализа опытных данных предложен графический метод определения основных кинетических характеристик процесса сушки тканей в заданном диапазоне изменения режимных параметров.

Расчетные зависимости, полученные обработкой эксперимента по сушке тканей, на основе радиационного критерия Больцмана имеют простой линейный характер, что значительно упрощает расчеты, экономит время и позволяет использовать данный метод расчета в инженерной практике.

Литература

1. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена М., 1979.
2. *Пехович А. И., Жидких В. М.* Расчеты теплового режима твердых тел. Л., 1968.
3. *Лыков А. В.* Теория сушки. М., 1973.
4. *Колесников П. А.* Теплозащитные свойства одежды. М., 1965.
5. *Лыков А. В., Михайлов Ю. А.* Теория тепло- и массопереноса. М.; Л., 1963.
6. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. М., 1967.

A. I. OLSHANSKY, V. I. OLSHANSKY, C. V. ZHERNOSEK

INVESTIGATION OF RADIATION-CONVECTIVE DRYING OF FABRIC WITH THE HELP OF CRITERIONS OF SIMILARITY OF THERMAL TRANSFER

Summary

Results of research of radiation convective drying of fabrics are stated. Dependences of criterion of Boltzmann for a damp body from key parameters of drying kinetics are established. The empirical equations for calculation of time of drying, temperatures of a material and thermal streams are given in the period of the decreasing speed. Methods of the theory of similarity of heat exchange and the theory of a regular thermal mode of heating of damp bodies were used during the processing of experimental data.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 620.92.502.1(476)

О. А. БЕЛЫЙ, А. Е. БЕРНАЦКИЙ, Н. К. КРЫЖАНОВСКИЙ, Ф. А. РОЗАНОВА

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА – ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Центр системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 27.03.2014)

Введение. За последнее десятилетие производство электроэнергии в мире выросло почти в 1,5 раза, достигнув в 2012 г. 21 трлн кВт·ч. При этом основным источником получения энергии на Земле по-прежнему остается ископаемое топливо: нефть, уголь и природный газ, несмотря на постепенное снижение доли его использования в мировом производстве электроэнергии. Если в 1973 г. доля ископаемого топлива в мировом производстве электроэнергии составляла 75 %, то в 2011 г. она достигла 68 % [1]. Эта тенденция сохраняется.

Возрастающую роль на современном этапе развития энергетики на планете начинают играть возобновляемые источники энергии.

Экономически обоснованный потенциал возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире в настоящее время оценивается в 20 млрд т у. т./год при мировом потреблении энергии в объеме 18,5 млрд т у. т./год [2].

Основным достоинством ВИЭ является их эксплуатация без использования ископаемого углеводородного топлива. В большинстве ВИЭ являются экологически чистыми и повсеместно доступными. Они относительно равномерно распределены по территории земного шара, не находятся в монопольном владении ограниченного числа стран и поэтому рассматриваются как источники энергии, использование которых способствует повышению энергетической безопасности, снижению зависимости от импорта энергетических ресурсов и соответственно укреплению политической стабильности в мире.

В Республике Беларусь основным видом топлива при производстве тепловой и электрической энергии является природный газ. На его долю в структуре топливного баланса ГПО «Белэнерго» приходится 97,16 %. Из всего используемого природного газа 96,6 % импортируется из России [3], что свидетельствует о почти полной энергетической зависимости Республики Беларусь от одного поставщика и не соответствует требованиям энергетической и экологической безопасности Республики Беларусь. Кроме того, сжигание углеводородного топлива является основным источником выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и парниковых газов.

Мировая практика производства энергии. Структура мирового производства электроэнергии представлена на рис. 1 [1]. Анализ данных, приведенных на рисунке, показывает, что доля мирового производства электроэнергии с использованием ВИЭ приблизилась к доле электроэнергии, производимой с использованием природного газа, и продолжает увеличиваться.

По данным [4] установленная мощность ВИЭ в мире оценивается следующим образом: биоэнергетика 83 ГВт, геотермальная энергетика 11,7 ГВт, гидроэнергетика 990 ГВт, ветроэнергетика 283 ГВт, солнечная энергетика 100 ГВт.

Наиболее перспективные виды ВИЭ для Беларуси

Биоэнергетика. Технически доступный потенциал энергии биомассы в Беларуси составляет 5150–5930 тыс. т у. т./год, в том числе древесное топливо и отходы деревообработки – 3100 тыс. т у. т./год,

Национальная академия наук Беларуси

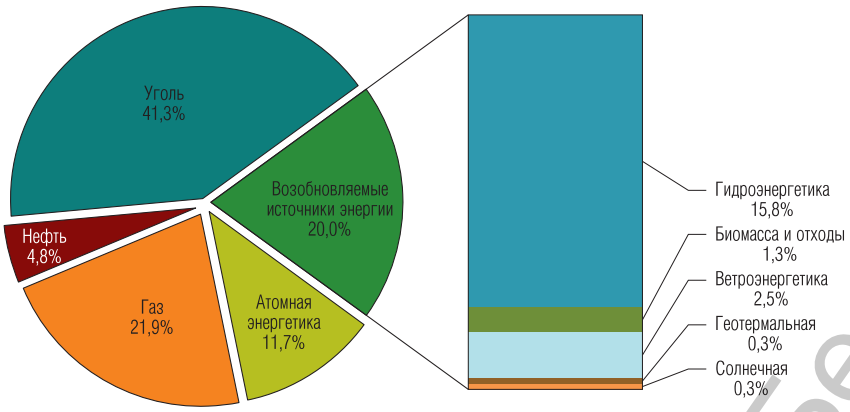


Рис. 1. Структура мирового производства электроэнергии

производство биогаза – 1600–2400 тыс. т у. т./год. Использование этого потенциала позволит заместить около 1,8 млрд м^3 природного газа и снизить выбросы парниковых газов в объеме 3450 тыс. т эквивалента CO_2.

Биогазовые технологии позволяют получать электрическую и тепловую энергию из вредных для окружающей среды веществ, таких как отходы животноводства и пищевых производств, твердые бытовые отходы, что существенно снижает нагрузку на окружающую среду.

Количество отходов животноводства и твердых бытовых отходов, которые могут быть использованы для производства биогаза, составляет соответственно 51,5 и 3,9 млн т/год.

В настоящее время фактическое использование в Беларуси биогаза составило 22,9 тыс. т у. т. (0,9–1,4 % технически доступного потенциала). В Республике Беларусь работают 23 биогазовые установки общей мощностью 23 МВт и две установки по выработке метана: в Бобруйске (3 000 м^3/сут) и в Вилейке (2 800 м^3/сут). Опыт эксплуатации свидетельствует о высокой эффективности их использования. Например, биогазовая установка в СПК «Рассвет» Кировского р-на Могилевской обл. общей стоимостью 13,5 млн € ежегодно вырабатывает 40,3 млн кВт·ч электроэнергии и 34 670 Гкал тепловой энергии. Себестоимость вырабатываемой электроэнергии 0,035 $/(кВт·ч). Срок окупаемости составляет 6–7 лет.

Энергия ветра. Технически доступный потенциал энергии ветра в Беларуси оценивается в 1600 МВт с годовой выработкой электроэнергии 2,4 млрд кВт·ч [5], что составляет 6,3 % от общего объема потребления электроэнергии в стране, который равен примерно 38 млрд кВт·ч/год.

В настоящее время в Республике Беларусь работают 18 ветроэнергетических установок (ВЭУ) общей мощностью 6,872 МВт, что составляет 0,43 % технически доступного потенциала энергии ветра. Опыт использования ВЭУ подтверждает их высокую эффективность в условиях Беларуси. Например, ВЭУ мощностью 1,5 МВт, работающая в п. Грабники Новогрудского р-на Гродненской области, вырабатывает 4,178 млн кВт·ч/год электроэнергии, себестоимость которой составляет 0,0485 $/(кВт·ч).

Гидроэнергетика. Потенциальная мощность всех водотоков Республики Беларусь составляет 850 МВт, в том числе технически доступный потенциал – 520 МВт. Экономически обоснованный потенциал гидроэнергетики в Беларуси оценивается в 250 МВт [6]. Как показывает зарубежный опыт, в странах с незначительными собственными запасами органического топлива величина экономически обоснованного потенциала гидроэнергетики приближается к технически доступному потенциалу.

В Беларуси находится в эксплуатации 51 ГЭС суммарной мощностью 34,6 МВт (6,4 % технически доступного потенциала). При планируемом вводе мощностей [6] в 2015 г. на ГЭС Беларуси будет вырабатываться около 510 млн кВт·ч/год, что позволит заместить примерно 140 тыс. т у. т./год.

При дальнейшем вводе в эксплуатацию в 2016–2019 гг. еще шести ГЭС годовая выработка электроэнергии к 2020 г. может составить 860 млн кВт·ч/год, что позволит заместить более 220 тыс. т у. т./год (около 200 млн м^3 природного газа) и уменьшить выбросы парниковых газов почти на 380 тыс. т.

Национальная академия наук Беларуси

Современный технический уровень оборудования ГЭС позволяет обеспечить им высокую эффективность. Например, при модернизации одной из старейших в Беларуси Осиповичской ГЭС установлены три новые турбины «Фойд» (Германия) общей мощностью 2,175 МВт и генераторы Siemens SFW 616/12-40. Статорные обмотки генераторов с новым классом изоляции позволяют загружать гидроагрегаты до номинальной мощности, что обеспечивает надежную работу даже во время половодья и паводков. Себестоимость вырабатываемой электроэнергии составляет 0,039 $/(кВт·ч).

Энергия Солнца. Годовое поступление суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность территории Республики Беларусь увеличивается в направлении с севера на юг от 3500 до 4100 МДж/м^2, или от 972 до 1139 кВт·ч/м^2 [7].

Для размещения солнечных электростанций (СЭС) требуются значительные территории. Поэтому СЭС целесообразно размещать на тех землях, которые не используются сельскими и лесными хозяйствами, организациями оздоровительного, природоохранного, рекреационного и историко-культурного назначения, на землях, не используемых под застройку, под дорогами и другими транспортными путями. В Беларуси в 2013 г. площадь таких земель, по данным Государственного статистического комитета Республики Беларусь, составила 660 тыс. га (6,6 тыс. км^2). При этом необходимо учитывать, что площадки, предназначенные для размещения СЭС, должны находиться в хорошо доступных местах, недалеко от потребителей электроэнергии, ЛЭП (не более чем 3 км). С учетом этих требований площадь, на которой могут быть установлены солнечные панели, может составить примерно 10 % от всей площади не используемых земель, т. е. 660 км^2.

В этих условиях потенциал солнечной энергии, технически возможный для преобразования в электроэнергию, составит 641,5–751,7 млрд кВт·ч/год. С учетом КПД современных солнечных панелей (0,16) выработка ими электроэнергии в Беларуси может составить 100–120 млрд кВт·ч/год.

Освоение этого огромного потенциала солнечной энергии в нашей стране находится в начальной стадии. В настоящее время в Беларуси действуют две солнечные электростанции и четыре отдельные солнечные установки общей мощностью 1,095 МВт. Среди них СЭС мощностью 400 кВт в деревне Жуково Могилевского района (поэтапный ввод в эксплуатацию завершен в 2013 г.) и СЭС мощностью 500 кВт в Бобруйске (введена в эксплуатацию в 2013 г.).

Основной причиной недостаточного уровня применения использования солнечной энергии в настоящее время является значительная стоимость фотоэлектрических модулей. Однако мировые тенденции свидетельствуют о высоких темпах снижения их стоимости. Так, цены на фотоэлектрические модули снизились с 1,95 €/Вт$_{пик}$ в 2009 г. до 0,7 €/Вт$_{пик}$ в 2013 г. и продолжают уменьшается.

Разработки белорусских ученых в области создания эффективных фотоэлектрических модулей и мировые тенденции развития фотовольтаики свидетельствуют о том, что солнечная энергетика в Беларуси в ближайшие годы станет конкурентоспособной.

Воздействие различных источников энергии на окружающую среду. Одна из важнейших экологических проблем современности – глобальное изменение климата. Новейшие научные данные доказывают, что доминирующей причиной климатических изменений является антропогенное усиление парникового эффекта, основной причиной возникновения которого являются выбросы, образующиеся при сжигании углеродсодержащего топлива. При его сгорании образуются углекислый газ (CO_2), оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), пары воды (H_2O) и другие вещества прямого и косвенного парникового действия.

Эксплуатация ВИЭ осуществляется без использования топлива, следовательно, без выбросов парниковых газов (ПГ). В Республике Беларусь основным источником выбросов ПГ является сектор «Энергетика», в который входит также и транспорт. Основные виды топлива в этом секторе – нефть и природный газ. Объемы потребления данных видов топлива не снижаются, поэтому не уменьшаются и выбросы ПГ. В то же время в нашей стране недостаточно используются ВИЭ. Установленная мощность ВИЭ составляет менее 0,8 % от установленной мощности всех электростанций белорусской энергосистемы. Динамика выбросов ПГ в Беларуси [8] представлена на рис. 2.

Национальная академия наук Беларуси

Рис. 2. Динамика выбросов парниковых газов в Беларуси, Гг CO_2·экв.

В таблице приведены удельные выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух при сжигании различных видов топлива [9]. Удельные выбросы для биогаза приняты такими же, как для природного газа. Анализ таблицы показывает, что из всех видов ископаемого топлива наименьшие выбросы загрязняющих веществ происходят при сжигании природного газа. При эксплуатации ВИЭ топливо не используется, поэтому воздействие на окружающую среду всех видов ВИЭ ниже, чем влияние традиционных источников энергии, использующих самое экологически «чистое» ископаемое углеводородное топливо – природный газ.

Удельные выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух при сжигании различных видов топлива

Топливо	Выбросы вредных веществ, т/т у. т.				
	CO	NO_x	SO_2	Твердые частицы	Итого
Природный газ	0,00117	0,00352	0,00	0,00	0,00469
Каменный уголь	0,00958	0,06356	0,0092	0,06532	0,14766
Брикеты торфяные	0,0081	0,0268	0,003	0,0131	0,051
Древесина (дрова)	0,0049	0,0094	0,0004	0,0044	0,019
Быстрорастущая древесина	0,0048	0,0095	0,00	0,0085	0,0228
Биогаз	0,00117	0,00352	0,00	0,00	0,00469

Оценка экономической эффективности использования ВИЭ с учетом экологических факторов. Основным показателем эффективности затрат на внедрение ВИЭ является срок окупаемости инвестиций, который определяется по формуле

$$T_{ок} = \frac{К}{Д + \Delta П - Р},$$

где К – капитальные вложения; Д – доход, полученный от реализации потребителям электрической (тепловой) энергии, другие виды доходов; $\Delta П$ –изменение доходов (расходов), обусловленное экологическими факторами; Р – годовые эксплуатационные расходы.

При оценке доходов (расходов), обусловленных экологическими факторами, для различных видов ВИЭ необходимо учитывать следующие показатели.

Для биоэнергетики:

приток денежных средств от реализации объемов добровольных сокращений выбросов парниковых газов;

снижение выплат экологического налога в связи с сокращением выбросов загрязняющих веществ;

прибыль от продажи удобрений;

прибыль от увеличения урожайности;

экономия за счет снижения объемов вносимых в почву химических веществ;

доход за счет снижения нагрузки на очистные сооружения.

Для гидроэнергетики:

Национальная академия наук Беларуси

доход от ведения промышленного рыбоводства;

доход от развития туризма, создания мест рекреации и отдыха;

ущерб от утраты мест обитания объектов животного мира и нарушения путей миграции из-за нарушений гидрологического режима рек.

Для гидроэнергетики, ветроэнергетики и солнечной энергетики:

снижение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в связи с отсутствием сжигания топлива;

издержки, связанные с отведением земель под строительство и эксплуатацию ВИЭ.

Результаты исследования влияния экологических факторов на экономическую эффективность ВИЭ показали, что срок окупаемости, например, биогазовых установок при использовании всех возможных источников дохода составляет 5–7 лет. Если не реализуется получаемая тепловая энергия, срок окупаемости возрастает до 8 лет. При этом в структуре доходов от переработки 1 т биомассы (20% свиного навоза и 80% кукурузного силоса) продажа электроэнергии составляет 55 %, продажа тепловой энергии – 20 %, продажа удобрений, увеличение урожайности – 11 %, снижение нагрузки на очистные сооружения, уменьшение экологического налога – 12 %, продажа добровольных сокращений выбросов парниковых газов – 2 %.

Анализ причин, сдерживающих развитие ВИЭ в Беларуси. Мировой опыт развития и эффективного использования ВИЭ свидетельствует о наиболее значительных успехах, достигнутых теми странами, которые раньше других приняли и постоянно совершенствуют законодательство в этой области. Например, в Германии за годы действия закона о возобновляемых источниках энергии, принятого 1 апреля 2000 г. (с изменениями и дополнениями 2004, 2009 и 2012 г.), доля электроэнергии, выработанной из ВИЭ, выросла в общем объеме производства электроэнергии от 3 до 22 %.

В нашей стране установленная мощность всех ВИЭ, включая ГЭС, на конец 2013 г. составила лишь 64,35 МВт, или менее 0,8 % от установленной мощности всех электростанций белорусской энергосистемы. Основные причины низкого уровня использования возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь:

отсутствие конкретных государственных целевых показателей производства и использования энергии из возобновляемых источников;

система льгот по стимулированию развития ВИЭ не является дифференцированной ни по отдельным видам энергии, ни по их установленной мощности. Так, постановлением Министерства экономики № 100 от 30 июня 2011 г. не принято во внимание, что такие источники энергии, как биоэнергетика, ветроэнергетика, гидроэнергетика, имеют различный энергетический потенциал, разные доступ для его освоения и объемы необходимого финансирования проектов по их реализации;

отсутствие системы обязательств, устанавливаемых государством для предприятий коммунального хозяйства и других отраслей по потреблению определенной доли энергии из возобновляемых источников. Такая система широко применяется в мировой практике и является эффективным инструментом стимулирования развития возобновляемых источников энергии на государственном уровне;

отсутствие стабильной системы государственных гарантий для инвесторов, а также эффективных механизмов привлечения инвестиций в возобновляемую энергетику.

Меры и механизмы, необходимые для привлечения инвестиций в возобновляемую энергетику.

Организация в Республике Беларусь собственного производства отдельных элементов конструкций для возобновляемой энергетики на основе имеющегося научно-технического потенциала.

Упрощение порядка отведения земельных участков для размещения возобновляемых источников энергии.

Долгосрочный контракт на покупку всей произведенной возобновляемой энергии.

Дифференцированная надбавка к стоимости произведенной энергии как по видам источника энергии, так и по установленной мощности.

Гарантия сохранения (не ухудшения) правовых и экономических условий, определенных законодательством на момент ввода в эксплуатацию установки возобновляемого источника энергии.

Национальная академия наук Беларуси

Организация подготовки в стране квалифицированных специалистов по проектированию, монтажу, ремонту и техническому обслуживанию ВИЭ.

Снижение предпринимательских и некоммерческих рисков инвестирования, разработка программ комплексного страхования.

Выводы

1. Сохраняется тенденция роста объема производства электроэнергии в мире, в том числе за счет возобновляемых источников энергии.

2. Беларусь обладает значительным потенциалом возобновляемых источников энергии, который позволяет в ближайшее время существенно сократить объемы импортируемого углеводородного топлива.

3. При замещении энергетических мощностей, использующих углеводородное топливо, возобновляемыми источниками энергии существенно снижается нагрузка на окружающую среду.

4. Возобновляемая энергетика являются конкурентоспособной по отношению к другим видам производства энергии, а экологические факторы значительно повышают ее экономическую эффективность.

5. Применение возобновляемых источников энергии вместо ископаемого углеводородного топлива будет способствовать повышению энергетической и экологической безопасности Республики Беларусь.

Литература

1. Key World Energy Statistics. МЭА, 2013.

2. *Белый О. А., Крыжановский Н. К., Бернацкий А. Е.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. № 1. С. 83–89.

3. Сб. технико-экономических показателей работы тепловых электрических станций и котельных ГПО «Белэнерго» за 2010 год. Мн., 2011.

4. Renewables 2013. Global status Report. UNEP, 2013

5. Национальная программа развития местных и возобновляемых энергоисточников на 2011–2015 годы. Утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь 10 мая 2011 г. № 586.

6. Государственная программа строительства в 2011–2015 годах гидроэлектростанций в Республике Беларусь. Утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 декабря 2010 г. № 1838.

7. Первое национальное сообщение в соответствии с обязательствами Республики Беларусь по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Мн., 2003.

8. Пятое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 2009 г.

9. Методика расчета выбросов диоксида углерода в атмосферу от котлов ТЭС и котельных. Методика 0212.16–99. Мн., 1999.

O. A. BELY, A. E. BERNATSKI, M. K. KRYZHANOUSKI, F. A. ROZANOWA

RENEWABLE ENERGY IS AN EFFICIENT WAY TO IMPROVE BOTH ENERGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY OF REPUBLIC OF BELARUS

Summary

The structure of the world electricity production is reviewed. It provides an assessment of actual use of the most promising renewable energy sources in Belarus; an environmental impact assessment of different power sources and fuels; an evaluation of economic efficiency of renewable energy considering environmental factors. It also presents an analysis of the reasons impeding the development of renewable energy in Belarus, and possible solutions.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 536.2:532/533;517.958:539.219.3

Н. Н. ГРИНЧИК[1], У. М. ХАРМА[2], Т. Е. ЩЕЛАК[1]

К ПРОБЛЕМЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

[1]Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси,
[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

(Поступила в редакцию 19.06.2014)

Тепломассоперенос в капиллярно-пористых средах определяет условия протекания широкого класса технологических процессов и физических явлений в строительной, пищевой, химической и легкой промышленности, а также в агрофизике.

В настоящее время наиболее известен и распространен метод теоретического описания взаимосвязанных процессов тепловлагопереноса на основе теории А. В. Лыкова [1]. Для моделирования неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых телах А. В. Лыков ввел ряд специфических коэффициентов массопереноса (влагопроводность, термовлагопроводность, изотермическая массоемкость, критерий фазового перехода), известных только для ограниченного класса материалов. Коэффициенты термовлагопроводности и критерий фазового перехода (отношение потока пара к суммарному потоку пара и жидкости) являются функциями толщины исследуемого образца, что осложняет их широкое использование. В исходной системе дифференциальных уравнений [1] появляются члены, для которых отсутствуют замыкающие соотношения [2], например поток жидкости. Метод теоретического описания [1] также затруднительно использовать при исследовании кинетики взаимосвязанных электродинамических, тепло- и массообменных процессов, протекающих в дисперсных системах при сушке и термообработке мощным электромагнитным полем [3, 4].

Теория двухфазной фильтрации, основанная на раздельном описании каждой из фаз и законов сохранения массы обеих фаз фильтрующейся жидкости, позволяет более строго подойти к описанию тепломассопереноса в пористых средах при наличии фазовых превращений.

Однако система уравнений двухфазной фильтрации также не замкнута. В классическом варианте теории принимается следующая гипотеза. Разность давлений в фазах $P_c = P_v - P_{liq}$, которую трактуют как капиллярное давление, выражается через универсальную функцию мгновенной насыщенности:

$$P_c = P_v - P_{liq} = \sigma\cos(\Theta)(n/k)^{\frac{1}{2}} J(\theta_{liq}). \qquad (1)$$

Данное представление впервые предложено Левереттом, а безразмерная функция $J(\theta_{liq})$ носит название функции Леверетта.

Экспериментально установлено, что функция $J(\theta_{liq})$ сохраняет свой вид с достаточной точностью для целых классов сходных по структуре пористых сред. Отметим, что зависимости $J(\theta_{liq})$ получают для равновесного распределения фаз. Поверхностное натяжение σ, краевой угол смачивания Θ данной жидкости пористого образца (а не гладкой поверхности) являются сложными функциями температуры и для реальных пористых сред фактически неизвестны, поэтому задачи капиллярной пропитки в неизотермических условиях, как правило, не рассматриваются. Представив, что удалось экспериментально определить неизотермическую функцию Леверетта $J(T,\theta_{liq})$, даже в этом случае невозможно задать граничные условия при изменении

Национальная академия наук Беларуси

«климатических» факторов, так как в функцию Леверетта не входит давление пара. Поэтому нельзя определить теплоту сорбции или десорбции, поскольку замыкающие соотношения отсутствуют.

Таким образом, рассмотренные выше подходы имеют один общий недостаток – связь с основными положениями физики и термодинамики поверхностных явлений выражена в недостаточной степени, что приводит к трудностям в практических расчетах.

В то же время описание тепломассопереноса должно учитывать многофазность фильтрации и поверхностные явления. Исследования в области тепловлагопереноса в капиллярно-пористых телах имеют длительную историю и к настоящему времени накоплен большой теоретический и экспериментальный материал. Приоритетных результатов в этом направлении добились школы теплофизиков-гидромехаников П. А. Ребиндера, Л. Р. Фокина, П. Я. Кочиной, А. В. Лыкова, Д. Р. Филипа, Д. А. де Вриза и др. [5–7].

В настоящее время при описании процессов совместного тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых средах даже для простейшего случая не существует единого феноменологического подхода, причем расхождения в физической и математической постановке подобных задач в теориях сушки, сорбции и двухфазной фильтрации носят принципиальный характер. Известные подходы практически не используют достижения в области термодинамики и физики поверхностных явлений.

Необходимость учета особенностей капиллярно-пористых сред достаточно очевидна и тривиальна, но отличается сложностью реализации в феноменологических моделях.

В связи с этим авторами данной работы ставилась цель разработки феноменологической модели нестационарных процессов взаимосвязанного тепловлагопереноса в капиллярно-пористых средах с учетом влияния капиллярных и поверхностных сил, интенсивности массообмена между фазами и термокапиллярных течений.

Математическая модель неизотермического влагопереноса строится из следующих соображений. Для капиллярно-пористой среды, в которой содержится водяной пар и жидкость, справедливы уравнения сохранения массы жидкости и водяного пара [8]:

$$\frac{\partial\left(\rho_{liq}\theta_{liq}\right)}{\partial t}=-\nabla\left(\rho_{liq}\boldsymbol{\upsilon}_{liq}\right)-I\,, \tag{2}$$

$$\frac{\partial\left(\rho_{v}\theta_{v}\right)}{\partial t}=-\nabla\left(\rho_{v}\boldsymbol{\upsilon}_{v}\right)+I\,, \tag{3}$$

где ρ_{liq} и ρ_v – плотность жидкости и водяного пара; $\boldsymbol{\upsilon}_{liq}$ и $\boldsymbol{\upsilon}_v$ – скорость движения воды и водяного пара в пористой среде; θ_v – объемное содержание пара; I – интенсивность массообмена между водой и водяным паром.

Суммируя уравнения (2) и (3), получаем следующее уравнение неизотермического влагопереноса:

$$\frac{\partial w}{\partial t}=-\nabla\left(\rho_{v}\boldsymbol{\upsilon}_{v}\right)-\nabla\left(\rho_{liq}\boldsymbol{\upsilon}_{liq}\right), \tag{4}$$

где $w=\rho_{liq}\theta_{liq}+\rho_{v}\theta_{v}$ – влагосодержание капиллярно-пористой среды, которое показывает отношение массы воды и водяного пара к полному объему пористой среды.

Из уравнения движения жидкой фазы запишем выражение для интенсивности массообмена между жидкостью и паром *I:*

$$I=-\nabla\left(\rho_{liq}\boldsymbol{\upsilon}_{liq}\right)-\frac{\partial\left(\rho_{liq}\theta_{liq}\right)}{\partial t}\,. \tag{5}$$

В соответствии с теорией двухфазной фильтрации для вычисления скорости движения водяного пара и жидкости используется обобщенный закон Дарси. Однако для моделирования неизотермического переноса воды и водяного пара с помощью уравнения (4) также необходимо

Национальная академия наук Беларуси

знание зависимости давления жидкости и водяного пара от влагосодержания и температуры. Для определения данной зависимости предложено использовать изотермы сорбции (десорбции) влаги пористой средой при различных температурах $\theta_e = f(\varphi,\ T)$ и уравнение, устанавливающее взаимосвязь между давлением жидкости и относительной влажностью [2]:

$$P_{liq} = P_v - \left(P_{sat} + \frac{RT\rho_{liq}}{M} \ln \varphi \right), \tag{6}$$

где P_{liq} и P_v – давление воды и водяного пара в среде; $P_{sat}(T)$ – давление насыщенного пара над поверхностью воды; R – универсальная газовая постоянная; M – молекулярная масса воды; T – температура; φ – относительная влажность.

Уравнение (6) известно как уравнение Кельвина. Для рассматриваемой задачи справедлива гипотеза локального термодинамического равновесия и, следовательно, использование уравнения Кельвина здесь оправдано.

