

ISSN 1694-6634

www.iopjournal.org

э.л. почта: info@iopjournal.org

научный журнал

ФИЗИКА

илимий журналы



2025, №2

Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева
Национальной академии наук Кыргызской Республики

ISSN 1694-6634

www.iopjournal.org

эл. почта: info@iopjournal.org

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ФИЗИКА

ИЛИМИЙ ЖУРНАЛЫ

2025, №2

Кыргызстан, г. Бишкек

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ФИЗИКА

Учредитель:

Институт физики им. академика
Ж.Жеенбаева Национальной
академии наук Кыргызской
Республики

Журнал зарегистрирован в
Министерстве юстиции Кыргызской
Республики.

Свидетельство о регистрации №1418
от 13 июня 2008г.

ISSN 1694-6634

Редакционная коллегия:

Главный редактор, д. ф.-м. н.,
член-корр. НАН КР

Зам. главного редактора, д. ф.-м.
н., профессор

Ответственный секретарь,
к. ф.-м. н., с. н. с.

Жеенбаев Нурбек Жаныбекович

Касмамытов Нурбек Кыдырмышевич

Ласанху Керим Арсаевич

Члены редколлегии:

А. А. Кутанов

Т. С. Рамазанов

М. М. Кидибаев

Э. М. Мамбетакунов

Б. В. Шульгин

Т. Н. Нурахметов

С. Джуманов

М. Имаев

А. А. Назаров

В. Н. Фоломеев

Р. М. Султаналиева

Н. К. Джаманкызов

Г. Дж. Кабаева

А. Т. Татыбеков

В. Ю. Иванов

К. Х. Хайдаров

К. Шаршеев

У. К. Мамытбеков

Г. Ж. Доржуева

Дж. А. Исмаилов

Б. Б. Саякбаева

Б. К. Рахадиллов

С. Г. Джабаров

Академик НАН КР (Кыргызстан)

Академик НАН РК (Казахстан)

Академик НАН КР (Кыргызстан)

Член-корр. НАН КР (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Казахстан)

д. ф.-м. н., профессор (Узбекистан)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

член-корр. НАН КР (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

д. т. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Россия)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

д. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. т. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (техн. секр-рь) (Кыргызстан)

PhD, профессор (Казахстан)

д. ф.-м. н. (Азербайджан)

Адрес редакции:

720071, Кыргызская Республика,
г. Бишкек, проспект Чуй, 265-а

Тел.: +(312) 64-62-90

Факс: +(312) 43-11-69, 43-11-71

E-mail: MegaCom17@mail.ru

Уважаемые коллеги! Дорогие друзья!

Администрация Института физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук сердечно поздравляет сотрудников лаборатории «Порошковые материалы» с 40-летним юбилеем со дня её образования в нашем Институте.

Сорокалетие лаборатории — это и достойная история, и славное настоящее, и твердая уверенность в завтрашнем дне. Эта юбилейная дата не так уж мало и не так уж и много, но однозначно можно сказать, что это зрелый возраст, которому присущи творческий поиск, успех созидания, осмысленность дальнейшего развития.

Администрация института по праву гордится яркими страницами биографии руководителей лаборатории именами тех, кто стоял у истоков его создания, а именно основателем лаборатории д.т.н., профессора, чл.-корр. АН Кирг.ССР Ростислава Александровича Андриевского, а также его последователями возглавлявшими лабораторию после него д.ф.-м.н., профессора Владимира Петровича Макарова и ныне действующего заведующего лаборатории д.ф.-м.н., профессора Нурбека Кыдырмышевича Касмамытова, которые обеспечивали востребованность научных разработок и исследований лаборатории, а также приумножали имеющийся научный авторитет сегодня. За годы своего функционирования замечательный коллектив лаборатории порошковых материалов внес неоспоримый вклад в развитие как фундаментальной, так и экспериментальной науки, а также практического применения в области нитридокремниевой керамики, а также в области технологии реакционного спекания кремния в среде азота, закономерностей формирования структуры в процессе синтеза и физико-химических свойств нитридокремниевых и карбонитридных материалов. Помимо этого, достигнуты большие научные результаты и при разработке высоковольтной фарфоровой керамики на основе местного сырья месторождений Кыргызской Республики.

Вам многое удалось сделать: завоевать авторитет, признание в России и за рубежом; создать уникальную научную школу; воспитать не одно поколение ученых в области физики твердого тела и материаловедения, а также подготовить высокопрофессиональных специалистов, которые сегодня успешно работают в лаборатории. Благодаря целеустремленности, огромной созидательной энергии, высокому профессионализму, умению бережно хранить заложенные традиции, коллектив лаборатории неизменно добивался успехов в осуществлении самых смелых, а подчас дерзких, планов, замыслов и идей.

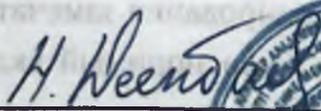
Сегодня прекрасный повод выразить слова искренней благодарности и признательности всем научным сотрудникам и инженерам лаборатории порошковых материалов за целеустремленность и творчество, самоотдачу и преданность профессии.

Дирекция желает научному коллективу лаборатории приумножения достигнутых результатов, авангардных позиций в науке, максимальной реализации научно-исследовательского и технического потенциала, успешных инновационных решений и процветания, вдохновения в решении непростых задач и преодолении современных вызовов.

Желаем вам крепкого здоровья, благополучия и сил для новых свершений. Пусть ваша работа приносит только радость, а совместные усилия ведут к ещё большим победам и достижениям. Желаем вам финансового благополучия, надёжных партнёров и новых, интересных проектов.

Пусть удача и успех сопутствуют Вам всегда! С праздником, дорогие коллеги!

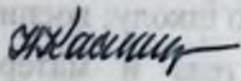
Директор ИФ НАН К чл.-корр. НАН КР

 Н.Н. Жеембаев

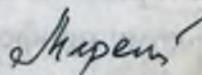
от « » 2025 г.



Зам. директора по научной работе
д.ф.-м.н., профессор

 Н.К.Касамытов

Ученый секретарь, к.ф.-м.н.



Л.К.Меренкова

061.6:53(091)

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЛАБОРАТОРИИ ФИЗИКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН КР

Касмамытов Н.К.

Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй 265-А, E-mail: nurkas@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена 40-летию образования лаборатории физики порошковых материалов, открывшейся в июне 1985 года в Институте физики Академии наук Киргизской ССР. В работе описаны периоды становления и развития лаборатории физики порошковых материалов от начала её образования до настоящего времени. Раскрыты основные направления исследований и научно-прикладные достижения лаборатории, и указаны руководители научной лабораторией в различные годы.

Ключевые слова: *Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева, Национальная академия наук Кыргызской Республики, лаборатория, физика порошковых материалов, основные направления исследований, состав и руководство лабораторией, научные направления и достижения лаборатории.*

HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF THE LABORATORY FOR PHYSICS OF POWDER MATERIALS OF THE INSTITUTE OF PHYSICS NAS KR

Kasmamytov N.K.

Academician J. Jeenbaev, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, Chui Ave 265-A, E-mail: nurkas@mail.ru

Abstract. The article is dedicated to the 40th anniversary of the formation of the laboratory of physics of powder materials, which opened in June 1985 at the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Kirghiz SSR. The work describes the periods of formation and development of the laboratory of physics of powder materials from the beginning of its formation to the present. The main directions of research and scientific and applied achievements of the laboratory are revealed, and the heads of the scientific laboratory in various years are indicated.

Keywords: *Institute of Physics named after Academician J. Jeenbaev, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, laboratory, physics of powder materials, main areas of research, composition and management of the laboratory, scientific directions and achievements of the laboratory.*

Начиная с июня 1985 года в Кыргызской Советской Социалистической Республике на базе Института физики Академии наук Киргизской ССР была открыта и сформирована лаборатория под названием «Физика порошковых материалов» (ФПМ). В этом году лаборатории «Физика порошковых материалов» исполнилось 40- лет со дня её организации и настоящая статья посвящена этой знаменательной дате. Первым заведующим научной лаборатории ФПМ являлся член-корреспондент АН Киргизской ССР, доктор технических наук, профессор, являвшимся одновременно заместителем директора по научной работе ИФ АН Кирг.ССР - Ростислав Александрович

Андриевский 1933 года рождения. В 1955 г. Он окончил Киевский политехнический институт, а в 1958 году окончил аспирантуру Института металлокерамики и специальных сплавов АН Украинской ССР. До приезда в г. Фрунзе (ныне г. Бишкек) Ростислав работал научным сотрудником Института металлокерамики АН УССР, начальником лаборатории, начальником отдела в Подольском научно-исследовательском институте. В 1985 году приехал в Кыргызстан. Как крупный специалист в области порошковой металлургии, член-корреспондент АН Кирг.ССР Р.А.Андриевский возглавлял научное направление по порошковой металлургии и материаловедению в ИФ АН Кирг. ССР. Фактически он был приглашен в 1985 году в АН Кирг.ССР в качестве заместителя директора по научной работе с целью развития в Кыргызстане технологии порошковой металлургии и порошкового материаловедения.

Важно понимать, что Р.А.Андриевский, как основоположник лаборатории «Физики порошковых материалов (ФПМ)», уже к тому времени являлся крупным ученым, внесшим большой вклад в развитие науки в области физики и технологии получения порошковых материалов и являлся не только видным российским ученым, но и известным ученым в зарубежных научных кругах в области порошкового материаловедения. В Институте физики АН Кирг.ССР он проработал с 1984 по 1990 год. В связи с возвращением в г. Москву в последние годы своей жизни Р.А.Андриевский проработал главным научным сотрудником Отдела функциональных неорганических материалов Института проблем химической физики Российской академии наук, где его научное творчество было связано с новой областью естествознания – наноструктурным материаловедением. Ростислав Александрович - ученый – материаловед с мировым именем, член Американского общества исследования НАНО материалов (Nano Society и MRS), академик Международного Института науки о материалах(Сербия). Он являлся членом Нанотехнологического общества России.

Под его руководством защищено 6 докторских и 33 кандидатских диссертаций. Опубликовано 475 научных работ, включая 13 монографий и 76 обзоров. Согласно открытым данным по его опубликованным работам на платформе SCOPUS, индекс цитирования статей Р.А. Андриевского составляет 1200, а индекс Хирша - 19. Работая в Институте физики АН КР он уделял большое внимание подготовке местных молодых научных кадров, являясь научным руководителем 5 аспирантов и 3 соискателей и за 5 лет работы в ИФ АН Кирг. ССР выпустил 3-х кандидатов наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. 19 октября 2016 года Р.А.Андриевский ушел из жизни, светлая ему память.

За короткий период, профессор Андриевский Ростислав Александрович проработав около 5 лет в качестве заведующего лаборатории ФПМ определил четыре основных направления НИР в области порошкового материаловедения, в частности, по следующей тематике:

1) Разработка активированного спекания металлических и высоколегированных порошков быстрорежущей стали (БС) классическим

методом прессования и спекания [1-7]. Коротко отметим, что цель этого научно-исследовательского задания заключалась в получении образцов БС из распыленных порошков БС, а также из шламовых отходов БС, образующихся на Бишкекском заводе Сверл в процессе их производства, и выявлении закономерностей структурообразования и формирования физико-механических свойств БС, полученных при различных температурах спекания с помощью классических методов порошковой металлургии [4,7]. Ответственным исполнителем за данное исследование являлся м.н.с Касмамытов Н.К.

2) Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) $Ti-B_2-Fe$. В работе исследовались высокотемпературные прочностные характеристики образцов $Ti-B_2-Fe$, полученных методом СВС [12,13]. Экспериментально были выявлены закономерности возрастания механической прочности образцов $Ti-B_2-Fe$ на сжатие при высоких температурах воздействия до $T=1200^\circ C$ [12-14]. Ответственным исполнителем по данной тематике являлся к.т.н., с.н.с Пак А., исполнитель м.н.с Байман И.Ф.).

3) Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного напыления упрочняющей пленки из нитрида кремния на режущую поверхность сверл быстрорежущей стали Р6М5 и Р12МФ5. (ответственные исполнители: начальник инженерного центра «Износостойкие покрытия» ПО Кыргызавтомаш. - Капшенинов В.П., и сотрудник лаборатории Института физики – м.н.с Белоконь И.А.,)

4) Технология, структура и свойства реакционно-спеченного нитрида кремния - Si_3N_4 [11], (Ответственный исполнитель – к.ф.-м.н., с.н.с Макаров В.П., и исполнитель - инженер лаборатории Асанов Б.У.).

Таким образом, под научным руководством члена-корреспондента АН Кирг.ССР Р.А.Андриевского в Республике Кыргызстан были начаты НИР по изучению закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств различных порошковых материалов, включая материалы на основе тугоплавких соединений Si_3N_4 и $Ti-B_2-Fe$, работающие в условиях высокотемпературных и механо-динамических воздействиях. Исследования выполненные СНС Макаровым В.П., МНС Касмамытовым Н.К., инженером Асановым Б.У. и другими сотрудниками привели к разработкам различных керамокомпозиционных материалов – нитридкремниевой керамики, которая обладает комплексом эффективных свойств: высокой температурой плавления, низким удельным весом, повышенной прочностью, инертностью ко многим агрессивным средам, низким коэффициентом термического расширения, высокой теплопроводностью. Эти уникальные свойства керамокомпозиционного материала на основе нитрида кремния были подтверждены при опытно-промышленных испытаниях изделий в технологических процессах ГАО КХМЗ «Астра» (пгт. Орловка), что позволяло использовать их при многократных термоциклических нагрузках.

Важно отметить что создание технической керамики на основе нитрида кремния получило многоцелевое значение для нужд промышленных

предприятий республики, в том числе золотоперерабатывающей, стекольной, полупроводниковой промышленности и др.

Инженерные центры были открыты и успешно функционировали на промышленных предприятиях г. Фрунзе:

- на базе промышленного объединения «Ала-тоо» - Инженерный центр «Порошковая металлургия».
- на заводе «Кыргызавтомаш» - Инженерный центр «Износостойкие покрытия».
- на предприятии Госагропрома Киргизской ССР – Инженерный центр «Восстановление и упрочнение деталей сельхозтехники».
- на предприятии Минпромстрой материалов Киргизской ССР – Инженерный центр «Камнеобрабатывающий инструмент» г. Токмак.

На рис. 1а. приведена крупным планом фотография заведующего лабораторией «Физики порошковых материалов (ФПМ)» ИФ АН Кирг.ССР члена корреспондента АН Кирг.ССР, д.т.н., профессора Ростислава Александровича Андриевского, работавшего одновременно с 1985 по 1990 гг. зам. директором по научной работе Института физики АН КР.

На рис. 1б. представлена фотография научного руководителя лаборатории физики порошковых материалов чл.-корр. АН Кирг.ССР. Р.А.Андриевского (в центре фотографии) вместе со своими аспирантами Н.К.Касмамытовым (справа) и И.А. Белоконь (слева) в лаборатории, где проводятся механические воздействия на металлические образцы путем их растяжения в вакууме при различных температурах нагрева образца с помощью установки ИМАШ «Ала-Тоо», которая позволяет исследовать эволюцию изменения микроструктуры опытных образцов при высоких температурах с помощью металлографического микроскопа.

В лаборатории ФПМ, по первому направлению НИР были разработаны спеченные порошковые материалы на основе высоколегированных быстрорежущих сталей, полученные методом классического прессования и вакуумного спекания. Под руководством Р.А. Андриевского аспирант, м.н.с Н.К.Касмамытов разработал технологию получения резцов быстрорежущей стали на основе распыленных сферических порошков быстрорежущей стали (БС), а также из микро-стружечных и шламовых отходов БС, образующихся в процессе производства сверл, метчиков и других инструментов на Бишкекском заводе Сверл. В процессе серийного производства по получению сверл БС образовывалось большое количество микростружечных и шламовых отходов БС (до 40% от исходного пруткового материала БС). Объемы отходов БС, содержащие такие элементы как вольфрам, ванадий, молибден, хром и другие выбрасывались в отвал в виде скрапа, микростружки и шламовых отходов со смазочно-охлаждающей жидкостью сотнями и тысячами тонн в месяц. Для решения этой проблемы Правительством Кыргызстана была разработана Программа «Порошковая металлургия и ресурсосберегающие технологии», в котором перед Академией наук Кыргызской Республики и промышленными предприятиями КР была поставлена задача по утилизации дорогостоящих отходов БС методами порошковой металлургии.



а)

б)

Рис. 1а,б. Фотографии: а) заведующий лаборатории Физики порошковых материалов, член-корреспондент Академии наук Кыргызской Республики, д.т.н., профессор Андриевский Ростислав Александрович; б) Сотрудники этой же лаборатории: (по середине фотографии - заведующий лабораторией Андриевский Р.А., справа от него - м.н.с., аспирант заочной формы обучения Н.К.Касмамытов, слева - аспирант И.А.Белоконь.

Важно отметить, что уже в 1988 году параллельно в Кыргызской Республике в сети крупных промышленных предприятий: Фрунзенском заводе сверл; Станкостроительном заводе им. В.И.Ленина; АО «Сетунь-Ала-тоо» и заводе «Кыргызавтомаш» были открыты первые участки порошковой металлургии в форме инженерных центров на этих предприятиях, где серийно начали изготавливать твердосплавные, бронзовые, стальные порошковые изделия различного назначения, а также были освоены и оптимизированы технологии нанесения упрочняющих покрытий из нитрида кремния методом ионно-плазменного распыления на поверхность классических режущих инструментов БС (сверла, метчики и др.).

Правительством Кыргызской Республики была инициирована Государственная республиканская научно-техническая программа - «Порошковая металлургия и ресурсосберегающие технологии» на период 1985-1990 гг. В рамках этой программы в лаборатории «Физика порошковых материалов» проводились исследования по ряду заданий НИР настоящей программы. Коротко отметим, что сотрудники лаборатории под руководством заведующего лаборатории «Физика порошковых материалов» чл.-корр. АН Кирг.ССР Андриевского Р.А. проводили исследования согласно научным заданиям Республиканской программы по всем четырем научным направлениям. Тематика научных исследований лаборатории тесно была связана с действующей Целевой республиканской программой, где на основе анализа исследований разрабатывались технологии по утилизации отходов производства. Одним из крупномасштабных заданий в данной Программе явилось направление по утилизации микрошламовых отходов быстрорежущей стали с абразивом и смазочно-охлаждающей жидкостью, образующаяся при

производстве быстрорежущих сверл. Требовалось разработать ресурсосберегающую, экологически чистую, безотходную технологию по получению спеченных порошковых материалов из промышленных шламовых отходов БС и провести комплексное изучение закономерностей, механизмов и особенностей спекания, формирования структуры и физико-механических свойств после их активированного спекания с последующим выявлением их возможного использования и внедрения разработанной технологии в промышленный сектор экономики Кыргызской Республики.