Относительная влажность и давление водяного пара связаны между собой выражением $\varphi = P_v / P_{sat}$, а давление насыщенного пара как функцию температуры можно описать определенным аналитическим уравнением $P_{sat}(T)$. Отсюда получаем зависимость давления жидкости от давления водяного пара и температуры [2]:

$$P_{liq} = P_v - \left(P_{sat}(T) + \frac{RT\rho_{liq}}{M} \ln \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \right). \tag{7}$$

С использованием изотермы сорбции $\theta_e = f(\varphi,\ T)$, закона для идеального газа $\rho_v = P_v M / RT$, выражения $\varphi = P_v / P_{sat}$ и учитывая, что $\theta_v = \theta_{sat} - \theta_{liq}$, получаем функциональную зависимость содержания влаги от давления водяного пара и температуры:

$$w = \rho_{liq} f\left(\frac{P_v}{P_{sat}},\ T \right) + \frac{P_v M}{RT} \left(\theta_{sat} - f\left(\frac{P_v}{P_{sat}},\ T \right) \right). \tag{8}$$

Из уравнения (7) находится функция, определяющая изменение давления водяного пара от температуры и давления жидкости: $P_v = f'(T, P_{liq})$. С ее использованием из выражения (8) получаем зависимость влагосодержания от давления жидкости и температуры:

$$w = \rho_{liq} f\left(\frac{f'(T, P_{liq})}{P_{sat}}, T \right) + \frac{P_v M}{RT} \left(\theta_{sat} - f\left(\frac{f'(T, P_{liq})}{P_{sat}},\ T \right) \right). \tag{9}$$

Соотношение (9) отражает физико-химические свойства жидкости, структурные характеристики пористого тела и необходимо при решении уравнения неизотермического влагопереноса для описания взаимосвязи между влагосодержанием, температурой, давлением жидкости и водяного пара.

С учетом изложенного выше и пренебрегая вследствие незначительности движением водяного пара под действием силы тяжести, уравнение неизотермического влагопереноса записывается в виде

$$\frac{\partial w}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial P_{liq}}\frac{\partial P_{liq}}{\partial t} = \nabla\left(\rho_v \frac{K_0 K_v}{\eta_v} \frac{\partial P_v}{\partial T} \nabla T \right) +$$

$$+\nabla\left(\rho_{liq} \frac{K_0 K_{liq}}{\eta_{liq}} \nabla P_{liq} + \rho_v \frac{K_0 K_v}{\eta_v} \frac{\partial P_v}{\partial P_{liq}} \nabla P_{liq} - \rho_{liq} \frac{K_0 K_{liq}}{\eta_{liq}} \rho_{liq} g \nabla D \right), \tag{10}$$

где K_0 – коэффициент проницаемости пористой среды; $K_{liq}(\theta_{liq})$, $K_v(\theta_v)$ – коэффициенты относительной фазовой проницаемости жидкости и водяного пара; η_{liq}, η_v – коэффициенты дина-

Национальная академия наук Беларуси

мической вязкости жидкости и водяного пара; g – ускорение свободного падения; D – координата в вертикальном направлении.

При малом содержании влаги в пористом теле, когда соответствующая изотерме сорбции равновесная относительная влажность $\varphi \le 0{,}7$, основной перенос влаги происходит за счет диффузии и переконденсации пара [2], поэтому $K_{liq}\left(\theta_{liq}\right) = 0$. При $\varphi \le 0{,}7$ адсорбционно-связанные молекулы воды в образце можно считать неподвижными.

Здесь для нахождения производных влагосодержания по температуре и давлению жидкости используется уравнение (9), а для нахождения производной давления водяного пара по давлению жидкости – замыкающее соотношение (7).

Для нахождения распределения температуры в капиллярно-пористой среде с учетом теплоты фазовых превращений вода – пар применяется уравнение переноса энергии [6]:

$$\frac{\partial\left(C_v T\right)}{\partial t} = \nabla\left(\lambda\left(\theta_{liq}, T\right)\nabla T\right) + LI\,, \tag{11}$$

где C_v – объемная теплоемкость капиллярно-пористой среды; λ – эффективный коэффициент теплопроводности; L – удельная теплота фазового перехода.

Вычисление удельной теплоты фазовых превращений осуществлено с учетом теплоты сорбции, которая находится на основании уравнения Клапейрона – Клаузиуса, и зависимости давления водяного пара от температуры и давления жидкости $P_v = f'\left(T, P_{liq}\right)$:

$$L = r_0 - \frac{RT^2}{M}\left(\frac{\partial \ln f'\left(T, P_{liq}\right)}{\partial T}\right), \tag{12}$$

где r_0 – теплота фазового перехода свободной воды в водяной пар.

В случае испарения влаги с поверхности капиллярно-пористой среды к уравнению переноса влаги задается граничное условие вида

$$P_{liq} = f''\left(\varphi, T\right) + \left(P_{sat}\left(T\right) + \frac{RT\rho_{liq}}{M}\ln\frac{f''\left(\varphi, T\right)}{P_{sat}\left(T\right)}\right). \tag{13}$$

Для учета влияния остальных климатических факторов на процессы тепломассопереноса полученные уравнения дополняются общеизвестными граничными условиями первого и второго рода.

Таким образом, предложена математическая модель тепловлагопереноса, базирующаяся на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции влаги, термодинамических уравнениях Кельвина и Клапейрона – Клаузиуса. В предложенной модели в отличие от известных разработок вычисление параметров массопереноса основано на изотермах сорбции, термодинамических уравнениях и уравнениях двухфазной фильтрации, а не на использовании эмпирических коэффициентов, что приводит к трудностям при практических расчетах. Кроме того, в большинстве работ по неизотермической двухфазной фильтрации не учитывается теплота сорбции, в то время как ее вклад в перенос энергии в пористой среде может быть существенным.

При численном решении полученные уравнения (10) и (11) записываются в виде системы уравнений тепловлагопереноса:

$$C_v\frac{\partial T}{\partial t} - L\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} + L\rho_{liq}\nabla\upsilon_{liq} - \nabla\left(\lambda\nabla T\right) = 0\,,$$

$$C_{hv}\frac{\partial T}{\partial t} + C_{wp}\frac{\partial P_{liq}}{\partial t} - \nabla\left(K_{hv}\nabla T\right) - \nabla\left(K_{wv}\nabla P_{liq} - K_w\rho_{liq}g\nabla D\right) = 0\,. \tag{14}$$

Коэффициенты уравнений (14) находятся из следующих выражений: $C_{hv} = \partial w/\partial T$; $K_w = \rho_{liq}K_0K_{liq}/\eta_{liq}$; $C_{wp} = \partial w/\partial P_{liq}$ и $K_{hv} = \rho_v K_0 K_v/\eta_v\,\partial P_v/\partial T$.

Национальная академия наук Беларуси

При решении системы уравнений (14) температура и давление жидкости аппроксимируются полиномами [8]

$$T \approx \tilde{T} = \sum_{j=1}^{M} T_j N_j \ , \ P_{liq} \approx \tilde{P}_{liq} = \sum_{j=1}^{M} P_{liq\,j} N_j \ , \tag{15}$$

где T_j и $P_{liq\,j}$ – значение температуры и давления жидкости в j-м узле; N_j – базисная функция в j-м узле; M – общее количество узлов.

При использовании метода взвешенных невязок в постановке Галеркина система уравнений неизотермического влагопереноса при граничных условиях второго рода записывается в виде

$$\int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i C_v & 0 \\ N_i C_{hv} & N_i C_{wp} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dfrac{\partial \tilde{T}}{\partial t} \\ \dfrac{\partial \tilde{P}_{liq}}{\partial t} \end{vmatrix} \partial\Omega - \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i L \dfrac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} \\ 0 \end{vmatrix} \partial\Omega +$$

$$+ \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i L \rho_{liq} \nabla \upsilon_{liq} \\ 0 \end{vmatrix} \partial\Omega - \int_{\Omega} \begin{vmatrix} 0 \\ \nabla N_i K_w \rho_{liq} g \nabla D \end{vmatrix} \partial\Omega +$$

$$+ \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i \nabla\lambda \nabla N_j & 0 \\ N_i \nabla K_{hv} \nabla N_j & N_i \nabla K_{wv} \nabla N_j \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_j \\ P_{liq\,j} \end{vmatrix} \partial\Omega - \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \alpha T_{\infty} \\ 0 \end{vmatrix} \partial\Gamma + \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \alpha N_j & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_j \\ P_{liq\,j} \end{vmatrix} \partial\Gamma -$$

$$- \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i q_h \\ N_i \left(q_{\upsilon} + q_{liq} \right) \end{vmatrix} \partial\Gamma - \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \varepsilon\sigma T_{\infty}^4 \\ 0 \end{vmatrix} \partial\Gamma + \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \varepsilon\sigma N_j^4 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_j^4 \\ P_{liq\,j} \end{vmatrix} \partial\Gamma = 0 \, . \tag{16}$$

Для дискретизации по времени значения температуры, давления жидкости, влагосодержания, скорости и их производных по времени в момент $t = t_n + \gamma \Delta t_n$ аппроксимируются следующими выражениями [9]:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|^{n+\gamma} \approx \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t_n} \, , \ T^{n+\gamma} = (1-\gamma) T^n + \gamma T^{n+1} \, ,$$

$$\left. \frac{\partial P_{liq}}{\partial t} \right|^{n+\gamma} \approx \frac{P_{liq}^{n+1} - P_{liq}^n}{\Delta t_n} \, , \ P_{liq}^{n+\gamma} = (1-\gamma) P_{liq}^n + \gamma P_{liq}^{n+1} \, ,$$

$$\left. \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} \right|^{n+\gamma} \approx \frac{\theta_{liq}^{n+1} - \theta_{liq}^n}{\Delta t_n} \, ,$$

$$\upsilon_{liq}^{n+\gamma} = (1-\gamma) \upsilon_{liq}^n + \gamma \upsilon_{liq}^{n+1} \, . \tag{17}$$

Подставляя в систему уравнений (14) полученные аппроксимации (17) и применяя квадратурную формулу Гаусса – Лобатто для вычисления подынтегральных выражений, получаем систему нелинейных алгебраических уравнений относительно P_{liq}^{n+1} и T^{n+1}. Ее решение методом Ньютона – Рафсона дает значения давления жидкости и температуры в момент времени $n+1$.

Пример 1. Для верификации предложенной математической модели влагопереноса в почве полученные результаты

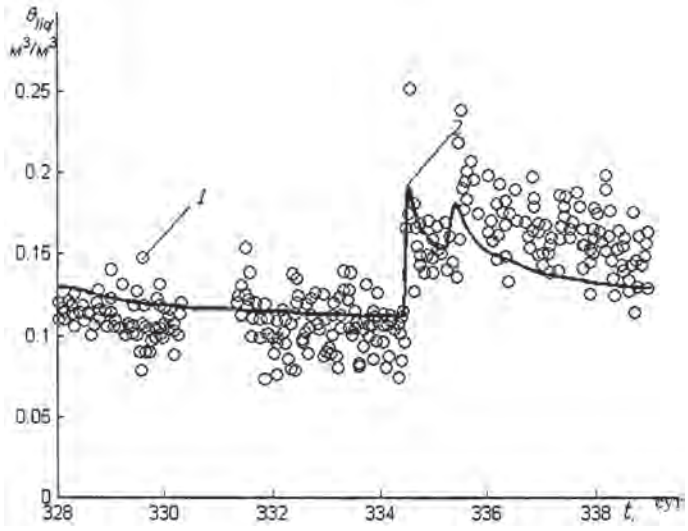


Рис. 1 Изменение объемного влагосодержания почвы на глубине 2 см в течение 12 сут: *1* – экспериментальные данные; *2* – результаты моделирования

Национальная академия наук Беларуси

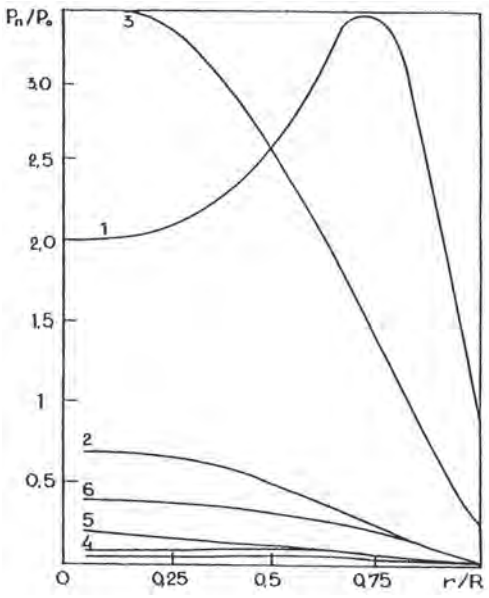


Рис. 2. Распределение локальных давлений пара в сечении образца при дискретном теплоподводе: *1–6* – число переключений

сравнивались с экспериментальными измерениями метеорологических условий, распределения влаги и температуры в почве, представленными в [10]. Из сравнения результатов моделирования неизотермического влагопереноса с экспериментальными измерениями (рис. 1) следует, что рассчитанные значения влагосодержания находятся в пределах 95%-ного доверительного интервала, построенного для экспериментальных данных.

Пример 2. Для улучшения качества сушки термолабильных материалов (пищевые продукты, хлопок сырец, бумага и др.) в ряде работ предлагалось использовать дискретный во времени теплоподвод, который практически можно реализовать периодическим изменением температуры теплоносителя (осциллирующий режим), нагревом с циркуляцией материала и промежуточным охлаждением, прерывистым облучением и т. п. В большинстве работ формулируется система уравнений взаимосвязанного тепло- и массопереноса при дискретном теплоподводе на основе использования системы уравнений А. В. Лыкова, когда температура теплоносителя является периодической функцией времени. Однако при этом фактически решается чисто температурная задача периодического нагрева и охлаждения, но без учета влияния на процесс массопереноса.

Проведены численные исследования процессов сушки целлюлозной бумаги марки К-120 при дискретном теплоподводе, коэффициенты переноса, геометрические размеры, условия в климатической камере, режимы осцилляций приведены в [2].

Результаты численных расчетов внутрипорового давления, которое вычислялось согласно изотерме сорбции, приведены на рис. 2 для дискретного радиационного теплоподвода, также показана зависимость давления пара в трех точках от времени (рис. 3) с волнообразной релаксацией его давления и уменьшением амплитуды с течением времени [2].

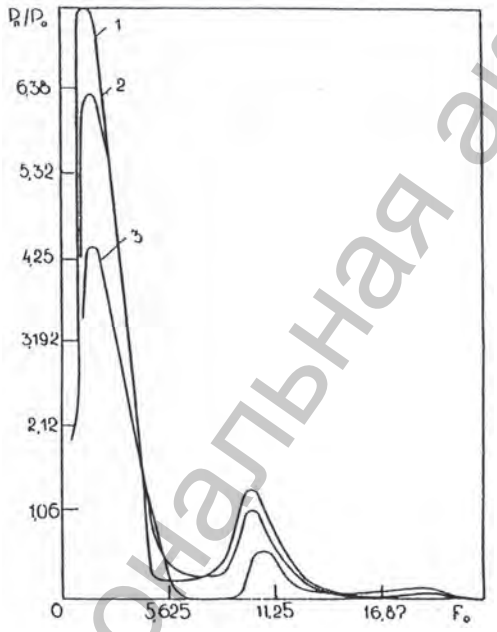


Рис. 3. Зависимость от времени давлений пара в трех точках образца (*1* – центр, *2* – середина, *3* – поверхность) при дискретном теплоподводе (число переключений 6)

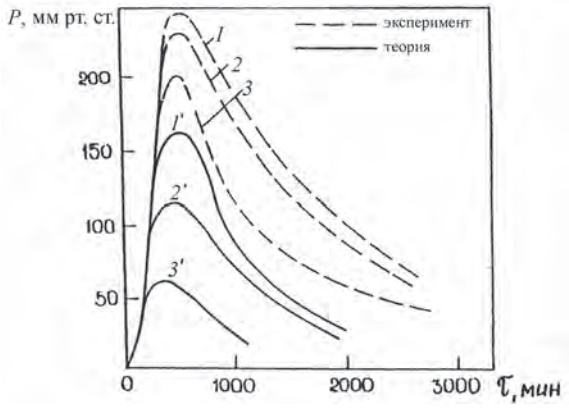


Рис. 4 Экспериментальные и теоретические зависимости внутрипорового давления пара в трех точках (*1, 1′* – центр, *2, 2′* – середина, h = 10 мм, *3,3′* – приповерхностный слой, h = 20 мм для образца бумажной изоляции толщиной h = 30 мм при температуре излучателя $T_e = 110$ °С)

Национальная академия наук Беларуси

Наблюдается хорошее качественное согласие теоретических и экспериментальных результатов (рис. 4). Пики давления пара наблюдаются для одного и того же момента времени $t = 500$ мин. При этом нарастание давления пара в трех точках в начальной стадии процесса происходит аналогичным образом, а увеличение его давления в процессе сушки является установленным фактом.

Нами также анализировались экспериментальные данные и теоретические зависимости температуры в различных зонах образца от времени сушки (рис. 5). Для более достоверной верификации разработанных моделей требуются более точные экспериментальные измерения.

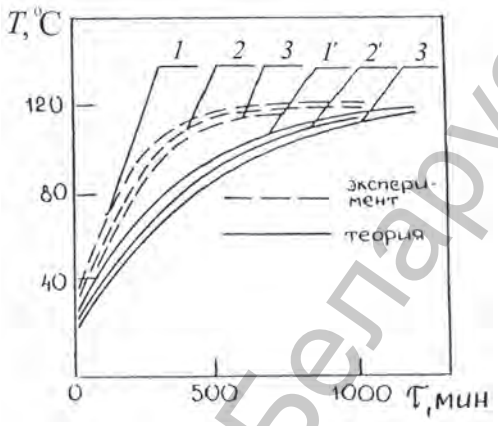


Рис. 5 Зависимость температуры в различных зонах образца от времени сушки *1,1′* –приповерхностный слой; *2,2′* и *3,3′* – средний и внутренний слой соответственно

Пример 3. Рассмотрим пористую среду, например плоский образец электроизоляционной бумаги К-120 с малой начальной влажностью $u_{liq0} = 65,73$ кг/м^3 при 293 К. В этом случае, согласно изотерме сорбции, внутрипоровое давление составляет $P_{v0} = 1052$ Па. Образец помещается в непроницаемую для пара и влаги оболочку. Требуется найти стационарное распределение влаги по толщине образца в известном стационарном температурном поле.

Температурное поле изменяется по линейному закону:

$$T(x) = T_1 + (T_2 - T_1)x/l = T_1 + kx, \tag{18}$$

где T_1 и T_2 – температура поверхности.

При малых влажностях, как уже отмечалось выше, влага не перемещается в виде жидкости. В этом случае для стационарного состояния в условиях изоляции давление пара является величиной постоянной $P_v = \text{const}$ по толщине образца (без учета влияния перекрестных членов). Для определения неизвестного давления пара используем тот факт, что суммарное количество влаги до начала и в конце опыта – величина постоянная, т. е. выполняется уравнение баланса массы

$$\int_0^l u_0 dx = \int_0^l A\exp\left(-\alpha T(x)\right)\left(\beta P_v\right)^{-\chi+\psi T(x)} dx, \tag{19}$$

где $A = 367{,}935$, $\alpha = 0{,}033$, $\beta = 0{,}0076$, $\chi = 0{,}96$, $\psi = 0{,}005$ – постоянные в изотерме сорбции.

Вводя обозначение $\alpha = \beta P_v$ и используя подстановку $\alpha^x = \exp(x\ln\alpha)$, имеем для образца длиной $l = 1$

$$A\exp\left(-\alpha T_1\right)a^{-\chi+\psi T_1}\int_0^l \exp(-\alpha kx)\exp\left(x\ln a^{\mu k}\right)dx = u_0 \tag{20}$$

и окончательно

$$\frac{A\exp\left(-\alpha T_1\right)a^{-\chi+\mu T_1}\int_0^l \exp\left[K\left(-\alpha+\mu\ln a\right)\right]-1}{K\left(-\alpha+\mu\ln a\right)} = u_0. \tag{21}$$

Требуется определить постоянную α из решения следующего уравнения:

$$A\exp\left(-\alpha T_1\right)a^{-\chi+\mu T_1}\left[a^{k\mu}\exp\left(-\alpha K\right)-1\right] = u_0 K\left(-\alpha+\mu\ln a\right). \tag{22}$$

Для образца толщиной $l = 1$ м и $\Delta T = T_2 - T_1 = 40$ К трансцендентное уравнение имеет вид

$$23{,}25\alpha^{0{,}5}\left(\alpha^{0{,}2}\,0{,}267-1\right) = -86{,}77 + 13{,}48\ln\alpha. \tag{23}$$

Национальная академия наук Беларуси

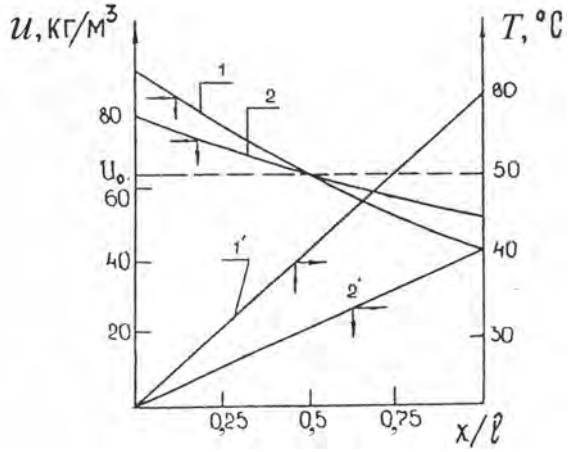


Рис. 6. Распределение влаги и температуры в исследуемом образце при малых влажностях (*1, 1′* – ΔT = 60 °С; *2, 2′* – ΔT = 40 °С)

Решая (23), имеем $\alpha = 16,25$ и давление пара соответственно $P_v = 2144$ Па. Подставляя найденные значения давления пара в уравнение изотермы сорбции, получаем

$$u = A\exp\left(-\alpha T(x)\right)\left(\beta P_n\right)^{-\chi+\mu T(x)}. \quad (24)$$

Стационарное распределение влаги зависит не только от начальной влажности и температуры, но и от градиентов температуры. При той же толщине l и $\Delta T = 20$ °С трансцендентное уравнение (23) имеет вид

$$23,25\alpha^{0,5}\left(\alpha^{0,2}0,516-1\right) = -43,85 + 6,74\ln\alpha\,. \quad (25)$$

Корнем уравнения (25) является $\alpha = 11,7$, что соответствует $P_v = 1539,3$ Па. Результаты моделирования распределения влаги и температуры по толщине образца приведены на рис. 6, из которого видно, что вследствие переконденсации пара величина влагосодержания больше в «холодных» частях образца.

Следует отметить, что, согласно теории А. В. Лыкова, стационарное распределение влаги в стационарном температурном поле полагается известным из опыта, его затруднительно вычислить теоретически. Зная распределение влаги в температурном поле в стационарных условиях, вычисляют термоградиентный коэффициент $\delta = \left(\dfrac{\Delta u_{liq}}{\Delta T}\right)_{u_{liq}}$ и затем используют его в общих уравнениях тепломассопереноса [1]. Сложность моделирования при таком подходе обусловлена тем, что δ существенно зависит от градиентов температуры и от толщины образца.

Таким образом, предложена математическая модель тепловлагопереноса в капиллярно -пористых средах, базирующаяся на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции влаги, термодинамических уравнениях Кельвина и Клапейрона – Клаузиуса. В предложенной модели в отличие от известных разработок вычисление параметров массопереноса основано на изотермах сорбции, термодинамических уравнениях и уравнениях двухфазной фильтрации, а не на использовании эмпирических коэффициентов, что приводит к трудностям при практических расчетах. Разработан численный метод решения уравнений тепловлагопереноса, базирующийся на методе взвешенных невязок.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования тепломассопереноса в различных технологических процессах, в строительной, пищевой и химической промышленности, а также в агрофизике.

Условные обозначения

q_v –потока пара, кг/(м^2·с); q_{liq} – поток жидкости, кг/(м^2·с); I – интенсивность массообмена между фазами, кг/(м^3·с); $\tilde{v}$ – удельный объем, м^3/ кг; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; P_c – капиллярное давление, Па; P_v – давление пара, Па; P_{sat} – давление насыщенного пара, Па; P_{liq} – давление жидкости, Па; Θ – краевой угол смачивания; θ_v – насыщенность пористой среды паром, м^3/м^3; θ_{liq} – насыщенность пористой среды жидкостью, м^3/м^3; θ_{cr} – критическая насыщенность, м^3/м^3; m – пористость, м^3/м^3; D_v – коэффициент диффузии пара, м^2/с; D_{liq} – коэффициент диффузии жидкости, м^2/с; ν'_v, ν'_{liq} – молярный объем водяного пара и жидкости соответственно, м^3/моль; ν''_v, ν''_{liq} – соответственно молярная масса водяного пара и жидкости, кг/моль; φ – относительная влажность пара, %; K_{liq} – проницаемость пара и жидкости, м^2; $f(\theta_v)$, $f(\theta_{liq})$ – относительные фазовые проницаемости пара и жидкости соответственно; η_v, η_{liq} – динамическая вязкость пара и жидкости, Па·с.

Национальная академия наук Беларуси

Литература

1. *Лыков А. В.* Теория сушки. М., 1968.
2. *Гринчик Н. Н.* Процессы переноса в пористых средах, электролитах, мембранах. Мн., 1991.
3. *Adamovich A. L., Grinchik N. N., Kundas S. P., Terekhov V. I.* // J. of Thermophysics and aeromechanics. 2004. Vol. 11, N 2. P. 253–268.
4. *Grinchik N. N., Terekhov V. I.* et. al. // Electromagnetic wave propagation in complex matter / Ed. by Ahmed A. Kishk. Published by Intech, Janeza Trdine 9, 5100 Rijeka, Croatia, 2011.
5. *Полубаринова-Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод. М., 1977.
6. *Philip J. R., de Vries D. A.* // Transactions American Geophysical Union, 1957. Vol. 38, N 5. P. 222–231.
7. *de Vries D. A.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1987. Vol. 30, N 7. P. 1343–1350.
8. *Grifoll J., Gastó J. M., Cohen Y.* // Advances in Water Resources. 2005. Vol. 28. P. 1254–1266.
9. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. М., 1986.
10. *Saito H., Simunek J., Mohanty B. P.* // Vadose Zone Journal. 2006. N. 5. P. 784–800.

N. N. GRINCHIK, U. M. HARMA, T. E. SCHELAK

TO THE PROBLEM OF NON-ISOTHERMAL MOISTURE TRANSFER IN CAPILLARY-POROUS MEDIA

Summary

A mathematical model of moisture transfer in capillary-porous media is proposed. It is based on the equations of two-phase filtration, isotherms of moisture sorption, thermodynamic equations of Kelvin and Klapeirone – Klausius. The numerical method of moisture transfer equations solving is developed on the basis of weighted residuals method. The results obtained can be used for simulation of heat and mass transfer in different technological processes, in building, food and chemical industry, and in agrophysics also.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 533.73+57.037

М. Л. ЛЕВИН, А. А. МАХАНЁК

СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЩЕЙ ГАЗОВОЙ КРИОТЕРАПИИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 15.08.2014)

Введение. Общая газовая криотерапия (ОГКТ) является высокоэффективным способом оздоровления людей, лечения при многих патологиях, повышения работоспособности и сокращения сроков восстановления спортсменов после больших физических нагрузок [1–3]. Лечебные и другие положительные эффекты, возникающие в результате прохождения пациентом курса ОГКТ, являются следствием кратковременного, но сильного воздействия сверхнизких температур на кожный покров человека. Физиологические, биохимические и биофизические механизмы реализации данных эффектов до сих пор не ясны. Одним из направлений исследования этих механизмов является теоретическое описание процессов теплопереноса в организме пациента при ОГКТ. Оно включает оценку характерных тепловых параметров и сопоставление их изменений в ходе курса процедур с наблюдаемыми изменениями биохимических и физиологических характеристик пациента. Моделирование теплового состояния человека во время ОГКТ необходимо для оценки допустимых (безопасных) температурно-временных экспозиций [4], а также для разработки методик, учитывающих некоторые индивидуальные особенности пациентов [5].

Физико-математическое описание процесса теплопереноса при ОГКТ принципиально не отличается от аналогичной тепловой задачи для общей гипотермии человека. Отличия обусловлены лишь характерными условиями проведения криотерапевтической процедуры: достаточно малое время воздействия (несколько минут) газообразным хладагентом (воздухом или смесью воздуха и паров жидкого азота) при температуре –110 °С и ниже. Известны два способа описания поля температур в теле человека: осреднение температур и других параметров в пределах кожного покрова и других слоев биоткани (костной, мышечной, жировой) – модели с сосредоточенными параметрами и разбиение этих слоев на малые подобласти для более детального описания изменения свойств тканей, кровотока в них и поля температур. Модель с сосредоточенными параметрами позволяет получать лишь средние значения температур в слоях. Для кожи такое осреднение означает одновременно и менее точное описание конвективного теплообмена с внешней средой, так как при этом используется заведомо завышенное значение температуры. Более того, средняя температура фактически не может быть измерена. Термометрия кожи дает температуру поверхности кожных покровов. С этой точки зрения более предпочтительным представляется количественное описание теплопереноса и поля температур в организме пациента при криотерапии, основанное на модели с распределенными параметрами.

Одним из ключевых параметров, обусловливающих температуру кожи человека во время криопроцедуры, является коэффициент теплоотдачи от поверхности кожи. Знание коэффициентов теплоотдачи α от поверхности разных участков кожи применительно к условиям ОГКТ необходимо для корректной оценки и прогноза теплового состояния пациента, разработки эффективных безопасных режимов проведения данной процедуры. Ранее авторами получены оценки критических значений параметра α, основанные на тепловой модели с сосредоточенными параметрами [4].

Национальная академия наук Беларуси

Обзор литературных источников по теплообмену человека с окружающей средой показал отсутствие данных для условий ОГКТ. Количественные измерения коэффициентов теплоотдачи от тела человека выполнены для комнатных условий [6–8].

Цель настоящей работы – сравнение результатов, получаемых при моделировании теплового состояния пациента во время ОГКТ с использованием моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами, а также определение коэффициентов теплоотдачи по экспериментальным данным, полученным методом инфракрасной термометрии, и их сравнение с литературными источниками. Оценки выполнены на основе тепловой модели с распределенными параметрами, позволяющей более точно описывать распределение поля температур в теле человека и тепловой поток через кожные покровы.