В лаборатории физики порошковых материалов Института физики по реализации задания по первой тематике НИР непосредственно в качестве исполнителя являлся м.н.с. лаборатории Н.К. Касмамытов. Им была разработана технология отчистки микрошламовых отходов БС и на их основе получены порошковые резцы БС. Исследования показали, что разработанные порошковые резцы быстрорежущей стали, полученные методом классической порошковой металлургии на основе переработанных шламовых отходов быстрорежущей стали Фрунзенского завода Сверл имеют повышенную износостойкость, причём износостойкость оказалось в 1,8 раз выше, чем у традиционных литых резцов быстрорежущей стали, изготовленных классическим способом из литых брусков быстрорежущей стали [9,11,15-19]. Повышенная износостойкость у опытных резцов (порошковых) БС была обусловлена формированием более качественной микроструктуры - отсутствием карбидной ликвации вдоль границ зерен в микроструктуре порошковой БС и в целом карбидная фаза равномерно распределялась по объёму зерна. На ряду с этим, на других действующих Инженерных центрах «Порошковой металлургии» Станкостроительного завода им. В.И.Ленина и АО «Сетунь-Ала-тоо» были освоены производственные технологии по серийному выпуску бронзовых втулок и твердосплавных изделий, состоящих из карбида вольфрама с кобальтовой связкой WC-Co (8%), изготовленных методами прессования и спекания.

Помимо этого, на базе Инженерного центра при заводе АО «Сетунь-Ала-тоо» в г. Фрунзе, непосредственно при участии сотрудников лаборатории (снс Пак А.Е. и Баймана И.Ф. были начаты полупромышленные исследования по апробированию СВС технологий (горячего прессования порошков металлов и микростружечных отходов с использованием СВС компактирования), а также по получению брикетов из очищенных порошковых отходов быстрорежущей стали методами СВС компактирования.

На территории инструментального цеха завода «Кыргызавтомаш» начал функционировать Инженерный центр по ионно-плазменному напылению износостойких нитридокремниевых покрытий на инструментальные изделия быстрорежущей стали. Сотрудником Инженерного центра Капшениновым В.В. совместно с аспирантом Института физики И.А. Белоконь были проведены исследования по оптимизации режимов ионно-плазменного напыления нитрида титана и нитридокремниевых покрытий на различные режущие инструменты на режущую кромку быстрорежущей стали.

На рис.2а,б. представлены фотографии режущих инструментов (свёрл), покрытых нитридтитановым покрытием (а) методом ионно-плазменного напыления и сверла без покрытия (б).

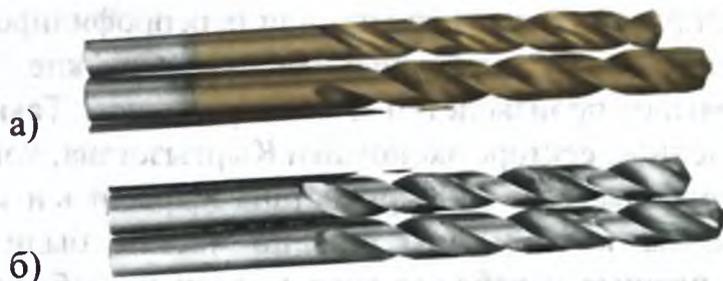


Рис. 2а,б. Сверла по металлу марки БС Р6М5: а) покрытие нитридом титана; б) без покрытия.

Согласно Республиканской программы в Чуйской области в пгт. Ак-тюз Кыргызской Республики на территории ОАО Кыргызского химико-металлургического комбината активно велись работы по разработке технологии получения и производства железного Ак-Тюзского порошка.

Сотрудниками и аспирантами лаборатории «Физики порошковых материалов», а именно: В.П.Макаровым, Н.К.Касмамытовым, В.П.Пинекером, Б.А.Асановым и И.А.Белоконь были проведены комплексные исследования структуры и физико-технологических свойств Ак-Тюзских железных порошков. По результатам комплексных исследований, в частности: методами растровой электронной микроскопии, микрорентгеноструктурного анализа микроструктуры железных порошков, рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа и других методов был дан глубокий научный анализ Ак-тюзским железным порошкам. В результате исследований был выявлен: химический состав, пикнометрическая плотность, наличие в порошках различных примесей и включений в объёме частиц порошков, определена морфология (форма и средние фракционные размеры) частиц порошка, изучены физико-химические и технологические свойства (текучести, насыпной плотности, прессуемости и формуемости). Также были изучены особенности процесса спекаемости и уплотняемости Ак-тюзских железных порошков как при их свободной засыпке, так и при их прессовании с различными степенями давления. Установлены особенности спекаемости и уплотняемости спресованных цилиндрических брикетов из Ак-тюзских железных порошков после их вакуумного спекания при различных температурах и выдержках, которые прошли сравнительный анализ с железным порошком, выпускаемым в ведущей Европейской компании «Хёганез». (Все эти результаты позволили дать исчерпывающие рекомендации по Ак-тюзским железным порошкам и сделать заключение о их возможных областях применения. Подробно об этом изложено в научных отчетах лаборатории физики порошковых материалов АН Кирг. ССР. за 1985-1988 гг.

Промышленная отрасль Кыргызстана переживала трудные времена после распада СССР, что привело к кризису промышленного производства

Кыргызстана, фактически в «одночасье» она претерпела значительный кризис и упадок. Практически все крупные заводы, имеющие Всесоюзное значение, столкнулись с большими проблемами, связанными с переходом к рыночной экономике. Вследствие распада СССР по известным причинам, многие промышленные предприятия были закрыты или репрофилированы, а объемы производства существенно сократились и в короткие сроки заводы окончательно прекратили производство и обанкротились. Такая сложившаяся ситуация в промышленном секторе экономики Кыргызстана, когда практически все крупные промышленные заводы Кыргызстана закрылись и за короткий срок обанкротились, привела к тому, что они по частям были распроданы и разворованы, а инженерные и рабочие кадры стали безработными и массово уезжали за рубеж.

В качестве наглядного примера на рис.3а,б представлены фотографии состояния общего вида инструментального цеха Станкостроительного завода В.И. Ленина до распада СССР (а) и после распада СССР(б). Из фотографий видно без комментариев - полная разруха данного завода после распада СССР. Следует отметить, что вышеописанная ситуация на Станкостроительном заводе им. В.И. Ленина аналогично имела место и на всех других крупных промышленных заводах Кыргызстана.



а)



б)

Рис.3а,б. Инструментальный цех Станкостроительного завода им. В.И.Ленина, г. Фрунзе: а) Фото процветающего завода до распада СССР;
б) Фото - состояние завода после распада СССР.

Несмотря на сложившуюся ситуацию научная лаборатория «Физика порошковых материалов» Института физики АН Кыргызстана, продолжала заниматься научными проблемами формирования структуры и свойств порошковых материалов, а также технологиями их получения, и фактически продолжает работать по сей день.

В эти трудные времена, процесс развала промышленной отрасли экономики нашей республики кризисно отразился на академической науке нашей республики в целом и особенно на ученых физико-технического направления, работающих в Институтах физико-технического направления НАН КР, в частности в Институте физики пошел отток научных кадров в

другие сферы экономики, обусловленный рядом причин: закрытием некоторых лабораторий из-за отсутствия финансирования и временного объединения отдельных лабораторий из-за снижения бюджетного финансирования, очень низкой заработной платой и другими факторами. Важно отметить, что в других институтах физико-технического направления АН КР отток научных кадров был еще сильнее и ощутимее. Выше отмеченные факторы в последующие годы в итоге привели к тому, что руководство НАН КР объединил три Института (Институт машиноведения, Институт автоматики, Институт геомеханики и освоения недр), в один Институт под названием Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР.

Если в Институте физики АН Кирг. ССР до развала СССР работало более 350 человек, то на сегодняшнее время в Институте работают 102 человека. Остались только истинные патриоты и верные науке люди. В такой сложной ситуации лаборатория порошковых материалов ставила перед собой одну задачу выжить, самосохраниться и продолжить намеченные фундаментальные и прикладные исследования в области порошковых материалов и керамического материаловедения. Несмотря на сокращение бюджетного финансирования Института физики и Академии наук нашей Республики в целом, лаборатория порошковых материалов продолжала функционировать, причем из четырех действующих направлений НИР лаборатории сохранилось только одно направление, а именно: исследования по изучению закономерностей протекания реакционного синтеза нитридокремниевого материала, её структурообразование и свойства. Сохранение керамического направления исследований еще было связано с тем, что «худо ли бедно», но все же с перебоями, застоями и остановками производства продолжал функционировать в Чуйской области в пгт. Орловка Кыргызский химико-металлургический завод (КХМЗ) «Астра» по выпуску полупроводниковых кремниевых пластин для гелиоэнергетики. На данном заводе в процессе производства полупроводниковых пластин кремния для гелиоэнергетики, образовывались большеобъемные отходы дорогостоящего монокристаллического кремния полупроводниковой чистоты со смазочно-охлаждающей жидкостью и абразивом, которые надо было вернуть в производство, разработав технологию отчистки шламовых отходов полупроводникового кремния.

Под руководством д.т.н., профессора В.П.Макарова (Он являлся заведующим лаборатории порошковых материалов в период с 1995 по 2004 гг., причем лаборатория ПМ в эти годы была переименована в лабораторию «Материаловедения», см. рис.4 на фото слева) и к.ф.-м.н., с.н.с. Н.К.Касмамытовым (на. рис.4 на фото справа.) была разработана технология очистки шламов полупроводникового кремния и на их основе методом реакционного спекания были синтезированы нитридокремниевые материалы с уникальными свойствами для нужд самого КХМЗ «Астра» (см. рис.5а-г), а также для других действующих промышленных предприятий и перерабатывающей отрасли: Майли-Сайского лампового завода, Кара-Балтинского аффинажного завода золота и др.



Рис.4. На фотографии за просвечивающим электронным микроскопом: слева д.ф.-м.н., и д.т.н., профессор В.П. Макаров, заведующий лабораторией «ПМ» в период с 1995 по 2004 гг; справа д.ф.-м.н., профессор Н.К.Касмамытов заведующий лабораторией «ПМ» с 2005 года по настоящее время Института физики имени академика Ж.Жеенбаева НАН КР, заместитель директора по научной работе с 2017 г. по настоящее время.

На рис.5а-г приведены реакционно-спеченные нитридокремниевые изделия, синтезированные из монокристаллического кремния в среде азота и полученные в лаборатории порошковых материалов для различных промышленных предприятий Республики и ближнего зарубежья.

Для разработки технологии по очистке полупроводникового кремния и их использования для получения порошковых изделий между КХМЗ «Астра» и Институтом физики НАН КР (лабораторией порошковых материалов) был заключен научно-технический договор.

Начиная с 2005 года согласно этого заключенного договора, под научным руководством заведующего лабораторией порошковых материалов к.ф.-м.н. Касмамытова Н.К. были начаты исследования по решению вышеотмеченной проблемы, стоящие перед КХМЗ «Астра». За короткий отрезок времени с 1995 по 2015 годы по результатам исследовательской работы сотрудниками лаборатории ПМ в процессе решения этой научно-технической проблемы были успешно защищены две докторские диссертации Макаровым В.П. по теме: «Реакционно-спеченный нитрид кремния» (в 2002 г) [27] и Н.К.Касмамытовым Н.К. по теме: «Получение, структурообразование и свойства нано- и ультраструктурированных керамо-композиционных материалов» (в 2011 г.) [28].

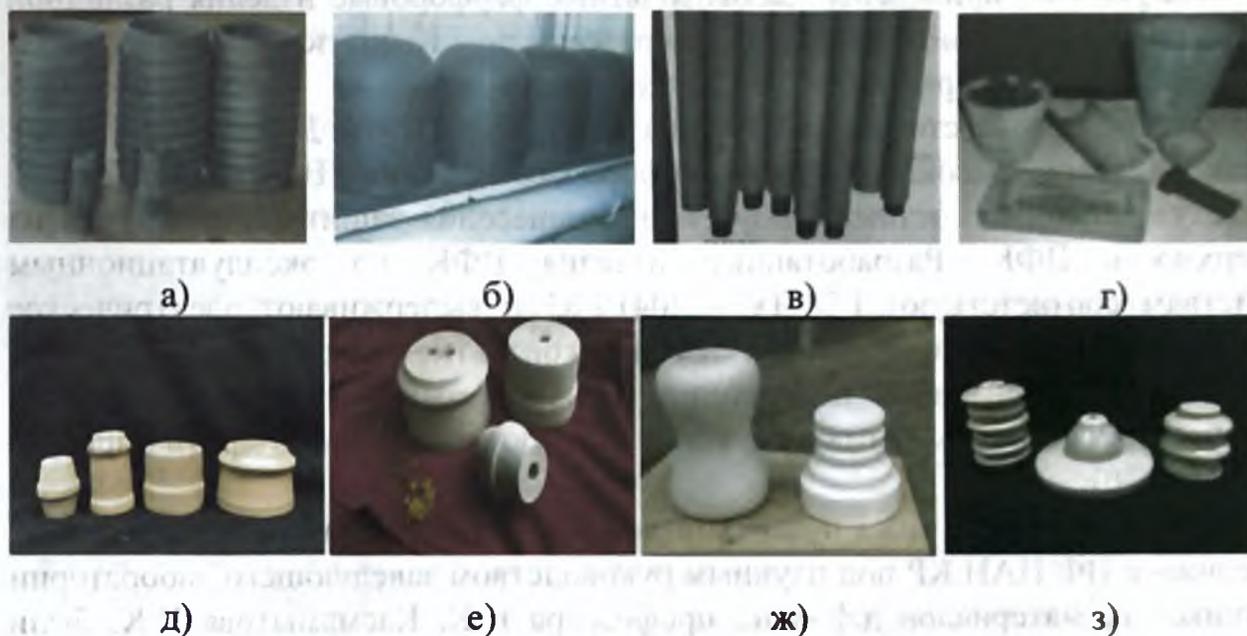


Рис. 5 а-ж. Керамические материалы и изделия разработанные и полученные в лаборатории порошковых материалов ИФ НАН КР:

а-г) Реакционно-спеченные нитридокремниевые изделия, изготовленные для нужд промышленных предприятий: стаканы и сопла, тигли для выращивания монокремния, чехлы для термопар, болты для крепления защитной футеровки печей и другие изделия;

д-з) Высоковольтные фарфоровые изделия различной конфигурации на основе сырья месторождений Кыргызской Республики, применяемые в энергосистеме «Северэлектро» Кыргызской Республике.

В дальнейшем начиная с 2015 года по настоящее время в лаборатории порошковых материалов под руководством заведующего лабораторией д.ф.-м.н., профессора Н.К.Касмамытова по линии бюджетного проекта проводятся НИР, посвященные разработке высоковольтных фарфоровых керамик на основе местного сырья месторождений Кыргызской Республики. Это направление НИР было обусловлено современными вызовами в интенсивном развитии энергетической отрасли Кыргызской Республики, высокая потребность в высоковольтной фарфоровой керамике (ВФК), которые на 100% завозятся из-за рубежа, необходимости решения импортозамещения привозных электротехнических фарфоровых изделий. В связи с этим разработка собственных ВФК на базе местного сырья являлось важным и актуальной задачей как с научной, так и с практической стороны для нашей развивающейся экономики республики. В лаборатории порошковых материалов были разработаны различные керамические массы ВФК на основе местного сырья с требуемыми эксплуатационными свойствами [29-34]. Разработаны к ним глазури, а также технологии получения ВФК (мокрого помола, сушки, формования, нанесения глазури и окончательного обжига), зарегистрированные в Кыргызпатенте [23-26]. Разработаны и освоены технологии получения различной конфигурации полупромышленных изделий ВФК, применяемые в энергосекторе Кыргызской Республики (см. рис. 5д-з).

На рис.5д-з приведены высоковольтные фарфоровые изделия различной конфигурации, применяемые в энергосекторе Кыргызской Республики. Высоковольтные фарфоровые изделия разработаны на основе местного природного сырья месторождений Кыргызской Республики. Для разработанных новых составов высоковольтных фарфоровых керамик (ВФК) разработаны новые улучшенные составы глазури для нанесения защитных покрытий на поверхность ВФК. Разработанные изделия ВФК по эксплуатационным свойствам соответствуют ГОСТу – 20419-83 и выдерживают электрическое напряжение на пробой 70-75 кВ. По высоковольтной фарфоровой керамике получен ряд патентов на изобретение, в частности на способ, технологию получения, состав шихты глазури, керамическую массу ВФК и др. [на пример, см. 19, 20-26].

В последующие годы в научной деятельности лаборатории порошковых материалов ИФ НАН КР под научным руководством заведующего лаборатории порошковых материалов д.ф.-м.н., профессора Н.К. Касмамытова Н.К. были защищены его учениками три кандидатские диссертации – м.н.с, аспирантом лаборатории Ласанху К.А. по теме: «Физико-химические свойства керамокомпозиционных материалов на основе шламовых отходов кремния» (2021 г); аспирантом Сатаевым Л.О. по теме: «Модельные исследования реакционного спекания нитрида кремния» (2022 г.) по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и аспирантом лаборатории Календеровым А.Ж. по теме: «Глазурованная электротехническая фарфоровая керамика на основе сырья месторождений Кыргызской Республики (2023 г.) по специальности 05.17.06 – технология и переработка композитов и полимеров.

Таким образом, в последние годы начиная с 2015 по настоящее время лаборатория порошковых материалов (основателем которой являлся член-корреспондент АН КР Андриевский Р.А.) успешно продолжает работать. Сформировалась высококвалифицированная научная школа по порошковому материаловедению керамики под руководством заведующего лабораторией д.ф.-м.н., профессора Касмамытова Нурбека Кыдырмышевича (см. рис.4.б), заместителя директора по научной работе Института физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики. В настоящее время профессор Н.К.Касмамытов большое внимание уделяет подготовке научных кадров в области порошкового материаловедения являясь научным руководителем 2-х докторантов и 3-аспирантов.

За 40 летний период сотрудниками лаборатории Порошковых материалов НАН КР по результатам НИР достигнуты высокие показатели, опубликовано свыше 400 научных статей, в том числе 12 научных монографий и свыше 50 научно-методических руководств, получено более 10 патентов и авторских свидетельств на технологии получения, составы керамики и другие изобретения.

Необходимо отметить, что порошковая металлургия является одной из самых интересных и инновационных технологий производства изделий, получивших основное развитие в мире с начала XX века. Несмотря на свое

относительно недавнее вхождение в производственный сектор современной экономики, технологические принципы порошковой металлургии существуют и продолжают широким фронтом создавать перспективные керамокомпозиционные материалы с уникальными эксплуатационными свойствами, применяющиеся в самых различных сферах промышленности и техники во всем мире.

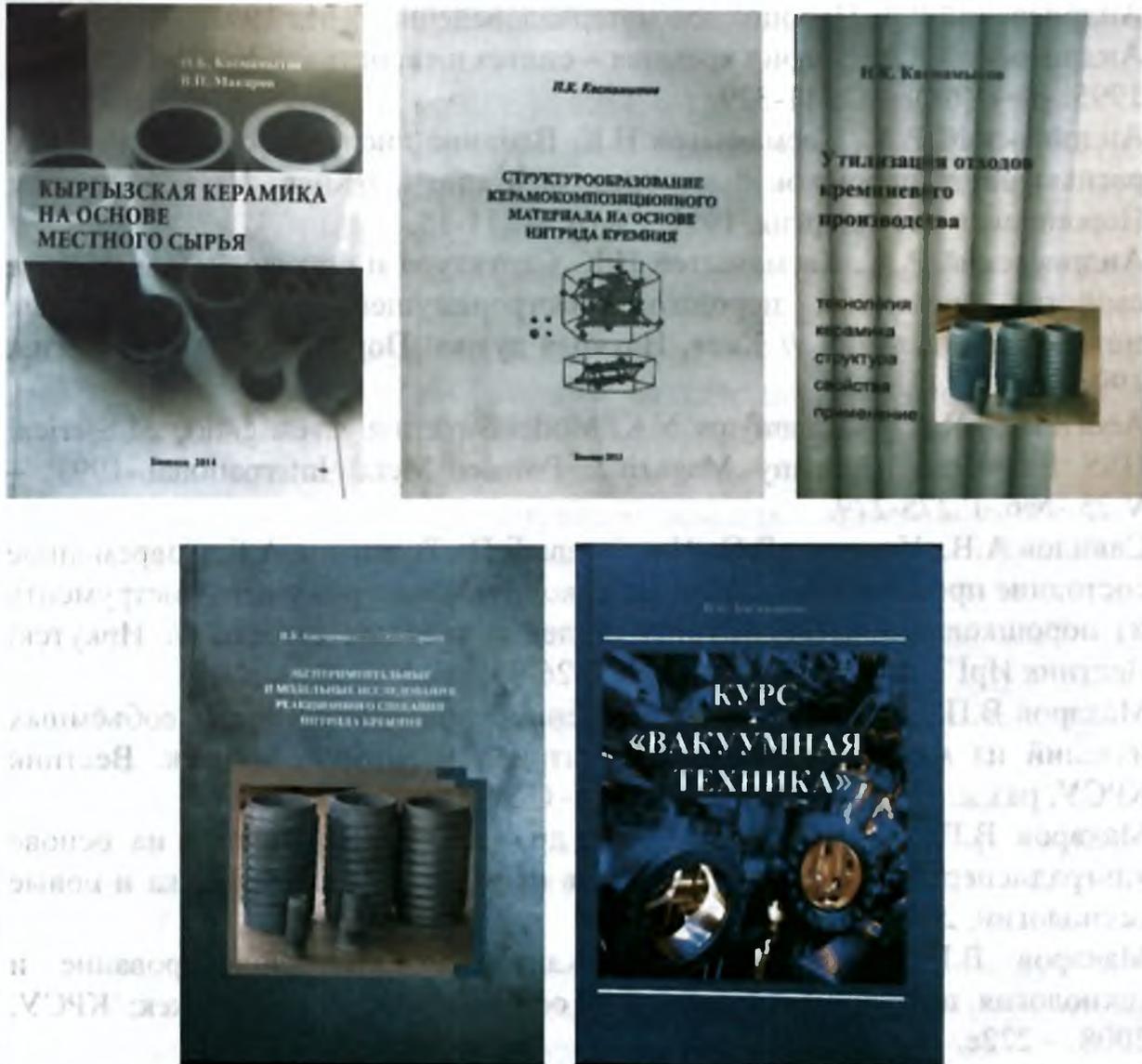


Рис.6. Научные монографии, опубликованные д.ф.-м.н., профессором Н.К.Касмамытовым по результатам нитридокремниевых исследований, синтезированных из монокристаллического кремния и азота в вакуумной печи.

Пользуясь случаем, хочу поздравить всех сотрудников лаборатории «Порошковые материалы» ИФ НАН КР с знаменательной датой 40-летием образования нашей лаборатории.

Уважаемые члены лаборатории! Дорогой мой коллектив! Поздравляю Вас с 40-летним Юбилеем образования нашей лаборатории. Всем желаю мира и здоровья, благополучия в семье, невероятных сил и гениальных идей для реализации научных целей в совместной упорной работе и в достижении результативной научной деятельности. Желаю творческих успехов в работе,

оставаться дружным коллективом, который сможет и горы свернуть ради общего успеха. Всем желаю успеха, достойных побед, личных благ и счастья.

Список литературы

1. Андриевский Р.А. Введение в порошковую металлургию. // Фрунзе: Илим, 1988. – 172 с.
2. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. // М.: 1991. – 180 с.
3. Андриевский Р.А. Нитрид кремния – синтез и свойства. // Успехи химии. – 1995. -№4. (64). – С.311-329.
4. Андриевский Р.А., Касмамытов Н.К. Влияние дисперсности на спекание распыленных порошков быстрорежущей стали. //Киев, Наукова думка: Порошковая металлургия, 1991. -№10. –С.11-15.
5. Андриевский Р.А., Касмамытов Н.К. Структура и физико- механические свойства спеченных порошков быстрорежущей стали, полученных методом распыления. // Киев, Наукова думка: Порошковая металлургия, 1993. -№10. - С.32-27.
6. Andrievskii R.A., Kasmamytov N.K. Model Sintering Investigation of Spherical HSS Powders.// Germany Magazine: Powder Metal International.-1993. – V.25.-№6.-P.275-279.
7. Савилов А.В., Никулин Д.С., Николаева Е.П., Родыгина А.Е. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твердых сплавов. // Иркутск: Вестник ИрГТУ. – 2013, №6 (77). – С.26-33.
8. Макаров В.П. Технологические особенности получения большеобъемных изделий из материала на основе нитрида кремния. //Бишкек: Вестник КРСУ, раздел Физика, Вып.3. - 2000. – С.34-41.
9. Макаров В.П., Касмамытов Н.К. и др. Получение шликера на основе ультрадисперсных шламовых отходов кремния. //Бишкек: Наука и новые технологии, 2009. - №6. – С.22-26.
- 10.Макаров В.П., Лелёвкин В.М., Каныгина О.Н. Моделирование и технология получения керамики на основе кремния. // Бишкек: КРСУ, 2008. – 222с.
- 11.Касмамытов Н.К. Асанов Б.У. Структура и упругие свойства спеченных быстрорежущих сталей. // Бишкек: КТУ им. И.Раззакова, - Вестник КТУ. – 2006. – №8. - С.88-91.
- 12.Байман И.Ф. Автореферат кандидатской диссертации на тему: Высокотемпературная прочность материалов Ti-B₂-Fe, полученных методом СВС-компактирования. // Бишкек-1994. – 17 с.
- 13.Андриевский Р.А., Пак А.Т., Байман И.Ф. Некоторые особенности формирования структуры и изменения плотности в терморреагирующих порошковых смесях титана с бором. // Киев: Наукова думка, Порошковая металлургия. -1989. - № 9. –С.1-3.

14. Андриевский Р.А., Байман И.Ф., Асанов Б.У. Температурная зависимость физико-механических свойств композиции Ti-B₂-Fe. // Доклады Академии наук СССР. -1990. – Т.314. -№5. – С. 1130-1132.
15. Касмамытов Н.К. Утилизация отходов кремниевого производства: технология, керамика, структура, свойства и применение. // Изд.-во Белек, Бишкек: ИФТПиМ, 2010. -236 с.
16. Касмамытов Н.К. Структурообразование керамокомпозиционного материала на основе нитрида кремния. // Бишкек: КРСУ, 2011. 91 с.
17. Касмамытов Н.К., Макаров В.П. Кыргызская керамика на основе местного сырья. // Бишкек: изд-во КРСУ, 2014. – 122 с.
18. Касмамытов Н.К., Кайрыев Н.Ж. Экспериментальные и модельные исследования реакционного спекания нитрида кремния. // Бишкек: Изд.-во КРСУ, 2023. – 188 с.
19. Касмамытов Н.К. Курс «Вакуумная техника». // Бишкек: изд-во КРСУ, 2025. -233 с.
20. Макаров В.П., Курбанов К.Р. Кыргызпатент. Способ изготовления керамокомпозиционных изделий из отходов кремния. (<http://patent.kg>) // Кыргызпатент KG 1203 C1 (C04B 35/58), 2009. – С.1-5.
21. Касмамытов Н.К. Особенности структурообразования нано- и ультрадисперсных керамокомпозиционных материалов на основе шламовых отходов кремниевого производства. // Перспективные материалы. -2011. -№3. – С.74-79.
22. Макаров В.П., Касмамытов Н.К., Ласанху К.А. Кыргызпатент. Кремний өндүрүшүнүн калдыктарынын керамикалык композициялык материалды алуунун ыкмасы. (<http://patent.kg>) // Кыргызпатент KG №1766. -18.06. 2014. -56.
23. Касмамытов Н.К., Ласанху К.А., Макаева К.М. Кыргызпатент. Электр фарфор буюмдары үчүн жергиликтүү чийки заттын негизиндеги керамикалык масса. (<http://patent.kg>)// Кыргызпатент KG, Ойлоп табууга №410, 29.11. 2024. - 5 б.
24. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж. Кыргызпатент. Жогорку вольттуу обочолоочту даярдоо үчүн керамиканы алуунун ыкмасы. (<http://patent.kg>)// Кыргызпатент KG, Ойлоп табууга №2187, 31.12.2019. – 54б.
25. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж., Макаева К.Т. Жогорку вольттуу керамиканы кооздоочу шихта. (<http://patent.kg>)// Кыргызпатент KG, Ойлоп табууга № 2193, 31.01.2020. -5 б.
26. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж. Кыдыралиев Э.М. Электротехникалык фарфорду алуу үчүн керамикалык масса. (<http://patent.kg>)// Кыргызпатент KG, Ойлоп табууга №2122. – 31.12. 2018. – 5б.
27. Макаров В.П. Структура и термомеханические свойства нитридкремниевой керамики. // Докторская диссертация., Бишкек ИФ НАН КР: 2001. – 147 с.

28. Касмамытов Н.К. Получение, структурообразование и свойства нано — и ультраструктурированных керамокомпозиционных материалов. // Докторская диссертация, Бишкек: ИФТПиМ НАН КР, 2011. -159 с.
29. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж., Макаева К.М., Ласанху К.А. Состав, технология получения, свойства высоковольтной фарфоровой керамики// Бишкек: Материаловедение. -2020, №2. – С.19-26.
30. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж., Календеров Э.М. Структура глазурированной высоковольтной керамики. //Бишкек: Научный журнал Физика, 1918. - №2. –С.30-37.
31. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Ласанху К.А. Физико-механические свойства высоковольтных фарфоровых керамик на основе местного сырья. // Бишкек: Научный журнал «Физика». -2022. -№2. –С.70-78.
32. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Жанибеков М.Ж. Влияние добавочных компонентов в составе глазури на физико-технологические свойства. // Бишкек: Научный журнал «Физика». -2023. -№1. –С.61-65.
33. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Асанбеков Ш.К., Донбаев Н.Э. Свойства глазурированной высоковольтной керамики с малым долевым содержанием глины кара-кече//Бишкек: Известие НАН КР, 2023. -№2. – С.12-19.
34. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Асанбеков Ш.К., Донбаев Н.Э. Формирование глазури на поверхности черепка высоковольтной фарфоровой керамики на основе местного сырья // Известие НАН КР, 2023. -№2. – С. 19-28.
35. Касмамытов Н.К., Кантай Н., Календеров А.Ж.// Влияние температуры обжига на формирование структуры и свойств высоковольтной фарфоровой керамики на базе местного сырья. // Бишкек: Научный журнал «Физика». -2018. -№1. –С.53-63.
36. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж., Кыдыралиев Э.М. Разработка новой керамической массы на основе местного сырья для создания высоковольтной керамики. // Бишкек: Научный журнал «Физика». -2017. - №2. –С.42-47.

061.6:53(091)

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ: ДОСТОИНСТВА И ПРЕИМУЩЕСТВА

(Обзор)

^{1,2}Касмамытов Н.К., ²Айтимбетова А.Н.

1-Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй 265-А, E-mail: nurkas@mail.ru

1-Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй 265-А, E-mail: nurkas@mail.ru

2-Кыргызско-Российский Славянский Университет им. 1-Президента Б.Н.Ельцина Российской федерации, Естественно-технический факультет, Бишкек, проспект Шабдан Баатыра, 140.

Аннотация. В статье изложены основные исторические периоды развития порошковой металлургии: от исторического начала применения этого метода до современного промышленного состояния в мире. Показано, что первые порошковые изделия обнаружены археологами датируемые III веком до нашей эры. Коротко описано начало развития порошковой металлургии в России XVIII века, а также в ведущих Европейских странах и Америки XIX века. В заключении обсуждены современные промышленные методы порошковой металлургии и материалов, полученных на их основе во второй половине XX и начала XXI веков. Отмечены основные достоинства и преимущества методов порошковой технологии, сыгравшие большую роль в интенсивном внедрении этих методов в современный промышленный сектор экономики развитых стран мира.

Ключевые слова: порошковая металлургия (ПМ), методы, технология, порошковые материалы, история развития ПМ, аддитивные SLM 3-D печать технологии, достоинства и преимущества ПМ.

HISTORICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT OF POWDER METALLURGY TECHNOLOGY: ADVANTAGES AND ADVANTAGES

(Review)

^{1,2}Kasmamytov N.K., ²Aytimbetova A.N.

1-Academician J.Jeenbaev, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, Chui Ave 265-A, E-mail: nurkas@mail.ru

2-Kyrgyz-Russian Slavic University named after the 1-st President of the Russian Federation B.N. Yeltsin, Natural Sciences and Engineering Faculty, Bishkek, 140 Shabdan Baatyra Ave.

Abstract. The article outlines the main historical periods in the development of powder metallurgy: from the historical beginning of the application of this method to the modern industrial state in the world. It is shown that the first gunpowder products discovered by archaeologists date back to the 3rd century BCE. The beginning of the development of powder metallurgy in Russia in the 18th century, as well as in leading European countries and America in the 19th century is briefly described. In conclusion, modern industrial methods of powder metallurgy and materials obtained

on their basis in the second half of the 20th and early 21st centuries are discussed. The main advantages and advantages of powder metallurgy methods are noted, which played a major role in the intensive introduction of these methods into the modern industrial sector of the economy of developed countries of the world.

Keywords: Powder Metallurgy (PM), methods, technology, powder materials, history of PM development, SLM additive 3D printing technologies, advantages and benefits of PM.

История получения порошковых изделий берет начало из далекой древности. Первые исторические факты по применению человечества базовых принципов порошковой металлургии были обнаружены в Египте в период III века до нашей эры, благодаря найденным древним изделиям путем археологических раскопок. Археологические раскопки и исторический анализ найденных артефактов в виде керамических изделий из глины показывает, что человечество впервые столкнулось с технологией порошковой металлургии при обжиге глины в Египте. На рис.1.1а-в представлены артефакты в виде керамических изделий, найденные при раскопках в древнем Египте.



Рис.1.1а-в. Древнеегипетские керамические изделия, изготовленные методами порошковой металлургии: а) Глиняные изделия (с использованием технологии формования, глазурирования и спекания (обжига глины), изготовленные 15 тыс. лет тому назад; б) глазурированные керамические кувшины; в) статуэтка женщины (обжиг глины, изготовлена 20 тыс. лет тому назад).

Аналогичные археологические находки были найдены и в южной Америке в виде золотых украшений и других артефактов, которые были изготовлены Древними инками из сферических порошков золота, т.е. Инки уже тогда применяли методы порошковой металлургии для создания золотых украшений, задолго до массового промышленного применения порошковой технологии, берущее начало в середине XIX века.

Производство первых металлургических порошков в России датируется 1826-1827г. Первые монеты, выпущенные в России из платиновых порошков, были получены методом порошковой металлургии на Урале в 1827-1828гг. Соболевским П.Г. [1-4] (см. рис.1.2.). Основы метода Порошковой металлургии в России были заложены в 1927 году П.Г. Соболевским и В.В. Любарским, они закрепили технологические основы метода ПМ и произвели первый производственный выпуск монет из губчатой формы порошков платины.



а)

б)

Рис. 1.2 а,б: а) Аверс и реверс первых платиновых монет России, изготовленные из платиновых порошков методом порошковой металлургии. б) Портрет Соболевского П.Г. - российский металлург, химик и инженер-конструктор, член-корреспондент Петербургской академии наук, один из основоположников Порошковой металлургии в России.

Методы порошковой металлургии получили широкое распространение в Европейских странах (Германии, Англии, Италии и др.) в конце XIX века, в период, когда методами порошковой металлургии начали изготавливать из порошков тугоплавкого вольфрама – электрические нити накаливания, что привело к новому импульсу развития порошковых технологий.

В первые десятилетия XX века порошковые технологии в промышленных развитых странах Европы и Америки начали интенсивно развиваться. Ярким примером этого периода служат выпущенные изделия из твердых сплавов, полученные методами порошковой металлургии в 1926 году, а также чуть позже в 1930 году порошковая промышленность в Европе стало выпускать первые пористые втулки и подшипники. Наиболее интенсивный скачок в развитии порошковой металлургии в мире приходится на вторую половину XX века.

В качестве примера на рис. 1.3а-г представлены фотографии современных порошковых изделий, изготовленные методами порошковой металлургии. Важно отметить, что за последние 50 лет методы порошковой металлургии широким фронтом стали внедряются в промышленный комплекс ведущих развитых стран мира, таких как США, Германия, Италия, Англия, Япония, Китай, Россия и другие. Это было обусловлено рядом достоинств и преимуществ технологии порошковой металлургии по отношению с традиционными классическими технологиями литья,ковки и т.д.

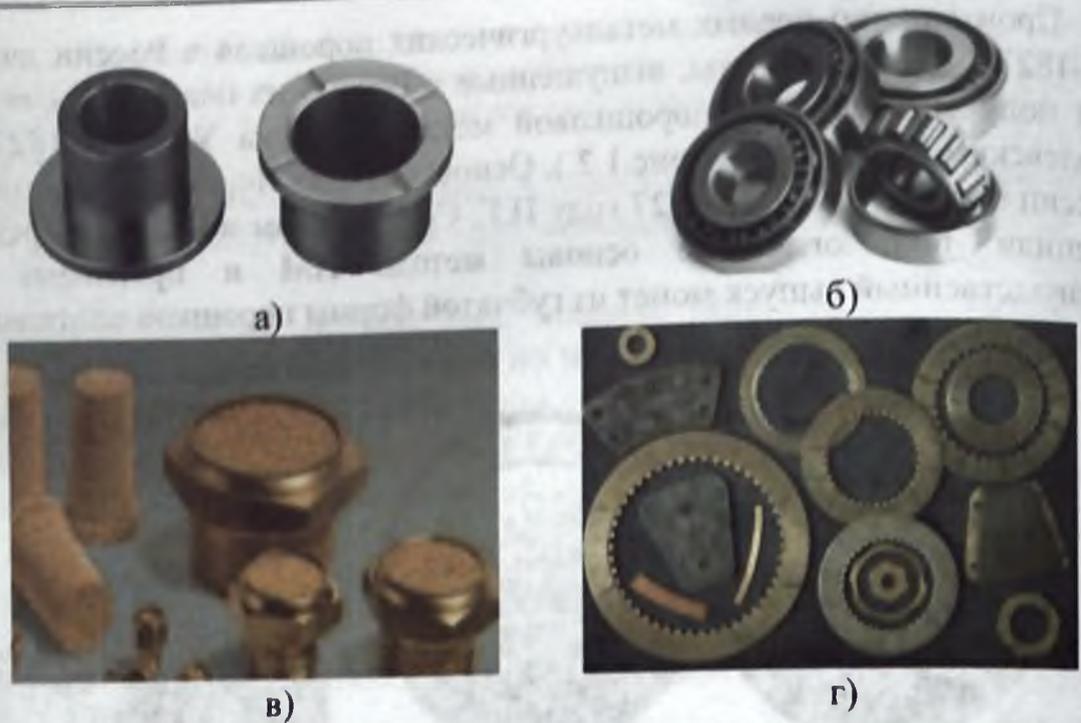


Рис. 1. За-г. Современные порошковые изделия, изготовленные различными методами порошковой металлургии: а) втулки скольжения; б) пористые подшипники; в) пористые порошковые фильтры; г) керамо-композиционные фрикционные накладки.