Математическая модель с распределенными параметрами. Постановка тепловой задачи с распределенными параметрами для *k*-го слоя *j*-го компартмента имеет вид

$$\left(\rho C_p\right)_{j,k}\frac{\partial T_{j,k}}{\partial t}=\nabla\left(\lambda_{j,k}\nabla T_{j,k}\right)+\left(\rho C_p\right)_b\omega_{j,k}\left(T_{j,k}-T_b\right)+Q_{j,k},\ k=0\text{–}3; \tag{1}$$

$$T_{j,k}\big|_{\Gamma_{jk}}=T_{j,k-1}\big|_{\Gamma_{j,k}};\ \lambda_{j,k}\nabla T_{j,k}\big|_{\Gamma_{jk}}=\lambda_{j,k-1}\nabla T_{j,k-1}\big|_{\Gamma_{jk}},\ k=1,\ 2,\ 3; \tag{2}$$

$$-\lambda_{j,k}\nabla T_{j,k}\big|_{\Gamma_{j4}}=\alpha_j\left(T_{j,k}\big|_{\Gamma_{j4}}-T_{env}\right), \tag{3}$$

$$T_{j,k}\left(t=0\right)=T_{j,k}^0. \tag{4}$$

Слагаемое Q_{jk} в уравнении энергии (1) учитывает мощность внутренних источников тепла метаболизма, тепла, выделяемого во время мышечной работы (в мышечном слое), и стоков тепла в ядре компартмента «грудная клетка», обусловленных испарительным охлаждением в легких при дыхании. Индекс *b* показывает, что теплофизический параметр относится к крови, ω – величина перфузии крови. Учет изменения интенсивности кровотока в биоткани осуществляется по модели Столвика–Харди для мышцы и кожи [9]. Согласно нашим более ранним оценкам, основанным на модели с сосредоточенными параметрами, влиянием кровотока в коже на теплообмен при ОГКТ можно пренебречь [10], однако он учитывается на этапах, предшествующих криопроцедуре.

Особенностью рассматриваемой тепловой задачи является определение коэффициента теплоотдачи α, при котором к моменту времени *t* температура поверхности кожи рассматриваемого участка достигает заданной величины $T_{\text{эксп}}$. Похожая задача ранее рассмотрена авторами в [4] применительно к модели с сосредоточенными параметрами и критическим условиям теплообмена, при которых кожа охлаждается до температуры ниже терминального порога, при достижении которого возможно холодовое повреждение тканей пациента. Отличия связаны с более детальным описанием поля температур в рамках модели с распределенными параметрами (1)–(4).

Алгоритм решения рассматриваемой задачи состоит в том, что при некотором начальном приближении параметра $\alpha^{(0)}$ решается прямая нестационарная тепловая задача (1)–(4) с определением температуры поверхности кожи заданного участка. Определяется величина целевой (минимизируемой) функции: абсолютное значение отклонения вычисленной температуры от заданной температуры, измеренной в эксперименте. Коэффициент теплоотдачи варьируется в заданных пределах и при каждом его значении решается прямая тепловая задача (1)–(4) с определением поля температур по глубине биоткани и на поверхности кожи. Расчетная температура кожных покровов для каждой части тела сравнивается с заданной температурой, полученной из эксперимента. Определяется значение коэффициента теплоотдачи, при котором величина рассогласования между заданной и расчетной температурами минимальна.

Тепловую задачу решали в приближении отсутствия вынужденной конвекции и однородности температуры в кабине криосауны. Полагали, что степень черноты стен кабины и кожи пациента равна 1, а стены имеют температуру окружающего их воздуха (–110 °С).

Национальная академия наук Беларуси

Решение нестационарной тепловой задачи предполагает задание начального распределения температур. С целью определения теплового состояния пациента перед общим криовоздействием рассматривали дополнительно три этапа. Первый этап – определение установочных (set-point) температур, необходимых для применения терморегуляционной модели Столвика [11]. Эти температуры характерны для конкретного человека с его специфическими антропометрическими и возрастными данными. Под следующими этапами подразумеваем пребывание обнаженного пациента при комнатной температуре 20 °С в течение 15 мин (второй этап), адаптация пациента к низкой температуре в предкамере криоустановки при –60 °С на протяжении 30 с (третий этап). Завершающий (четвертый этап) нашего моделирования – нахождение пациента в основной процедурной камере криоустановки при –110 °С в течение 3 мин. Восстановление после ОГКТ температуры кожных покровов пациента при комнатных условиях в данной статье не рассматривалось.

С использованием разработанной нами компьютерной программы выполнен тепловой расчет для двух моделей: с сосредоточенными и распределенными параметрами (далее условно называемых моделями 0D и 1D). Вычисленные по обеим моделям величины коэффициентов теплоотдачи сравнивались между собой, а также со справочными значениями, получаемыми из известных аппроксимационных соотношений для коэффициентов теплообмена вертикального цилиндра при ламинарном и турбулентном режимах естественной конвекции воздуха [12], учитывающих и радиационную составляющую.

В качестве исходных данных использованы температуры поверхности разных частей тела спортсменов академической гребли, полученные методом инфракрасной термометрии сразу после прохождения процедуры. Температуры усреднялись по поверхности компартментов «грудная клетка», «живот», «плечо» и «бедро».

Результаты моделирования. Величины всех терморегуляционных сигналов, а также интенсивность метаболических источников тепла зависят от рассогласования между текущей температурой биоткани в некоторой точке или слое и характерной (set-point) температурой в этой же точке или слое. Характерные температуры вычислялись для полностью обнаженного человека, находящегося в термонейтральных условиях (температура окружающего воздуха 29 °С, отсутствие мышечной работы, положение лежа). Исходные данные и основные результаты моделирования теплового состояния пациента и теплообмена (полученные значения коэффициентов теплоотдачи) представлены в табл. 1–4. В табл. 3 приведены установочные значения температур слоев биоткани разных компартментов для модели 0D и средние по каждому слою значения установочных температур для модели 1D. Моделирование показало, что при стандартных для модели Столвика удельных мощностях метаболических тепловыделений температура мозга (ядра компартмента «голова») существенно зависит от комплекции человека. Значение температуры мозга 37 °С, отраженное в табл. 3, получено при соответствующей коррекции этих мощностей. Чтобы в рамках нашей антропометрической модели у 22-летнего мужчины ростом 180 см, массой тела 80 кг и мышечной массой 40 кг температура мозга была равна 37 °С, необходимо увеличить характерные для термонейтральных условий удельные мощности метаболических тепловыделений у стандартного человека, полученные Столвиком, на 6,3 и 8,8 % для моделей 0D и 1D соответственно.

Таблица 1. **Параметры пациента**

Параметр	Значение	Слой	Масса слоев и крови, кг
Возраст, лет	22	Ядро	18,61 (23,3%)
Рост, см	180	Мышцы	40,02 (50,1%)
Масса, кг	80	Жир	12,25 (15,3%)
Площадь поверхности кожи, м^2	1,98	Кожа	3,29 (4,1%)
		Кровь	5,78 (7,2%)

Таблица 2. **Измеренные средние температуры участков кожи пациента**

Компартмент	«Грудная клетка»	«Живот»	«Плечо»	«Предплечье»	«Бедро»	«Голень»
Температура,°С	18,45	18,82	15,47	16,87	15,42	19,17

Национальная академия наук Беларуси

Таблица 3. **Установочные (set-point) температуры слоев биоткани**

Компартмент	Ядро		Мышца		Жировая клетчатка		Кожа	
	0D	1D	0D	1D	0D	1D	0D	1D
«Голова»	37,00	37,00	36,86	36,82	36,42	36,49	36,32	36,38
«Лоб»	36,84	36,84	36,85	36,77	36,51	36,54	36,43	36,45
«Лицо»	36,85	36,80	36,85	36,76	36,56	36,53	36,34	36,35
«Шея»	36,97	36,95	36,80	36,71	35,50	35,98	35,32	35,82
«Грудная клетка»	36,84	36,79	36,87	36,76	35,56	35,90	34,97	35,41
«Живот»	37,06	37,03	36,88	36,79	35,53	35,79	34,79	35,18
«Плечо»	36,72	36,85	36,71	36,62	35,39	35,89	35,18	35,70
«Предплечье»	36,72	36,85	36,71	36,62	35,39	35,89	35,18	35,70
«Кисть»	36,20	36,15	36,18	36,07	35,78	35,80	35,55	35,62
«Бедро»	36,80	36,88	36,79	36,70	35,49	35,88	35,05	35,52
«Голень»	36,79	36,87	36,79	36,69	35,46	35,86	35,02	35,49
«Ступня»	36,49	36,43	36,46	36,34	35,96	35,97	35,61	35,71

Таблица 4. **Сравнение результатов для моделей 0D и 1D на трех этапах**

Параметр	Комфортные условия		Комнатные условия		После ОГКТ	
	0D	1D	0D	1D	0D	1D
Тепло метаболизма, Вт*	81,6	83,0	79,2	80,3	76,4	76,1
Работа мышц (без учета миокарда), Вт	0	0	23,6	24,1	71,6	73,0
Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К)**	14,50	11,26	14,39	11,20	5,91	9,87
Средняя температура кожи,°С	35,03	35,43	32,09	33,40	17,48	17,48
Температура крови, °С	36,84	36,79	36,67	36,56	36,70	36,45
Температура мозга, °С	37	37	36,83	36,78	36,85	36,70
Ректальная температура (ядро компартмента «живот»),°С	37,06	37,03	36,93	36,85	36,92	36,79
Сердечный выброс, л/мин	5,51	5,46	5,54	5,56	5,68	5,66

*Учитывается также 10 Вт тепла, выделяемого сердцем в ядре компартмента «грудная клетка».

**Для первых двух этапов показаны справочные значения коэффициентов теплообмена. Для этапа ОГКТ – вычисленные значения с учетом экспериментальных температур поверхности кожи.

Максимальные различия между установочными температурами, вычисленными по моделям 0D и 1D, составили 0,13 °С в ядре компартментов «плечо» и «предплечье», 0,12 °С в мышечном слое ступней, 0,50 и 0,52 °С в жировом слое и коже руки (плеча и предплечья) соответственно. Наибольшие установочные температуры (37,06 и 37,03 °С для моделей 0D и 1D) наблюдались в ядре компартмента «живот», а наименьшие (34,79 и 35,18 °С) – в слое кожи этой же части тела.

Сравнение основных результатов для моделей 0D и 1D на трех этапах расчета теплового состояния пациента (табл. 4), обнаруживает очень слабое различие между рассматриваемыми моделями по величинам теплопродукции за счет тепла метаболизма и мышечной работы, а также по значению минутного сердечного выброса. Детализация геометрии расчетной области наиболее существенно проявилась на вычисленных коэффициентах теплоотдачи: различия между моделями 0D и 1D составили 28,8, 28,5 и 67,0 % для этапов «комфортные условия», «комнатные условия» и ОГКТ соответственно. Для этих же этапов различия в температуре крови составили 0,05, 0,11, 0,25 °С, температуры мозга различались на 0, 0,05, 0,15 °С, разница в ректальной температуре составила 0,03, 0,08, 0,13 °С. Различия в средней температуре кожи были 0,40, 1,31 и 0 °С. Тождественность средних температур участков кожного покрова для моделей 0D и 1D обусловлена зада-

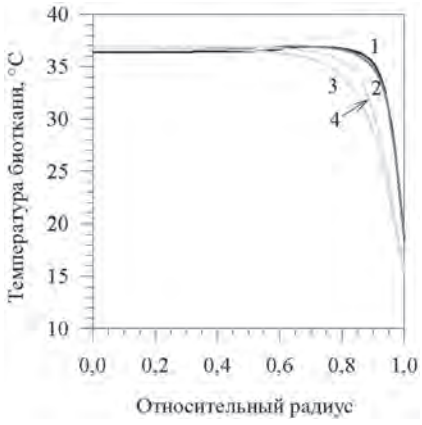


Рис. 1. Профиль температур по толщине биоткани компартментов: *1* – «грудная клетка», *2* – «живот», *3* – «плечо», *4* – «бедро»

Национальная академия наук Беларуси

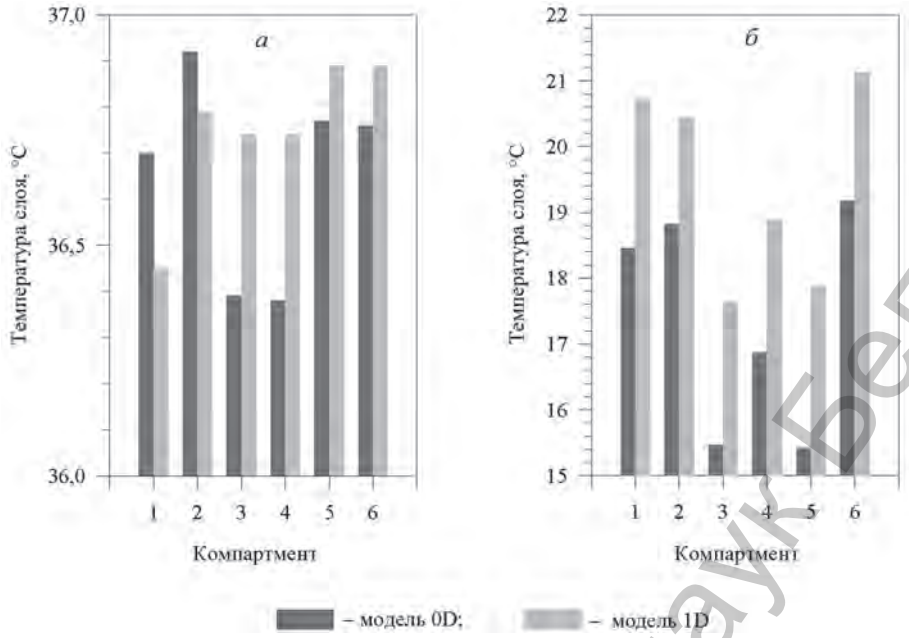


Рис. 2. Сравнение средних температур ядра (*а*) и кожи (*б*) компартментов «грудная клетка» (*1*), «живот» (*2*), «плечо» (*3*), «предплечье» (*4*), «бедро» (5), «голень» (*6*) после завершения ОГКТ

нием предопределенных (экспериментальных) значений температур поверхности кожи и соответствующим выбором (определением) коэффициентов теплоотдачи на этапе ОГКТ.

Вычисленные распределения температур по относительной координате, представляющей собой отношение текущего радиуса точки в глубине биоткани к радиусу поверхности кожи для рассмотренных частей тела, приведены на рис. 1. Можно отметить близость распределений температур в слое кожи для компартментов «грудная клетка» и «живот», а также некоторое увеличение температур в мышечном слое по сравнению с ядром. Температура компартментов «плечо» и «бедро» монотонно снижается от центра к периферии. В компартменте «бедро», более крупном, чем компартмент «плечо», на одинаковых относительных глубинах наблюдаются и более высокие температуры, что связано с влиянием выделения тепла в мышечном слое, имеющем бóльшую толщину в бедре, чем в руке.

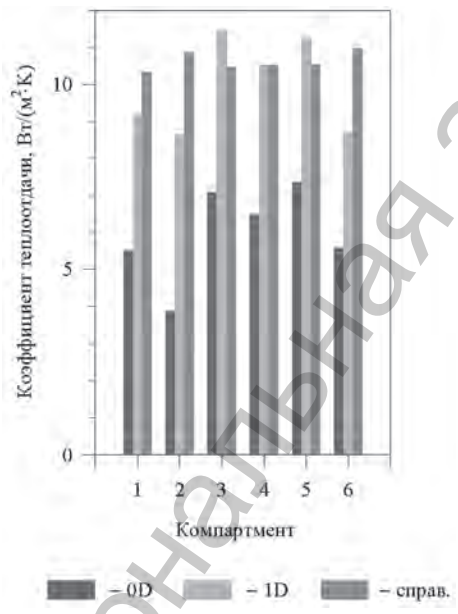


Рис. 3. Сравнение вычисленных и справочных значений коэффициентов теплоотдачи от компартментов «грудная клетка» (*1*), «живот» (*2*), «плечо» (*3*), «предплечье» (*4*), «бедро» (*5*), «голень» (*6*)

Средние значения температур слоев «ядро» и «кожа» нескольких крупнейших частей тела, полученные по моделям с сосредоточенными и распределенными параметрами, показаны на рис.2. Можно отметить сравнительно небольшие различия в температурах ядра (менее 0,4 °С) и значительные отличия в вычисленных средних температурах кожи (до 2,4 °С в компартменте «бедро»). Примечательно, что почти для всех случаев средние температуры слоев биоткани, полученные согласно модели с распределенными параметрами, оказались выше, чем температуры по модели с сосредоточенными параметрами. Исключение составил лишь слой «ядро» компартментов «грудная клетка» и «живот».

Основной результат нашего исследования представляет рис. 3, показывающий вычисленные, согласно моделям 0D, 1D и справочным данным, коэффициенты теплоотдачи. Очевидно, что модель 0D дает сильно заниженные ве-

Национальная академия наук Беларуси

личины коэффициентов теплоотдачи от поверхности кожи. Максимальное отличие от справочных данных составило 181 % в компартменте «живот», а минимальное различие – 43,3 % в компартменте «бедро». Модель 1D позволяет получать более близкие значения рассматриваемого параметра к результатам, полученным по справочным формулам. Максимальное отличие от справочных данных составило 25,7 %, а минимальное – 6,8% для компартментов «живот» и «бедро» соответственно. Подчеркнем, что в случае решения прямой тепловой задачи с заданием справочных значений коэффициентов теплоотдачи модель с сосредоточенными параметрами будет всегда давать заниженные значения температуры кожи пациента во время процедуры ОГКТ.

Заключение. Моделирование теплового состояния пациента после ОГКТ с использованием моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами обнаружило близость расчетных значений минутного сердечного выброса, а также мощности суммарных по телу человека источников тепловыделений, обусловленных метаболическими процессами и мышечной работой. Температуры крови, головного мозга и ядра компартмента «живот» (ректальная) в случае модели с распределенными параметрами меньше значений, получаемых по модели с сосредоточенными параметрами на 0,25 °С, 0,15 °С и 0,13 °С. Наиболее существенное отличие, связанное со степенью детализации геометрии расчетной области, наблюдается в расчетных значениях средних по компартментам и всему телу коэффициентов теплоотдачи. Вычисляемые с использованием измеренных температур поверхности кожи коэффициенты теплоотдачи разных участков кожи оказываются ближе к справочным значениям в случае модели 1D по сравнению с моделью 0D. Последняя модель дает сильно заниженные величины этих коэффициентов. Максимальное отличие от справочных данных при использовании модели с сосредоточенными параметрами составило 181 % в компартменте «живот», а минимальное отличие – 43,3 % в компартменте «бедро». В случае модели 1D максимальное отличие между коэффициентами теплоотдачи, вычисленными по заданной температуре разных участков кожи и по справочным данным, составило 25,7 %, а минимальное отличие – 6,8% для компартментов «живот» и «бедро», соответственно. При моделировании теплового состояния пациента в условиях ОГКТ целесообразно использование модели с распределенными параметрами, обеспечивающей более реалистичное описание конвективного теплообмена поверхности тела пациента с окружающим газовым хладагентом.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № Ф13-147).

Литература

1. *Панченко О. А. Криотерапия.* Киев, 2013.

2. *Banfi G., Lombardi G, Colombini A, Melegati G.* // Sports Med. 2010. Vol. 40, N6. P. 509–517.

3. *Левин М. Л., Лукъянская Л. А., Пятина Г. А.* // Матер. III науч.-практ. конф. «Криотерапия в России», Санкт-Петербург, 13 мая 2010. СПб., 2010. С. 20–28.

4. *Маханёк А. А., Левин М. Л., Драгун В. Л.* // Матер. III науч.-практ. конф. «Криотерапия в России», Санкт-Петербург, 13 мая 2010. СПб., 2010. С. 42–48.

5. *Маханёк А. А., Левин М. Л., Драгун В. Л.* // Матер. IV науч.-практ. конф. «Криотерапия в России», Санкт-Петербург, 13 мая 2011. СПб., 2011. С. 50–61.

6. *de Dear R. J., Arens E., Hui Z., Oguro M.* // Int. J. Biometeorol. 1997. Vol. 40. P. 141–156.

7. *Gao N. P., Niu J. L.* // Indoor Built Environ. 2005. Vol. 14, N 1. P. 5–16.

8. *Najjaran A.* // Transaction on control and mechanical systems. 2012. Vol. 1, N 8, P. 362–369.

9. *Stolwijk J. A. J., Hardy J. D.* // Pflugers Arch. 1966. Vol. 291. P. 129–162.

10. *Маханек А. А., Драгун В. Л., Левин М. Л.* // Матер. II науч.-практ. конф. «Криотерапия в России», Санкт-Петербург, 14 мая 2009. СПб., 2009. С. 80–103.

11. *Stolwijk J. A. J.* In: Thermal characteristics of tumors: applications in detection and treatment / Ed. R. K. Jain, P. M. Gullino. Annals of the New York Academy of Sciences. 1980. Vol.335. P. 98–106.

12. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М., 1982. С. 177–178.

Национальная академия наук Беларуси

M. L. LEVIN, A. A. MAKHANIOK

COMPARISON OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF WHOLE GAS CRYOTHERAPY WITH LUMPED AND DISTRIBUTED PARAMETERS

Summary

The results of the numerical solution of the heat problem of whole body gas cryotherapy (WBGC) using models with lumped and distributed parameters have been presented. Heat transfer coefficients from the surface of various parts of the human body, which correspond to given (measured by thermographic technique) average temperatures of these surfaces after the completion of WBGC procedure were calculated. It has been found out that the model with lumped parameters gives strongly understated values of heat transfer coefficients in comparison with empirical reference data. Model with distributed parameters reveals the best fit of the calculated heat transfer coefficients to the reference data. The maximum difference was less than 26%.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 677.017.56:536.495

А. М. ГУСАРОВ[1], А. А. КУЗНЕЦОВ[1], Н. М. ДМИТРАКОВИЧ[2], С. М. ДАНИЛОВА-ТРЕТЬЯК[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МНОГОСЛОЙНОМ ПАКЕТЕ МАТЕРИАЛОВ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

[1]Витебский государственный технологический университет,
[2]Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь,
[3]Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 12.08.2014)

При проектировании боевой одежды пожарных (БОП) большое значение имеет формирование пакетов материалов, отвечающих нормативным требованиям. Основными критериями для оценки показателей теплозащитных свойств БОП при тепловом воздействии является температура подкостюмного пространства, или температура на внутренней поверхности пакета материалов, которая и определяет время потенциально безопасной эксплуатации защитной одежды при тепловом воздействии.

Исследование теплофизических свойств отдельных материалов, входящих в состав БОП, не позволяет определить уровень защитных свойств всего пакета, установить распределение температурных полей внутри него и соответственно осуществить прогноз времени безопасной эксплуатации защитной одежды при тепловом воздействии различного уровня.

Экспериментальный подбор материалов для формирования пакета БОП, используемый в настоящее время, связан со значительными временными и материальными затратами при проведении испытаний по определению его соответствия нормативным требованиям.

Возникает необходимость в разработке аналитических методов расчета температурного поля в пакете материалов БОП при тепловом воздействии в ходе нормативных испытаний. Однако сложность и громоздкость решений задач теплопереноса, связанные с многослойностью пакета, несимметричностью граничных условий, нестационарностью процесса теплообмена, непостоянством показателей теплофизических свойств материалов, приводят к невозможности практического использования полученных решений. Вследствие этого требуется разработка простого в физическом понимании и приемлемого в практическом использовании аналитического метода, который бы позволял адекватно рассчитать распределение температуры в многослойном пакете материалов БОП при тепловом воздействии и на основании полученных данных проектировать его состав.

Устойчивость пакета материалов БОП к воздействию теплового потока определяют согласно СТБ 1971–2009 »Одежда пожарных боевая. Общие технические условия». При анализе структуры и разработке модели процесса были приняты следующие допущения:

материалы пакета рассматриваются как твердое непрозрачное, однородное тело;

на границе раздела слоев происходит контактный теплообмен – передача теплоты между соприкасающимися твердыми поверхностями. Контакт этих поверхностей идеальный и термическое сопротивление в зоне контакта равно нулю.

Указанные допущения вносят определенную погрешность в количественные результаты расчета, однако качественная картина процесса теплопереноса сохраняется.

Поскольку ширина и длина материалов пакета несоизмеримо велики по сравнению с толщиной, то их можно рассматривать как неограниченные пластины, а процесс определения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока можно представить как нестационарный процесс теплопроводности в многослойной пластине при воздействии теплового потока с постоянной плотностью.

Национальная академия наук Беларуси

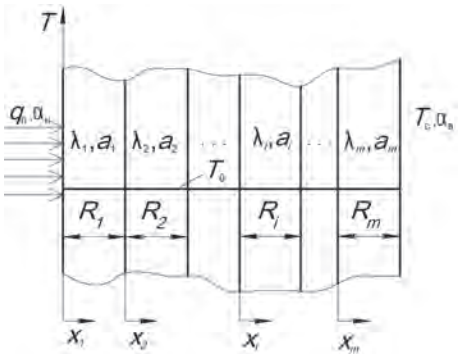


Рис. 1. Схематическое представление объекта исследования

Схематическое представление объекта исследования приведено на рис. 1. На наружную поверхность многослойной пластины воздействует тепловой поток $q_п$. Ее внутренняя поверхность взаимодействует с окружающей средой T_c. Требуется найти распределение температуры по толщине многослойной пластины в любой момент времени. Для каждого слоя известны численные значения коэффициентов теплопроводности λ_i и удельной теплоемкости c_{pi}, а также его толщина R_i.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для многослойной пластины с показателями теплофизических свойств, зависящими от температуры, имеет вид [1, 2]

$$(\rho c_p)_i \frac{\partial T_i(x_i,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_i \frac{\partial T_i(x_i,\tau)}{\partial x_i}\right) (0 < x_i < +R_i; i = 1, \ldots, m), \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i-го слоя, кг/м^3; T_i – температура слоя, К; x_i, – пространственная координата в декартовой системе, м; τ – время, с; i – номер слоя; R_i – толщина i-го слоя, м.

На границе сопряжения слоев заданы граничные условия четвертого рода исходя из равенства тепловых потоков и температур

$$\begin{cases} \lambda_{i-1}(T_{i-1}) \dfrac{\partial T_{i-1}(R_{i-1},\tau)}{\partial x_{i-1}} = \lambda_i(T_i) \dfrac{\partial T_i(0,\tau)}{\partial x_i} (i = 2, \ldots, m), \\ T_{i-1}(R_{i-1},\tau) = T_i(0,\tau)\ (i = 2, \ldots, m), \end{cases} \quad (2)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i-го слоя, Вт/(м·К).

Запишем граничные условия на внутренней и наружной поверхностях исследуемой системы. Оценка показателей теплозащитных свойств пакета материалов БОП производится при воздействии на его наружную поверхность теплового излучения с постоянной поверхностной плотностью [3]. Одна часть падающего теплового излучения поглощается материалом верха БОП, а другая часть отражается от его наружной поверхности. При этом вследствие нагрева происходит теплоотдача с наружной поверхности материала верха тепловой энергии в виде конвекции. Таким образом, баланс тепла на наружной поверхности многослойной пластины сведен к следующему граничному условию [4]:

$$-\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(0,\tau)}{\partial x_1} = A q_п - \alpha_н T_1(0,\tau), \quad (3)$$

где $q_п$ – плотность потока теплового воздействия, Вт/м^2; A – интегральная поглощательная способность наружного слоя; $\alpha_н$ – «наружный» коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

На внутренней поверхности происходит теплообмен с окружающей средой, который определяется граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m(R_m,\tau)}{\partial x_m} = \alpha_в (T_m(R_m,\tau) - T_c), \quad (4)$$

где $\alpha_в$ – «внутренний» коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К), T_c – температура окружающей среды, К.

Начальные условия задаются в виде

$$T_i(x_i, 0) = T_0\ (i = 1, \ldots, m). \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений теплопроводности (1) вместе с граничными (2)–(4) и начальными (5) условиями является математической моделью реального процесса испытаний пакета материалов БОП на соответствие нормативным требованиям. Решение данной системы

Национальная академия наук Беларуси

позволит получить картину распределения тепла в многослойном пакете материалов БОП и проанализировать кинетику и динамику процесса теплопереноса в нем.

Так как система уравнений, описывающая процесс теплопереноса в многослойной пластине, является нелинейной (в силу того, что коэффициенты теплопереноса зависят от температуры), то получение единого аналитического решения задачи теплопереноса практически невозможно. Вследствие этого для решения поставленной задачи целесообразно использовать комбинированный метод решения краевых задач теплопереноса. Данный метод базируется на основе сочетания элементов аналитического и численного решений [5–7].

Суть метода состоит в том, что весь процесс теплопередачи разбивается на множество малых временных интервалов, в пределах каждого из которых коэффициенты теплопереноса в слоях и плотности теплового потока через соприкасающиеся поверхности слоев имеют постоянное значение, а также одинаковую температуру на стыках слоев. Следовательно, на стыках слоев наблюдается идеальный тепловой контакт, но граничные условия четвертого рода на стыке слоев заменяются условиями первого и второго рода, что облегчает решение задачи.

Таким образом, общая задача для многослойной пластины разбивается на три автономные задачи:

для наружного слоя ($i = 1$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями (3) на левой границе, граничными условиями первого рода на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2, *а*);

для промежуточных слоев ($i = 2, ..., m-1$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями второго рода на левой границе, граничными условиями первого рода на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2, *б*);

для внутреннего слоя ($i = m$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями второго рода на левой границе, с условиями (4) на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2, *в*).

На основании теоремы подобия Кирпичева–Гухмана [8, 9] для уменьшения числа аргументов и облегчения решения представленных выше задач уравнения представлялись в безразмерных переменных. Аналитические решения задач для отдельных слоев пакета получены методом интегрального преобразования Лапласа и представлены в виде бесконечных сходящихся рядов [2, 10].

Аналитическое решение задачи для первого слоя имеет следующий вид:

$$\Theta_1(\eta_1, \mathrm{Fo}_1) = \Theta_{1,R}\frac{(\mathrm{Bi}_1\eta_1 + 1)}{(\mathrm{Bi}_1 + 1)} - \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\mathrm{Bi}_1 \sin\left[\mu_{n,1}(\eta_1 - 1)\right]}{\left(\mathrm{Bi}_1 + \cos^2\mu_{n,1}\right)}\exp\left(-\mu_{n,1}^2\mathrm{Fo}_1\right)\times$$
$$\times\left(\int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi)\sin\left[\mu_{n,1}(1-\xi)\right]d\xi - \frac{\Theta_{1,R}}{\mu_{n,1}}\right), \qquad (6)$$

где $\Theta_1(\eta_1, \mathrm{Fo}_1) = \left(\frac{Aq_{\text{п}}}{\alpha_{\text{н}}} - T_1(x_1, \tau)\right) \Big/ T_1(R_1, 0)$ – безразмерная температура первого слоя пакета; $\Theta_{1,0} = \left(\frac{Aq_{\text{п}}}{\alpha_{\text{н}}} - T_1(x_1, 0)\right) \Big/ T_1(R_1, 0)$ – безразмерная температура первого слоя пакета в начальный

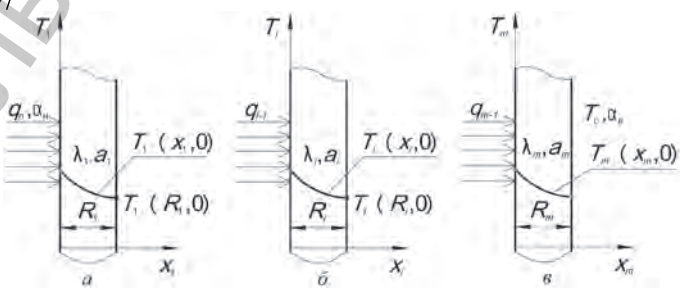


Рис. 2. Расчетные схемы нестационарной теплопроводности для отдельных слоев m-слойной пластины при несимметричных граничных условиях: *а* –наружный слой ($i = 1$); *б* – промежуточный слой ($i = 2, ..., m-1$); *в* – внутренний слой ($i = m$)

Национальная академия наук Беларуси

момент времени; $\Theta_{1,\mathrm{R}} = \left(\dfrac{Aq_{\text{п}}}{\alpha_{\text{н}}} - T_1(R_1,0) \right) \Big/ T_1(R_1,0)$ – безразмерная температура на внутренней поверхности первого слоя пакета в начальный момент времени; $\eta_1 = x_1/R_1$ – безразмерная координата первого слоя пакета; ξ – безразмерная текущая координата первого слоя пакета; $\mathrm{Fo}_1 = a_1\tau/R_1^2$ – число Фурье первого слоя пакета; $\mathrm{Bi}_1 = \alpha_{\text{н}} R_1/\lambda_1$ – критерий Био первого слоя пакета; $\mu_{n,1}$ – корень характеристического уравнения ($\mu_{n,1} = -\mathrm{Bi}_1 \operatorname{tg}\mu_{n,1}$).

Аналитическое решение задачи для *i*-го слоя имеет следующий вид:

$$\Theta_i(\eta_i,\mathrm{Fo}_2) = \mathrm{Ki}_i \left[(1-\eta_i) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\cos(\mu_{n,i}\eta_i)}{\mu_{n,i}^2} \exp\left(-\mu_{n,i}^2 \mathrm{Fo}_i\right) \right] + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} 2\cos(\mu_{n,i}\eta_i) \exp\left(-\mu_{n,i}^2 \mathrm{Fo}_i\right) \int_0^1 \Theta_{i,0}(\xi)\cos(\mu_{n,i}\xi)\,\mathrm{d}\xi, \tag{7}$$

где $\Theta_i(\eta_i,\mathrm{Fo}_i) = \left(T_i(x_i,\tau) - T_i(R_i,0)\right)/T_i(R_i,0)$ – безразмерная температура *i*-го слоя пакета; $\Theta_{i,0} = \left(T_i(x_i,0) - T_i(R_i,0)\right)/T_i(R_i,0)$ – безразмерная температура *i*-го слоя пакета в начальный момент времени; $\eta_i = x_i/R_i$ – безразмерная координата *i*-го слоя пакета; ξ – безразмерная текущая координата *i*-го слоя пакета; $\mathrm{Fo}_i = a_i\tau/R_i^2$ – число Фурье *i*-го слоя пакета; $\mathrm{Ki}_i = \left(q_{i-1}R_i\right)/\left(\lambda_i T(R_i,0)\right)$ – критерий Кирпичева *i*-го слоя пакета; $\mu_{n,i}$ – корень характеристического уравнения $\left(\mu_{n,i} = (2n-1)\dfrac{\pi}{2}\right)$.

Аналитическое решение задачи для *m*-го слоя имеет следующий вид:

$$\Theta_m(\eta_m,\mathrm{Fo}_m) = \mathrm{Ki}_m \left[\frac{\left[\mathrm{Bi}_m(1-\eta_m)+1\right]}{\mathrm{Bi}_m} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mathrm{Bi}_m \cos(\mu_{n,m}\eta_m)}{\mu_{n,m}^2\left(\mathrm{Bi}_m + \sin^2\mu_{n,m}\right)} \exp\left(-\mu_{n,m}^2 \mathrm{Fo}_m\right) \right] + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mathrm{Bi}_m \cos(\mu_{n,m}\eta_m)}{\left(\mathrm{Bi}_m + \sin^2\mu_{n,m}\right)} \exp\left(-\mu_{n,m}^2 \mathrm{Fo}_m\right) \int_0^1 \Theta_{m,0}(\xi)\cos(\mu_{n,m}\xi)\,\mathrm{d}\xi, \tag{8}$$

где $\Theta_m(\eta_m,\mathrm{Fo}_{\mathrm{m}}) = \left(T_m(x_m,\tau) - T_{\mathrm{c}}\right)/T_{\mathrm{c}}$ – безразмерная температура *m*-го слоя пакета; $\Theta_{0,m}(\eta_m, 0) = \left(T_m(x_m,0) - T_{\mathrm{c}}\right)/T_{\mathrm{c}}$ – безразмерная температура *m*-го слоя пакета в начальный момент времени; $\eta_m = x_m/R_m$ – безразмерная координата *m*-го слоя пакета; ξ – безразмерная текущая координата *m*-го слоя пакета; $\mathrm{Fo}_m = a_m\tau/R_m^2$ – число Фурье *m*-го слоя пакета; $\mathrm{Bi}_m = \alpha_{\text{в}} R_m/\lambda_m$ – критерий Био *m*-го слоя пакета; $\mu_{n,m} = \mathrm{Bi}_m \operatorname{ctg}\mu_{n,m}$ – корень характеристического уравнения.

Полученные аналитические решения (6)–(8) можно использовать для расчета температурного поля однослойных материалов с различными несимметричными граничными условиями. Общее решение для многослойного пакета материалов БОП реализовано с помощью методики численного сопряжения на каждом малом временном интервале аналитических решений (6) –(8) по всем слоям.

Алгоритм комбинированного метода расчета процесса теплопередачи в многослойном пакете материалов БОП реализован в виде программы для ПЭВМ. Последняя позволяет в течение небольшого интервала времени получить распределение температуры по слоям пакета материалов БОП в процессе практически любого теплового воздействия и провести всесторонний анализ процесса теплопередачи.

Адекватность получаемых результатов расчета температурного поля зависит от величины шага по времени и по толщине слоя, а также от достоверности оценки показателей теплофизических свойств слоев пакета. Для оценки адекватности полученных моделей расчета теплопереноса в многослойных пакетах материалов на базе научно-исследовательского центра Витебского областного управления МЧС проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве объекта исследования использовался пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из материала верха (материал типа «Арселон-С», арт. 09с-368/1 саржевого переплетения), водонепроницаемого слоя (мембранный материал ТУ BY 300620644.017–2008), теплоизоляционной подстежки (ватин полушерстяной холстопрошивной) и подкладочной ткани

Национальная академия наук Беларуси

(100 %-ная хлопчатобумажная ткань). Образец материала размером 210×70 мм подвергался воздействию теплового потока плотностью в диапазоне от 1 до 5 кВт/м^2, действие которого не приводит к возникновению видимых признаков деструкции пакета: разрушение наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавление, обугливание, прогар); отслоение полимерного покрытия от тканевой основы водонепроницаемого слоя; воспламенение. Тепловое воздействие продолжалось до наступления стационарного режима. В процессе исследования регистрировались значения температуры на наружной и внутренней поверхностях всех слоев пакета материалов, а также плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов БОП.

Для комбинированного расчета распределения температуры по толщине многослойного пакета материалов при тепловом воздействии в исследуемом диапазоне использовалась разработанная программа со следующими параметрами: шаг по времени $\Delta\tau = 1$ с; шаг по толщине слоя $\Delta\eta_i = 0{,}01$ (i= 1, ..., m), количество членов сходящегося ряда аналитического решения $n = 6$.

Коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости, объемная плотность, толщина материалов пакета БОП, степень черноты поверхности материала верха измерены в Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Коэффициенты теплоотдачи определены экспериментально в испытательной лаборатории учреждения «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь». Численные значения представлены в табл. 1–4.

Таблица 1. **Объемная плотность и толщина материалов пакета**

Слой	Объемная плотность, ρ_i, кг/м^3	Толщина, R_i, м
Материал верха	448	0,0017
Водонепроницаемый слой	753	0,0009
Теплоизоляционная подкладка	306	0,0044
Подкладочная ткань	816	0,0002

Таблица 2. **Коэффициенты теплопроводности материалов пакета**

Температура t, ºС	Коэффициент теплопроводности λ_i, Вт/(м·К)			
	материал верха	водонепроницаемый слой	теплоизоляционная подкладка	подкладочная ткань
25	0,104	0,126	0,087	0,059
50	0,103	0,131	0,082	0,060
75	0,106	0,134	0,091	0,060
100	0,111	0,146	0,093	0,064
125	0,121	0,152	0,107	0,067
150	0,125	0,154	0,109	0,068

Таблица 3. **Коэффициенты удельной теплоемкости материалов пакета**

Температура t, ºС	Коэффициент удельной теплоемкости c_i, Дж/(К·кг)			
	материал верха	водонепроницаемый слой	теплоизоляционная подкладка	подкладочная ткань
25	1126	655	1243	649
50	1275	1135	1238	983
75	1290	1273	1397	1286
100	1275	1277	1468	1394
125	1328	1203	1630	1474
150	1585	1334	1755	1345

Таблица 4. **Коэффициенты теплоотдачи при различном уровне теплового воздействия**

Плотность теплового потока, падающего на наружную поверхность пакета, $q_п$, Вт/м^2	Коэффициент теплоотдачи «внутренний», $\alpha_в$, Вт/(м^2·К)	Коэффициент теплоотдачи «наружный», $\alpha_н$, Вт/(м^2·К)
1000	23,02	1,07
2000	23,68	2,72
3000	24,26	3,78
4000	24,95	4,79
5000	25,54	5,86

Национальная академия наук Беларуси

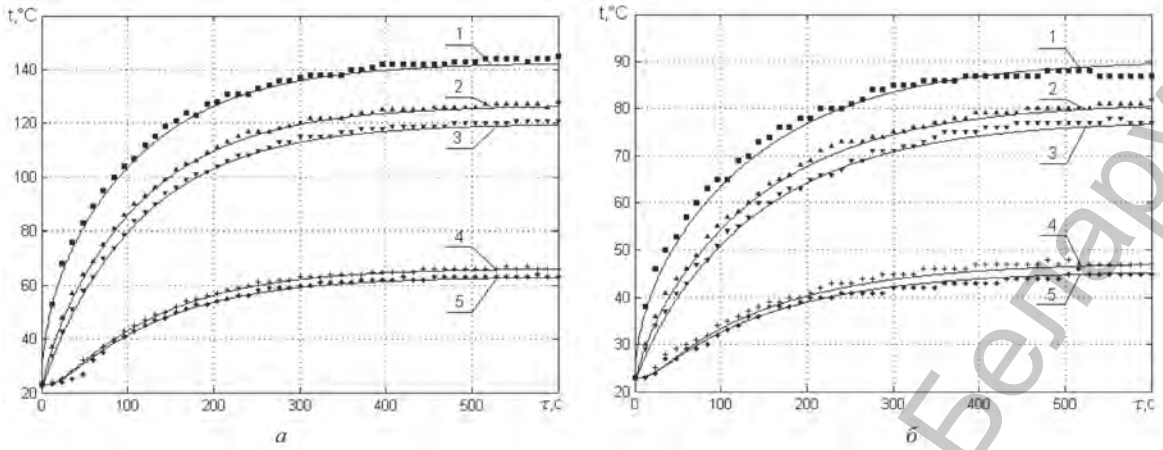


Рис. 3. Зависимость температуры t от времени τ по слоям пакета материалов при плотности теплового воздействия $q_п = 2$ кВт/м^2 (*а*), $q_п = 4$ кВт/м^2 (*б*): *1* – на наружной поверхности пакета; *2* – между материалом верха и водонепроницаемым слоем; *3* – между водонепроницаемым слоем и теплоизоляционной подстежкой; *4* – между теплоизоляционной подстежкой и подкладочной тканью; *5* – на внутренней поверхности пакета

Так как по закону Кирхгофа поглощательная способность серых тел совпадает с их степенью черноты и не зависит от длины волны [4, 11], то поглощательная способность материала верха численно равна степени его черноты: $\varepsilon_{пов} = 0,75$ [12].

В результате проведенных исследований получены экспериментальные и расчетные зависимости изменения температур на внутренней и внешней поверхностях для всех слоев пакета материалов. Некоторые результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов нестационарной теплопроводности в многослойном пакете материалов БОП представлены на рис. 3, *а, б.*

Разность экспериментальной и расчетной температур для всех слоев пакета при различной плотности падающего теплового потока на протяжении всего процесса нагревания составляет не более 3 °С.

По результатам проведенного комплекса исследований возможно проектирование состава многослойного пакета материалов БОП, что приводит к существенному сокращению временных и материальных затрат при проведении нормативных испытаний по определению устойчивости боевой одежды пожарных к воздействию теплового потока.

Литература

1. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. М., 1967.

2. *Пехович А. И., Жидких В. М.* Расчеты теплового режима твердых тел. Л., 1968.

3. Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия: СТБ 1971–2009. Введ. 01.01.2010.

4. *Корнюхин И. П.* Тепломассообмен в теплотехнике текстильных материалов: Учеб. пособие для вузов. М., 2004.

5. *Федосов С. В., Ибрагимов А. М.* // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 86–87.

6. *Ибрагимов А. М.* // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 72–73.

7. *Ибрагимов А. М.* // Строительные материалы. 2006. № 8. С. 88–89.

8. *Гухман А. А.* Введение в теорию подобия: Учеб. пособие для втузов: 2-е изд., доп. и перераб. М., 1973.

9. *Кирпичев М. В.* Теория подобия. М., 1953.

10. *Беляев Н. М.* Методы нестационарной теплопроводности. М., 1978.

11. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. 5-е изд. перераб. и доп. М., 1979.

12. *Дмитракович Н. М.* Огнетермостойкий материал на тканой основе ракельного способа формирования для защитной одежды пожарных-спасателей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02, 05.26.02. Витебск, 2009.

A. M. GUSAROV, A. A. KUZNETSOV, N. M DMITRAKOVICH, S. M. DANILOVA-TRETIAK

RESEARCH OF TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A MULTILAYERED PACKAGE OF MATERIALS OF A PROTECTIVE CLOTHES OF FIREMAN DURING THERMAL IMPACT

Summary

A combined method of calculation of a temperature field of a package of materials of a protective clothes of fireman during thermal impact is offered. The method is based on a basis of a combination of elements of the analytical and numerical decisions. Reliability of the developed method is confirmed with pilot studies. The carried-out complex of researches gives a chance to design optimum structure of a package of fighting clothes of firefighters that leads to essential reduction of time and material inputs when carrying out standard tests.

Национальная академия наук Беларуси

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 612.117:57.08

Е. С. ДРОЗД[1,3], МОХАММЕД САЛЕМ А. А.[2], О. С. СПИРИДОНОВА[1], Н. С. КУЖЕЛЬ [1], С. А. ЧИЖИК [1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА РАКОВЫХ КЛЕТОК ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА ЛИНИИ А549

[1] Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси,
[2] Белорусский национальный технический университет,
[3] Генуэзский университет

(Поступила в редакцию 28.08.2014)

Введение. В настоящее время активно проводятся исследования механических свойств отдельных клеток, в частности, модуля упругости [1–6]. Показано, что данный параметр является весьма информативным с точки зрения выявления ряда патологических состояний клеток [7]. В этой связи представляют значительный практический интерес разносторонние исследования влияния различных факторов на отдельные клетки, а также разработка методов оценки их эластических и адгезионных свойств как в норме, так и при определенных патологиях или внешних воздействиях (в том числе при взаимодействии с нанообъектами различной природы).

Представляется важным исследование влияния различных физических факторов на ряд важных характеристик клеток, таких как дифференцировка, пролиферация, клеточная гибель, старение, иммортализация и раковая трансформация. Одним из таких факторов является температура. Интерес к данному фактору связан с исследованиями в области клеточных технологий, в которых для прекращения делений клеток и индуцирования дифференцировки предварительно выращенные при 37 °С клеточные культуры переносили в термостат с пониженной температурой (30 °С). Этот методический подход основан на работе [8], продемонстрировавшей дифференцировку стволовых клеток тератокарциномы мыши при 31 °С. Культивирование клеток при пониженной температуре применяется также в производстве рекомбинантных белков [9].

Цель настоящей работы – визуализация и количественная оценка в статическом режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ) морфологических неоднородностей, механических и адгезионных свойств клеток рака легких человека линии А549, культивированных при разных температурах.

Материалы и методы исследования. Использованы культивируемые *in vitro* клетки рака легких человека (линия А549). Их снимали с ростовой поверхности культурального сосуда с помощью трипсина и суспендировали в среде Игла с добавлением 10%-ной сыворотки эмбрионов телят и антибиотиков пенициллина и стрептомицина. Концентрацию клеток подсчитывали под микроскопом в камере Горяева.

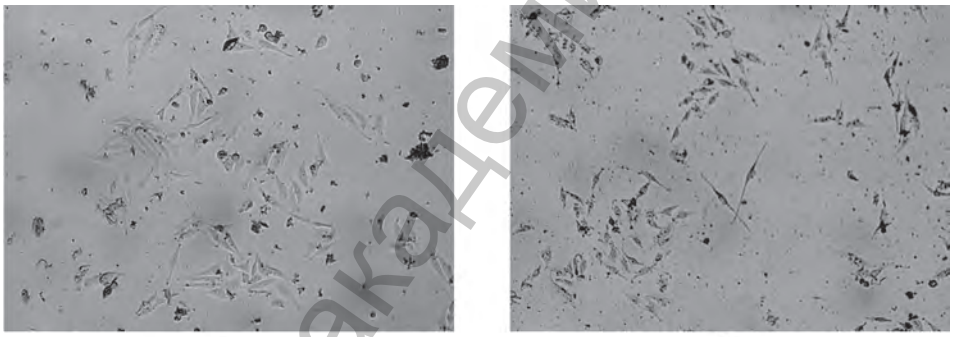
Клеточную суспензию А549 разбавляли средой так, чтобы при внесении в культуральный сосуд приходилось 5000 клеток на 1 см^2 ростовой поверхности. Клетки вносили в культуральные сосуды с вложенными предметными стеклами, добавляли углекислый газ (5% CO_2) и культивировали трое суток при 37 °С в герметично закупоренных резиновыми пробками культу-

Национальная академия наук Беларуси

ральных сосудах. Через трое суток большинство клеток распластывалось на поверхности предметных стекол. Затем часть стекол (для исследования методом АСМ) с клетками линии А549 фиксировали в восходящих концентрациях этанола (24, 48 и 96%, по 1 мин в каждой из концентраций) и высушивали на воздухе. Остальные культуры линии А549 переносили в термостат при пониженной температуре (30 °С) и культивировали в течение дополнительных 11 сут. После 5 и 11 сут культивирования при 30 °С выполняли цифровое фотографирование клеточных культур, а на 11-е сутки клетки на вложенных стеклах фиксировали этанолом.

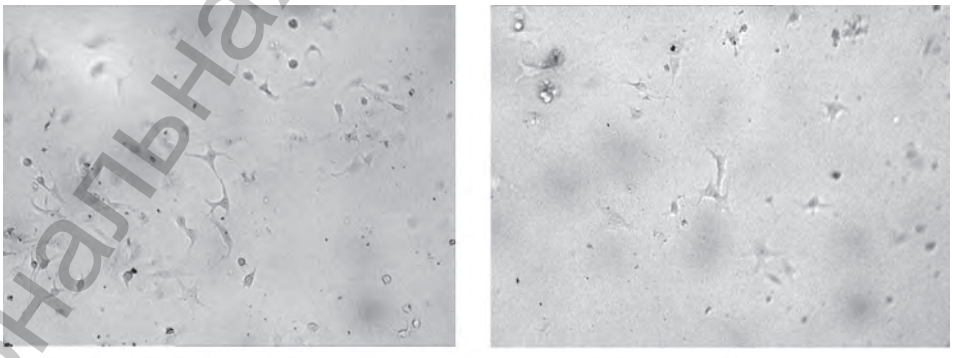
Исследование клеток методом АСМ осуществлялось при помощи специального экспериментального комплекса, совмещающего функции сканирующей зондовой и оптической микроскопии, с использованием стандартных кремниевых зондов NSC11 («MikroMasch») с константой жесткости консоли 3 Н/м. Комплекс состоит из атомно-силового микроскопа NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) и оптической системы (BelOMO «ЛЭМТ», Беларусь). Последняя позволяет позиционировать острие иглы на определенной области исследуемого образца.

Результаты исследований. Компьютерные микрофотографии клеток линии А549 после 3-суточного культивирования при 37 °С (контрольный вариант), а также после дальнейшего культивирования при 30 °С представлены на рис. 1–4. Через 5 сут культивирования клеток рака легких человека линии А549 при пониженной температуре отмечено появление соединенных друг с другом морфологически сходных клеток, образовавшихся в результате незавершенного митоза (рис. 2). После 11-суточного культивирования при 30 °С регистрировали появление клеток с множественными выростами цитоплазмы (рис. 2), что свидетельствует об усилении дифференцировочных процессов, а также наблюдали в большей части ростовой поверхности значительную гибель клеток. Поэтому препараты после фиксации этанолом было затруднительно применять для АСМ в связи с ограниченными возможностями поиска подходящих клеток в



а *б*

Рис. 1. Оптическое изображение живых (*а*) и фиксированных (*б*) клеток линии А549 после 3 сут культивирования при 37 °С



а *б*

Рис. 2. Оптическое изображение клеток линии А549: *а* – после 3 сут культивирования при 37 °С и 5 сут культивирования при 30 °С (в центре – две сходные сестринские клетки, образовавшиеся в результате незавершенного митоза), *б* – после 3 сут культивирования при 37°С и 11 сут при 30 °С (появляются клетки с множественными псевдоподиями)

Национальная академия наук Беларуси

используемой установке. По этой причине АСМ выполнена только для контрольного варианта и варианта культивирования в течение 8 сут при 30 °С. Таким образом, для изучения параметров клеток с использованием метода контактно-зондовой микроскопии целесообразно применять более высокую плотность посева клеток (например, 30000 клеток на 1 см^2) либо уменьшать срок культивирования при пониженной температуре.

Рис. 3. Оптическое изображение клеток линии А549 после 3 сут культивирования при 37 °С и 8 сут культивирования при 30 °С (фотография фиксированных клеток)

Под влиянием фиксации происходит конденсация клеток – они становятся компактнее (рис. 1). В то же время на фиксированных препаратах можно наблюдать изменения морфологии клеток при их культивировании в условиях пониженной температуры (рис. 1, *б*, 3).

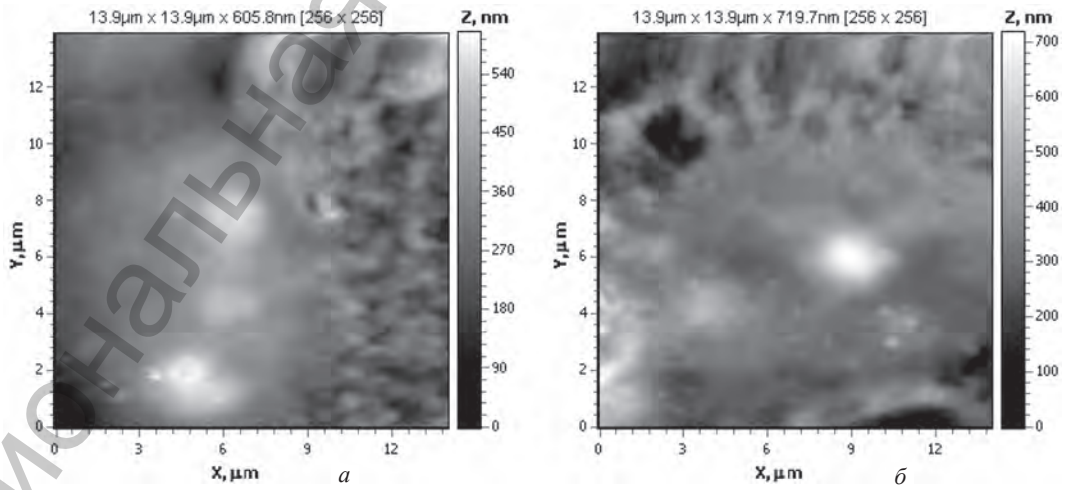
С помощью оптической микроскопии обнаружены клетки с длинными выростами цитоплазмы, а также распластанные клетки с увеличенной площадью при пониженной температуре. На фиксированных стеклах также наблюдали клетки с множественными псевдоподиями. Это свидетельствует о том, что под влиянием пониженной температуры происходят процессы дифференцировки клеток, а также, по-видимому, клеточного старения.

Исследование топографии поверхности и модуля упругости образцов проводилось методом АСМ в контактном режиме сканирования стандартным кремниевым зондом NSC11 (жесткость консоли зонда k = 3 Н/м), радиус закругления которого составлял порядка 50 нм. На рис. 4, *а* представлены изображения топографии поверхности контрольного образца клеток.

Далее проводилась оценка структуры поверхности клеток после 8 сут экспонирования при пониженной температуре (30 °С) (рис. 4, *б*).

Средние значения модуля упругости для клеток линии А549 на глубине внедрения 20 нм составляют (2,01±0,07) МПа, при этом у данных клеток спустя 8 сут культивирования при пониженной температуре модуль упругости составляет (1,98±0,11) МПа. Следовательно, значительных изменений в эластичности клеток не обнаружено.

Проведена оценка адгезии контрольного образца клеток линии А549 и клеток после 8 сут культивирования при пониженной температуре (30°С) методом АСМ, который позволяет измерять силы, возникающие между острием зонда и исследуемой поверхностью. Для этого используются зависимости перемещения от изгиба консоли (кривые подвода-отвода), получаемые при проведении процедуры статической силовой спектроскопии.



а *б*

Рис. 4. АСМ-изображение клетки линии А549 (размер поля сканирования 14х14 мкм^2): *а* – контрольный образец, *б* – образец, культивированный при пониженной температуре 30 °С

Национальная академия наук Беларуси

Процедура оценки силы адгезии выполнялась зондом NSC11, радиус закругления зонда 50 нм. Расчет контактной силы адгезии проводили по формуле

$$F_a = kZ_{back}$$

где F_a – сила адгезии, Z_{back} – изгиб консоли зонда при отрыве острия от образца, нм.

Исследования показали, что сила адгезии контрольного образца составила (14,12±0,91) и (15,97±1,41) нН для клеток после 8 сут культивирования при пониженной температуре (30 °С). Следовательно, у клеток под влиянием пониженных температур наблюдается тенденция к увеличению силы адгезии острия зонда к поверхности мембраны.

Заключение. По сравнению с культурой клеток линии А549, выращенной при 37 °С, последующее их экспонирование при пониженной температуре (30 °С) в течение 5 и 8 сут приводит к появлению клеток с удлиненными цитоплазматическими выростами. При пониженной температуре отмечается также появление соединенных друг с другом морфологически сходных клеток, образовавшихся в результате незавершенного митоза. В результате 11-суточного культивирования клеток линии А549 при 30 °С появляются клетки с множественными псевдоподиями, что свидетельствует об индуцировании процессов дифференцировки. Также наблюдается значительная гибель клеток. Исследование клеток линии А549 рака легких человека с помощью АСМ при культивировании клеток при 30 °С в течение 8 сут показало, что понижение температуры процесса не приводит к достоверным изменениям механических свойств данных клеток. Кроме того, можно утверждать, что у клеток под влиянием пониженных температур наблюдается тенденция к увеличению силы адгезии поверхности мембраны к острию зонда.