Коротко отметим о ряде наиболее существенных преимуществ и достоинствах технологии порошковой металлургии сыгравшие важную роль:

1. Высокая эффективность использования исходного сырьевого материала, т.е. методы порошковой металлургии являются ресурсосберегающими технологиями, обладающие возможностью существенного снижения отходов исходного сырья (дорогостоящих металлов и сплавов). Причем, достигается существенная экономия дорогостоящего сырья за счет безотходных или очень малоотходных методов порошковой технологии при получении конечных порошковых изделий (отсутствием обработки резанием и шлифовки). Другими словами, производство конечных порошковых изделий готовых к эксплуатации близка к окончательной форме и размеров, что позволяет исключить как обработку изделий резанием, так и шлифовку изделий.

2. Технология порошковой металлургии является экологически чистой технологией по сравнению с традиционными методами – она безотходная технология способная утилизировать отходы в виде окалины, скрапа, шлама и микростружки, образующихся в процессе классического металлургического, инструментального и станкостроительного производства.

3. Метод порошковой металлургии (МПМ) позволяет создавать порошковые изделия с заданной степенью пористости, сложных химических составов, композиционных материалов (пористые материалы, антифрикционные, некоторые инструментальные материалы), которые нельзя получать традиционными методами плавки, литья,ковки, прокатки и механической обработки и др.

4. МПМ обеспечиваются высокой автоматизацией и управляемостью

процессов технологии получения изделий со снижением трудоемкости: от исходного порошка до конечного изделия.

5. Технология порошковой металлургии позволяет эффективно утилизировать отходы, образующиеся в металлообрабатывающей промышленности в виде стружки, скрапа, микростружки и шлама и др.

6. МПМ позволяют создавать принципиально новые материалы с повышенными эксплуатационными свойствами порошковых материалов по сравнению с литыми.

7. МПМ тесно связаны с другими технологическими направлениями такими как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), напыление покрытий, технологией взрыва, низкотемпературной плазмой и др., что расширяет возможности МПМ и делает её универсальным.

Следует отметить, что вышеперечисленные достоинства и преимущества порошковой металлургии определили ее современное широкомасштабное развитие, совершенствование и внедрение в промышленный комплекс, в частности авто-, авиа- и ракетостроение и в многие другие отрасли экономики передовых стран Европы, Америки и Азии несмотря на имеющиеся два недостатка метода это невозможность создания крупных по размерам порошковых изделий и заготовок, а также высокая себестоимость изготавливаемой продукции.

Активное внедрение порошковых материалов в авто- и авиастроении и другие отрасли производства обусловлено еще и тем, что метод порошковой металлургии позволяет создать более легкие, прочные и жаропрочные порошковые изделия с уникальными свойствами, причем с экономией ресурсов, а также повышением эффективности производства за счет высокой автоматизации технологии получения порошковых изделий.

Порошковые материалы используются для изготовления деталей двигателей, конструкционных элементов, а также в производстве композитов и покрытий благодаря технологиям порошковой металлургии, позволяющие получать материалы с улучшенными характеристиками.

Порошковые материалы широко стали применяться в деталях двигателей в качестве втулок, колец, храповиков благодаря их повышенной износостойкости и надежности. Технологии порошкового напыления позволяют упрочнять поверхность быстрорежущих инструментов увеличивая ресурс её эксплуатации, что в целом способствуют экономному использованию металлов и создавать изделия с более улучшенными характеристиками и высокой эффективностью.

Известно, что в авиастроении широкое применение получили легкие порошковые сплавы на основе алюминий-лития, обладающих высокой удельной прочностью и жесткостью, что важно для снижения веса самолета. Наряду с этим применяются порошковые жаропрочные сплавы в конструкциях авиационных двигателей, изготовленных методом порошковой металлургии, которые обладают более повышенной устойчивостью к высоким температурам.

Широкое применение порошковые материалы получили в качестве композиционных материалов, поскольку технологии порошковой металлургии

дают возможность создавать современные композитные материалы, которые невозможно получить другими способами. Следует также отметить, что все шире стали применять порошковые материалы для производства различных функциональных элементов, включая подшипники скольжения и фрикционные диски.

В последние десятилетия в мире сильно развивается направление в порошковой технологии, получившая название «Spray forming» [13-15]. Суть этой технологии заключается в послойном напылении специальных сплавов («atomization») на подложку-заготовку с послойным выращиванием болванки изделия с последующей их механообработкой. Сплав расплавляют в плавильной камере, затем полученный расплав сливают в специальный распылитель, в котором жидкий расплав под высоким давлением потока инертного газа измельчается через форсунку на мельчайшие капли, образуя факел из дисперсных частиц расплава металла размером 10-100 мкм и осаждаются послойно на подложку, где он застывает, формируя слоистую структуру тела болванки, которая в последующем подвергается механообработке и доводится до конечной формы и размера изделия.

На рис.1.4а-в представлены различные по конфигурации детали авиадвигателя, изготовленные методом Spray forming технологии. Этот метод позволяет создавать детали с достаточно сложной геометрией и уникальными свойствами, которые невозможно получить с помощью традиционного литья или механической обработки. В отличие от литой заготовки, болванка, изготовленная Spray forming технологией, имеет высокую однородность микро и макроструктуры материала, что позволяет их использовать в качестве ответственных деталей аэрокосмического назначения из специальных сплавов с повышенными требованиями.



а)



б)

Рис. 1.4.а,б Различные детали авиадвигателя, полученные по технологии Spray forming:
а) уплотнительные, соединительные кольца б) сопла.

Однако Spray forming технология нашла коммерческое применение и в серийном производстве, в частности, для производства гильз цилиндров из Al-Si сплава для двигателей автомобилей Мерседес. Также эту технологию используют для получения ряда материалов, например, изготавливают заготовки медных сплавов, которые применяются в качестве суперпроводников на основе сплава CuSn; изготавливают высокопрочные инструменты на основе

сплавов Cu-Mn-Ni и Cu-Al-Fe для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.

Отметим, что показанные детали на рис. 1.4 а,б для авиадвигателей получены на основе Al-Si сплава с содержанием алюминия 30% и кремния 70% по массе. Главное отличительное свойство Al-Si сплава, полученного методом Spray forming технологии по сравнению с традиционными технологиями литья это отсутствие катастрофического охрупчивания изделия.

В таблице 1 представлены основные разновидности порошковых материалов, нашедших применение в различных сферах современного производства. Анализ данных таблицы 1 позволяет утверждать, что различными технологиями порошковой металлургии освоены и нашли практическое применение порошковые материалы в различных отраслях экономики развитых стран. На сегодняшний день номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр порошковых материалов и этот приведенный список далеко еще не полный.

Таблица 1. Области применения металлопорошковых материалов

Материалы	Применение
Al-Ni-Co, Fe-Nd-B	Производство магнитов, магниты
Al-Si-Mg	Сплавы с термостабильной структурой
Al-Sn-Cu	Подшипники скольжения
Al-переходные лантаноиды	Сплавы с повышенной термопрочностью
Bi-Te (теллурид висмута)	Устройства, использующие эффект Пельтье
Cr-Al	Защитные покрытия
Co-Cr	Сплавы для зубопротезирования
Cu-Ba, Cu-Y	Суперпроводники
Cu-Cr-Zr	Электропроводники без бериллия
Cu-In-GaSelenide	Фотогальванические материалы
Cu-Mn-Ni, Cu-Ti-Sn	Режущий инструмент
Au-Pt-Pd-Ag-In; Ni-Ti-Si-B; Ag-Cd-Zn-Cu	Сплавы для пайки
Au-Ag-Cu	Тонкопленочные покрытия
Fe-14%Cr-0,4%C	Специальный инструмент и оснастка
Fe-Mn	Износостойкие опоры прокатных станов
Fe-6%Si	Сердечники трансформаторов
Fe-Si-Al	Магнитные компоненты
Сплавы Mg	Металлические матрицы
Ni-алюмиды	Структурные компоненты и покрытия
Ni-Ce	Катализаторы
Ni-Cr-Fe-Si-B	Порошки для плазменного напыления
Ni-Cr-Mo-B	Антикоррозионные покрытия
Ni-лантаноиды	Топливные элементы
Нержавеющая сталь 304/316	MIM-технология
Сталь T42	Инструментальная оснастка
Tb-Fe	Опико-электронные устройства
Al-Ni-Co, Fe-Nd-B	Производство магнитов, магниты
Al-Si-Mg	Сплавы с термостабильной структурой
Al-Sn-Cu	Подшипники скольжения
Al-переходные лантаноиды	Сплавы с повышенной термопрочностью

Bi-Te, теллурид висмута	Устройства, использующие эффект Пельтье
Cr-Al	Защитные покрытия
Co-Cr	Сплавы для зубопротезирования
Cu-Ba, Cu-Y	Суперпроводники
Cu-Cr-Zr	Электропроводники без бериллия
Cu-In-GaSelenide	Фотогальванические материалы
Cu-Mn-Ni, Cu-Ti-Sn	Режущий инструмент
Au-Pt-Pd-Ag-In, Ni-Ti-Si-B, Ag-Cd-Zn-Cu	Сплавы для пайки
Au-Ag-Cu	Тонкопленочные покрытия

Таким образом, современные аддитивные методы порошковой металлургии достигли такого уровня, что полученные порошковые материалы находят применение в таких ответственных высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая техника, судостроение, приборостроение, химической и медицинской промышленности и других отраслях. Технологии порошковой металлургии однозначно можно отнести к наиболее наукоемким и приспособляющимся технологиям в области материаловедения и производства изделий, позволяющая создавать материалы с заранее заданным набором структуры и свойств [10,12-15]. В последнее десятилетие в промышленности получают все более интенсивное развитие 3D-печати металлов с использованием SLM (Selective laser melting (sintering)) технологий [12]. Под SLM методом следует понимать селективное лазерное спекание, использующая метод 3D-печати с применением лазера для послойного сплавления порошкового материала и создания порошкового изделия с требуемыми физико-механическими свойствами любой геометрической сложности для аэрокосмической, медицинской и автомобильной промышленности.

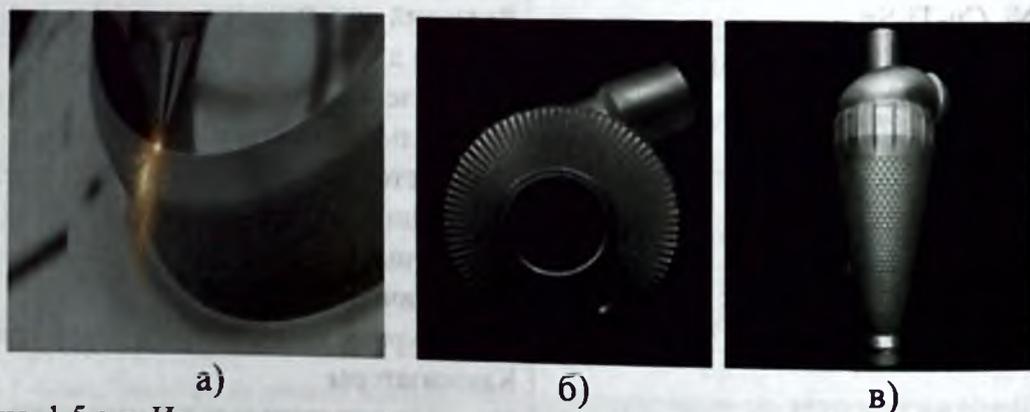


Рис. 1.5 а-в. Изделия сложной геометрической формы с детализацией поверхности, полученные методом 3-D печати SLM технологией.

На рис. 1.5 а,б представлены сложной формы порошковые изделия, полученные SLM технологией. Из рисунков видно, что эти SLM изделия имеют сложную геометрическую конфигурацию, отпечатанных с высокой точностью и качеством 3-D печати, полученные с помощью мощных лазеров с программным обеспечением печати (с математической моделью цифрового 3D-представления объекта), созданного с помощью системы автоматизированного

проектирования (CAD-Computer-Aided Design), основанное на математических расчетах и точных геометрических параметрах.

В заключении статьи отметим о достоинствах и преимуществах SLM 3-D печати. Данная технология постепенно вытесняет классические и традиционные методы получения металлических изделий сложной конфигурации. Это технология позволяет получать изделия с однородной, гомогенной и непористой структурой, что предопределяет его превосходящие физико-механические свойства по сравнению с классическими порошковыми аналогами.

Важно понимать, что SLM 3-D печать технология по изготовлению различных порошковых металлических деталей обладает рядом важных достоинств и преимуществ. Во-первых, имеет невысокие производственные затраты, т.е. относительные экономические оценки по производству SLM 3-D продукции существенно ниже классического производства из-за отсутствия технологической операции резания и деформационной обработки сложной по конфигурации продукции, что приводит к снижению времени по получению конечного готового продукта. Во-вторых, SLM 3-D печать технология обладает широким спектром функциональных возможностей в проектировании и моделировании заготовок и деталей практически любой сложной геометрией, имеющие в объеме изделия внутренние каналы и технологические полости для эффективного охлаждения в процессе их эксплуатации. Эта технология гибкая значительно упрощает и снижает время на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, позволяет вносить конструктивные изменения причем быстро и недорого. В-третьих, это технология практически безотходное или очень мало отходная по использованию сырья. Порошки, применяющиеся в технологическом процессе SLM 3-D печати, которые по тем или иным причинам были не задействованы в технологическом процессе, отводятся из рабочей области камеры SLM и используются повторно. В-четвертых, напечатанные изделия методом аддитивной технологии SLM 3-D печати обладают высокой точностью размеров порядка $\sim 0,01-0,001$ мм, что практически исключает технологическую операцию финишной обработки и шлифовки, что позволяет ускорить производственный процесс и оптимизировать расходы с экономией денег и времени.

Список литературы

1. И.Н. Францевич, В.И. Трефилов. Порошковая металлургия в СССР. История. Современное состояние. //М.: Наука, 1986. – 269с.
2. Р.А. Андриевский Порошковое материаловедение. // М.: Металлургия, 1991. – 205 с
3. В.В. Савич. Порошковая металлургия: современное состояние и перспективы развития. //Пермь: ПНИПУ, Серия "Машиностроение", 2021. — 695 с.

4. П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич. Порошковая металлургия в мире и в Беларуси: 1990-2010. Состояние, проблемы, перспективы// Сб. трудов. Межд. конференции. Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Минск, 07–09 апреля, 2021. - 26-80 с.
5. И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысельский и др. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник. //1985. - 624 с.
6. Д.С. Кива, С.А. Бычков, О.Ю.Нечипоренко, И.Г.Лавренко. Порошковая металлургия на рубеже веков: новые аспекты, понятия и определения. // Киев: КВИЦ. - 2017. -79 с.
7. М.И. Алымов, П.Ю. Гуляев, С.В. Семичев. Консолидация порошковых наноматериалов: обзор тенденций развития и применения.// Вестник Югорского государственного университета, 2019, Вып. 4 – С.62-70.
8. О.В. Роман, А.П. Богданов. Порошковая металлургия США. // Минск: БелНИИНТИ, 1972. - 19 с.
9. L. Aboussouan. Presentation of the European Powder Metallurgy Association.// Overviews of the status and trends in the European PM Industry, May 2019. - 58 с.
10. В.И. Кулик, А.С. Нилов Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. // Санкт-Петербург, 2018. - 160 с.
11. H. Endo. Technology Trends in Sintered Structural Parts. // Hitachi Powdered metals Technical Report. - 2002. - V1. – P.3-8.
12. А.Ф. Ильющенко, Е.С. Севастьянов, П.Н. Киреев. Высокоплотные порошковые стали и технологии изготовления из них конструкционных деталей сложной формы. // Минск, ГНПО ПМ, 2010. - С.218-229.
13. В. С. Антонова, И. И. Осовская. Новейшие достижения аддитивных технологий. //Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2019. – 60 с.
14. Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. Технологии аддитивного производства. /перевод с английского И. В. Шишковского. // М.: Техносфера, 2016. – 646 с.
15. А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. Аддитивные технологии. //М.: Лазерная техника и технология, 2025. -340 с.
16. Г.М.Волкогон, Ж.В.Еремеева, Д.А.Ледовской. Современные процессы порошковой металлургии. // Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. -208 с.

УДК 621.03.536.12

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Джураев Д.С¹., Мукашова А.Б².

¹Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими, просп. Исмоили Сомони, 226, Таджикистан, г. Худжанд.

²Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальная академия наук Кыргызской Республики, 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265-а,
E-mail: ulan-mk@bk.ru

Аннотация. В статье приведены краткий обзор экспериментальной установки и проведения эксперимента по исследованию температуропроводности магнитных жидкостей методом лазерной вспышки в зависимости индукции магнитного поля и давления при комнатной температуре.

Ключевые слова: магнитная жидкость, температуропроводность, магнитное поле, давление, экспериментальная установка.

INSTALLATION FOR MEASURING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MAGNETIC FLUIDS

Dzhuraev D.S¹., Mukashova A.B²

¹Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, 226 Ismoili Somoni Avenue, Khujand, Tajikistan.

²Institute of Physics named after Academician Zh. Zheenbaev, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, Chui Avenue 265a,
E-mail: ulan-mk@bk.ru

Abstract. The article presents a brief overview of the experimental setup and the procedure for investigating the thermal diffusivity of magnetic fluids using the laser flash method, depending on the magnetic field induction and pressure at room temperature.

Keywords: magnetic fluid, thermal diffusivity, magnetic field, pressure, experimental setup.

Многие магнитные жидкости относятся к слабопроводящим средам. Механизм воздействия магнитного поля на жидкость в этом случае связан только с ее уникальными магнитными свойствами [1].

Метод основан на быстром локальном нагреве поверхности образца лазерным импульсом, при этом измеряется температура образца и поглощенная им энергия [2-10].

Перечень методов измерения температуропроводности приведен в [7]. В настоящее время, примерно 75 % данных по температуропроводности получены методом лазерной вспышки [8].

Установки метода лазерной вспышки, начиная с 80-х годов прошлого века бурно развиваются в мире, в том числе в странах СНГ. Эти установки позволяют измерять теплоемкости жидкостей при комнатной температуре.

Наша установка позволяет измерять температуропроводность прозрачных твердых тел, жидкостей и растворов в зависимости от давления и индукции магнитного поля при комнатной температуре.