Литература

1. *Sen Sh., Subramanian Sh., Discher D. E.* // Biophysical J. 2005. Vol.89. P. 3203–3213.
2. *Wagh A. A., Roan E., Chapman K. E.* et al. // Am. J. Physiol. Lung Cell Mol. Psiol. 2008. Vol. 295. P. L54–L60.
3. *Mustata M., Ritchie K., McNally H. A.* // J. of Neoroscience Methods. 2010. Vol. 186, issue 1. P. 35–41.
4. *Maciaszek J. L., Andemariam B., Lykotrafitis G.* // J. Strain Analysis. 2011. Vol. 46. P. 368–379.
5. *Kiss R., Bock H., Pells S.* et al. // J. of Biomechanics Engineering. 2011. Vol.133. P. 1–9.
6. *Cross S. E., Jin Yu-Sh., Tondre J.* et al. // Nanotechnology. 2008. Vol.19. P. 384003–384011.
7. *Lee G. Y. H., Lim C. T.* // Biomechanics approaches to studying human diseases, Trends Biotechnol. 2007. Vol. 25. P. 111–118.
8. *Cremisi C., Duprey P.* // J. Cell Physiol. 1986. Vol. 129. P. 230–236.
9. *Kumar N., Gammell P., Meleady P.* et al. // BMC Biotechnol. 2008. Vol. 8. P. 42.

E. S. DROZD, MOHAMMED SALEM A. A., O. S. SPIRIDONOVA, N. S. KUZHEL, S. A. CHIZHIK

INVESTIGATION OF CULTIVATION TEMPERATURE EFFECT ON SURFACE TOPOGRAPHY AND MECHANICAL PROPERTIES OF A HUMAN LUNG CANCER CELL LINE A549

Summary

The results of study the effect of temperature on the culture surface topography and mechanical properties of human lung cancer cell line A549 by atomic force microscopy are presented. It is shown that lowering the temperature of cultivation does not lead to significant changes in the mechanical properties of A549 cells, but the cells under the influence of low temperatures tend to increase the adhesive force between the probe tip to the membrane surface.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 576.6:612.017.1:576.3

Е. С. ДРОЗД[1,2], МОХАММЕД САЛЕМ А. А.[3], С. А. ЧИЖИК[1],
О. С. СПИРИДОНОВА[1,4], Н. С. КУЖЕЛЬ[1], М. Е. МЫЧКО[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЛЕТОК ПОЧКИ БЫКА ЛИНИИ MDBK

[1] Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси,
[2] Генуэзский университет,
[3] Белорусский национальный технический университет,
[4] Минский городской клинический онкологический диспансер

(Поступила в редакцию 28.08.2014)

Введение. Особое место в современной биологии занимает изучение влияния наночастиц на клетки. Их широкое применение в медицине обусловлено уникальными антибактериальными свойствами. Наночастицы находят свое применение в борьбе против некоторых вирусов, для лечения ожогов, уничтожения опухолевых клеток, а также в качестве средств доставки лекарственных препаратов к больному органу. Известно, например, что наночастицы оксида цинка (ZnO) способны к ингибированию процесса репликации вирусов [1]. С одной стороны, применение цинка в любой фазе вирусной репликации прекращает формирование нового вируса. С другой, цинк обладает иммуностимулирующим эффектом, при его небольших концентрациях функции иммунной системы восстанавливаются [2]. Он участвует в регуляции процессов активации лимфоидных клеток, пролиферации и апоптоза. Таким образом, большой интерес представляет разработка современных препаратов на основе наночастиц с иммуностимулирующим, антибактериальным и противовирусным эффектом. Для подобных разработок большое значение имеет учет влияния препаратов на основе наночастиц на различные бактерии и вирусы, а также на клетки иммунной системы.

Цель данной работы – исследование методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) влияния наночастиц на культуру клеток почки быка линии MDBK (Madin–Darby Bovine Kidney Cells), а также определение модуля упругости и силы адгезии клеток почки быка при воздействии на них наночастиц меди и серебра (Cu + Ag), нитрита серебра ($AgNO_3$) и ZnO.

MDBK – культура эпителиальных клеток почки быка [3]. Она широко используется для изоляции вирусов диареи крупного рогатого скота, везикулярного стоматита (индийский штамм), инфекционного ринотрахеита и парвовируса крупного рогатого скота, аденовирусов I и III крупного рогатого скота, вируса парагриппа-3 [4]. Кроме того, эта культура является основной при получения культуральных противовирусных вакцин.

Методы и материалы исследования. Для визуализации одиночных частиц использовали специальную методику подготовки образцов, которая заключалась в гидрофилизации подложки и последующем осаждении наночастиц из суспензии L-B-L-способом, т. е. в вертикальном осаждении частиц на подложку. Очищенную подложку выдерживали в коллоидном растворе наночастиц в течение 5–10 мин, промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе. Для осуществления гидрофилизации кремниевую подложку помещали в раствор, состоящий из 2 мл раствора аммиака, 2 мл пероксида водорода и 10 мл воды и выдерживали в течение 15 мин при 75 °С. Затем промывали дистиллированной водой и высушивали. Оценка качества подготовленного образца наночастиц проводилась с помощью оптического микроскопа Микро200 (ОАО «Планар», Беларусь).

Национальная академия наук Беларуси

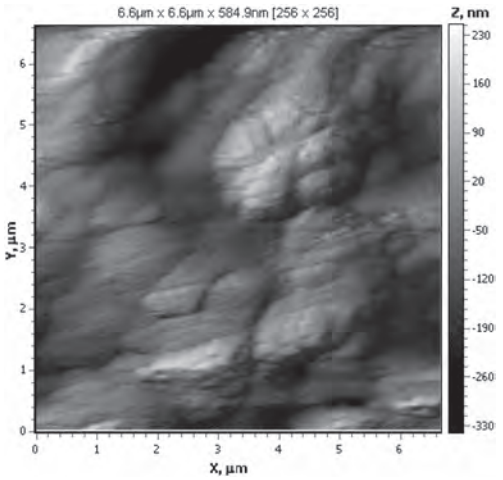


Рис. 1. АСМ-изображение топографии поверхности мембраны клеток линии MDBK (контрольные образцы, размер поля сканирования 7×7 мкм)

Для получения образцов клеток, пригодных для АСМ-исследования, применяли химическую фиксацию. С этой целью культуру клеток инкубировали в течение 20 мин с суспензией наночастиц, разведенной в соотношении 1:5 раствором Хэнкса. Клетки отмывали фосфатным буфером, добавляли 1,5%-ный раствор глутарового альдегида на 30 мин, дважды отмывали фосфатным буфером и дистиллированной водой и высушивали на воздухе при комнатной температуре.

АСМ-исследования проводились с помощью прибора НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) в контактном режиме. Использованы кремниевые зонды («MikroMasch» Co, Эстония) NSC11 радиусом 20 нм с константой жесткости консоли 3 Н/м.

Влияние наночастиц на клеточную линию MDBK. На рис. 1, 2 представлены изображения топографии поверхности клетки линии MDBK, полученные с помощью атомно-силового микроскопа. Размеры частиц серебра определяли по профилю сечения поверхности изображения подложки с наночастицами, получаемому после сканирования исследуемого образца. На профилях маркерами отмечали края каждой частицы. Оценка размера частиц методом АСМ показала, что на поверхности клеток он составляет 220–250 нм.

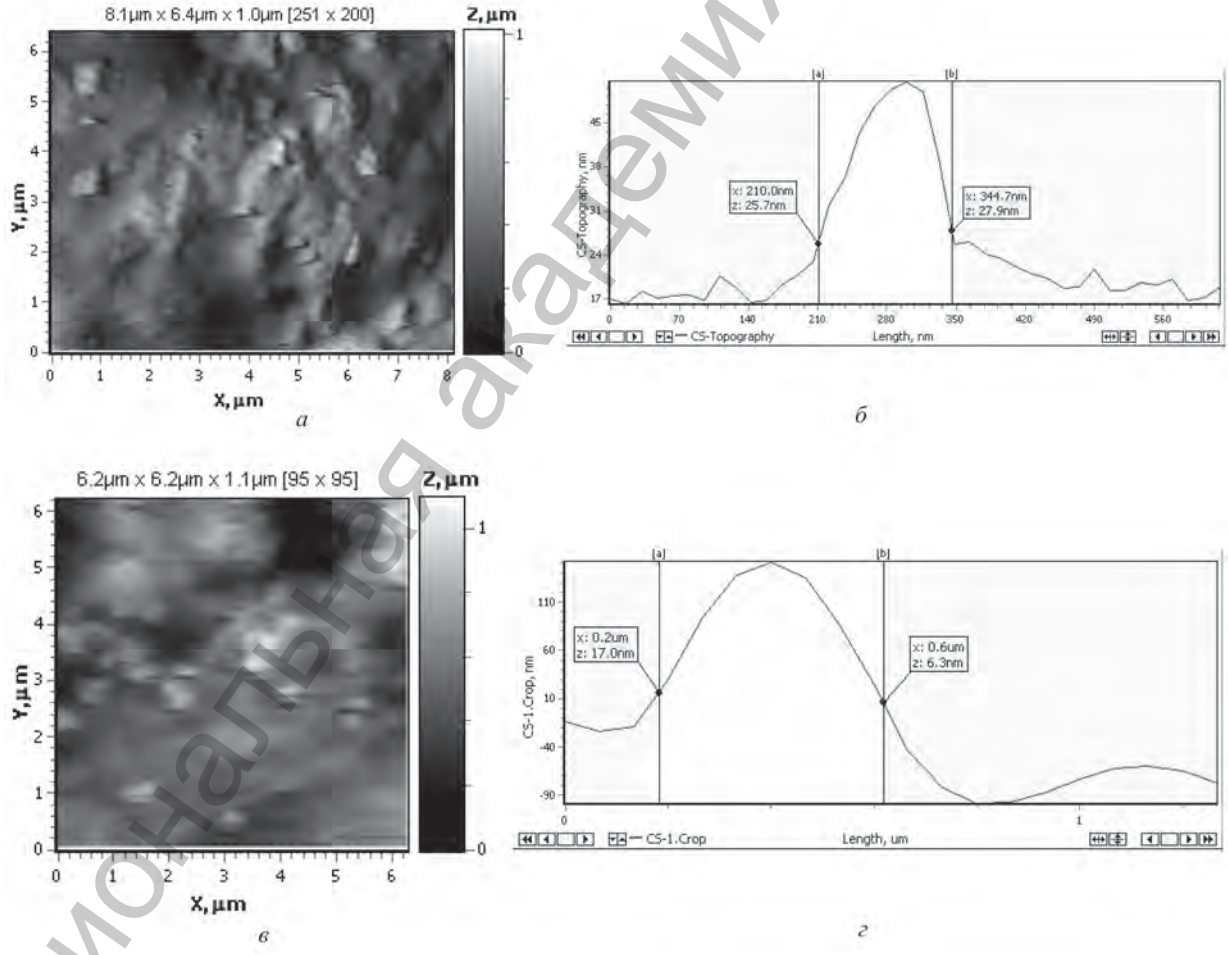


Рис. 2. Топография мембраны клетки с наночастицами Cu+Ag на поверхности, область сканирования 8,1×6,4 мкм (*а*), 6,2×6,2 мкм (*в*) и профиль сечения наночастицы (*б*, *г*)

Национальная академия наук Беларуси

Влияние наночастиц биоэлементов на упругие характеристики клеток линии MDBK. С помощью атомно-силового микроскопа методом индентирования изучены упругие характеристики клеток. На практике индентирование осуществляется в режиме статической силовой спектроскопии. В результате устанавливается связь между силой и величиной деформации образца в области внедрения зонда. Расчет модуля упругости по формуле Герца [5] показал, что для клеток почки быка после 20 мин их инкубации с суспензией наночастиц характерны следующие значения модулей упругости E, МПа: контроль – 6,92±0,36; Cu+Ag – 8,09±0,45; $AgNO_3$ – 9,56±0,68; ZnO – 0,017±0,001. Значение модуля упругости клеток контрольного образца ниже, чем у клеток после воздействия наночастиц Cu+Ag и $AgNO_3$. После воздействия наночастиц ZnO модуль упругости клеток уменьшается.

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно отметить, что проникновение наночастиц Cu+Ag и $AgNO_3$ внутрь клеток увеличивает их жесткость. Совершенно иное действие на клетки оказывают наночастицы ZnO, уменьшая упругость клеток более чем на порядок. Исходя из расчетов модуля упругости и анализа трехмерных изображений клеток после 20 мин инкубации с наночастицами ZnO, можно предположить, что в данном случае происходит сильное повреждение клеток.

Влияние наночастиц на адгезионные свойства клеток линии MDBK. Удельная поверхностная энергия (работа адгезии) γ определяется энергией, затраченной на разрыв связи по контакту между фазами и энергией, отнесенной к единице площади контакта. Удельную поверхностную энергию и силу адгезии соответственно вычисляли по формулам:

$$\gamma = \frac{2}{3}\frac{F_a}{\pi R}, \quad F_a = kZ_{defl}.$$

Здесь R – радиус закругления острия зонда, k – жесткость консоли; Z_{defl} – изгиб консоли по вертикали, рассчитываемый по кривым подвода-отвода, получаемым в статическом режиме АСМ.

Результаты расчета силы адгезии и значения поверхностной энергии клеток линии MDBK представлены в таблице. Можно констатировать, что воздействие наночастиц $AgNO_3$ и ZnO приводит к уменьшению силы адгезии и поверхностной энергии. Как было показано выше, при инкубировании клеток с наночастицами ZnO происходит значительное снижение модуля упругости (примерно в 40 раз), кроме того, наблюдаются морфологические изменения клеток. Таким образом, наночастицы ZnO оказывают сильное повреждающее воздействие на клетки почек быка в отличие от наночастиц $AgNO_3$, не проявивших токсического эффекта.

Характеристики адгезии клеток MDBK

Образец	F_a, нН	γ, Дж/м^2
Контроль	48,91±3,26	0,13±0,01
$AgNO_3$	41,95±3,89	0,11±0,01
ZnO	36,80±6,71	0,09±0,01

Влияние наночастиц на структурные особенности клеток линии MDBK. Для исследования влияния наночастиц на клетки животных выбраны наночастицы $AgNO_3$ и ZnO. Известно, что наночастицы производных серебра оказывают повреждающее действие на вирусы, а наночастицы ZnO не обладают антибактериальными свойствами. В качестве объекта для исследования влияния наночастиц $AgNO_3$ и ZnO выбрана культура клеток линии MDBK.

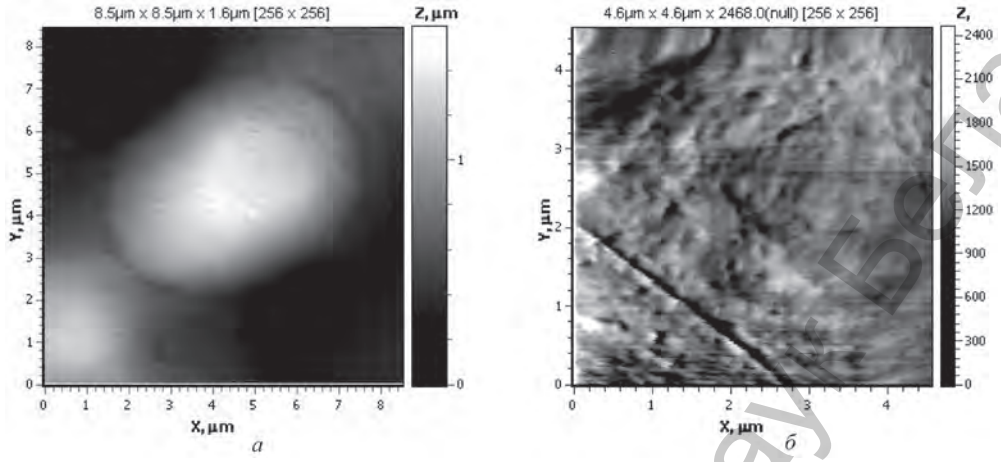
На рис. 3 представлены изображения отдельной клетки MDBK и участка поверхности мембраны, полученные в режиме латеральных сил. Исследование топографии показало, что поверхность клеток MDBK гладкая и ровная, без явно выраженных структурных элементов. Результаты исследования топографии поверхности после инкубации с суспензией наночастиц $AgNO_3$ при 37 °С представлены на рис. 4.

После взаимодействия клеток линии MDBK с наночастицами $AgNO_3$ наблюдались изменения формы их поверхности по сравнению с контрольным образцом (поверхность клеток стала

Национальная академия наук Беларуси

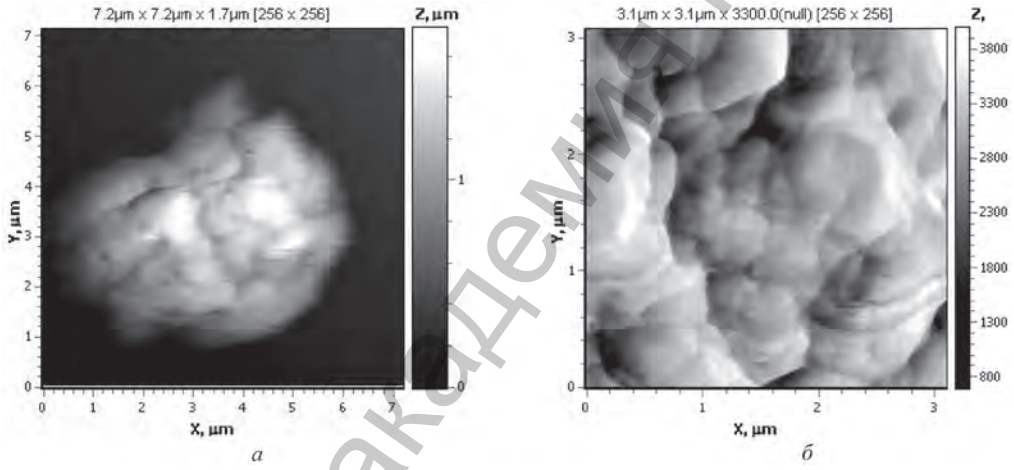
более рельефной с ярко выраженными выступами округлой формы). Топография поверхности клетки MDBK, подвергшейся влиянию наночастиц ZnO, приведена на рис. 5.

В результате взаимодействия клеток MDBK с наночастицами ZnO их форма сильно изменилась по сравнению с формой клеток контрольного образца. Можно предположить, что в резуль-



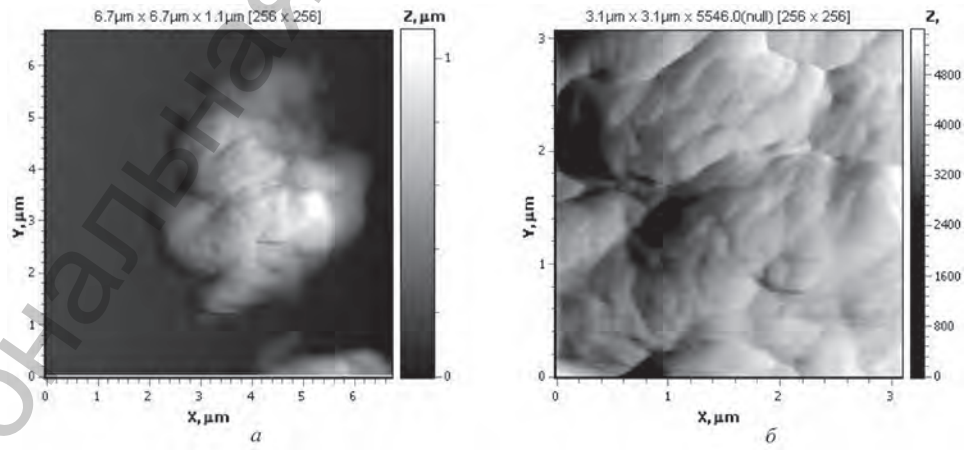
а *б*

Рис. 3. АСМ-изображение поверхности клеток MDBK: *а* – топография поверхности, область сканирования 8,5×8,5 мкм^2; *б* – изображение в режиме латеральных сил, область сканирования 4,6×4,6 мкм^2



а *б*

Рис. 4. АСМ-изображение поверхности клеток MDBK после их инкубации с $AgNO_3$; *а* – топография поверхности, область сканирования 7,2×7,2 мкм^2; *б* – изображение в режиме латеральных сил, область сканирования 3,1×3,1 мкм^2



а *б*

Рис. 5. АСМ-изображение поверхности клеток MDBK после их инкубации с наночастицами ZnO при 37 °С; *а* – топография поверхности, область сканирования 6,7×6,7 мкм^2; *б* – изображение в режиме латеральных сил, область сканирования 3,1×3,1 мкм^2

Национальная академия наук Беларуси

тате воздействия наночастиц ZnO происходит повреждение внутренней структуры клеток. Морфология поверхности также отличается от морфологии поверхности клеток, инкубированных с наночастицами $AgNO_3$. Наблюдается неоднородная поверхность клеток с ярко выраженными структурными образованиями.

Заключение. Исследование влияния наночастиц на иммунокомпетентные клетки почки быка показало, что в результате инкубирования клеток с наночастицами меди и серебра, а также нитрита серебра значение модуля упругости увеличивается по сравнению с модулем упругости клеток контрольного образца. В случае инкубирования клеток с наночастицами оксида цинка наблюдается противоположный эффект – уменьшение величины модуля упругости клеток по сравнению с модулем упругости клеток контрольного образца. Установлено, что действие наночастиц оксида цинка приводит к значительному, практически разрушительному, изменению формы и структуры поверхности клеток (возрастает шероховатость поверхности клетки) и к уменьшению силы адгезии на 30 % по сравнению с контролем.

Литература

1. *Burnham N. A.* // J. Vac. Sci. Technol. 1989. Vol. A7. P. 1200–1210.
2. *Czajkowsky D. M.* // J. of Electron Microscopy. 2000. Vol. 49(3). P. 395–406.
3. *Nagama M.* // FEMS Microbiol. Lett. 1996. Vol. 145. P. 239–243.
4. *Генкель П. А.* Микробиология с основами вирусологии: Учеб. пособие для студентов. биол. фак. пед. ин-та. М., 1974.
5. *Jacot J. G.* // J. Biomed. Mater. Res. 2006. Vol. A79. P. 485–494.

E. S. DROZD, MOHAMMED SALEM A. A., S. A. CHIZHIK, O. S. SPIRIDONOVA, N. S. KUZHEL, M. E. MYCHKO

A STUDY BY ATOMIC FORCE MICROSCOPE OF EFFECT OF NANOPARTICLES ON STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CELL LINES MDBK

Summary

The effect of copper and silver nanoparticles Cu+Ag, silver nitrite $AgNO_3$ and zinc oxide ZnO on morphology and mechanical properties of immunocompetent cells bovine kidney line MDBK is investigated by atomic force microscopy. The results of calculation of the local elastic modulus, strength, surface cell adhesion, adhesion work, and the three-dimensional image analysis of cells in control and after incubation with the nanoparticles bioelements for 20 min are presented.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 537.311.33

А. П. ОДРИНСКИЙ[1], Н. М. КАЗЮЧИЦ[2], Л. Ф. МАКАРЕНКО[2].

PICTS-СПЕКТРОСКОПИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО HPHT-АЛМАЗА В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 300–550 К

[1]Институт технической акустики НАН Беларуси,
[2]Белорусский государственный университет.

(Поступила в редакцию 05.06.2014)

Введение. Снижение себестоимости производства синтетического алмаза и его уникальные свойства обусловливают перспективность расширения области применения этого материала для ряда технических приложений, в частности, детекторов ионизирующих излучений, потоков заряженных частиц и т. д. Преимуществом детекторов на основе алмаза является их высокая радиационная стойкость, обеспечивающая длительную работоспособность в условиях радиации (в ускорителях заряженных частиц [1], в открытом космосе [2], в радиационной терапии [3]).

Характеристики этих приборов зависят от дефектного и примесного составов алмазных подложек. Например, для изготовления дозиметрических детекторов используют специально отобранные алмазы, содержащие примесь азота в диапазоне концентраций 10^{18}–10^{19} см$^{-3}$ [4, 5]. В то же время быстродействующие детекторы изготавливают из алмазов с высоким содержанием примеси азота и низким содержанием структурных дефектов [6]. Поляризация детекторов, связанная с захватом свободных носителей заряда, также определяется спектром энергетических уровней примесей и дефектов в запрещенной зоне алмаза [7]. Свойства некоторых дефектов исследованы теоретически на основе расчетов из первых принципов [8–10]. Вместе с тем экспериментальные исследования электрически активных дефектов затруднены вследствие высокого удельного сопротивления синтетических алмазов. Большинство экспериментов выполнено на поликристаллических алмазных пленках, для которых интерпретация результатов исследования затруднена из-за сложности учета влияния потенциальных барьеров на границах зерен.

В настоящей работе представлены результаты исследования электрически активных дефектов в монокристалле синтетического алмаза, выращенном методом высоких давлений и высоких температур (HPHT-метод). В экспериментах использована разновидность нестационарной спектроскопии глубоких уровней со световым возбуждением образца – фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия (PICTS) [11].

Подготовка образцов, методика регистрации и обработка результатов измерений. Монокристаллы синтетического алмаза выращены методом температурного градиента [12, 13] в металлуглеродной системе Fe–Ni–C в течение 60–70 ч при давлении 4,5–5,0 ГПа и температуре 1350–1450 °С. Содержание железа в металлуглеродной системе составляло 70 мас. %, содержание никеля – 30 мас. %. Синтез проходил в беспрессовых аппаратах высокого давления типа «разрезная сфера» (БАРС) в РУП «Адамас БГУ» [14]. Образцы для исследований изготавливали в виде плоскопараллельных полированных пластин толщиной около 300 мкм, вырезанных из центральной части кристалла вдоль плоскости (100) параллельно основанию. На освещаемой поверхности пластины имплантацией ионов бора с последующим активационным отжигом внедренной примеси формировалась система парных встречно-штыревых контактов. Площадь поверхности, занимаемая одной контактной парой, составляла 1,0×0,8 мм^2. На противоположной поверхности пластины по аналогичной технологии формировался сплошной контакт. Подключение соответствующей пары контактов по планарной либо «сэндвич»-схеме позволяло исследо-

Национальная академия наук Беларуси

вать различные участки пластины. Качество контактов оценивали по вольт-амперной характеристике, которая была линейной при комнатной температуре в диапазоне прикладываемого напряжения ± 100 В.

Возбуждение образцов проводилось прямым излучением ксеноновой лампы ДКСШ-500, содержащим ультрафиолетовую составляющую с энергией квантов больше ширины запрещенной зоны алмаза E_g = 5,5 эВ [15]. Свет падал перпендикулярно поверхности пластины. Периодичность освещения задавалась механическим модулятором с частотой 10 Гц и отношением длительности светового интервала к темновому интервалу 1:5.

Все измерения проводились с использованием типичной схемы регистрации фототока с подачей внешнего напряжения 60 В на последовательно соединенные образец и сопротивление нагрузки 0,1–0,33 МОм. Изменение падения напряжения на сопротивлении нагрузки после усиления широкополосным усилителем подавалось на аналогово-цифровой преобразователь, связанный с персональным компьютером. При регистрации релаксации фототока проводились поточечное накопление и усреднение кинетики сигналов (64 реализации), содержащей 2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени выборки Δt_s = 56 мкс. Измерения проводились при нагреве образца со скоростью примерно 2 К/мин в диапазоне 300–550 К с шагом 1 К. Для обработки результатов использовали широко распространенную методику анализа данных нестационарной спектроскопии глубоких уровней с расчетом в ряде температурных точек набора функций-спектров:

$$P_j(T) = \int_0^\infty i_n(t,T) F_j(t) Dt, \tag{1}$$

где j = 1,..., k – номер спектра, $i_n(t, T)$ – зарегистрированный при температуре T сигнал релаксации фототока, нормированный на величину стационарного фототока, $F_j(t)$ – весовая функция, описываемая таким образом:

$$F_j(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t \le \Delta t + \tau_j, \\ +1 \text{ при } \Delta t + \tau_j < t \le \Delta t + 2\tau_j, \\ -1 \text{ при } \Delta t + 2\tau_j < t \le \Delta t + 3\tau_j, \\ 0 \text{ при } t > \Delta t + 3\tau_j, \end{cases} \tag{2}$$

где τ_j – характеристическое время регистрации j-го спектра, Δt – временная задержка.

Полагая наличие существенного вклада в кинетику релаксации термоэмиссии неравновесного заполнения ловушек, зависимость функции i_n (t, T) от температуры следующая:

$$i_n(t, T) = f + A \exp(-t/\tau_x(T)), \tag{3}$$

где f и A – параметры, изменением которых с температурой можно пренебречь. Кинетика релаксации фототока определяется вторым слагаемым уравнения (3), обусловленным термоэмиссией неравновесного заполнения ловушек с характеристическим временем релаксации $\tau_x(T)$. При наличии вклада в релаксацию фототока термоэмиссии с одного вида ловушек функция $P_j(T)$ с учетом уравнений (1)–(3) имеет максимум при

$$\tau_x = \tau_j / \ln[1 + 2\,\tau_j / (\tau_j + \Delta t)]. \tag{4}$$

Правая часть равенства (4) полностью определяется выбранными параметрами F_j. При использованных условиях регистрации данных анализ проводился в диапазоне характеристического времени релаксации 0,2–40 мс. Условия и методика регистрации данных более подробно описаны в [16].