Представленное устройство (рис.1), состоит из лабораторного автотрансформатора, тонометра, реостата, амперметра, катушки, лазерной установки типа ЛГН-109, микровольтнаноамперметра типа Ф136, термопары и ячейки [4-6].

Эксперимент проводится следующим образом: Фронтальная поверхность малого образца формы призмы, т.е ячейка, заполняется исследуемым объектом и соединяется с тонометром, после чего устанавливается внутри катушки так, чтобы ячейка была в центре катушки и не касалась ее стенок и подвергается облучению. Катушка прикрепляется к штативу.

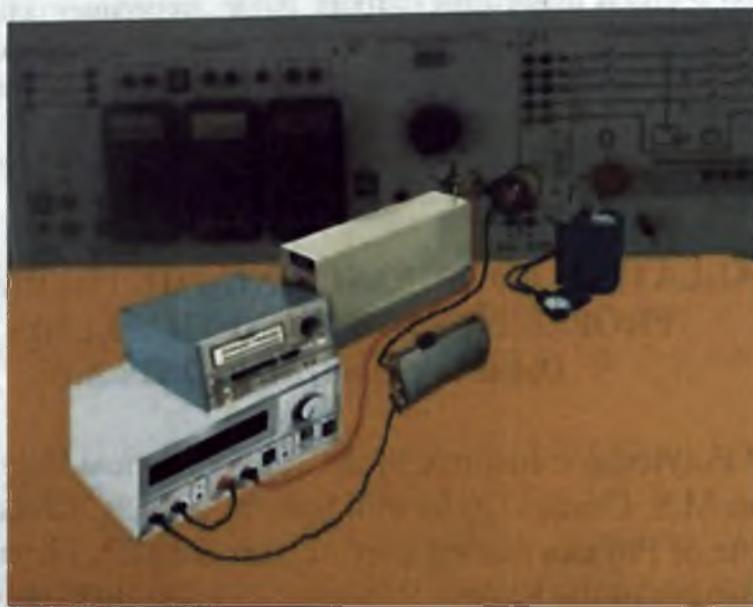


Рис.1. Установка для исследования влияния магнитного поля на температуропроводность вещества методом лазерной вспышки в зависимости от давления при комнатной температуре.

После чего, подавая напряжение от 3-х до 8 В лабораторным автотрансформатором, с помощью реостата контролируем ток от 0.4 до 1 А, который показывает амперметр. На катушке создаем магнитное поле от 1,6 до $3,9 \cdot 10^{-2}$ мТл, а с помощью тонометра изменяем давление от $P=0,101$ до 0,141 МПа. Источником облучения служит лазерная установка. Лазерная установка ЛГН-109, микровольтнаноамперметр Ф136 и ЛАТР питаются от сети, напряжением 220 В переменного тока.

Изменение температуры на тыльной стороне образца измеряется хромель-алюмелевой термопарой, спай которой прикреплен к ячейке, а концы подключены к микровольтнаноамперметру. Микровольтнаноамперметр установлен с помощью переключателя на 100 мкВ. Время фиксируется до снижения показания микровольтнаноамперметра. Максимальное время достижения температуры на тыльной поверхности τ фиксируется двухстрелочным секундомером типа С-11-1Б, с точностью 0.1с.

Температуропроводность образца вычисляли, решая одномерное нестационарное линейное уравнение

$$a = 1,37l^2 / (\pi^2 \tau_{0,5}),$$

где l – толщина образца; $\tau_{0,5} = 0,5\tau_{\max}$, τ_{\max} – время нагрева противоположной стороны образца до максимального значения [8].

Заключения.

Разработанные экспериментальные установки могут быть использованы для быстрого определения температуропроводности магнитных жидкостей в зависимости от давления и магнитного поля в лабораторных условиях. Кроме того разработана экспериментальная установка для измерения температуропроводности магнитных жидкостей в зависимости от давления и магнитного поля методом лазерной вспышки [4-5].

Список литературы

1. Диканский Ю.И., Кожевников В.М., Чеканов В.В. Магнитная восприимчивость и электропроводность магнитной жидкости при наличии структурных образований // Физические свойства магнитных жидкостей. Сб. науч. трудов, Свердловск, 1983.С.28-33.
2. Башарин, А. Ю. Методика экспериментального исследования оптических характеристик тугоплавких металлов при сверхвысоких температурах [Текст] / А. Ю. Башарин, А.В. Кириллин, М.А. Шейндлин // ТВТ. 1984. –Т. 22. –№1. –С.131–137.
3. Мирошниченко, В. И. Экспериментальная установка с импульсным лазерным нагревом для исследования теплопроводности и теплоемкости твердых тел при высоких температурах [Текст]: тез. докл. / В. И. Мирошниченко, В.В. Махров, М. В. Ребров // 9-й Теплофизической конференции СНГ. Махачкала, 1992. –С.22–23.
4. Джураев Д.С., Сафаров М.М. , Нажмудинов Ш.З. и др. Устройство для определения влияния магнитного поля на изменение температуропроводности магнитных жидкостей. № ТЈ 229. 2009.МПК (2006) G01 N 27/00; 17/74.
5. Джураев Д.С., Сафаров М.М. , Нажмудинов Ш.З. и др. Устройство для определения температуропроводности при комнатной температуре и атмосферном давлении путем лазерной вспышки № ТЈ 230. 2009.МПК (2006) G01N. 21/00.
6. Джураев Д.С., Сафаров М.М., Нажмудинов Ш.З. и др. Устройство для определения температуропроводности магнитных жидкостей. № ТЈ 292. 2010. МПК (2006) G01 N 27/00; 17/74.
7. Taylor, R. E. Heat-pulse thermal diffusivity measurements [Text] / R. E. Taylor // High Temperatures- High Pressures. –1979. –V. 11. –P. 43–58.

8. Клименко, А.В. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент [Текст] / А.В. Клименко, В.М.Зорина. 3-е издание. –М.: Издательство МЭИ, 2001. –560 с.

9. Холиков, М. М. Состав выхлопных газов и способы снижения вредного воздействия отработанные газы двигателей внутреннего сгорания / М. М. Холиков, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев // Вопросы физической и коллоидной химии : Материалы IV Международной конференции, посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Хамида Мухсиновича Якубова и Зухуриддина Нуриддиновича Юсуфова, Душанбе, 03–04 мая 2019 года. – Душанбе: Таджикский национальный университет, 2019. – С. 202-208. – EDN VKAQIB.

10. Адсорбционные, теплофизические, термодинамические свойства некоторых наночастиц и их влияние на поведение теплоносителей / М. М. Сафаров, Х. Х. Назаров, Н. Б. Давлатов [и др.] // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении : Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова, Казань, 13–15 сентября 2016 года. – Казань: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский научный центр Российской академии наук, 2016. – С. 217-220. – EDN ZIKZIN.

УДК 551 (510.53:590.21:510.4)

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ СРЕДНИХ ШИРОТ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ УРОВНЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

д.ф.-м.н. Гайнутдинова Р.Д., магистр Крымская Д.Н., Жунушова Г.Ш.

Институт физики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская Республика
epfk@rambler.ru, dina.krymskaya@yandex.ru, zhunushova.gulnara@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены основные причины изменения климата, связанные с гелиогеофизическими факторами и с техногенным фактором, приводящим к парниковому эффекту в атмосфере. Дана оценка роли и вклада этих двух факторов в процесс изменения климата. Представлены результаты многолетних исследований термического режима атмосферы над Кыргызстаном, региональных особенностей и причин климатических изменений атмосферных параметров. Проведены эмпирические оценки изменений приземной температуры с учетом амплитуд и фаз значимых периодических составляющих.

Ключевые слова: атмосфера, температура, солнечная активность, климат, океан.

CHANGES IN THE TEMPERATURE REGIME OF THE LOWER ATMOSPHERE OF THE MIDDLE LATITUDES CONNECTED WITH THE LEVEL OF HELIOGEOPHYSICAL ACTIVITY

Dr. Gainutdinova R.D, Ms.Sci. Krymskaya D.N., Zhunushova G.Sh.

Institute of Physics of NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic
epfk@rambler.ru, dina.krymskaya@yandex.ru, zhunushova.gulnara@mail.ru

Abstract. The main causes of climate change connected with heliogeophysical factors and with the technogenic factor leading to the greenhouse effect in the atmosphere are considered. The role and contribution of these two factors to the process of climate change is assessed. The results of long-term studies of the thermal regime of the atmosphere over Kyrgyzstan, regional features and causes of climatic changes in atmospheric parameters are presented. Empirical estimates of changes in surface temperature were made taking into account the amplitudes and phases of significant periodic components.

Keywords: *atmosphere, temperature, solar activity, climate, ocean.*

Введение. Основной причиной изменения температуры атмосферы является солнечная радиация, видимая и инфракрасная области спектра которой полностью контролирует температуру поверхности Земли и прилегающей атмосферы. На радиационный баланс атмосферы существенное влияние оказывают такие малые газовые составляющие, как углекислый газ CO_2 , метан CH_4 , пары воды H_2O , озон O_3 , газовые гидраты и другие примеси. Существующие модели влияния парниковых газов на температуру атмосферы дают завышенные результаты, превышающие фактически наблюдаемый рост температуры. В целом основным источником выброса CO_2 в атмосферу является океан.

Основные причины изменения температуры приземного слоя атмосферы связаны с природными факторами, в основе которых лежат изменения полной солнечной радиации и с техногенным фактором, связанным с выбросами в атмосферу в ходе человеческой деятельности углеводородных соединений, водяных паров и других газов. Существует ряд других факторов, влияющих на потепление - это геодинамика земной коры, конвекция вещества с мантии Земли, динамика океанических течений, вариации космического излучения, вулканическая деятельность и др.

Анализ экспериментальных данных. Рассмотрим влияние факторов солнечной активности на температурный режим атмосферы. Известно, что малый ледниковый период в 1650-1750 годах совпал с известным маундеровским минимумом солнечной активности /1/. После этого начался рост солнечной активности, максимум которой отмечался в 1980-1985 гг. В этот период максимумы и минимумы 11-летних циклов солнечной активности совпадали с максимумами и минимумами в изменениях температуры приземной атмосферы.

В солнечных циклах доминируют цикличности с периодами 11-13 лет, 21-23 и 35-42 года, 55-60 и 90-100 лет. Эти же периодичности выделяются и в долгопериодных вариациях температуры /2/. Это указывает на реальную связь изменений приземной температуры с солнечной активностью. Последние 60 лет характеризовались беспрецедентно высоким уровнем солнечной активности за предшествующие 500 лет. С 1998 года начался спад солнечной активности и в этот период отмечался максимум потепления. Этот же период может характеризоваться как начало глобального похолодания. По прогнозам специалистов в 2025-2030 годы ожидается ближайший минимум векового цикла солнечной активности.

Глобальное потепление, наблюдаемое в 1979-2005 годах, – это очередная фаза потепления в естественном фоновом цикле глобальных вариаций температуры, которые происходят примерно через каждые 57-60 лет. При этом отклонения значений глобальных температур от средней величины за последние 10000 лет не превышали 1°C и их можно отнести к фоновым колебаниям [2,3].

Анализ климатических вариаций приземной температуры в тропосфере над Кыргызстаном по данным метеостанций, расположенных на высотах 2040 м и 3700 м над уровнем моря, обнаруживает их четкую зависимость от уровня солнечной активности в 21-ом и 22-ом одиннадцатилетних циклах [2-4]. В периоды максимума солнечной активности температура атмосферы на этих уровнях в зимний период возрастала относительно среднефоновой температуры на $0,8^{\circ}\text{C}$ в 23-ем цикле солнечной активности и на $1,5^{\circ}\text{C}$ в 24-ом цикле, а в периоды ее минимума уменьшилась на $1,2^{\circ}\text{C}$ [2,3].

На рисунке 1 приведены вариации отклонений приземной температуры атмосферы на высоте 3700 м (МС Тянь-Шань) и параметров солнечной активности – чисел Вольфа W и потока радиоизлучения $F_{10,7}$ с 1984 по 2010 годы.

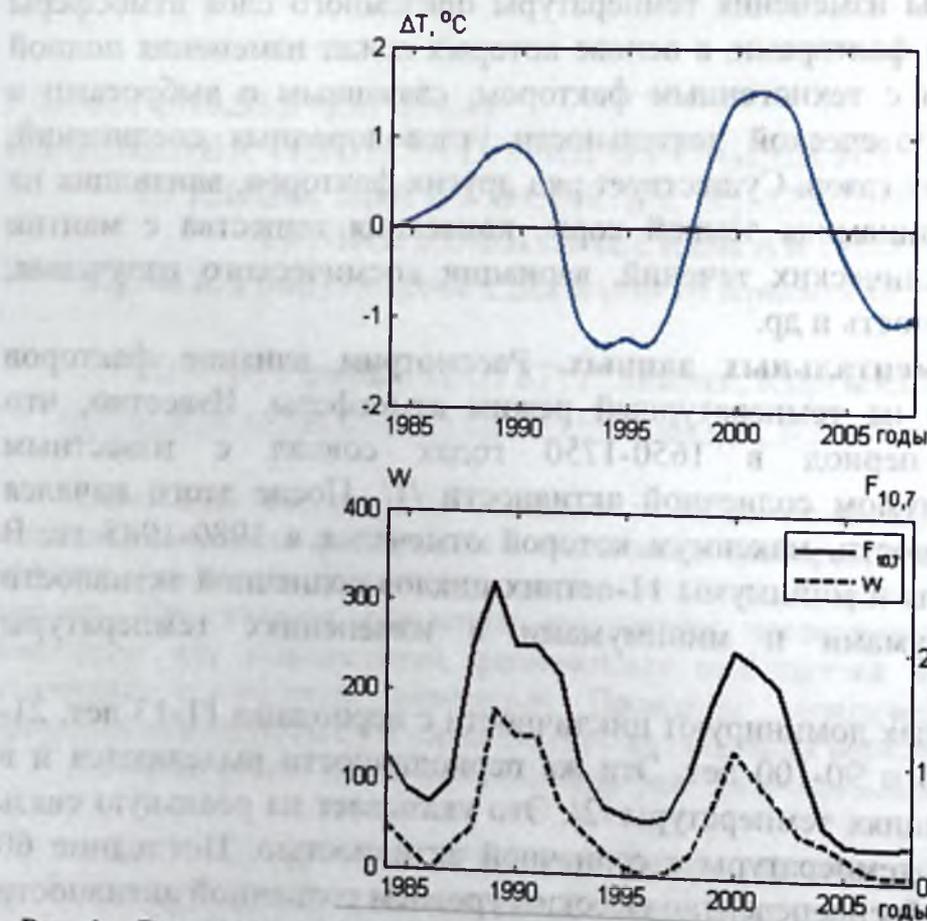


Рис. 1. Вариации отклонений приземной температуры атмосферы на высоте 3700 м (МС Тянь-Шань) и параметров солнечной активности – чисел Вольфа W и потока радиоизлучения $F_{10,7}$.

Из рисунка видно, что от максимума к минимуму 11-летнего цикла солнечной активности температура атмосферы на высоте 3700 м (МС Тянь-Шань) изменялась на $(1,5-1,6)^{\circ}\text{C}$. В процентном отношении эти изменения температуры относительно среднепериодной температуры на этих высотах составляют 12-15%. Четко виден высокий уровень корреляции между вариациями отклонений приземной температуры атмосферы и 11-летними циклами солнечной активности.

В зимние периоды 2005-2020 годов по Кыргызстану отмечено отсутствие роста приземной температуры и спад ее средних значений в зимний период на $0,5-0,7^{\circ}\text{C}$. На рис. 2 хорошо виден спад этот температурный спад.

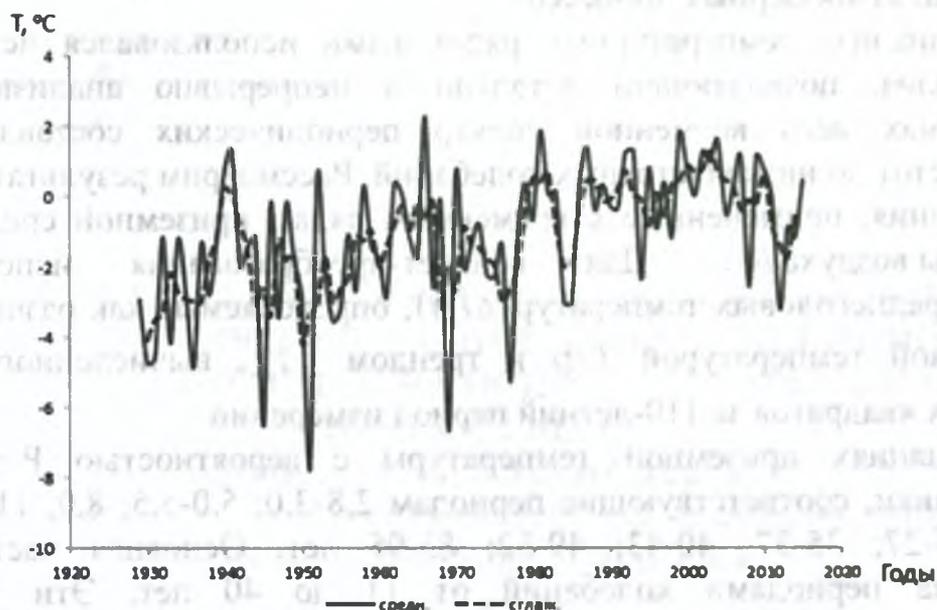


Рис. 2. Многолетние вариации среднегодовой температуры по данным МС Бишкек в холодное полугодие

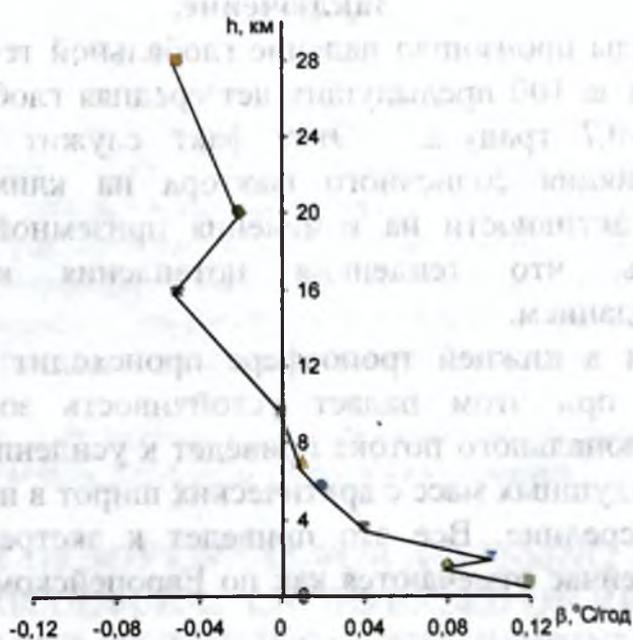


Рис. 3. Высотная структура изменения скорости потепления $\beta^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в тропосфере и стратосфере над Кыргызстаном за холодные периоды 1984-2004 гг.