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. На рис. 1 приведены PICTS-спектры синтетического алмаза, полученные с использованием «сэндвич»-схемы подключения контактов в центральной области пластины. Спектры содержат широкий пик в области ΔT = 420–550 К, наблюдавшийся также в спектрах других исследованных областей пластины синтетического алма-

Национальная академия наук Беларуси

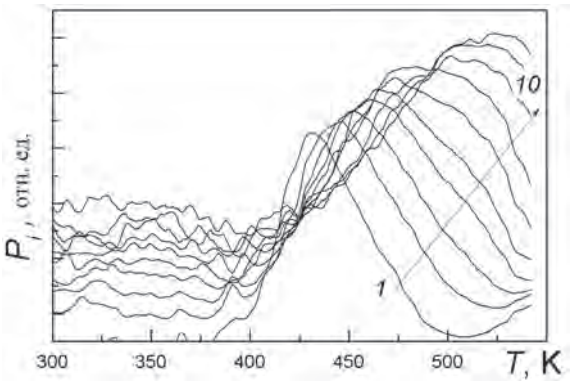


Рис. 1. PICTS-спектры синтетического алмаза, соответствующие различным характеристическим временам релаксации (τ_x, мс) в максимуме: кривая *1* – 39; *2* – 16; *3* – 10; *4* – 6,2; *5* – 4,8; *6* – 3,2; *7* – 2,5; *8* – 1,6; *9* – 1,2; *10* – 0,9

за. Положение максимума пика смещается в область более высоких температур с уменьшением характеристического времени регистрации спектра, что находится в соответствии с увеличением скорости темоэмиссии по закону Аррениуса:

$$1/\tau_x(T) = e_t(T) = \sigma_t T^2 B \exp[-E_t/kT], \quad (5)$$

где σ_t – эффективное сечение захвата, T – температура, B – константа для данного материала, E_t – энергия термоактивации эмиссии, k – постоянная Больцмана.

Наряду со смещением максимума пика наблюдается его ассиметричное уширение, возрастающее с уменьшением характеристического времени регистрации. Такое искажение формы пика позволяет предположить наличие в регистрируемом сигнале вклада перезарядки нескольких дефектов. Кривые релаксации фототока (рис. 2) подтверждают данное предположение. На них можно выделить несколько основных составляющих, различающихся постоянной времени спада фототока. При низких температурах на начальном участке хорошо различима быстрая компонента релаксации фототока, которую следует сопоставлять с рекомбинацией неравновесных свободных носителей заряда. Последующая более медленная релаксация содержит как минимум две компоненты.

Для выделения вкладов отдельных процессов в релаксацию фототока мы использовали аппроксимацию зарегистрированной кинетики релаксации суммой двух экспоненциальных составляющих:

$$Y(t) = A_0 \exp(-t/\tau_\alpha) + B_0 \exp(-t/\tau_\beta) + C_0, \quad (6)$$

$\tau_\alpha > \tau_\beta$ – характеристические времена релаксации соответственно α- и β-компоненты. Аппроксимация проводилась в каждой температурной точке из области регистрации пика ΔT. Использовался специальный программный модуль для итерационного определения параметров модели методом согласованного градиентного спуска с возможностью изменения соотношения масштабов приращений параметров в процессе подгонки. Как видно из рис. 2, полученные в результате моделирования кривые хорошо описывают кинетику релаксации фототока.

На рис. 3, *а* представлены изменения с температурой показателей степени экспоненциальных составляющих в результате аппроксимации «медленного» участка кинетики релаксации $\Delta t_r = 2$–100 мс модельной функцией, заданной уравнением (6). На графике наблюдается устойчивый рост наименьшего показателя степени $1/\tau_\alpha$, тогда как $1/\tau_\beta$ практически не меняется в области температуры 420–440 К. При дальнейшем повышении температуры (более 440 К) параметр $1/\tau_\beta$ также растет. В области температур выше 460 К зависимость τ_α и τ_β от температуры типична для термоэмиссии носителей заряда с уровней дефекта (уравнение (5)).

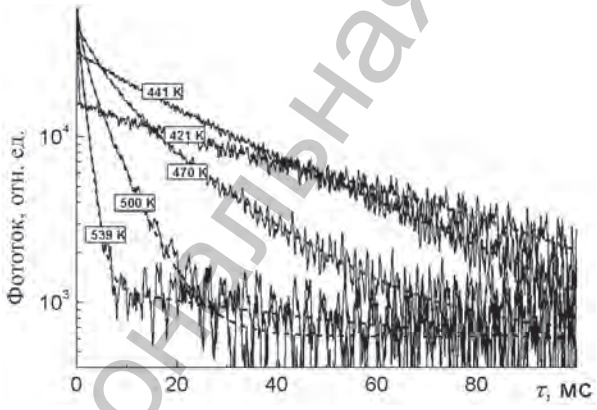


Рис. 2. Кривые релаксации фототока, записанные при различных температурах. Штриховыми линиями показаны результаты аппроксимации в соответствии с выражением (6)

Изменения с температурой амплитуды экспоненциальных составляющих представлены на рис. 3, *б*. В области температур $T < 490$ К вклады α- и β-компонент в релаксацию фототока приблизительно одинаковы и растут с температурой, тогда как при более высокой температуре вклад амплитуды β-компоненты выходит на насыщение и в дальнейшем убывает.

Национальная академия наук Беларуси

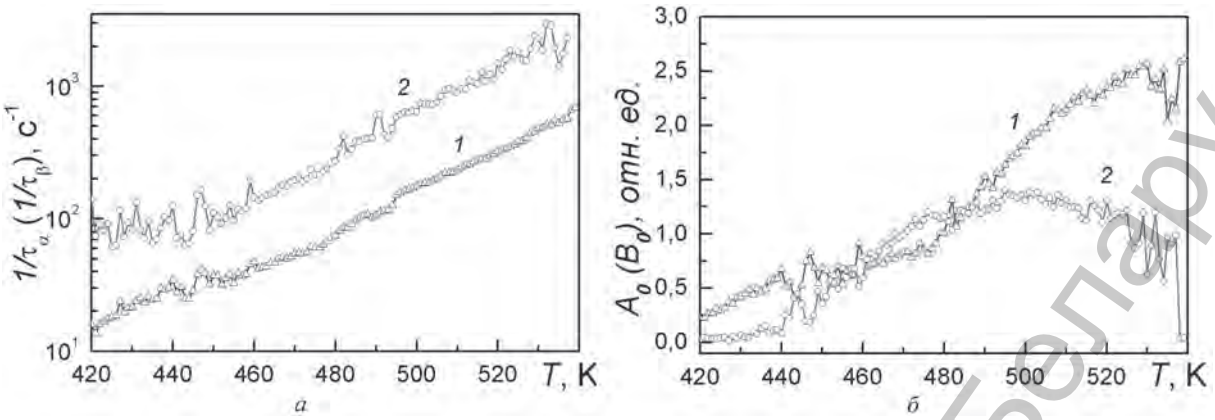


Рис. 3. Изменение с температурой показателя степени характеристических времен релаксации (*а*) и амплитуд (*б*) экспоненциальных составляющих кинетики спада фототока: *1, 2* – α- и β-компоненты соответственно

На рис. 4 приведен график Аррениуса (кривая *1*), полученный по стандартной методике определения характеристического времени релаксации, согласно уравнению (4), отслеживанием смещения температурного положения максимума пика в наборе PICTS-спектров. Здесь же представлены результаты анализа с использованием аппроксимации кинетики релаксации двухуровневой моделью (уравнение (6)). Отметим близкое расположение характеристических времен релаксации, определенных по стандартной процедуре обработки спектров PICTS, и β-компоненты спада фототока, выделенной в соответствии с уравнением (6).

Значение энергии термической активации α-ловушек, рассчитанное по наклону кривой *3* (рис. 4), составляет $E_t = 0{,}688$ эВ, а величина эффективного сечения захвата дырок этими ловушками – $\sigma_p = 2{,}3\cdot10^{-18}$ см^2. Параметры β-ловушек (кривая 2) $E_t = 0{,}723$ эВ, $\sigma_p = 2{,}1\cdot10^{-17}$ см^2. Из-за малого сечения захвата для обнаруженных в настоящей работе ловушек следует ожидать высоких значений их концентраций.

На рис. 4 линиями *4*, *5* представлены температурные зависимости характеристического времени релаксации доминирующих ловушек в поликристаллическом CVD-алмазе [17]. Линии *4* соответствуют параметры $E_t = 1{,}14$ эВ, $\sigma = 4{,}0\cdot10^{-13}$ см^2, а линии *5* – $E_t = 1{,}23$ эВ, $\sigma = 9{,}5\cdot10^{-14}$ см^2. Поскольку энергии активации и сечения захвата значительно отличаются для CVD- и HPHT-алмазов, тем не менее скорости эмиссии носителей этими ловушками находятся в одном и том же диапазоне значений при 460–520 К. Этот факт следует учитывать при интерпретации спектров PICTS.

Модель с двумя экспоненциальными компонентами хорошо описывает кинетику релаксации фототока в рассматриваемой области температур. Однако представленная на рис. 3, *б* зависимость амплитуды β-компоненты от температуры, а именно ее убывающий характер в области температур более 500 К, указывает на возможную связь между экспоненциальными компонентами релаксации, не учтенную в уравнении (6). Следовательно, убывающий характер амплитуды β-компоненты не позволяет интерпретировать процесс релаксации фототока как термоэмиссию с двух независимых локальных уровней, как это будет показано ниже.

Рассмотрим случай неравновесного заполнения двух независимых ловушек дырок в по-

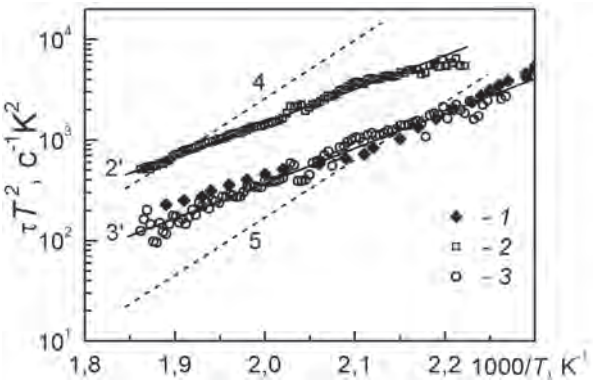


Рис. 4. Зависимости от температуры характеристического времени перезарядки дефекта с учетом T^2-коррекции, определенные по изменению температурного положения максимума PICTS-спектров (*1*), и с использованием подгонки кривых релаксации по формуле (6) для α-компоненты (*2*) и β-компоненты (*3*). Линиям *2'*, *3'* соответствуют энергии активации 0,723 и 0,688 эВ. Линиями *4*, *5* показаны данные работы [17]

Национальная академия наук Беларуси

лупроводнике *p*-типа [18]. Кинетику релаксации в приближении линейной рекомбинации и пренебрежении перезахватом можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dp_1/dt = -e_1 p_1, & (7) \\ dp_2/dt = -e_2 p_2, & (8) \\ dp/dt = -p/\tau + e_1 p_1 + e_2 p_2, & (9) \end{cases}$$

где p_1, p_2 – концентрации дырок, захваченных ловушками 1 и 2 соответственно, p – концентрация свободных носителей, τ – время жизни свободных носителей, e_1 и e_2 – скорости термоэмиссии с соответствующих дефектов. Решение уравнений (7) и (8) можно представить в виде

$$p_i(t) = p_{i0} \exp(-e_i t) \text{ при } i = 1, 2, \quad (10)$$

где p_{i0} – неравновесное заполнение соответствующей i-й ловушки дырками на момент прекращения фотовозбуждения. Тогда решение уравнения (9) описывает изменение концентрации свободных носителей – релаксацию фототока:

$$p(t)/p_0 = (1-B_1-B_2)\exp(-t/\tau) + B_1 \exp(-e_1 t) + B_2 \exp(-e_2 t). \quad (11)$$

Здесь p_0 – концентрация неравновесных свободных дырок на момент прекращения фотовозбуждения и введено обозначение соответствующей амплитуды i-й компоненты релаксации:

$$B_i \equiv (p_{i0}/p_0)/(1/(e_i\tau) - 1). \quad (12)$$

Рассматривая изменение с температурой амплитуды экспоненциальных составляющих уравнения (11), следует отметить, что для неравновесного заполнения дефекта при фотовозбуждении, по-видимому, характерно уменьшение p_{i0} с ростом температуры [19]. Однако второй сомножитель уравнения (12) имеет более сильную зависимость от температуры, возрастающую по активационному закону в области температур регистрации перезарядки дефекта ΔT, где значение e_i изменяется от величин, близких к нулю, до величин, сравнимых с $1/\tau$.

Анализ зависимости $B_i(T)$ показывает отсутствие экстремумов и возрастающий характер функции $B_i(T)$ в области температур регистрации перезарядки дефекта ΔT. Следовательно, обнаруженная нами смена характера температурной зависимости амплитуды β-компоненты вблизи 500 К (рис. 3, *б*) не согласуется с исходным предположением о термоэмиссии с двух независимых локальных уровней. Наиболее вероятно предположить наличие взаимосвязанных процессов при термоэмиссии (например, в виде конкуренции захвата неравновесных носителей заряда на уровни ловушек в условиях оптического возбуждения).

Сложная структура энергетического спектра дефектов в алмазах отмечалась многими исследователями. Например, при изучении алмазов методом измерения термостимулированного тока обнаруживается набор ловушек с энергиями активации в интервале 0,6–1,2 эВ как для поликристаллических CVD-пленок синтетического алмаза [17, 20–24], так и для природных алмазов [25]. Сложный характер регистрируемых сигналов отмечали и в DLTS-исследованиях поликристаллических алмазных пленок, легированных бором [26, 27], для которых изменение сигнала с температурой интерпретировалось с учетом суперпозиции процессов перезарядки нескольких независимых дефектов. Как следует из приведенных выше экспериментальных данных, сложная дефектная структура наблюдается и в монокристаллах алмаза, синтезированных методом HPHT. Величины энергии активации скорости эмиссии носителей заряда ловушками в HPHT-алмазах близки к значениям, полученным ранее для природных алмазов типа IIa [25].

Следует отметить, что наблюдаемые дефекты в HPHT-алмазах, по-видимому, проявляются в характеристиках детекторных структур. Для таких алмазных детекторов используется предварительное облучение для стабилизации сигнала. Время стабилизации при этом составляет, как правило, сотни секунд [28], что сопоставимо с временами релаксации, регистрируемыми в данной работе при комнатной температуре. Аналогичное поведение обнаружено при исследо-

Национальная академия наук Беларуси

вании детекторов рентгеновского излучения на основе природных алмазов, в которых время стабилизации сигнала определяется ловушками с энергией активации 0,7 эВ [25].

Заключение. Анализ результатов измерений PICTS-спектров в HPHT-алмазах обнаружил две экспоненциальные компоненты процесса релаксации фототока, различающиеся характеристическим временем релаксации. Изменение с температурой их вклада в регистрируемый сигнал фототока не поддается интерпретации как процесс термоэмиссии с независимых локальных уровней. Предполагается, что обнаруженные дефекты определяют долговременные процессы стабилизации тока фотоионизации детекторов на основе HPHT-алмаза.

Литература

1. RD42 CERN Collaboration. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. Vol. 434. P. 131–145.
2. *Pace E*., *De Sio* A. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. Vol. 514. P. 93–99.
3. *Descamps C.* et al. // Phys. stat. sol. (a). 2006. Vol. 203, N. 12. P. 3161–3166.
4. *Козлов С. Ф.* Алмаз в электронной технике. М., 1990.
5. *Плотникова С. П.* Алмаз в электронной технике. М., 1990.
6. *Казючиц Н. М.*, *Наумчик Е. В.*, *Русецкий М. С.* и др. // Сб. статей 9-го Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, 28–30 мая 2013 г. Мн., 2013. С. 229–232.
7. *Мухачев Ю. С., Татаринов В. С., Борзенко С. Ю.* и др. // ФТП. 1984. Т. 18, № 3. С. 460–464.
8. *Goss J. P.*, *Briddon P. R.*, *Jones R.*, *Sque S.* // Diamond and Related Materials. 2004. Vol. 13. P. 684–690.
9. *Shim J., Lee E.-K., Lee Y. J., Nieminen R. M.* // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 035206.
10. *Goss J. P.* et al. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72. P. 035214.
11. *Hurter Ch., Boilou M., Mitonneau A., Bois D.* // Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 32. P. 821–823.
12. *Хаджи В. Е., Цинобер Л. И., Штеренлихт Л. М.* и др. Синтез минералов: в 2 т. М., 1987. Т. 1.
13. *Чепуров А. И.* Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. Новосибирск, 1997.
14. http:// www.adamas.by.
15. Природные алмазы России / Под ред. В. Б. Кваскова. М., 1997.
16. *Одринский А. П.* // Матер. V Междунар. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Полоцк, 2008. Т. 3., С. 80–83.
17. *Bruzzi M., Menichelli D., Sciortino S., Lombardi L.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 5765–5774.
18. *Balland J. C., Zielinger J. P., Noguet C., Tapiero M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1986. Vol. 19. P. 57–70.
19. *Одринский А. П.* // ФТП. 2005. Т. 39, № 6. С. 660–666.
20. *Hearne S. M.* et al. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 99. P. 113703–113708.
21. *Alvarez J.* et al. // Diamond and Related Materials. 2004. Vol. 13. P. 881–885.
22. *Bruzzi M., Menichelli D., Pirollo S., Sciortino S.* // Diamond and Related Materials. 2000. Vol. 9. P. 1081–1085.
23. *Bruzzi M., Miglio S., Pirollo S., Sciortino S.* // Diamond and Related Materials. 2001. Vol. 10. P. 601–605.
24. *Behnke T.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. Vol. 489. P. 230–240.
25. *Tromson D., Bergonzo, P., Brambilla, A.* et al. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 3360–3364.
26. *Muret P.* et al. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. P. 235205.
27. *Muret P., Pernot J., Teraji T., Ito T.* // Phys. stat. sol. (a) 2008. Vol. 205, N 9, P. 2179–2183.
28. *Казючиц Н. М., Макаренко Л. Ф., Наумчик Е. В.* и др. // Тр. XXIII Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 8–13 июля 2013 г.: Под ред. Г. Г. Бондаренко. М., 2013. С. 446–453.

A. P. ODRINSKY, N. M. KAZUCHITS, L. F. MAKARENKO

PICTS-SPECTROSCOPY OF SYNTHETIC HPHT DIAMOND IN THE TEMPERATURE RANGE 300–550 K

Summary

The electrically active defects in synthetic single crystals of HPHT diamond have been investigated using photo-induced current transient spectroscopy (PICTS). It has been found that kinetics of photocurrent is of complex nature in the temperature range 400–550 K. Detailed analysis of photocurrent relaxation on the basis of approximation by the sum of two exponential components has been performed. It is shown that their contributions cannot be interpreted as the result of thermal emission from two independent local levels. These defects are suggested to be responsible for the long photocurrent stabilization in detectors made of HPHT diamonds.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 621.384.6.01+621.385.69+004.942

В. В. ТИХОМИРОВ, С. Э. СЯГЛО

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНОГО ВИРКАТОРА

Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета

(Поступила в редакцию 25.10.2013)

Введение. Развитие многих отраслей науки и техники тесно связано с прогрессом в создании импульсных источников сверхвысокочастотного электромагнитного излучения (СВЧ). Важнейшими их приложениями являются импульсный нагрев плазмы, ускорение сильноточных пучков электронов и ионов, питание сверхмощных радарных систем, накачка мощных эксимерных лазеров, разрушение атмосферного фреона в целях защиты озонового слоя. Помимо этого они также могут служить импульсными источниками электронов и нейтронов. Особые надежды связывают с использованием импульсных источников СВЧ-излучения для проверки стойкости аппаратуры и разработки новых оборонных систем.

Весьма перспективным источником СВЧ-импульсов с мощностью 10 ГВт и выше признан виркатор [1, 2], в котором для генерации излучения используются колебания плотного сгустка электронов – виртуального катода (ВК). Достоинствами виркаторов являются простота конструкции, компактность, невысокие требованию к качеству электронного пучка, простота конструкции волноводной системы, возможность перестройки частоты генерации, а также возможность работы в отсутствие внешнего магнитного поля, хотя виркаторы с неоднородным фокусирующим внешним магнитным полем также могут оказаться достаточно эффективными [3]. Однако существующие конструкции виркаторов пока обладают невысокой эффективностью и нестабильной частотой излучения.

Принципиальной особенностью виркаторов является использование в них пучков электронов со сверхпредельными токами (превышающими предельный вакуумный ток). Попадая через анодную сетку в волновод, такой пучок начинает замедляться, формируя ВК, и его нарастающее электрическое поле отражает вновь поступающие электроны, заставляя их осциллировать между виртуальным и реальным катодами. В свою очередь отражение, взаимное отталкивание и уход электронов за ВК приводят к его разрушению. Колебания заряда и формы ВК вместе с осцилляциями электронов и служат источниками интенсивного СВЧ-излучения.

Сильная нелинейность, нестационарность и многопотоковость движения электронов позволяют проводить разработку виркаторов лишь исходя из первых принципов электродинамики и кинетики, традиционно воплощаемых в методе частица – сетка (particle in cell – PIC), сочетающем в себе конечно-разностную формулировку уравнений Максвелла и метод крупных частиц (finite-size particle) [4, 5]. Данный подход является безальтернативным для широкого круга задач, связанных с использованием сверхпредельных токов, и реализован в ряде программ, некоторые из которых, такие как MAGIC [6] и КАРАТ [7], получили широкую известность и коммерческое распространение.

Однако использование этих программ не стало повсеместным. Так, ни одна научная группа Республики Беларусь в настоящее время не использует указанные программы в процессе разработки СВЧ-техники. Простейшим объяснением этому является высокая стоимость, но существует и ряд физических причин.

При использовании дискретных (или конечно-разностных) методов для решения уравнений Максвелла необходимо регулярное проведение корректирования и сглаживания (цифровой

Национальная академия наук Беларуси

фильтрации) численных решений для полей, плотностей заряда и тока. Как способы, так и методики проведения этих процедур весьма разнообразны и часто не имеют строгого математического обоснования. Это существенно ограничивает возможности контроля и настройки подобных процедур в приобретенных готовых программах. Владение же полной информацией о процедурах корректирования и сглаживания открывает перед разработчиком широкие возможности оптимизации их проведения и настройки на конкретную задачу, в том числе и с использованием экспериментальных данных. Совокупность этих обстоятельств делает очевидной необходимость разработки программ для решения уравнений Максвелла на основе метода частица – сетка в Республике Беларусь. В данной статье предложен первый вариант программы, позволяющей адекватно моделировать нестационарную нелинейную динамику сверхпредельных электронных пучков в аксиальных виркаторах гигаваттного диапазона простейших конструкций, работающих на аксиально-симметричных модах.

Алгоритм численного решения. ***Разностная схема и граничные условия.*** Кратко напомним общую методику решения уравнений Максвелла методом частица – сетка [4–7] и приведем конкретные варианты используемых в ней процедур. Электрическое и магнитное поля разбиваются на квазистатические внешние и быстро изменяющиеся «внутренние» поля, порождаемые зарядами и токами системы. При этом квазистационарное ускоряющее электрическое поле задается потенциалом электродов и рассчитывается путем решения уравнения Лапласа, а внутренние поля определяются граничными условиями и находятся из уравнений Максвелла. Следуя [6, 7], для их решения мы будем использовать метод с перешагиванием (leapfrog sheme) и прямоугольные разностные сетки, сдвинутые во времени и пространстве (Yee mesh). Пока ограничимся рассмотрением достаточно простых и в то же время распространенных устройств [1, 2, 7–9], эффективно работающих на аксиально-симметричных модах TM_{0i} круглых волноводов[1], описываемых разностной схемой в цилиндрической системе координат ($R\theta z$) с осевой симметрией:

$$\begin{aligned}
\frac{(E_r)^{n+1}_{i-1/2,k}-(E_r)^{n}_{i-1/2,k}}{c^2\tau} &= -\frac{(B_\theta)^{n+1/2}_{i-1/2,k+1/2}-(B_\theta)^{n+1/2}_{i-1/2,k-1/2}}{h_z}-\mu_0(J_r)^{n+1/2}_{i-1/2,k},\\
\frac{(E_z)^{n+1}_{i,k-1/2}-(E_z)^{n}_{i,k-1/2}}{c^2\tau} &= \frac{r_{i+1/2}(B_\theta)^{n+1/2}_{i+1/2,k-1/2}-r_{i-1/2}(B_\theta)^{n+1/2}_{i-1/2,k-1/2}}{r_i h_r}-\mu_0(J_z)^{n+1/2}_{i,k-1/2},\\
\frac{(B_\theta)^{n+1/2}_{i-1/2,k-1/2}-(B_\theta)^{n-1/2}_{i-1/2,k-1/2}}{\tau} &= \frac{(E_z)^{n}_{i,k-1/2}-(E_z)^{n}_{i-1,k-1/2}}{h_r}-\frac{(E_r)^{n}_{i-1/2,k}-(E_r)^{n}_{i-1/2,k-1}}{h_z},
\end{aligned} \qquad (1)$$

где E_r и E_z – радиальная и продольная компоненты электрического поля, B_θ – азимутальная компонента магнитного поля, J_r и J_z – радиальная и продольная компоненты плотности тока соответственно. Индексы i и k в формуле (1) соответствуют номерам узлов сетки вдоль осей $0r$ и $0z$ с координатами $r_i=(i-1)h_r$ и $z_k=(k-1)h_z$, где h_r и h_z – соответственно радиальный и продольный размеры ячеек в плоскости rz; τ – шаг по времени, n – номер шага. Величины $n\pm1/2$, $i\pm1/2$ и $k\pm1/2$ соответствуют промежуточным моментам времени $(n\pm1/2)\tau$ и «полуцелым» координатам $r=(i\pm3/2)h_r$ и $z=(k\pm3/2)h_z$. Шаги по времени и координатам должны удовлетворять условию устойчивости Куранта

$$c\tau<\sqrt{h_r^2+h_z^2}. \qquad (2)$$

В наиболее распространенных конструкциях виркаторов, состоящих из цилиндрических труб и кольцевых диафрагм с прямоугольным сечением в плоскости rz [8, 9] (рис. 1), металлические поверхности параллельны либо оси $0r$ (эмитирующая поверхность катода, анодная сетка и фронтальные поверхности диафрагм резонатора), либо оси $0z$ (внешние стенки диода, катододержателя и резонатора, торцевые поверхности диафрагм). Условие идеальной проводимости

[1] Заметим, что для коаксиальных виркаторов учет аксиально-несимметричных мод принципиально важен.

Национальная академия наук Беларуси

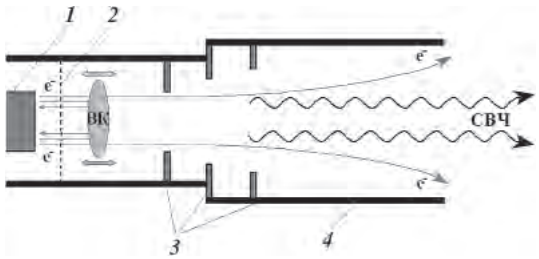


Рис. 1 Центральное продольное сечение аксиального виркатора: *1* – катод, *2* – анодная сетка, *3* – диафрагмы резонатора, *4* – боковая стенка резонатора. Осцилляции виртуального катода, а также осцилляции электронов, отражаемых виртуальным и реальным катодами, являются источниками мощного СВЧ-излучения

для этих двух типов поверхностей принимают соответственно вид $E_r = 0$ и $E_z = 0$. Выход излучаемой волны из резонатора обеспечивается условием

$$c\frac{\left(B_\varphi\right)^{n+1/2}_{i-1/2,k+1/2} + \left(B_\varphi\right)^{n-1/2}_{i-1/2,k-1/2}}{2} = \left(E_r\right)^{n}_{i-1/2,k} \qquad (3)$$

для значения продольного индекса $k = z_{ex} / h_z + 1$, соответствующего координате z_{ex} выходного окна. Мощность излучения виркатора рассчитывается интегрированием вектора Пойнтинга $W = E_r \cdot H_\varphi$ по площади выходного окна.

Разностные уравнения (1) предполагают задание плотностей тока J_r и J_z в дискретных точках сетки $(i-3/2)h_r$, $(k-1)h_z$ и $(i-1)h_r$, $(k-3/2)h_z$ соответственно. В то же время движение частиц под действием суммы внешних и внутренних полей является непрерывным и описывается уравнением Ньютона – Лоренца, куда входят напряженности электрического и магнитного полей, которые также должны быть рассчитаны в точках, где расположены частицы с непрерывными координатами. *Залогом успешного использования метода частица – сетка является корректный прямой и обратный переходы между физическими величинами, задаваемыми в непрерывном пространстве и на дискретной сетке* [4, 5]. Эти переходы осуществляются с помощью весовых функций, зависящих от расстояния между точкой расположения частицы и координатой узла сетки.

Мы убедились в достаточной эффективности процедуры взвешивания первого порядка (называемой взвешиванием по площади) [4, 5], означающей, что точечный заряд, находящийся в точке расположения частицы, имеющей непрерывную координату, распределен по ближайшим к нему узлам сетки по формулам линейной интерполяции. Подобная процедура взвешивания используется на каждом временном шаге дважды. Первый раз – при интерполяции непрерывных плотностей заряда и тока в дискретные узлы сетки для решения уравнений Максвелла (1) и Пуассона (см. ниже) и второй раз – при интерполяции полей, найденных в ходе решения уравнений Максвелла в узлах сетки, в непрерывно распределенные частицы. Для достижения приемлемой точности этой процедуры, повторяемой на каждом шаге интегрирования по времени, принципиально важным является использование одних и тех же весовых функций для прямой и обратной интерполяций [4, 5]. Остается добавить что поля, интерполированные в непрерывно расположенные точки, используются для нахождения траекторий частиц путем решения уравнения Ньютона – Лоренца, записываемого в центрированной по времени форме и решаемого с применением алгоритма, предложенного Бо́рисом [4].