Судобый интерес представляет высотная структура развития процесса потепления в атмосфере. Для анализа использовались данные измерений температуры по сети метеорологических и аэрологических станций Кыргызстана за период с 1984 по 2006 годы. На рис. 3 приведена высотная структура изменения скорости потепления β $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в тропосфере и стратосфере над Кыргызстаном за указанные периоды 1984-2004 гг.

Анализ этих данных показал, что процесс потепления в основном (до 90%) происходит в тропосфере от приземного слоя до высот 3,5-4,0 км. Выше уровня в до значительные изменения происходят практически весь слой нижней стратосферы и в меньшей мере. Данное явление хорошо объясняется процессом инверсионной структуры тропосферы.

Для анализа температурных рядов были использованы непрерывные ряды наблюдений за последние десятилетия и в частности анализировать по спектральному виду функции спектра периодических составляющих от данных имеют до незначительных колебаний. Рассмотрим результаты вейвлет-преобразования, примененные к временным рядам приземной среднетемпературной за период 1984-2006 гг. Для вейвлет-преобразования использовались функции скалярных температур $\Delta T(t)$, определяемые как разность между среднетемпературой $T(t)$ и трендом T_0 , вычисленного методом наименьших квадратов за 100-летний период измерений.

В анализе временной температуры с вероятностью $P > 0,87$ были выявлены такие синхронизированные периоды 2,8-3,0; 5,0-5,5; 8,0; 11-12; 16-18; 21-22; 27-28; 33-34; 40-42; 48-52; 85-95 лет. Основная часть спектра сосредоточена в диапазоне периодов от 11 до 40 лет. Эти результаты согласуются с данными о связи приземной приземной температуры за период с максимумом активности Солнца с вариациями солнечной активности.

Заключение

За последние годы произошло падение глобальной температуры на $0,6^{\circ}\text{C}$. Этот эффект, если за 100 предыдущих лет средняя глобальная температура повысилась на $0,4-0,7$ градуса. Этот факт служит экспериментальным подтверждением влияния солнечного фактора на климат Земли. Анализ влияния солнечной активности на изменения приземной температуры дает основание полагать, что тенденции потепления климата связаны с постепенным похолоданием.

При потеплении в нижней тропосфере происходит снижение скорости зonalного потока, при этом падает устойчивость zonalного переноса. Снижение скорости zonalного потока приведет к усилению меридионального обмена холодными воздушными масс с арктических широт в высокие и теплых масс с низких широт в средние. Все это приведет к экстремальным погодным явлениям, которые сейчас отмечаются как по Европейскому региону, так и по всему миру.

Список литературы

1. Клименко В.В. Глобальное потепление и энергетика: мифы и реальность // Энергия: экон., техн., экол., М., 2001, № 5, с.16-24.
2. Каримов К.А. Физические механизмы региональных долгопериодных изменений температурного режима атмосферы // Доклады НАН КР, 2015, №2, с. 27-35.
3. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Роль различных физических факторов в долгопериодных изменениях температуры нижней атмосферы // Труды Гидрометцентра России, М., 2017, вып. 366, с.121-136.
4. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д., Жунушова Г.Ш., Крымская Д.Н. Сезонные изменения температуры атмосферы в тропосфере в связи с солнечной активностью // Труды XXVII Межд. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» -Москва, Россия, Изд-во ИОА СОРАН, 2021, с. 220-213.

УДК 681.3.01

РАСЧЕТ ОЦЕНКИ АЗОТНОГО СТАТУСА ЗЕЛеной РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ИНДЕКСА ReCL

Аманова Назира Турдубековна

Старший научный сотрудник Института сейсмологии при НАН КР

Аккозов Абдылдабек Джадраевич

Доцент кофедры ИВТ КГТУ им. И.Разакова,

Кыргызской Республики,

кандидат физико-математических наук.

Аннотация: Рассматривается проблема оценки содержания азота в зеленой растительности на основе вегетационного индекса ReCL, отражающего зависимость между количеством хлорофилла и уровнем усвоенного азота. Представлена разработанная авторами программа для расчета ряда вегетационных индексов, включая ReCL, с функцией сегментации растительного покрова и примером выявления участков с признаками азотного дефицита по данным дистанционного зондирования. Необходимость создания программы обусловлена ограничениями существующих решений (ArcGIS, QGIS, ENVI и др.), которые отличаются высокой стоимостью, сложностью освоения и отсутствием поддержки ряда специализированных индексов. Предложенное программное средство является простым и доступным инструментом для решения прикладных задач мониторинга состояния растительности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, вегетационный индекс, азотный статус, хлорофилльный индекс ReCL сегментация изображений.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR ASSESSING THE NITROGEN STATUS OF AGRICULTURAL CROPS BASED ON REMOTE SENSING DATA BASED ON THE ReCL CHLOROPHYLL INDEX

Amanova Nazira Turdubekovna

Senior Research Fellow at the Institute of Seismology of the
National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic.

Kyrgyz Republic. Email: acem22@mail.ru

Tel.: +996709188600 (WhatsApp)

Akkozov Abdyaldabek Zhadraevich

Associate Professor of the Department of ICT, KSTU named after I. Razzakov
Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

Kyrgyz Republic. Email: abysh2012@mail.ru

Tel.: +996700364035 (WhatsApp)

Annotation: The study addresses the assessment of nitrogen content in green vegetation using the ReCL vegetation index, which reflects the relationship between chlorophyll concentration and nitrogen uptake. The ReCL index demonstrates high sensitivity to changes in chlorophyll levels and allows for the detection of vegetation areas with yellowing or leaf loss, indicating nitrogen deficiency. The paper presents a software tool developed by the authors for calculating multiple vegetation indices, including ReCL, and performing vegetation cover segmentation. A user guide and a case study illustrating the identification of nitrogen-deficient areas based on remote sensing data (aerial and satellite imagery) are provided. The development of this tool is motivated by the limitations of existing software such as ArcGIS, QGIS, and ENVI, which are costly, complex to use, and often lack support for specialized indices. The proposed software offers a simple, accessible, and efficient solution for applied vegetation monitoring and nitrogen status evaluation.

Keywords: remote sensing, vegetation index, nitrogen status, chlorophyll index ReCL, image segmentation.

Введение

Систематический мониторинг состояния растительного покрова представляет собой одну из наиболее актуальных междисциплинарных задач современной науки и практики. Его значимость детерминирована ключевой ролью фитомассы в функционировании биосферы, включая процессы фотосинтеза, депонирования углерода, регулирования водного и энергетического балансов. В практическом аспекте достоверная информация о состоянии растительности является критически важной для решения широкого спектра прикладных проблем, таких как обеспечение продовольственной безопасности через оптимизацию сельскохозяйственного производства, рациональное управление лесными ресурсами, контроль за деградацией земель, а также оценка последствий антропогенного воздействия.

Связь между полезными ископаемыми и растительностью, выявляемая с помощью ДЗЗ, — это мощный инструмент прямого поиска месторождений. Он основан на фундаментальном принципе: любое скопление полезных ископаемых создает в окружающей среде геохимическую аномалию, которая неизбежно влияет на биоту, и в первую очередь — на растительный покров. Современные методы ДЗЗ позволяют "увидеть" этот стресс и использовать его как надежный ориентир для геологов[8].

Азот — один из важнейших макроэлементов, необходимых для роста и развития растений. Его дефицит приводит к снижению фотосинтетической активности, замедлению роста и, как следствие, значительным потерям урожая.

В то же время избыточное внесение азотных удобрений экономически невыгодно и вызывает серьезные экологические проблемы, такие как эвтрофикация водоемов и загрязнение грунтовых вод. В этой связи актуальной задачей является разработка методов оперативного и точного мониторинга азотного питания зеленой растительности и сельскохозяйственных культур[4].

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), особенно с использованием БПЛА, оснащенных мультиспектральными камерами, предоставляет возможность неразрушающего, оперативного и пространственно-непрерывного мониторинга состояния посевов [1]. Связь между содержанием азота и спектральными характеристиками растительного покрова опосредована содержанием хлорофилла, поскольку атом азота входит в состав молекулы хлорофилла. Для оценки содержания хлорофилла широко используются вегетационные индексы, рассчитываемые по данным съемки в ближнем инфракрасном и красном краях спектра. Особой чувствительностью обладает индекс ReCL, который использует канал красного края (red-edge) спектра [2, 5].

Теоретическое обоснование вегетационного индекса ReCL

Индекс хлорофилла играет очень важную роль в современном сельском хозяйстве. Чтобы понять почему, нам нужно поближе взглянуть на сам хлорофилл.

Хлорофилл — пигмент, который придает растениям характерный зеленый цвет. Он играет важную роль в жизни растений, поскольку поглощает солнечный свет, который с помощью фотосинтеза затем преобразуется в сахар и крахмал. Таким образом, хлорофилл является отличным индикатором здоровья растения. Измерив спектральную отражательную способность хлорофилла в растениях из космоса, мы можем регулярно отслеживать состояние растительного покрова и сельскохозяйственных культур. Для этой задачи применяется хлорофилловый вегетационный индекс[6].

Индекс хлорофилла находит различное применение в точном земледелии: Выявление дефицита питательных веществ в растениях.

Оценка поглощения азотных удобрений.

Прогнозирование урожайности.

Картирование рекомендаций по дифференциальному внесению семян и удобрений (VRA) и другое.

И фермеры не единственные, кто может извлечь выгоду из использования индекса хлорофилла. Поставщикам средств производства необходимо регулярно отслеживать состояние сельскохозяйственных культур, чтобы проверить эффективность своих продуктов. Страховщики могут использовать индекс для надежного прогнозирования урожайности и расчета страховых выплат на основе объективных данных. А сельскохозяйственным кооперативам индекс позволит быстрее и проще корректировать план внесения удобрений для большого количества полей. Возможности безграничны[3].

Расчет хлорофилльного ReCL вычисляется по следующей формуле:

$$\text{ReCI}=(\text{NIR}/\text{RED})-1 \quad (1)$$

где:

NIR – значение спектральной яркости в ближней инфракрасной области (диапазон 740-790 нм);

RED - значение спектральной яркости в красной области спектра (диапазон 670-680 нм) [7].

Биофизической основой индекса является тот факт, что здоровые, богатые хлорофиллом растения интенсивно поглощают излучение в красной области спектра (низкие значения RED) и сильно отражают в ближней инфракрасной (высокие значения NIR). В результате, на участках с высокой концентрацией хлорофилла значение дроби NIR/RED велико, а следовательно, велико и значение ReCL. Поскольку хлорофилл является производным поглощенного растением азота, индекс ReCL хорошо коррелирует с азотным статусом зеленого растительности. Снижение значений индекса указывает на участки с пожелтением (хлорозом) или опаданием листвы, что является прямым следствием азотного дефицита.

Программа расчета вегетационных индексов «PrRasVgtInd».

Расчет вегетационного индекса ReCL

Для автоматизации процесса расчета вегетационных индексов была разработана специализированная программа «PrRasVgtInd», которая позволяет рассчитать ряд вегетационных индексов, в том числе и ReCL с последующей сегментацией покровов с различными значениями индексов. Существует ряд общеизвестных программных средств таких как ArcGIS, QGIS, ENVI и др. Они многофункциональны. Но они отличаются высокой стоимостью, сложностью освоения, требующей определенного профессионального уровня пользователя, и отсутствием поддержки ряда специализированных индексов. В связи с этим нами разработан специальный программный продукт, который является простым в эксплуатации и доступным инструментом для решения узкого круга задач, связанного с расчетом вегетационных индексов, прикладных задач мониторинга состояния растительности.

Эта программа позволяет рассчитать индексы растительности (растительного покрова) сельскохозяйственных культур по данным аэрокосмических снимков с функцией сегментации растительного покрова. Ниже приводится руководство пользователя разработанной программы на примере расчета вегетационного индекса ReCL и выявления участков с признаками азотного дефицита по данным дистанционного зондирования.

При запуске программы «PrRasVgtInd» откроется следующее окно, которое мы назвали титульным:

При нажатии кнопки «Перейти к расчету» открывается новое окно «Окно ввода исходных данных». В этом окне путем нажатия соответствующей радиокнопки выбираем вид рассчитываемого индекса растительности. Допустим, что мы хотим рассчитать хлорофилльный индекс. Тогда выбираем и нажимаем на радиокнопку «ReCL, после чего становятся доступными (активными) кнопки «RED» и «NIR» (рис.2).

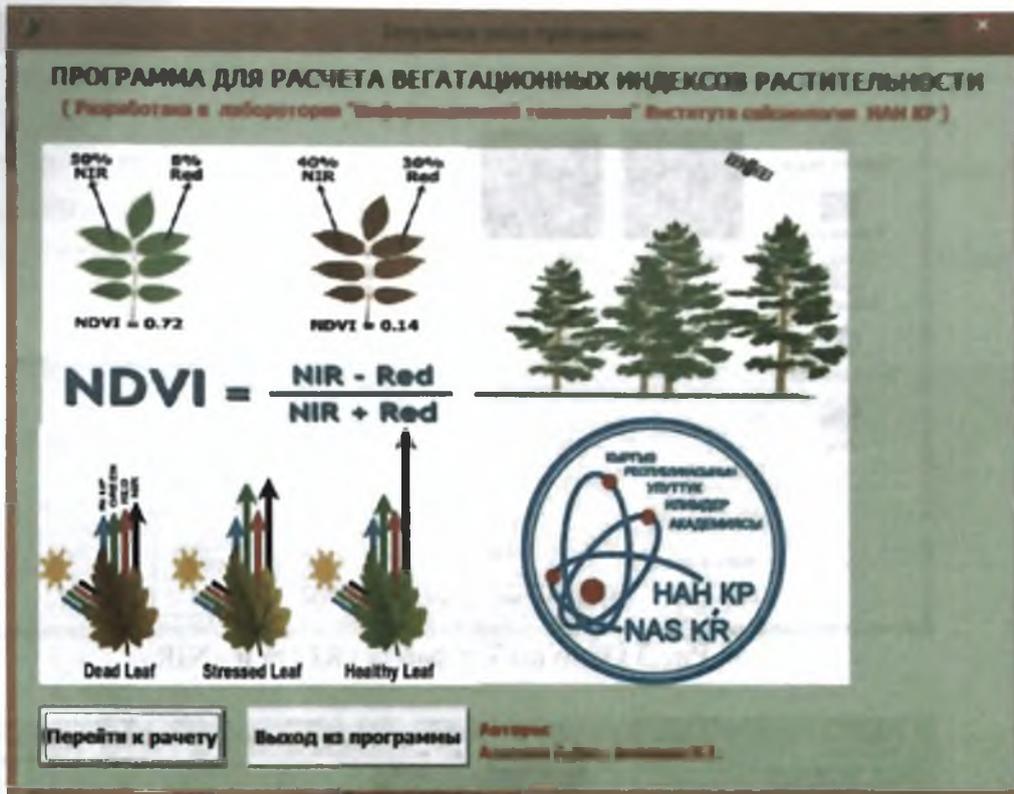


Рис.1 Титульное окно.

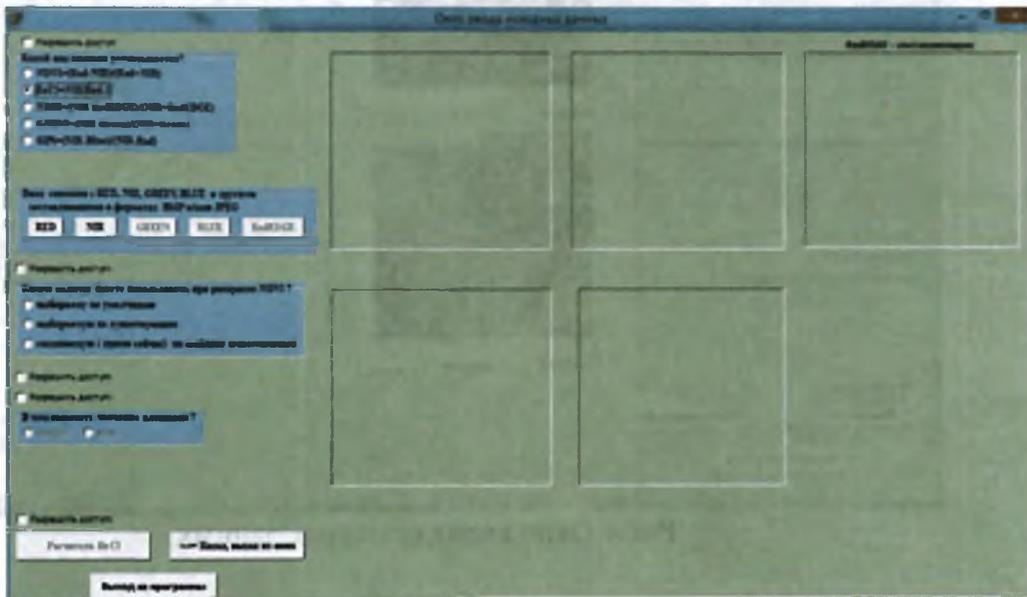


Рис.2 Окно выбора кнопки «RED» и «NIR».

Далее для ввода в компьютер снимки с «RED» и «NIR» составляющими, последовательно (не важно в каком порядке) нажимаем кнопки «RED» и «NIR». При этом открываются окна, позволяющие найти местоположения соответствующих этим снимкам графических файлов (рис.3).

Выбрав в этом окне соответствующие файлы, и нажимая на кнопку «Открыть», осуществляем ввод в компьютер снимки с «RED» и «NIR» составляющими. После чего снова открывается окно «Окно ввода исходных данных», которое уже будет иметь вид как на рис.4.

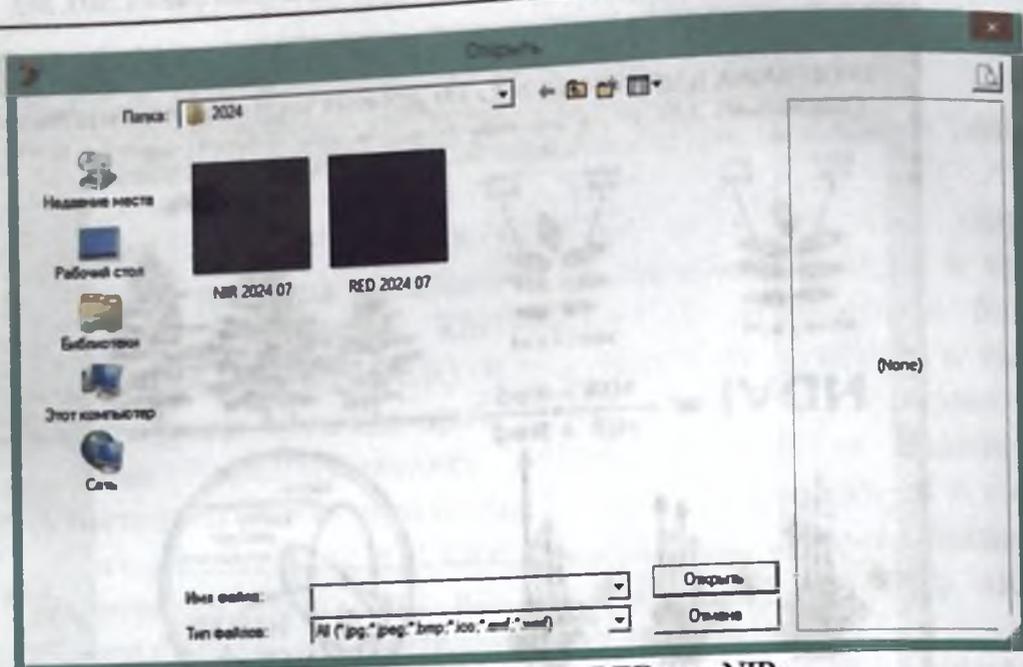


Рис.3 Окно выбор файла «RED» и «NIR».

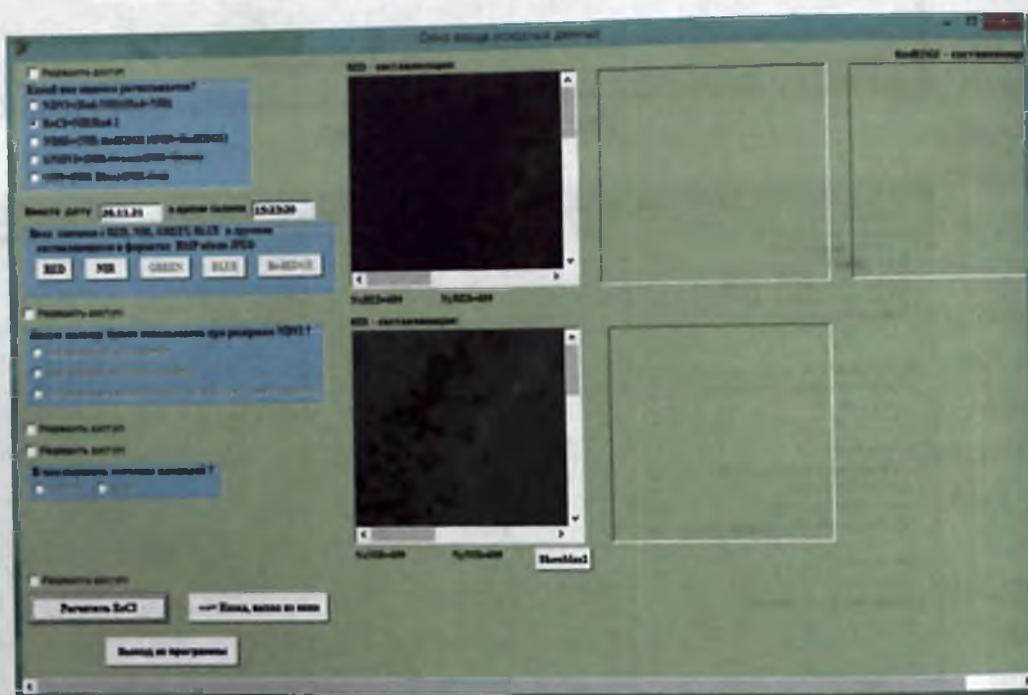


Рис.4 Окно ввода исходных данных

В этом положении:

- выберем палитру соответствия, в котором приводятся отдельные интервалы, на которые делится весь диапазон возможных значений индексов, и соответствующие им цвета окраски, которыми будет окрашиваться участки покрова, в зависимости от того, какому интервалу соответствует значение их индексов;
- выбираем единицу измерения площадей;
- нажимаем кнопку «Расчитать ReCL», после чего откроется новое окно.

Это окно, как это будет видно, является «дружественным». После последовательного выполнения действий, предложенных в окне, это окно примет следующий вид (рис.5),

в котором видим:

- 1) результаты расчёта индексов;
- 2) сегментацию с раскраской в соответствии со значениями индексов;
- 3) таблицу, в которой приводятся использованная палитра соответствия и значения площадей сегментов.

Кнопка ShowMax4 переназначен для показа изображении развернутой форме.

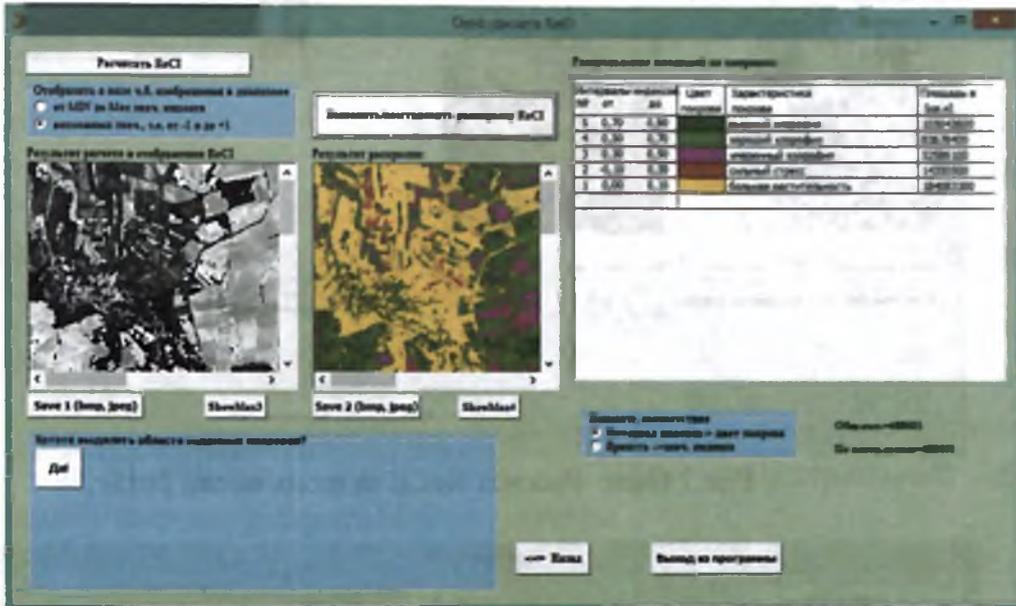


Рис.5 Окно Расчет ReCL за май месяц 2015г.

Программа позволяет отдельно выделить одно или несколько участков с соответствующих выбранному цвету окраски. Ниже приводится картина, в который выделены участки окрашенные темно-зеленым и красным цветами, т.е. участки с высоким уровнем хлорофилла и сильным стрессом (рис.6).

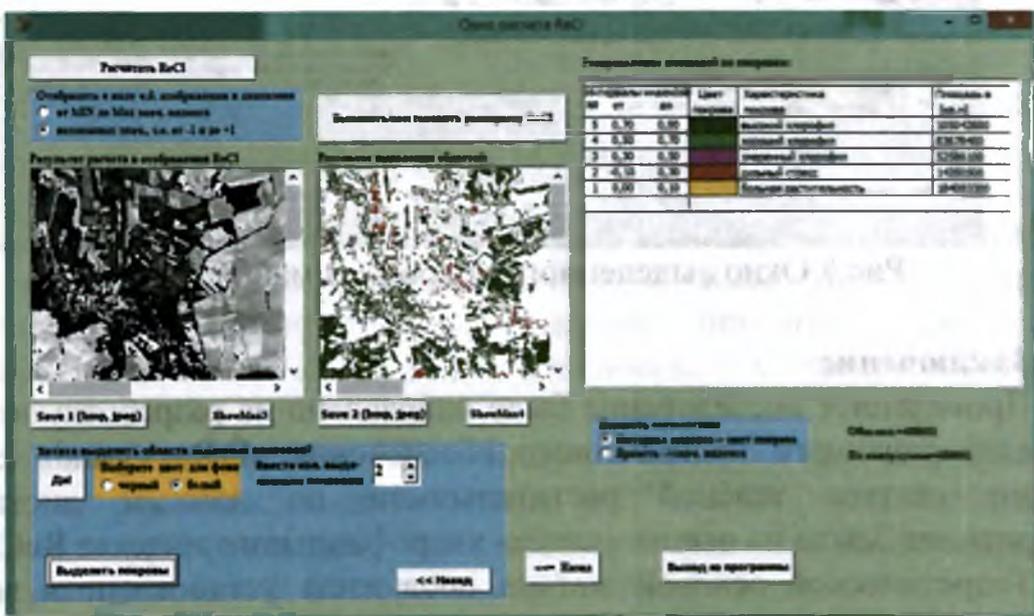


Рис.6 Окно выделенного покрова за май месяц 2015г.

Следует отметить, приведенные результаты соответствует снимку выбранного участка в местности, расположенной на северо-западе города Кара-Кола Иссык-Кульской области за май месяц 2015 года. Ниже приводится аналогичные результаты и за июнь месяц того же года (рис.7).

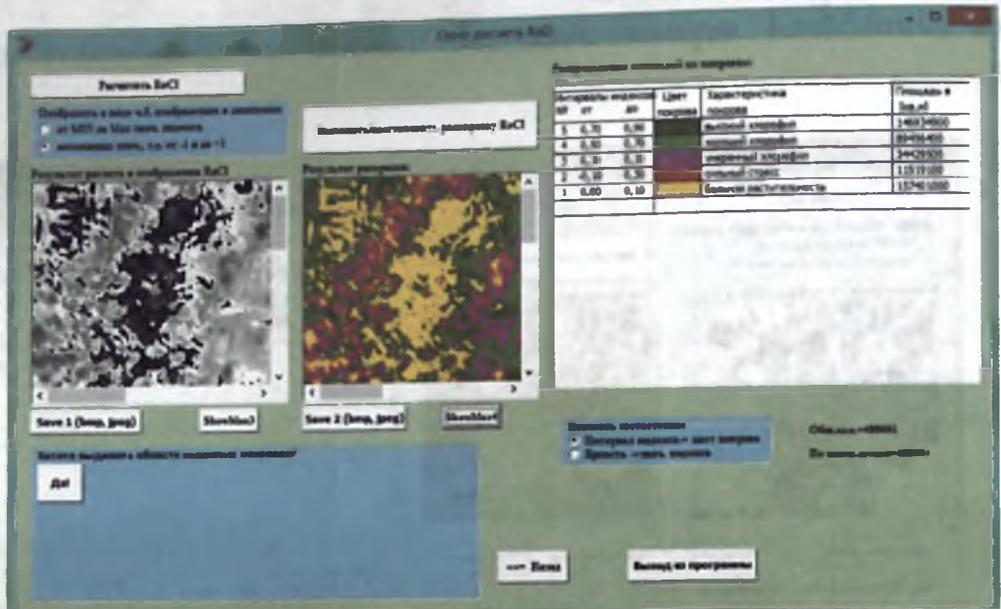


Рис.7 Окно Расчет ReCL за июнь месяц 2015г.

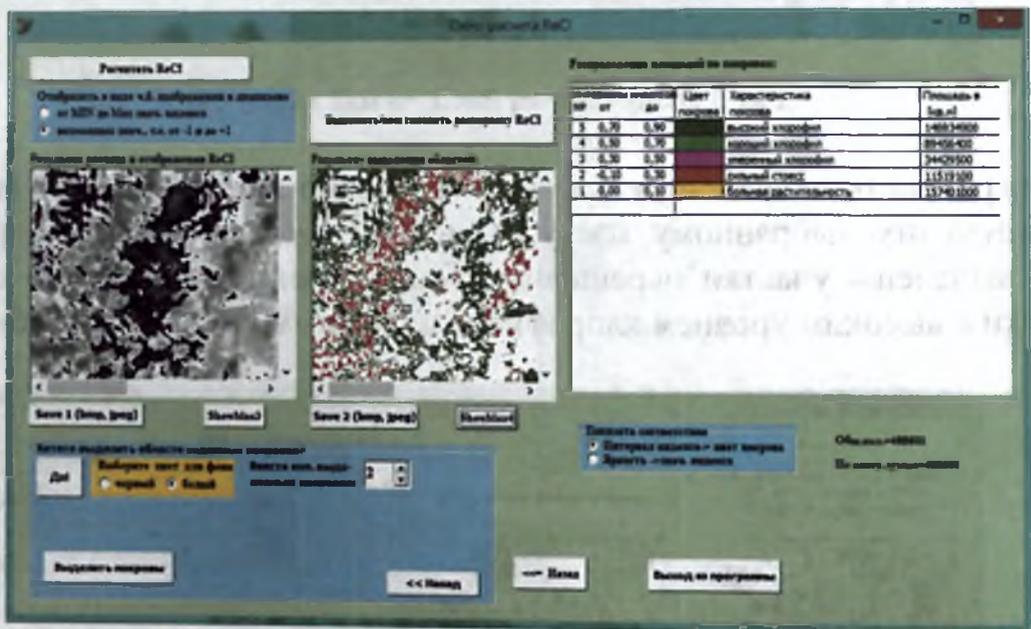


Рис.8 Окно выделенного покрова за май месяц 2015г.

Заключение

Проведённое исследование было направлено на разработку и апробацию специализированного программного обеспечения «PrRasVgtInd» для оценки азотного статуса зелёной растительности по данным дистанционного зондирования Земли на основе расчёта хлорофилльного индекса ReCL.

Теоретической основой метода послужила установленная зависимость между содержанием хлорофилла в листовой массе и уровнем усвоенного растениями азота. Используемый вегетационный индекс ReCL, рассчитываемый по соотношению спектральной яркости в ближнем

инфракрасном (740-790 нм) и красном (670-680 нм) диапазонах, продемонстрировал высокую чувствительность к концентрации хлорофилла, что подтверждает его эффективность для косвенной оценки азотного питания.

Разработанный программный продукт устраняет ключевые недостатки существующих геоинформационных систем (таких как ArcGIS, QGIS, ENVI), а именно: высокую стоимость, сложность освоения и отсутствие поддержки ряда специализированных индексов. Программа предоставляет удобный интерфейс для автоматизированного расчёта индексов, визуализации результатов и сегментации растительного покрова по уровням содержания хлорофилла, что позволяет оперативно выявлять зоны с признаками азотного дефицита.

Практическая апробация методики на примере анализа многозональных снимков участка в Иссык-Кульской области подтвердила работоспособность подхода. Программа успешно идентифицировала участки растительности с различным азотным статусом, что иллюстрируется результатами сегментации и количественной оценкой площадей зон с хлорозом.

Список литературы:

1. А.А.Тронин, «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2011.Т.8.№4.С.23-26 «Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии»
2. Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лупян Е.А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, 16(3): 11-23
3. Кирсанов А.Д., Комаров А.А. Использование индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 143–155.
4. Матвеев Д. А., Якушев В. В., Якушев В. П. Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 79–86.
5. Якушев В. П., Канаш Е. В., Русаков Д. В. и др. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 1. С. 98–112.
6. Степанов А.С., Фомина Е.А., Илларионова Л.В. и др. Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 6. С. 1473–1498.
7. Черепанов А.С. Вегетационные индексы: справочные материалы, Геоматика.–2011, №2, С. 98-102.

8. Тультемирова Г.У. Использование технологии дистанционного зондирования в геологических исследованиях и выявлении минеральных ресурсов в Кыргызской Республике // Известия КГТУ им. И.Раззакова 48/2017. С.95-100

УДК 666.3.017-65.549.632/666.3.049.774

НИТРИД КРЕМНИЙ, ЛЕГИРОВАННЫЙ КАРБИДОМ КРЕМНИЯ И ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

¹Ласанху К. А., ²Кыдыралиев Э. М.

¹Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265-а,

e-mail: MegaCom17@mail.ru

²Кыргызский авиационный институт им. И. Абдраимова

e-mail: Kvdvraliev_e@mail.ru

Аннотация. В статье синтезированные опытные образцы на основе нитрида кремния НК легированием оксида алюминия (ОА) и карбида кремния (КК). Влияние легирования компонентов ОА и КК на физико-химические и физико-механические свойства полученных нитридо-кремниевых керамических материалов после реакционного спекания в электропечи в среде газообразного чистого азота.

Ключевые слова: оксид алюминия, карбид кремний, нитрид кремний, реакционное спекание, газообразный азот, порошки.

SILICON NITRIDE ALLOYED WITH SILICON CARBIDE AND ALUMINUM OXIDE

Lasankhu K. A. Kydyraliev E. M.

¹Institute of physics named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences, Bishkek, 265-a Chui Avenue, the Kyrgyz Republic

e-mail: MegaCom17@mail.ru

²Kyrgyz Aviation Institute named after. I. Abdraimova

e-mail: Kydyraliev_e@mail.ru

Abstract: The article presents synthesized experimental samples based on silicon nitride NC by alloying aluminum oxide (AO) and silicon carbide (SC). The effect of alloying components AO and SC on the physicochemical and physicomechanical properties of the obtained nitride-silicon ceramic materials after reaction sintering in an electric furnace in a gaseous pure nitrogen environment.

Keywords: aluminum oxide, silicon carbide, silicon nitride, reaction sintering, nitrogen gas, powders.

Технология получения керамических материалов на основе рационально-спеченного нитрита кремния (Si_3N_4) заключается в азотирование нано- и ультрадисперсных формированных различными методами порошков кремния в среде газообразного азота при температуре от 1500 до 1700К в процессе

которого порошок кремния при взаимодействии с азотом превращаются в различную модификацию Si_3N_4 .

В лаборатории «Порошковых материалов» Института физики Национальной академии наук Кыргызской Республики разработали метод получения нитридо-кремниевой керамики, которая состоит из следующих технологических операций рисунок 1 [1-4].

Целью исследования является изучения влияния ультрадисперсных порошков карбида кремния (SiC , КК) и оксида алюминия (Al_2O_3 , ОА) на физико-химические и физико-механические свойства нитридо-кремниевых композиционных материала.

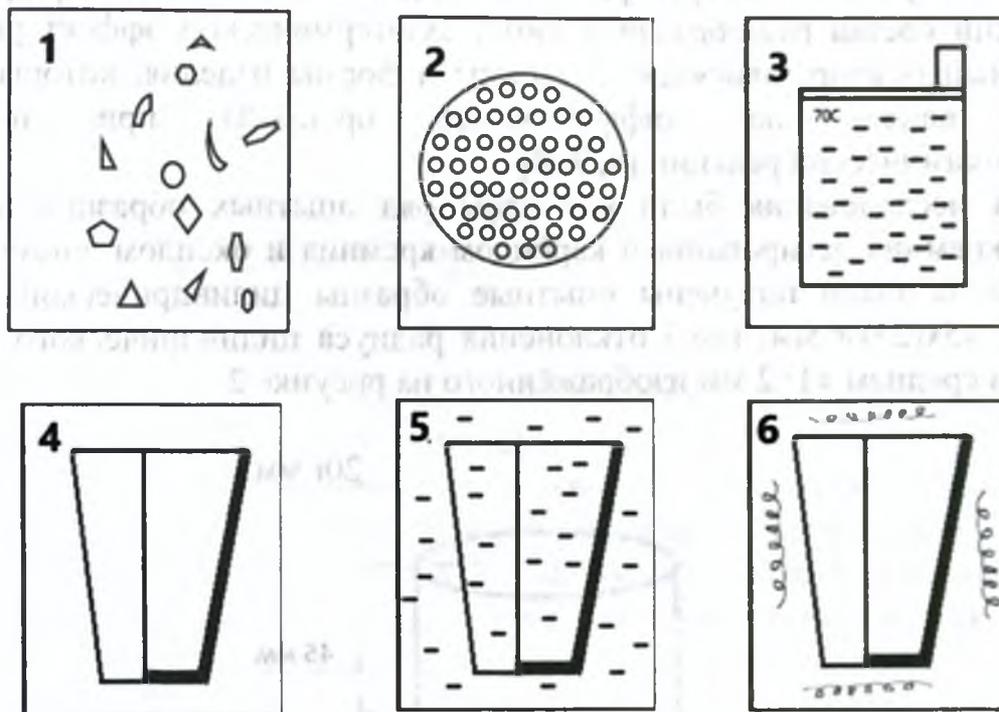


Рис. 1. Способ получения нитридо-кремниевых материалов легированный нано- и ультра порошками SiC и Al_2O_3 : 1-отбор сырья, 2-помол порошка (сырья) до требуемых размеров, 3-получения шликерной массы, 4-формовка изделия (шликерное литье), 5-предварительное удаления связки из изделия, 6-реакционное спекания нитридо-кремниевых опытного изделия.