Коррекция численного решения. Следует отметить, что моделирование распределения электронов в фазовом пространстве крупными частицами, каждая из которых может содержать 10^9 электронов и более, является весьма радикальным шагом, последствия которого должны ясно осознаваться и эффективно преодолеваться. Неизбежным обстоятельством при этом является то, что число крупных частиц в пространственной ячейке всегда не очень велико и не позволяет достичь непрерывного предела даже при максимальных вычислительных мощностях. По этой причине компоненты плотности тока в правых частях уравнений Ампера в выражениях (1) являются мощным, постоянно действующим источником числового шума на масштабах, определяемых

Национальная академия наук Беларуси

размерами ячейки пространственной сетки. Хотя такие важные процессы, как формирование и эволюция ВК, а также возбуждение им электромагнитного поля, проявляются на существенно более крупных пространственных масштабах, присутствие постоянного сильного источника высокочастотного шума неизбежно оказывает влияние на поведение крупных частиц и с течением времени приводит к возбуждению им нефизических колебаний на промежуточных частотах, что не может не отразиться на поведении пучка в наиболее актуальной для моделирования пространственно-временной области [4–7].

Данная проблема преодолевается проведением процедуры коррекции численных решений уравнений Максвелла, что позволяет не только получать осмысленные результаты при небольших количествах крупных частиц в ячейке на общедоступных вычислительных мощностях персональных ЭВМ, но даже выходить за пределы условия Куранта (2) [6]. Несмотря на физическую оправданность, коррекция является искусственным приемом, вследствие чего, вероятно, бессмысленно или, по крайней мере, преждевременно ставить вопрос об оптимальном способе ее проведения. В реальности ряд ведущих специалистов и научных коллективов после многих лет поиска разработали собственные подходы к проведению коррекции, демонстрирующие корректность и высокую эффективность при сравнении с реальным экспериментом [4–7]. Руководствуясь их опытом и исходя из стоящих перед нами практических задач, в данной работе мы использовали процедуры коррекции, представляющиеся на данном этапе простыми, надежными и позволяющими успешно вести разработку мощных аксиальных виркаторов.

Исторически первой была понята и преодолена проблема нарушения уравнения Гаусса $\mathrm{div}\,\mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$, тождественного нарушению уравнения сохранения заряда $\mathrm{div}\,\mathbf{J} + \partial\rho / \partial t = 0$. Самым распространенным способом устранения этой проблемы является коррекция методом Бо́риса [4]. Она состоит в нахождении удовлетворяющего уравнению Пуассона $\Delta\Phi = \nabla\mathbf{E} - \rho / \varepsilon_0$ корректирующего потенциала Ф и замене поля $\mathbf{E}$ на $\mathbf{E} - \vec{\nabla}\Phi$. Данная процедура может заметно варьироваться. В программном комплексе КАРАТ [7] для интегрирования уравнения Пуассона применяется метод верхней релаксации, для улучшения сходимости дополненный методом вложенных сеток с ускорением по Чебышеву. Использование столь высокоточного подхода в данном контексте представляется нам излишним. Основная причина не только в затратах машинного времени, позволяющих применять его только через несколько временных циклов. Излишней представляется высокая точность нахождения решения, несущего большей частью нефизическую информацию о шумовых флуктуациях плотностей тока, связанных с реализацией метода крупных частиц. Эти соображения привели нас к использованию гораздо более простой, быстрой и в то же время достаточной процедуры, состоящей в применении минимального количества итераций простейшего итерационного метода – метода Якоби. Казалось бы, можно возразить, что этот метод обладает медленной сходимостью, требующей сотен и тысяч итераций. Однако в процессе интегрирования уравнений (1) по времени обычно проводятся десятки тысяч итераций, в результате этого даже одной итерации по методу Якоби на каждом временном шаге оказывается достаточно для удержания высокочастотного шума, связанного с применением метода крупных частиц, на уровне, не приводящем к каким-либо нефизическим явлениям на характерных пространственно-временных масштабах ВК. Подобное объяснение применимо и к методу Мэрдера [10], по отношению к которому наш подход следует рассматривать как более наглядный и дополнительно упрощенный, но тем не менее работоспособный аналог [11].

Отметим, что минимальная трудоемкость предложенного подхода позволяет проводить значительное количество итераций уравнения Пуассона для корректирующего потенциала Ф на каждом временном шаге без существенного замедления процедуры моделирования в целом. В обычной ситуации количество итераций может быть доведено до десятков, а для малых пространственных областей, таких как ускоряющий промежуток между катодом и анодом, даже до сотен. При этом увеличение числа итераций приводит к некоторому понижению расчетной мощности излучения и более гладкому распределению полей. Поскольку, как уже отмечалось, и одной итерации по методу Якоби на каждом временном шаге достаточно для обеспечения устойчивости процедуры интегрирования. Число итераций в различных областях конструкции может

Национальная академия наук Беларуси

использоваться в качестве варьируемого модельного параметра для улучшения согласия с экспериментальными данными или другими численными результатами.

Компенсация отклонений от закона Гаусса также может быть обеспечена коррекцией не продольной компоненты электрического поля, а плотности тока [6]. В любом случае процедура коррекции затрагивает величины, задаваемые в один момент времени, и является центральной по времени и обратимой [4]. Помимо электростатических флуктуаций ошибки интерполяции плотностей тока приводят к возбуждению поперечных полей, амплитуды которых в отсутствие затухания нарастают со временем, внося все более значимые вклады в компоненты роторов уравнений (1). Изначально для подавления коротковолновых поперечных полей использовалась простейшая фильтрация, сводящаяся к усреднению фильтруемых величин по ближайшим узлам сетки с традиционно используемыми весами [4, 5, 7]. Однако в настоящее время преобладает использование нецентральной по времени (time-biased semi-implicit) версии процедуры фильтрации, предложенной Годфри [12]. В соответствии с ней на каждом временном шаге в каждой точке сетки проводится I итераций ($i = 1,\ldots, I$) уравнений Ампера и Фарадея

$$E^{n+1,i} = (1-\tau_i)E^{n+1,i-1} + \tau_i E^{n,I} + \\ +\tau_i \delta t\left[-J^{n+1/2}/\varepsilon_0 + \nabla\times\left(aB^{n+3/2,i-1} + (1-a)B^{n+1/2,I}\right)/(\mu_0\varepsilon_0)\right], \qquad (4)$$
$$B^{n+3/2,i} = B^{n+1/2,I} - \delta t\nabla\times E^{n+1,i}.$$

Их результатом является избирательное подавление амплитуд высокочастотных фурье-компонент полей, степень которого (вместе с необходимым количеством итераций I) возрастает при увеличении параметра a от нуля до единицы. Для обеспечения оптимальной фильтрации спектра частот для итерационных коэффициентов используют выражение [6]

$$\tau_i = \left\{1 + 2a\left\{1 - \cos[\pi(i-1/2)/I)]/\cos\left(\pi/(2I)\right)\right\}/(1-a)^2\right\}^{-1}. \qquad (5)$$

Подобно коррекции продольного поля параметры a и I в процедуре фильтрации поперечного поля на данном этапе исследований приходится выбирать опытным путем. При этом после обеспечения устойчивой работы схемы интегрирования свобода в выборе указанных параметров может быть использована для достижения наилучшего согласия с экспериментом.

Инжекция тока, ограниченного пространственным зарядом. Как известно [13, 14], сверхпредельные токи обеспечиваются взрывной эмиссией электронов с поверхности катода. Величина плотности тока инжектируемых электронов при этом ограничивается плотностью пространственного заряда, присутствие которого приводит к обращению в нуль нормальной компоненты электрического поля на эмитирующей поверхности. Касательная компонента также обращается в нуль. В этих условиях теорема Гаусса для i-й ячейки сетки с $0 < z < h_z/2$ и $0 < r < h_r/2$ при $i = 1$ и $h_r(i-3/2) < r < h_r(i-1/2)$ при $i = 2,3,\ldots$ позволяет определить величины зарядов

$$\Delta Q_i = \pi\varepsilon_0 h_r\left\{\frac{1}{4}h_z\left[\left(i-\frac{1}{2}\right)(E_r)_{i-1/2,2} - \left(i-\frac{3}{2}\right)(E_r)_{i-3/2,2}\right] + (i-1)h_r(E_z)_{i,1}\right\} - Q_i, \quad i = 2,3,\ldots, \\ \Delta Q_1 = \pi\varepsilon_0 h_r\left\{\frac{1}{8}h_z(E_r)_{1/2,2} + \frac{1}{4}h_r(E_z)_{1,1}\right\} - Q_1, \qquad (6)$$

которые следует инжектировать в эти ячейки на данном временном шаге для того, чтобы не нарушалась теорема Гаусса.

Пока вопрос о размещении зарядов ΔQ_i внутри соответствующих ячеек не имеет однозначного решения. Наиболее естественным, на первый взгляд, является квазиравномерное эмитирование зарядов вблизи поверхности катода. Однако использование линейной интерполяции электрического поля не позволяет получить корректные величины ускоряющего поля вблизи последнего, а малость этих полей, обусловленная стремлением нормальной составляющей поля к нулю

Национальная академия наук Беларуси

вблизи его поверхности, приводит к тому, что медленное движение крупных частиц вблизи поверхности катода начинает определяться неточностями интерполяции полей. Не имея, таким образом, возможности строго задавать пространственное распределение инжектируемых электронов, в [15] было предложено размещать эмитируемые электроны в центры $r_i = h_r(i-1),\ i = 1,2\ldots,\ z = h_z/4$ ячеек пространственной решетки, примыкающих к поверхности катода. Мы также предлагаем инжектировать электроны в плоскости $z = h_z/2$, однако распределять их квазиодномерно по величине r^2.

Пример моделирования работы аксиального виркатора. Рассмотрим аксиальный виркатор, реализованный и промоделированный в [9] (рис. 1). В соответствии с уравнениями (1) колебания электронной плотности в условиях аксиальной симметрии создают переменные в пространстве и времени продольные и радиальные токи, индуцирующие аналогичные компоненты электрического поля, порождающие в свою очередь азимутальное магнитное поле. В условиях обращения в нуль касательных (или тангенциальных) компонент электрического поля на стенках в замкнутом цилиндрическом резонаторе радиуса R и длины L генерируются моды TM_{0il} резонатора с полями

$$E_z = E_0 J_0(k_\perp r)\cos k_z z,$$
$$E_r = E_0 \frac{k_z}{k_\perp} J_1(k_\perp r)\sin k_z z, \qquad (7)$$
$$B_\varphi = iE_0 \frac{\omega}{k_\perp c^2} J_1(k_\perp r)\cos k_z z,$$

где $k_\perp = \lambda_i / R,\ \lambda_i$ – корни функции Бесселя нулевого порядка $J_0(\lambda_i) = 0$; $k_z = \pi l / L,\ l = 1,2,...,$ $\omega = c\sqrt{k_z^2 + k_\perp^2}$ – частота, E_0 – амплитуда волны.

Резонатор обладает отверстием, соединяющим его с диафрагмированным волноводом, конструкция которого обеспечивает как эффективное резонансное взаимодействие излучения с ВК в резонаторе, так и вывод излучения наружу. Стоячие волны (7) при этом переходят в бегущие с тем же радиальным распределением напряженностей.

Частота генерации $f = 4 \div 4{,}1$ ГГц и радиус резонаторной секции волновода R = 4 см позволяют выбрать ее длину L = 5,4 см, обеспечивающую преимущественную генерацию моды TM_{011}. Размеры последующих секций волновода, изображенного на рис. 1 [9], были восстановлены Е. А. Гурневичем, внешний и внутренний радиусы кольцевого катода и катод-анодное расстояние

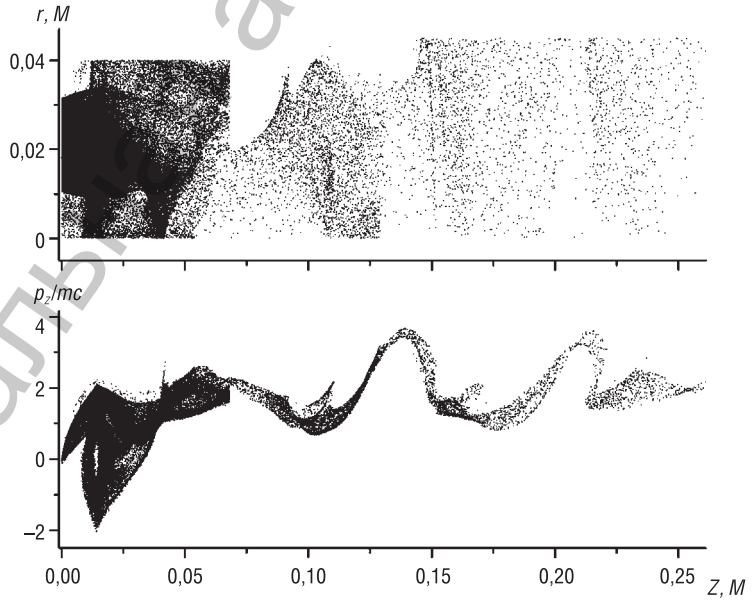


Рис. 2. Конфигурационный (вверху) и продольный фазовый портрет пучка аксиального виркатора (внизу)

Национальная академия наук Беларуси

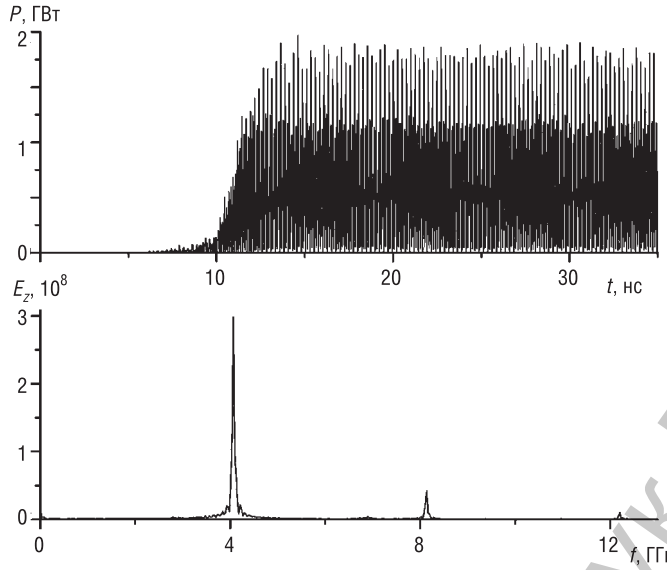


Рис. 3. Временная зависимость мощности (вверху) и спектр излучении (внизу) аксиального виркатора (рис. 1)

брались, как и в [9], равными соответственно 32, 12 и 14 мм, а прозрачность сетки полагалась равной 70%. Результаты моделирования работы данной конструкции при катод-анодном напряжении в 630 кВ иллюстрируются на рис. 2, 3. Распределения электронов в конфигурационном и продольном фазовом пространстве (рис. 2) иллюстрируют основные черты динамики ВК, а также существенную импульсную модуляцию электронов, распространяющихся за ним. Как видно (рис. 3), средняя мощность излучения близка к 1 ГВт, а частота генерации близка к 4,1 ГГц.

Отметим, что в данной конструкции за ВК происходит ускорение электронов до энергий, более чем вдвое превышающих энергию их ускорения в катод-анодном промежутке (ср. с [8]). Нетрудно предположить возможность повышения эффективности данной конструкции виркатора путем выведения электронов из процесса ускорения в резонаторе в областях минимума их энергии, например, при помощи локальных внешних полей. Использование полей для повышения эффективности работы виркаторов исследуются в [3].

Заключение. Нами был описан и протестирован алгоритм моделирования методом частица – сетка, позволяющий вести практическую разработку виркаторов, работающих на аксиально-симметричных модах. Выбранные и опробированные в комплексе методы коррекции численного решения уравнений Максвелла и Пуассона позволяют устойчиво моделировать быструю нелинейную многопотоковую динамику возникновения и эволюции ВК и порождаемых им полей, могут быть перенесены на случай аксиально-несимметричных мод. При этом возможность использования различных значений для численных параметров, входящих в процедуры, корректирующие решение, открывает широкие возможности тонкой настройки численного решения по доступным экспериментальным данным. В качестве указанных параметров для корректирующих процедур могут использоваться число итераций уравнения Пуассона при применении метода Бо́риса, обеспечивающего выполнение закона сохранения заряда, а также число и параметры итерационной процедуры подавления высокочастотных поперечных шумов методом Годфри.

Авторы признательны В. Г. Барышевскому за предложение данной тематики, а также благодарят за сотрудничество и полезные обсуждения В. Г. Барышевского, А. А. Кураева, С. В. Анищенко, А. А. Гуринович, Е. А. Гурневича, П. В. Молчанова и С. Н. Сытову.

Литература

1. *Рухадзе А. А., Столбецов А. А., Тараканов В. П.* // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, №. 3. С. 385–396.
2. *Дубинов А. Е., Селемир В. Д.* // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, №. 6. С. 645–672.
3. *Куркин С. А., Короновский А. А., Храмов А. Е., Кураев А. А, Колосов С. В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83, № 10. С. 98–107.

Национальная академия наук Беларуси

4. *Бэдсел Ч., Ленгдон* А. Физика плазмы и численное моделирование. М., 1989.
5. *Хокни Р., Иствуд Дж.* Численное моделирование методом частиц. М., 1987.
6. *Goplen B., Ludeking L., Smithe D.* et al. // Comp. Phys. Comm. 1995. Vol. 87. P. 54–86.
7. *Tarakanov V. P.* 'User's Manual for Code KARAT'. BRA Inc., Va, USA, 1992.
8. *Альтеркоп Б. А., Рухадзе А. А., Сокулин А. Ю.* и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61, №. 9. С. 115–123.
9. *Li Z.-Q., Zhong H.-H., Fan Y.-W.* et al. // Chin. Phys. Lett. 2008. Vol. 25. P. 2566–2568.
10. *Marder B.* // J. Comput. Phys. 1987. Vol. 68. N 1.
11. *Langdon A. B.* // Comp. Phys. Comm. 1992. Vol. 70. P. 447–450.
12. *Godfrey B. B., Goplen B.* // 22 Annual meeting of APS, Division of plasma physics, 10–14 November, 1980 Mission Res. Corp., Lancaster, PA, AMRC-N-146, Nov. 1980.
13. *Месяц Г. А.* Импульсная энергетика и электроника. М., 2004.
14. *Миллер* Р. Введение в физику *сильноточных пучков* заряженных частиц. М., 1984.
15. *Watrous J. J., Lugisland J. W., Sasser III G. E.* // Phys. Plasm. 2001. Vol. 8, N 1. P. 289–296.

V. V. TIKHOMIROV, S. E. SIAHLO

SIMULATION OF AXIAL VIRCATOR

Summary

An algorithm of particle in cell simulations is described and tested to aid further the actual design of simple vircators working on axially symmetric modes. The methods of correction of the numerical solution, have been chosen and jointly tested, allow the stable simulation of the fast nonlinear multiflow dynamics of virtual cathode formation and evolution, as well as the fields generated by the virtual cathode. The selected combination of the correction methods can be straightforwardly generalized to the case of axially nonsymmetric modes, while the parameters of these correction methods can be widely used to improve an agreement between the simulation predictions and the experimental data.

Национальная академия наук Беларуси

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 628.474.76

В. П. БУБНОВ

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ СЕРНИСТОГО АНГИДРИДА

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 13.12.2013)

Сернистый ангидрид (SO_2) является одним из распространенных компонентов вредных выбросов химической промышленности и тепловой энергетики. При соединении SO_2 с парами воды образуются сернистая и серная кислоты. При соответствующих метеоусловиях серная кислота находится в атмосфере в виде капель тумана либо выпадает на землю вместе с дождем. При загрязнении воздуха сернистыми соединениями сверх допустимых пределов у людей обостряются многие заболевания. Пагубному воздействию подвергаются флора и фауна, сооружения, водоемы и др.

Одним из основных загрязнителей окружающей среды SO_2 являются энергетические установки, использующие органическое серусодержащее топливо.

Известно около 200 различных способов удаления SO_2 из дымовых газов, более 25 из них нашли промышленное применение [1–3]. Все известные методы очистки газов от SO_2 можно разделить на три основные группы:

1) аммиачные методы, позволяющие одновременно с очисткой газов от SO_2 получать сульфит и бисульфит аммония, которые используются как товарные продукты;

2) методы нейтрализации сернистого ангидрида, позволяющие одновременно получать сульфиты и сульфаты и обеспечивающие высокую степень очистки газов. Однако получаемые продукты имеют ограниченный спрос в народном хозяйстве;

3) каталитические методы, основанные на окислении SO_2 в присутствии катализаторов с получением разбавленной серной кислоты.

Выбор того или иного метода очистки от SO_2 решается с учетом местных условий, технико-экономических показателей и потребностей в получаемых продуктах.

Отметим некоторые особенности методов и их технико-экономические показатели.

Аммиачные методы очистки газов от сернистого ангидрида основаны на взаимодействии SO_2 с водными растворами сульфита аммония:

$$SO_2 + (NH_4)_2\,SO_3 + H_2O = 2NH_4HSO_3.$$

Полученный бисульфат аммония подвергается разложению кислотным, автоклавным, циклическим или нециклическим способом.

Аммиачно-кислотные методы являются относительно экономичными, но требуют расхода дефицитного продукта – аммиака. Получаемые при этом соли и товарная двуокись серы не всегда компенсирует расходы на очистку. Данные методы нашли применение для очистки отходящих газов сернокислотных и металлургических производств.

Национальная академия наук Беларуси

Аммиачно-серно-кислотный метод заключается в обработке бисульфита аммония серной кислотой:

$$2NH_4HSO_3 + H_2SO_4 \rightarrow 2(NH_4)_2SO_4 + 2H_2O + SO_2.$$

Технологическая схема аммиачно-серно-кислотного метода очистки отходящих газов от сернистого ангидрида показана на рис. 1. Главным аппаратом установки является абсорбер распылительного типа (АРТ). Эффективность очистки газа зависит от состава поглотительного раствора. Основными параметрами, характеризующими активность раствора, являются общая концентрация солей и соотношение между концентрациями сульфита и бисульфита аммония.

Изменение содержания сульфита аммония в растворе регулируется подачей аммиака. При увеличении количества NH_3 протекает следующая реакция:

$$NH_4HSO_3 + NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_3.$$

Когда концетрация сульфит-бисульфитных солей в поглотительном растворе достигает 500–600 г/л, его из емкости *9* периодически отводят в сборник *8*, затем с помощью центробежного насоса *7* подают на орошение на колонну разложения *4*. Здесь при температуре 70 °С протекают реакции

$$2NH_4HSO_3 + H_2SO_4 \rightarrow 2(NH_4)_2SO_4 + 2H_2O + 2SO_2,$$

$$(NH_4)_2HSO_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + H_2O + SO_2.$$

Выделяющаяся 100%-ная двуокись серы отводится из колонны и используется для получения серной кислоты или направляется на склад.

Раствор сульфата аммония из кубовой части колонны *4* поступает в емкость *6*, где он нейтрализуется аммиачной водой до концентрации нейтральной или слабощелочной среды и центробежным насосом *5* подается на склад готовой продукции.

Аммиачно-азотно-кислотный метод заключается в очистке отходящих газов от SO_2 сульфит-бисульфитным раствором с последующим разложением полученных растворов азотной кислоты:

$$(NH_4)_2HSO_3 + 2HNO_3 \rightarrow 2NH_4NO_3 + SO_2 + H_2O,$$

$$NH_4HSO_3 + HNO_3 \rightarrow NH_4NO_3 + SO_2 + H_2O.$$

В результате этих реакций образуются товарная двуокись серы и аммиачная селитра, используемая в качестве азотного удобрения.

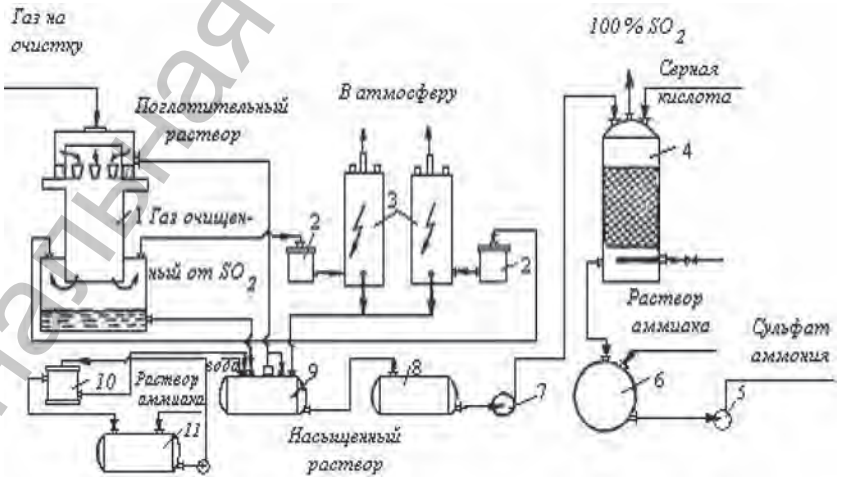


Рис. 1. Технологическая схема аммиачно-сернокислотного метода очистки газов от SO_2 с использованием АРТ: *1* – АРТ; *2* – каплеотбойник; *3* – электрофильтры; *4* – колонна разложения; *5*, *7* – насосы; *6* – сборник сульфата аммония; *8*, *9*, *11* – емкости; *10* – сборник аммиачной воды

Национальная академия наук Беларуси

При очистке данным методом дымовых газов ТЭЦ, содержащих 0,3% SO_2, на 1 т утилизируемого сернистого ангидрида можно получить 1,3 т серной кислоты, 3 т жидких азотных удобрений и около 0,2 т сульфата аммония с примесью нитрата аммония.

Аммиачно-фосфорно-кислотный способ. При его использовании образуются фосфорные удобрения и SO_2, который может быть переработан в серную кислоту. Разложение сульфит-бисульфита аммония фосфорной кислотой протекает по реакциям

$$3(NH_4)_2SO_3 + 2H_3PO_4 \rightarrow 2(NH_4)_3PO_4 + 3SO_2 + 3H_2O,$$

$$3NH_4HSO_3 + H_3PO_4 \rightarrow (NH_4)_3PO_4 + 3SO_2 + 3H_2O.$$

Аммиачно-автоклавный метод. SO_2 абсорбируется раствором сульфит-бисульфита аммония. По достижении определенной концентрации солей он подвергается разложению. В отличие от аммиачно-кислотного метода разложение сульфит-бисульфитных растворов производят не кислотами, а нагреванием в автоклаве до 140–150 °С. При этом в кислой среде происходит разложение солей аммония

$$2NH_4HSO_3 + (NH_4)_2SO_3 \rightarrow 2(NH_4)_2SO_4 + S + H_2O.$$

Получаемые сульфат аммония и сера используются как товарные продукты.

Для ускорения реакции в автоклав добавляют серную кислоту, серу, селен или тиосульфат. Количество добавляемой серы определяют по стехиометрическому расчету для перевода всего сульфита в тиосульфат. При двух-, трехкратном избытке серы продолжительность процесса составляет около 1 ч. Добавление 0,003 % селена (от массы раствора) позволяет проводить процесс при 135 °С.

Образовавшуюся в автоклаве жидкую серу, содержащую до 99,9 % основного вещества, отводят в виде товарного продукта на склад. Недостатком данного метода является большой расход аммиака и пара.

Аммиачно-циклический метод, суть которого заключается в поглощении SO_2 водными растворами сульфит-бисульфита аммония при низкой температуре и выделении SO_2 при нагревании. Процесс протекает по обратимой реакции

$$(NH_4)_2\,SO_3 + SO_2 + H_2O \rightarrow 2NH_4HSO_3.$$

Выделенный при нагревании SO_2 осушают и используют как товарный продукт высокого качества или перерабатывают в серу или серную кислоту. Раствор сульфита аммония охлаждают и вновь используют для абсорбции SO_2. Степень очистки газа при этом составляет 90%.

К недостаткам аммиачно-циклического метода очистки можно отнести большие затраты на нагрев, необходимость изготовления всей аппаратуры из кислотостойких материалов, высокую стоимость установки и большие эксплуатационные расходы.

Ниже приведены показатели работы установки по аммиачно-циклическому методу очистки газов от SO_2.

Содержание SO_2 в очищаемом газе, об. %	0,25–0,40
Содержание золы, г/м^3	5–7
Температура очищаемого газа, °С	150–180
Степень извлечения, %:	
SO_2	90
зола	92–94
Степень окисления SO_2 до сульфата аммония, %	15–20
Содержание аммиака в отходящем газе (в виде сульфитов), г/м^3	0,03–0,05
Расходные коэффициенты:	
аммиак, полученный после отгонки, кг/т SO_2	140–180
пар, т/т SO_2	7–10
электроэнергия, кВт·ч/т SO_2	700

Национальная академия наук Беларуси

Методы очистки, основанные на нейтрализации SO_2

Содовый метод основан на поглощении SO_2 раствором соды. Фактически процесс получения бисульфита происходит через стадии образования бикарбоната и сульфита натрия:

$$2Na_2CO_3 + SO_2 + H_2O \rightarrow 2NaHCO_3 + Na_2SO_3,$$

$$2NaHCO_3 + SO_2 \rightarrow Na_2SO_3 + CO_2 + H_2O,$$

$$Na_2SO_3 + SO_2 + H_2O \rightarrow 2NaHSO_3.$$

При концентрации SO_2 в газе менее 0,3% получение товарного продукта затрудняется из-за параллельно протекающего процесса окисления $NaHSO_3$ в жидкой фазе.

Известковый метод основан на поглощении SO_2 из газов суспензией CaO, химический состав которой следующий:

$$H_2SO_4 + CaO \rightarrow CaSO_4 + H_2O,$$

$$CaO + SO_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_3 \cdot 2H_2O,$$

$$CaSO_3 \cdot 2H_2O + 1/2O_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O.$$

Двуокись углерода, содержащаяся в газах, частично улавливается известковым молоком; образующиеся карбонаты кальция вступают в реакцию с SO_2, образуя сульфит кальция:

$$CaCO_3 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 + CO_2.$$

При недостатке извести может образоваться хорошо растворимый бисульфат кальция $CaSO_3 + SO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HSO_3)_2$, который затем переходит в сульфит при добавлении к суспензии известкового молока $Ca(HSO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaSO_3 + 2H_2O$.

Ниже приведены технико-экономические показатели известкового метода очистки газов от сернистого ангидрида:

Производительность по газу, $м^3$/ч (объем газа при нормальных условиях)	70000
Содержание SO_2 в газе, об. %	0,17–0,2
Содержание, г/$м^3$:	
туман H_2SO_4	1,5
влага в газе	170
Температура газа, °С	105–110
Степень очистки газа, %	98
Капитальные затраты, руб.:	
общие	16000
на 1000 $м^3$ газа	0,28
Эксплуатационные затраты на 1000 $м^3$ газа, руб	0,11
Расходные коэффициенты на 1000 $м^3$ газа:	
электроэнергия, кВт·ч	3,5
пар, кг	0,6
вода, $м^3$	0,05
известняк, кг	8,5

Для этого метода характерна простота и надежность работы установок, относительно небольшая площадь для их сооружения. К его недостаткам следует отнести необходимость фильтрации шлама и наличие отходов в виде солей сульфита и сульфата кальция.

Принципиальная схема известкового метода представлена на рис. 2.

Национальная академия наук Беларуси

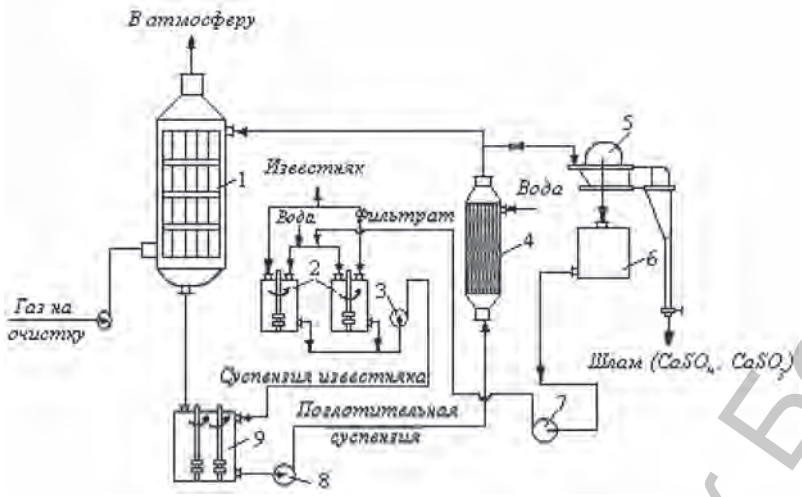


Рис. 2. Схема известкового метода очистки газов от SO_2: *1* – скруббер; *2* – емкости; *3* – насос; *4* – кристаллизатор; *5* – вакуум-фильтр; *6* – сборник; *7* – насос; *8* – циркуляционный насос; *9* – сборник известкового молока

Магнезитовый метод, суть которого состоит в связывании SO_2 суспензией MgO с образованием сульфита магния, который выпадает в осадок:

$$MgO + SO_2 + 6H_2O \rightarrow MgSO_3 \cdot 6H_2O.$$

Этот метод может быть осуществлен по кристальной или бескристальной схемам. Различие состоит в способе регулирования состава рабочего раствора в цикле поглощения, целью которого является предотвращение выпадения кристаллов сульфита магния. По бескристальной схеме часть раствора выводится из цикла поглощения для извлечения кристаллов $MgSO_3$ в специальном аппарате-нейтрализаторе, где бисульфит магния взаимодействует с магнезитом.

Магнезитовый метод очистки имеет свои преимущества: возможность очистки запыленных газов, имеющих высокую температуру, отсутствие сточных вод. К его недостаткам следует отнести наличие твердых веществ в системе поглощения, а также большой расход энергии на разложение $MgSO_3$.

Цинковый метод заключается в поглощении SO_2 из газов суспензией окиси цинка. При этом протекают реакции

$$ZnO + SO_2 + 2{,}5H_2O \rightarrow ZnSO_3 \cdot 2{,}5H_2O,$$

$$ZnO + SO_2 + 2{,}5H_2O \rightarrow Zn(HSO_3)_2.$$

Возможны три варианта реализации данного метода:

1) производство в виде готовой продукции сульфата цинка и жидкого SO_2;
2) производство в виде готовой продукции только жидкого SO_2;
3) получение серной кислоты.

Каталитические методы очистки диоксида серы

Пиролюзитный метод основан на окислении сернистого ангидрида кислородом в жидкой фазе в присутствии катализатора-пиролюзита. Технологическая схема пиролюзитного метода показана на рис. 3.

Озоно-каталитический метод. Его достоинствами являются относительная простота технологической схемы и возможность получения более концентрированной серной кислоты (до 60%). Он является дальнейшим развитием пиролюзитного метода и отличается от последнего тем, что окисление двухвалентного марганца до трехвалентного осуществляется посредством озоно-воздушной смеси.

Национальная академия наук Беларуси

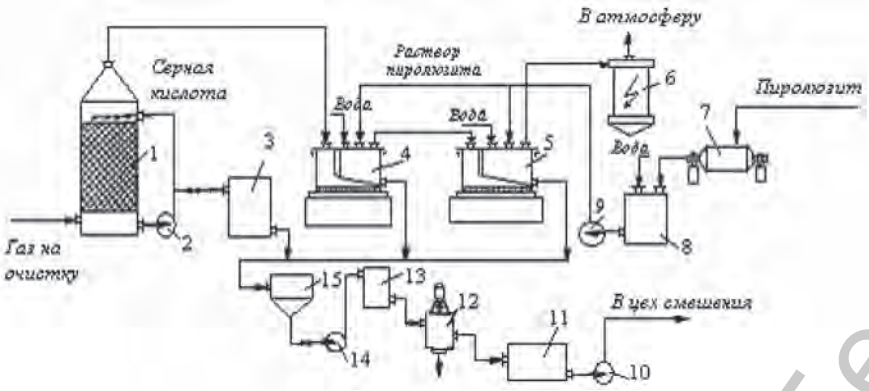


Рис. 3. Технологическая схема пиролюзитного метода очистки газов от SO_2: *1* – башня с насадкой из колец Рашига; *2* – насос; *3* – сборник; *4* – барботер 1-й ступени; *5* – барботер 2-й ступени; *6* – электрофильтр; *7* – шаровая мельница; *8* – сборник пиролюзита; *9* – насос для суспензии пиролюзита; *10* – насос готовой продукции; *11* – сборник готовой продукции; *12* – центрифуга; *13* – напорный бак; *14* – насос; *15* – сборник слабой серной кислоты

Технологические схемы этих методов идентичны. Ниже приведены технико-экономические показатели озоно-каталитического метода очистки газов от SO_2.

Концентрация, об.%	
SO_2 в газе	0,2
озона в газе	0,005
Температура газа, °С	120
Степень очистки, %	80
Коэффициент стехиометрии	100
Степень использования озона, %	30
Содержание $MnSO_4$ в поглотительном растворе, мас.%	0,03
Температура поглотительного раствора, °С	50
Концентрация получаемой неупаренной H_2SO_4, %	55

Жидкостно-контактный метод основан на поглощении SO_2 из газов суспензией $CaCO_3$. При этом протекает реакция

$$CaCO_3 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 + CO_2.$$

По расчетам на нейтрализацию 1 кг SO_2 расходуется 1,56 кг $CaCO_3$.

Электронно-лучевой метод очистки газовых выбросов. Как следует из рассмотренных выше методов, утилизация SO_2 основана либо на их связывании, либо на восстановлении до молекулярной серы, либо на доокислении до высших окислов с выделением в виде кислот или соответствующих солей. С этой точки зрения электронно-лучевой метод относится к последнему классу. Особенность электронно-лучевой обработки газов состоит в том, что при этом происходит одновременное удаление из дымовых газов окислов серы и азота [4–7]. Это сухой метод очистки, который позволяет избежать жидких отходов, проблемы удаления шламов, повторного нагрева газов. Кроме того, данный метод позволяет очищать дымовые газа как от SO_2, так и NO_x и получать порошкообразную смесь побочных продуктов – удобрений $(NH_4)_2SO_4$ и NH_4NO_3.

Упрощенную схему процесса можно представить в следующем виде:

$$SO_2 \xrightarrow[\nu]{Q} SO_3 \xrightarrow{H_2O} H_2SO_4 \xrightarrow{NH_3} (NH_4)_2SO_4,$$

где Q – энергия излучения; ν – частота излучения; H_2O – пары воды; NH_3 – аммиак.

Наиболее известное технологическое решение электронно-лучевой газоочистки – эбара-процесс. Дымовые газы из котлов поступают на электрофильтры, где удаляются основное количе-

Национальная академия наук Беларуси

ство твердых частиц (золы) около 99 %. Далее в газовый поток вводится аммиак, дымовые газы поступают в камеру облучения, устройство которой должно обеспечить равномерное облучение всего газового потока и достижение требуемого значения поглощенной дозы. Для равномерности облучения газового потока целесообразно использовать двухсторонний подвод энергии облучения. В камере облучения и частично на выходе из нее, т. е. в каналах транспорта дымовых газов, происходят все химические изменения в дымовых газах и образование твердых частиц сульфата и нитрата аммония. Новообразованные твердые компоненты улавливаются на дополнительном блоке пылеочистки (электрофильтры или рукавные фильтры).

В качестве энергии облучения в электронно-лучевой газоочистке, как правило, используют электроны, ускоренные до сравнительно небольших энергий (300–1000 кэВ). Последние с одной стороны, облегчают создание системы биологической защиты ускорительных установок, а с другой, гарантируют отсутствие наведенной активности ускорительного оборудования, оборудования облучательных камер, дымоходов и самого обрабатываемого газа. Это позволяет обращаться с используемым в процессе очистки оборудованием на всех стадиях изготовления, монтожа и демонтажа, обслуживания, как с обычным электротехническим оборудованием. При использовании «чистого» эбара-процесса для достижения эффекта очистки (удаление более 95 % оксидов серы и более 80 % оксидов азота) в газе должно быть поглощено около 2 Мрад излучения или 25 кДж/м^3 газа. Для обработки отходящих газов тепловой электростанции установленной мощностью 500 МВт (выбрасываемое количество дымовых газов около 1,6 млн м^3 / ч) необходим источник излучения около 12 МВт, что составляет 2,4 % установленной мощности. Однако увеличение затрат на собственные нужды станции компенсируется уменьшением экологического налога за выбросы и добавочным доходом от реализации получаемых продуктов при очистке дымовых газов от SO_2 и NO_x.

В настоящее время такие установки эксплуатируются в Японии, США, Польше, Германии. Схема электронно-лучевой газоочистки на ТЭЦ в Щецине (Польша) представлена на рис. 4.

Для сравнительного анализа рассмотренных методов очистки дымовых газов ТЭС рассчитаны некоторые относительные показатели систем очистки. За единицу приняты показатели системы с использованием известкого метода. Как следует из результатов таблицы, наименьшие затраты на очистку 1000 м^3 имеют известковый и известняковый, а также электронно-лучевой методы. Однако электронно-лучевой метод позволяет одновременно производить очистку дымовых газов от SO_2 и NO_x.

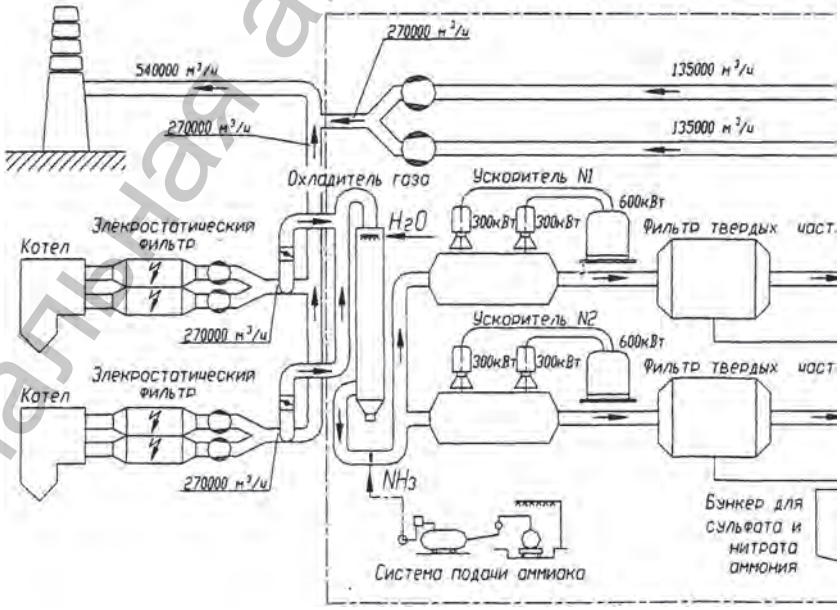


Рис. 4. Схема электронно-лучевой газоочистки на ТЭЦ в Щецине (Польша)

Национальная академия наук Беларуси

Сравнительные показатели систем очистки дымовых газов от SO_2

Метод	Содержание SO_2 в топливе, %	Содержание SO_2 в дымовых газах, г/м^3 (%)	Степень очистки, %	Удельные капитальные затраты (разы)	Удельные эксплуатационные затраты (разы)	Стоимость очистки 1000 м^3 дымовых газов (разы)
Известковый	3	5,5 (0,2)	95	1	1	1
Известняковый	3	5,5 (0,2)	95	1,14	1,05	1,14
Магнезитовый с получением серной кислоты или серы	3	4,4 (0,15)	85	 3,90 4,60	 2,24 2,24	 2,91 3,43
Известняковый	3	4,4(0,15)	85	4,90	2,07	3,57
Магнезитовый разрывной	3	10,3 (0,35)		6,83	4,48	4,74
Аммиачно-цикличный	3	10,3 (0,35)	85	7,15	7,41	4,97
Озонный	3	2,0	90	5,05	4,83	—
Электронно-лучевой	3	2,0	90	4,44	5,17	2,86

Литература

1. *Кузнецов И. Е., Троицкая Т. М.* Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. М., 1979.

2. *Белов С. В.* Охрана окружающей среды. М., 1991.

3. *Стриха И. И., Карниций Н. Б.* Экологические аспекты энергетики: атмосферный воздух. Мн., 2001.

4. *Бубнов В. П., Дашук Е. М., Ничипор Г. В.* и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1992. № 2. С. 38–44.

5. *Бубнов, В. П., Бугаенко В. Л., Гришкин В. Л.* и др. // Теплоэнергетика. 1993. № 1.

6. *Моргунов В. В., Файнштейн А. Л., Шкилько А. М.* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. № 3/11. С. 25–29.

7. *Schmitt K., Murray D., Dibble T.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2009. Vol. 29. P. 347–362.

V. P. BUBNOV

ENVIRONMENT AND ECONOMIC INDICATORS OF SULFUR DIOXIDE EMISSIONS TREATMENT SYSTEMS

Summary

Environmental and economic indicators of different methods of sulfur dioxide (SO_2) emissions treatment have been considered. It have been shown that the lime and limestone methods and electron-beam method have the lowest cost for treating of 1000 m³. But the electron-beam method is also capable to treat sulfur dioxide (SO_2) and nitrogen oxides (NO) emissions at once.

Национальная академия наук Беларуси

РЕФЕРАТЫ

УДК 677.469

Мулярчик В. В., Данишевский В. Н., Мазовка Е. С., Прокопчук Н. Р., Никитенко П. Г. **Получение нановолокон из хитозана методом электроформования** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 5–8.

Впервые в Республике Беларусь получены нановолокна из хитозана по технологии NANOSPLDER на лабораторной установке NS LAB 500 S производства ф. «Элмарко» (Чешская Республика): разработан химический состав, подобраны реологические параметры формовочного раствора, оптимизирована технология электроформования, исследована структура нановолоконного слоя на подкладочный материал на электронном микроскопе JSM-5610 LV Jeol (Япония), отмечена перспективность использования мембран из нановолокон хитозана в фильтрационных и сорбионных процессах медицины и биологии, особенно при лечении ожогов, плохо заживающих ран.

Ил. 3. Библиогр. – 8 назв.

УДК 669.112.227.322:543.275.1

Бойправ О. В., Борботько Т. В., Лыньков Л. М. **Влияние влагосодержания на электродинамические параметры порошкообразного перлита //** Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 9–13.

Исследованы зависимости значений критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости вспученного порошкообразного перлита марки М75 от величины его влагосодержания. Предложено использование полученных результатов исследования в процессе создания на основе влагосодержащего вспученного порошкообразного перлита экранирующих модулей с требуемыми значениями коэффициентов передачи электромагнитного излучения.

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр. – 10 назв.

УДК 621.382

Оджаев В. Б., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Турцевич А. С., Шведов С. В., Филипеня В. А., Черный В. В., Явид В. Ю., Янковский Ю. Н., Дубровский В. А. **Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 14–17.

Исследованы ВАХ МОП-транзисторов, созданных по эпитаксиально-планарной технологии в различное время с использованием идентичных технологических материалов по аналогичным технологическим маршрутам. Установлено, что электрофизические характеристики МОП-транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела $Si–SiO_2$ приводят как к увеличению порогового напряжения, так и к снижению тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и в области насыщения, проводимости структуры в линейной области. Возрастают также токи утечки затвора. Показано, что причиной ухудшения электрофизических параметров МОП-транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (Fe, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

Табл. 2. Ил. 2. Билиогр. – 9 назв.

УДК 539.3

Швед О. Л. **Численное моделирование эффекта увеличения пластичности металла при растяжении под действием высокого гидростатического давления** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 18–23.

На основе модели нелинейно-упругопластического материала описывается явление прерывистости деформации из опыта Дж. Ф. Белла при мягком простом растяжении. Моделируются эффекты увеличения пластичности и залечивания поврежденностей материала при дополнительном равномерном всестороннем сжатии.

Ил. 2. Библиогр. – 7 назв.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 621.774.353

Томило В. А., Левкович В. В. **Напряженно-деформированное состояние при валковом обжиме участков толстостенных труб //** Весці НАН Беларуси. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 24–30.

Представлена схема поперечно-винтовой прокатки. На основе литературных данных описан характер нормальных напряжений, действующих в зоне контакта заготовка–валок. Показано, что радиальные, тангенциальные и осевые напряжения в случае прокатки труб на всей длине очага деформации являются сжимающими. Приведены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. Зоны максимальных сжимающих напряжений расположены непосредственно под валками, при движении в глубь заготовки величины напряжений уменьшаются и на внутренней поверхности трубной заготовки их значения близки нулю. По длине очага деформации область максимальных сжимающих напряжений располагается между серединой очага деформации и точкой пережима. Между валками на поверхности заготовки возникают растягивающие напряжения. Циклический характер напряжений позволяет влиять на свойства обрабатываемой заготовки. Показано изменение коэффициента осевой скорости по длине очага деформации. Характер полученных зависимостей отвечает теоретическим представлениям, что может служить критерием соответствия построенной модели реальным процессам.

Ил. 10. Библиогр. – 10 назв.

УДК 681.7.023.72

Филонов И. П., Лаптева Е. О., Козерук А. С., Филонова М. И. **Моделирование геометрических и кинематических связей технологического оборудования для двусторонней обработки линз //** Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 31–38.

Приведена кинематическая схема станка для одновременной двусторонней обработки линз и выполнено математическое описание его рабочей зоны. Разработана математическая модель геометрических и кинематических связей входного и выходного звеньев исполнительного механизма упомянутого станка. Получены аналитические выражения для переносной скорости верхнего и нижнего инструментов и предложена методика расчета законов их возвратно-вращательного движения.

Ил. 3. Библиогр. – 3 назв.

УДК 537.84:621.03

Баштовой В. Г., Моцар А. А., Рекс А. Г. **Упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром//** Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 39–43.

Экспериментально исследованы упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным источником магнитного поля в канале клиновидной формы применительно к виброзащитным магнитожидкостным устройствам. Показана возможность изменения силы упругости и положения такой капли путем электромагнитного воздействия. По данным измерений рассчитаны коэффициенты упругости изучаемой системы, произведена оценка диапазона регулирования силы упругости и перемещения такой капли.

Ил. 6. Библиогр. – 6 назв.

УДК 621.923

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Шабуня В. В. **Финишная обработка конических поверхностей плафонов светильников //** Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 44–49.

В результате теоретических исследований предложены вариант расчета градиента магнитной индукции при магнитно-абразивной обработке (МАО) конических поверхностей плафонов и способ его реализации путем изменения профиля (профилированием) поверхности полюсных наконечников.

По результатам проведенных экспериментальных исследований определены режимы МАО поверхности плафонов, при которых светоотражательная способность составляет 75–80%.

Ил. 2. Библиогр. – 5 назв.

УДК 539.538::621.039.542.84

Сорокин В. В. **Расчет износа частиц в плотном вращающемся слое внутри неподвижной вихревой камеры //** Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 50–55.

Проведен расчет износа частиц в плотном вращающемся слое внутри неподвижной вихревой камеры. Количественно износ удовлетворительно описывается на основе имеющихся инженерных методик. Наиболее подвержена износу боковая стенка камеры. С увеличением нагрузки, давления частиц и скорости вращения износ возрастает.

Национальная академия наук Беларуси

Показано, что интенсивность износа может быть снижена применением прочных материалов стенок и оболочек частиц (включая пластины для футеровки стенок или наплавки), использованием частиц, введенных в слой специально для подавления износа. Материал этих частиц отличается большей мягкостью и плотностью. Один-два слоя мягких частиц локализуются возле направляющего аппарата и изолируют от контакта с боковой стенкой слой исходных частиц, что ослабляет износ в данной паре трения.

Табл. 2. Ил. 5. Библиогр. – 8 назв.

УДК 66.047:3.085.1

Ольшанский А. И., Ольшанский В. И., Жерносек С. В. **Исследование радиационно-конвективной сушки технических тканей критериями подобия теплообмена** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 56–64.

Изложены результаты исследования радиационно-конвективной сушки тканей. Установлены зависимости критерия Больцмана для влажного тела от основных параметров кинетики сушки. Приведены эмпирические уравнения для расчета времени сушки, температуры материала и тепловых потоков в периоде падающей скорости. При обработке опытных данных использовались методы теории подобия теплообмена и теории регулярного теплового режима нагревания влажных тел.

Табл. 4. Ил. 8. Библиогр. – 6 назв.

УДК 620.92.502.1(476)

Белый О. А., Бернацкий А. Е., Крыжановский Н. К., Розанова Ф. А. **Возобновляемая энергетика – эффективное направление повышения энергетической и экологической безопасности Республики Беларусь** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 65–70.

Рассмотрена структура мирового производства электроэнергии. Приведена оценка состояния использования наиболее перспективных для Беларуси возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Дана оценка воздействия различных источников энергии и видов топлива на окружающую среду, оценка экономической эффективности использования ВИЭ с учетом экологических факторов. Представлен анализ причин, сдерживающих развитие ВИЭ в Беларуси, и меры для их устранения.

Табл. 1. Ил. 2. Библиогр. – 9 назв.

УДК 536.2:532/533;517.958:539.219.3

Гринчик Н. Н., Харма У. М., Щелак Т. Е. **К проблеме неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых средах** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 71–79.

Предложена математическая модель тепловлагопереноса в капиллярно-пористых средах, базирующаяся на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции влаги, термодинамических уравнениях Кельвина и Клапейрона – Клаузиуса. Разработан численный метод решения уравнений тепловлагопереноса, базирующийся на методе взвешенных невязок. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования тепломассопереноса в различных технологических процессах, в строительной, пищевой и химической промышленности, а также в агрофизике.

Ил. 6. Библиогр. – 10 назв.

УДК 533.73+57.037

Левин М. Л., Маханёк А. А. **Сравнение физико-математических моделей общей газовой криотерапии с сосредоточенными и распределенными параметрами** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 80–86.

Представлены результаты численного решения тепловой задачи общей газовой криотерапии (ОГКТ) с использованием моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами. Получены коэффициенты теплоотдачи от поверхности различных частей тела пациента, которые соответствуют заданным (измеренным термографическим методом) средним температурам этих поверхностей после завершения процедуры ОГКТ. Установлено, что модель с сосредоточенными параметрами дает сильно заниженные величины коэффициентов теплоотдачи в сравнении с эмпирическими справочными данными. Модель с распределенными параметрами обнаруживает лучшее соответствие вычисленных коэффициентов теплоотдачи справочным данным. Максимальное отличие составило менее 26%.

Табл. 4. Ил. 3. Библиогр. – 12 назв.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 677.017.56:536.495

Гусаров А. М., Кузнецов А. А., Дмитракович Н. М., Данилова-Третьяк С. М. **Исследование распределения температуры в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных при тепловом воздействии** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 87–92.

Разработан комбинированный метод расчета температурного поля в пакете материалов БОП при тепловом воздействии. Он базируется на основе сочетания элементов аналитического и численного решения. Достоверность разработанного метода подтверждена экспериментальными исследованиями. Проведенный комплекс исследований дает возможность проектирования оптимального состава пакета материала БОП, что приводит к существенному сокращению временных и материальных затрат при проведении нормативных испытаний.

Табл. 4. Ил. 3. Библиогр. – 12 назв.

УДК 612.117:57.08

Дрозд Е. С., Мохаммед Салем А. А., Спиридонова О. С., Кужель Н. С., Чижик С. А. **Исследование влияния температуры культивирования на морфологию, механические и адгезионные свойства раковых клеток легких человека линии А549** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 93–96.

Представлены результаты исследования методом атомно-силовой микроскопии влияния температуры культивирования на топографию поверхности и механические свойства раковых клеток легких человека линии А549. Показано, что понижение температуры культивирования не приводит к достоверным изменениям механических свойств данных клеток, однако увеличивает силу адгезии острия зонда к поверхности мембраны.

Ил. 4. Библиогр. – 9 назв.

УДК 576.6:612.017.1:576.3

Дрозд Е. С., Мохаммед Салем А. А., Чижик С. А., Спиридонова О. С., Кужель Н. С., Мычко М. Е. **Исследование методом атомно-силовой микроскопии влияния наночастиц на структурные и механические свойства клеток почки быка линии MDBK** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 97–101.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовано влияние наночастиц меди и серебра Cu+Ag, нитрита серебра $AgNO_3$ и оксида цинка ZnO на морфологию и механические свойства иммунокомпетентных клеток почки быка линии MDBK. Представлены результаты расчетов локального модуля упругости, силы поверхностной адгезии клеток, работы адгезии, а также анализа трехмерных изображений клеток в контроле и после инкубации с наночастицами биоэлементов в течение 20 мин.

Табл. 1. Ил. 5. Библиогр. – 5 назв.

УДК 537.311.33

Одринский А. П., Казючиц Н. М., Макаренко Л. Ф. **PICTS-спектроскопия синтетического HPHT-алмаза в области температур 300–550 К** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 102–107.

Методом фотоэлектрической релаксационной спектроскопии исследованы электрически активные дефекты в синтетическом монокристалле HPHT-алмаза. Обнаружен сложный характер кинетики спада фототока в области 400–550 К. Детальный анализ релаксации фототока проведен на основе приближения суммой двух экспоненциальных компонент. Показано, что их вклады невозможно интерпретировать как результат термоэмиссии носителей заряда с двух независимых локальных уровней. Предполагается, что обнаруженные дефекты определяют долговременные процессы стабилизации тока фотоионизации детекторов на основе HPHT-алмаза.

Ил. 4. Библиогр. – 28 назв.

УДК 621.384.6.01+621.385.69+004.942

Тихомиров В. В., Сягло С. Э. **Моделирование аксиального виркатора** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 4. С. 108–115.

Описан и протестирован алгоритм моделирования методом частица–сетка, позволяющий вести практическую разработку аксиальных виркаторов – импульсных источников мощного СВЧ-излучения. Выбранные и опробированные в комплексе методы коррекции численного решения уравнений Максвелла и Пуассона позволяют устойчиво моделировать быструю нелинейную многопотоковую динамику возникновения и эволюции виртуального катода и порождаемых им полей. При этом использование различных численных значений для параметров, входящих в процедуры, корректирующие решение, открывает широкие возможности

Национальная академия наук Беларуси

тонкой настройки численного решения по доступным экспериментальным данным. В качестве указанных параметров для корректирующих процедур могут использоваться число итераций уравнения Пуассона при применении метода Бо́риса, обеспечивающего выполнение закона сохранения заряда, а также число и параметры итерационной процедуры подавления высокочастотных поперечных шумов методом Годфри.

Ил. 3. Библиогр. – 15 назв.

УДК 628.474.76

Бубнов В. П. **Эколого-экономические показатели систем очистки газовых выбросов от сернистого ангидрида** // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. наук. 2014. № 4. С. 116–123.

Рассмотрены эколого-экономические показатели различных способов очистки газовых выбросов, содержащих сернистый ангидрит (SO_2). Показано, что наименьшие затраты на очистку 1000 м^3 имеют известковый и известняковый, а также электронно-лучевой методы. Однако электронно-лучевой метод позволяет одновременно производить очистку дымовых газов сразу от SO_2 и NO_x.

Табл. 1. Ил. 4. Библиогр. – 7 назв.

Национальная академия наук Беларуси