Методика изготовления. Необходимо учитывать, что изготовление требуемой формы и размеров нитридо-кремниевых изделий легированного КК и ОА на основе $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ и $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ получают непосредственно в виде готового изделия, в связи с этим следует учитывать, что свойства опытных нитридо-кремниевых изделий, полученные при формовке изделия должны реализовываться в процессе их технологического изготовления (до спекания в электропечи). Впоследствии такого технологического процесса готовые изделия не требуют механической обработки. Такая технология дает возможность отсутствие усадки или увеличение размеров в процессе реакционного синтеза, поскольку увеличение объема полученного материала происходит за счёт заполнения внутренних пор заготовки всего объема, частично легированием порошков карбида кремния и оксида алюминия. При получении и изделий из порошков различного состава мы использовали метод

шликерное литье, которому отводится первое место [1, 4-6], с помощью данного метода можно получить требуемые формы изделия.

Кристаллохимическая реакция взаимодействия атома азота с компактной смесью порошков ультрадисперсного кремния и добавленного порошка КК и ОА имеет ряд особенностей и в значительной степени зависит от многих факторов способствующих данному процессу получения конечного изделия на основе нитрида кремния и легированием карбида кремния или оксида алюминия. Также на скорость реакции, образования нано-, ультра-микроструктуры и свойства нитридо-керамики влияет дисперсность, плотность, присутствие различных примесей в порошке, температура спекания, давления азота в камере-реакторе и химический состав газообразного азота, экзотермический эффект реакции, и масштабный фактор зависящий от массы и формы изделия, который в свою очередь влияет на диффузионные процессы при протекании кристаллохимической реакции [4, 7, 8].

Для исследования были получены ряд опытных образцов на основе нитрида кремния легированный карбидом кремния и оксидом алюминия. Для исследования были получены опытные образцы цилиндрической формы с размером $45 \times (2+i)$ мм, где i отклонения радиуса цилиндрического опытного образца, в среднем $\pm 1 \div 2$ мм изображённого на рисунке 2.

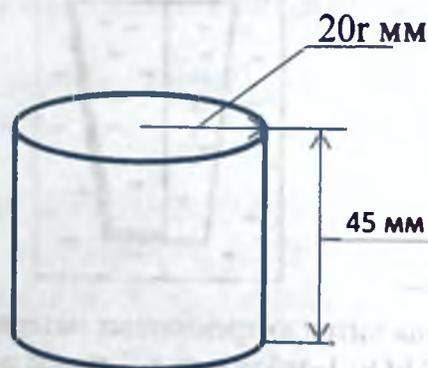


Рис. 2. Цилиндрические опытные образцы на основе нитрида кремния и легированием $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Целью исследовательской работы это изучения физико-механических и физико-химических свойств композиционной нитридо-кремниевой керамики легированный карбидом. В нитридо-кремниевые опытные образцы, полученные при реакционном спекании в газообразном азоте, добавлялись порошки SiC и Al_2O_3 с разным процентным содержанием шликерной массы, что указано в таблице 1 [6, 10].

Полученные опытные композиционные нитридо-кремниевые изделия легированные SiC или Al_2O_3 имели содержание от 0 до 10% порошка $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ по массе.

После получения опытных нитридо-кремниевых изделий была изучена термостойкость опытных изделий. Термостойкость нитридо-кремниевой материала является одним из важнейших качественных показателей, который известен на основе термостойкости определяется его область применения.

конкретных условиях, что способствует определению зависимости внешних влияющих факторов на эксплуатационные свойства. При эксплуатации нитридо-кремниевых керамических материалов в области высоких температур и резким изменением температуры в широком диапазоне в местах эксплуатации, появляются в изделии термические микронапряжения, которые могут быть разрушающими, если данные микронапряжения начнут коррелировать с температурным фактором.

Таблица 1 – Опытные нитридо-кремниевые образцы легированные SiC/ Al₂O₃

№ п/п	Состав образца	Количество примесей SiC, %	Количество примесей Al ₂ O ₃ , %
1	Si ₃ N ₄	0	0
2	Si ₃ N ₄	0,5	0,5
3	Si ₃ N ₄	1,0	1,0
4	Si ₃ N ₄	2,0	2,0
5	Si ₃ N ₄	5	5
6	Si ₃ N ₄	10,0	10,0

Чтобы определить зависимость корреляции значения возникающих термических напряжений от температуры, которое приводит к разрушению всего изделия, мы рассчитывали количественную меру сопротивления термического напряжения композиционного нитридо-кремниевого опытного изделия легированного карбидом кремния. Количественную меру сопротивления термического напряжения, которая считается максимальной разность температур между изотермическими поверхностями, при котором происходит полное разрушение композиционного нитридо-кремниевого опытного образца при определенных условиях теплопередачи. При разрушении композиционного нитридо-кремниевого опытного образца значения термического напряжения, так же является в данном случае предел прочности материала. Для определения максимальной разности температур, которое приводит к разрушению композиционного нитридо-кремниевого изделия рассчитывали по следующей математической формуле 1:

$$\Delta t_{max} = R * S \quad (1)$$

где Δt_{max} – максимальная разность температуры между изотермическими поверхностями;

R – сопротивления изделия термическому напряжению;

S – факторы геометрической формы изделия.

Сопротивления композиционного нитридо-кремниевого опытного изделия термическое напряжение R зависит от условий протекания нагрева и охлаждения, а так же от свойств изделия в целом. Такие физико-механические и химические свойства нитридо-кремниевых материалов как геометрическая

форма, размеры и условия теплопередачи определяет время образования трещин, разрушений в изделии [9].

Для композиционных нитридо-кремниевых опытных изделий термостойкость определяли методом последовательных теплосмен (циклов) путем нагрева 800-1550°C до образования на поверхности микротрещин и разрушений. Для термического нагрева использовали электропечь марки СНВЭ-12.5/14,5-Н1 (Редмет 30, Россия) с графитовыми нагревателями.

Композиционные нитридо-кремниевые опытные образцы нагревались в интервале температур от 1500К до 1700К с температурным шагом в 100К. Каждые 100К производилось ее охлаждения в холодной воде. После термического отжига каждый композиционный нитридо-кремниевый образец проходил дополнительное измерение по изменению рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа на определение и наличия микротрещин в разрешении на поверхности опытного нитридо-кремниевого изделия. Критерием определения термической стойкости служило количество теплосмен до появления микротрещин или разрушения опытного образца. Полученные экспериментальные данные по термостойкости приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Термическая стойкость нитридо-кремниевого изделия легированного карбидом кремнием SiC/Al₂O₃

№ п/п	Температура нагрева, К	Количество теплосмен (Критерия термостойкости)	Изменения поверхности (рельефа) изделия Si ₃ N ₄ -SiC	Изменения поверхности (рельефа) изделия Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃
1	1100	10	Изменения нет	Изменения нет
2	1200	10	Изменения нет	Изменения нет
3	1300	10	Изменения нет	Изменения нет
4	1400	10	Изменения нет	Изменения нет
5	1500 (1600)	8-10	<i>опытный образец с 10 % (SiC) образовалось мелкие трещины</i>	Изменения нет
6	1600	10	<i>опытный образец с 10 % (SiC) образовалось мелкие трещины</i>	Изменения нет
7	1700	10	Изменения нет	Изменения нет
8	1800	10	Изменения нет	Изменения нет

Как видно из таблицы 2 испытание композиционных нитридо-кремниевых опытных образцов на термостойкость до температуры 1800К показали себя довольно хорошо. Причина появления микротрещины при температуре между 1500-1600К у опытного образца осталось непонятным, так как дальнейшей деструкции композиционного нитридо-кремниевого опытного образца легированного SiC не происходило, так же и до данной температуры. Для полной информации будут проведены дополнительные методы исследования.

Опытные образцы легированные оксидом алюминия такие процессы – трещины или сколы не происходило на протяжении всего испытания опытных образцов.

Заключение. Разработан комплексный метод определения термомеханических свойств полученных нитридо-кремниевых изделий легированного порошком SiC или Al_2O_3 . Полученные опытные композиционные нитридо-кремниевые материалы легированные SiC/ Al_2O_3 на основе шламовых отходов порошка кремния реакционно-синтезированных в среде чистого газообразного азота обладают высокими конкурентоспособными физическими свойствами и термической стойкостью до 1800K и более, без каких либо критичных изменений и свойств образца.

Для полной картины физико-механических и физико-химических свойств опытных образцов требуется дополнительных исследований различными методами, что будет описаны в следующих научно-исследовательских работах.

Вторая партия образцов легированный оксидом алюминия Al_2O_3 имеют более удовлетворительные экспериментальные результаты, что требует дальнейшего исследования.

Причины возникающие при температуре 1500-1600 K в образцах образуется мелкие трещинки, что с повышением температуры просто исчезают это связано с тем что в процессе образуется в зоне фаза оксид кремния которая положительно влияет на структуру нитрид кремний-карбид кремний происходит процесс восстановления.

Добавления оксида алюминия в структуру нитрида кремния увеличивает межатомные взаимодействия при реакционном спекании опытного образца нитрид кремний и оксида кремния как будто как проводник образования прочных химических связей, что в свою очередь увеличивается прочные и физико-химические, физико-механические свойства конечного изделия.

Сам процесс влияние добавок карбида кремния и оксида кремния на структуру нитрида кремния подробно будет изучаться в следующих научно-исследовательских работах и подробно описано механизм.

Список литературы

1. Макаров В. П., Касмамытов Н.К., Ласанху К. А. Пат. № 1766 KG. Способ получения керамического композиционного материала из отходов кремниевого производства // – Заявка № 201440066.1; Приоритет 18.06.2014; Зарегистрировано 31.07.2015. <http://base.patent.kg/iz.php?action=search>
2. Ласанху, К. А., Касмамытов Н. К. Влияние графитового волокна на фазовый состав. Рентгеноструктурный анализ // Интеграция наук. – М., 2017. – Вып. 7 (11). – С. 59–63. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29988206>
3. Ласанху, К. А. Физико-химические свойства композиционных материалов легированных графитовым волокном // Современ. науч. исслед. и разработки. – Астрахань, 2017. – Вып. № 5 (13). – С. 197–202. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29444570>

4. Ласанху, К. А. Нитридокремниевые фазы в керамических материалах // Физика / НАН КР. – Бишкек, 2018. – № 1. – С. 110–115.
5. Lasankhu, K. A., Kasmamytov N. K. Physical and chemical stability of ceramocompositions materials on the basis of waste of semiconductor production // Физика / НАН КР. – Бишкек, 2013. – № 3. – С. 28–35.
6. Ласанху, К. А. Касмамытов Н. К., Матяш И. В., Макаров В. П. Синтез опытных образцов Si_3N_4 с добавлением порошка Al_2O_3 // Журнал физика / НАН КР. – Бишкек, 2024. – № 1. – С. 3-9.
7. Кайрыев, Н. Ж., Касмамытов Н. К., Ласанху К. А. Модельные исследования азотирование порошков кремния методом реакционного спекания // Сборник тр. XI Исык-Кул. междунар. школы-конф. по радиац. физике твердого тела (SCORPh-2015). – Бишкек, 2015. – С. 135–140.
8. Кайрыев, Н. Ж., Касмамытов Н. К., Ласанху К. А. Расчетные характеристики нагрева и процесса реакционного спекания кремния в среде азота методом численного анализа // Сборник тр. XI Исык-Кул. междунар. школы-конф. по радиац. физике твердого тела (SCORPh-2015). – Бишкек, 2015. – С. 140–150.
9. Баринов С. М., Иванов Д. А., Фомина Г. А. Термостойкость и характеристики термостойкости алюмооксидного материала со слоистогранульной структурой // Огнеупоры. – 1996. №3. – С. 9-12.
10. Ласанху, К. А. Касмамытов Н. К., Матяш И. В. Нитрид кремний, легированный карбидом кремнием // Журнал физика / НАН КР. – Бишкек, 2024. – № 2. – С. 3-9.

УДК 621.48(572.2)

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ДОЖДЕВАНИЯ ГОРНЫХ ПАСТБИЩ

Дуйшеев Т.

Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265-а

Аннотация: В этой работе представлены теоретические положения для определения размеров конструкции мелкодисперсного дождевателя.

Ключевые слова: мелкодисперсный дождь (МДД), дождеватель, распылитель, капли дождя, скорость ветра.

DEVELOPMENT OF A FINE-MISPERAGE IRRIGATION SYSTEM FOR MOUNTAIN PASTELANDS

T. Duysheev

Z. Jeenbaev Institute of Physics, National Academy of Sciences, 265-a Chui Avenue, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic

Abstract: This paper presents theoretical principles for sizing a fine-mist sprinkler.

Keywords: fine-mist rain (FMR), sprinkler, atomizer, raindrop, wind speed.

Основы динамических взаимодействий капель дождя с окружающим воздухом приведены в [1]. Из-за малого диаметра капля мелкодисперсного дождя МДД (0,1 – 0,6мм) при их падении скорость воздушного потока оказывает на нее сильное воздействие. Это используется в рассмотрении ранее стационарных системах МДД для распределения МДД («климатизирующего дождя») по орошаемому участку [2]. Однако вследствие того, что в этих системах МДД образуется на высоте 10–20м, основной объем поданной распылителями МДД влаги испаряется в процессе полёта каплей, оказывая тем самым эффективное климатизирующее воздействие (климатизирующая составляющая МДД) на приземный слой воздуха орошаемого участка. В нашем случае необходимо повысить увлажнительный эффект МДД (увлажнительная составляющая МДД). Для этого необходимо понизить уровень установки распылителей МДД, сохранив при этом принцип использования энергии потока воздуха для переноса каплей в горизонтальном направлении.

Определим дальность переноса капли в зависимости от высоты ее образования и скорости действующего ветра. При выводе формулы примем допущение, что после вылета из распылителя, установленного конусом распыла вертикально вверх, и потери кинетической энергии напора каждая капля начинает независимо парашютировать под действием двух взаимно перпендикулярных сил: силы тяжести и силы действующего ветра, обуславливающей горизонтальную составляющую переноса капли со скоростью ветра.

Скорость установившегося падения капли в воздухе при $0,08 < d < 1,2$ мм пропорциональна ее диаметру (1).

$$V_k = dk \text{ [м/сек]} \quad (1)$$

где: d – диаметр капли, мм,
 k – $4c^{-1}$; коэффициент парусности.

При вылете из распылителя, установленного на высоте H над уровнем земли, капля под действием рабочего напора поднимается дополнительно еще на высоту h , с которой она в дальнейшем парашютирует. Высоту h можно определить следующим образом. Поступательная скорость капли при вылете из распылителя равна [3]

$$V = \mu\sqrt{2p/\rho} \text{ [м/с]} \quad (2)$$

где: μ - коэффициент расхода распылителя;
 p – рабочее давление, н/м²
 ρ - плотность воды при 20 град.= 1000кг/м³

Начальное значение вертикальной составляющей скорости вылетевшей из распылителя капли будет:

$$V_B = V \cos \alpha \quad (3)$$

где: α – половина угла конуса распыла, град.;

Вверх капля движется равнозамедленно до полной остановки. Поэтому согласно известным зависимостям:

$$V_B = gt \quad (4)$$

Где: g – ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$;

t – время подъема капли, с.

Отсюда:

$$t = \frac{V_B}{g} \quad (5)$$

Высота подъема капли находится по известному закону физики:

$$h = V_B t - \frac{gt^2}{2} \quad (6)$$

Подставляя в выражение (5) зависимость (4) находим:

$$h = \frac{V_B^2}{g} - \frac{gV_B^2}{2g^2} = \frac{V_B^2}{2g}$$

С учетом выражений (2) и (3) высота h будет равна:

$$h = \frac{V^2 \cos^2 \alpha}{2g} = \frac{\mu^2 2P \cos^2 \alpha}{2g\rho} = \frac{\mu^2 P \cos^2 \alpha}{g\rho} \quad (7)$$

Подставляя значения g и ρ , и учитывая требуемую размерность, выражение (7) приобретает вид:

$$h = 100P\mu^2 \cos^2 \alpha \quad (8)$$

где: h – высота выброса капли из распылителя, м;

P – рабочее давление, МПа;

α – половина угла конуса распыла, град.

Капля начинает парашютировать с высоты установки распылителя (H) плюс высота выброса капли из распылителя (h). С этой высоты капля будет падать в течение времени:

$$\tau = \frac{H+h}{V_k} \quad (9)$$

где: V_k – скорость установившегося падения капли.

За время падения за счет энергии ветра капля переносится в горизонтальном направлении на расстояние:

$$L = \tau V_B$$

или с учетом выражений (1) и (9) :

$$L = \frac{(H+h)V_B}{kd} \quad (10)$$

где: H – высота установки распылителя, м;
 h – высота выброса капли из распылителя, м;
 V_B – скорость ветра, м/с;
 d – диаметр капли, м.;
 k – 4000 с^{-1} .

При установке на одном уровне более одного распылителя необходимо учесть, что пересечение их конусов распыла приводит к соударению капель, образованных соседними распылителями, и последующему их укрупнению за счет слияния (3). Это нежелательно. Поэтому необходимо определить зависимость минимально допустимого расстояния между соседними распылителями от их характеристик. Из простых геометрических построений это расстояние определится:

$$L = 2htg\alpha \quad [м] \quad (11)$$

где: h – высота выброса капли из распылителя с конусом распыла, направленным вертикально вверх, м.;
 L – половина угла конуса распыла, град.

Распылитель образует капли различных диаметров. Поэтому с определенной высоты при определенной скорости ветра эти капли переносятся на разное расстояние. При использовании выражения (10) можно задаться $(H+h)$ или L . Рассмотрим на примере использования полученных выражений (8), (10) и (11).

Необходимо рассчитать геометрические характеристики дождевателя МДД для полива при средней скорости ветра 5 м/с. Рабочее давление 0,5 МПа. Максимальная дальность полива $L_{\max} = 30\text{м}$.

$$H + h = \frac{Lkd}{V_B} \quad \text{или} \quad H = \frac{kdL}{V_B} - h \quad (12)$$

Необходимо определить h . Используя выводы, изложенные в [3] находим, что коэффициент расхода выбранного распылителя $\mu=0,227$:

$$h = 98 * 0.5 * (0.227)^2 + \text{Cos}^2 55^\circ = 98 * 0.5 * 0.051 * 0.33 = 0.82 \quad [м]$$

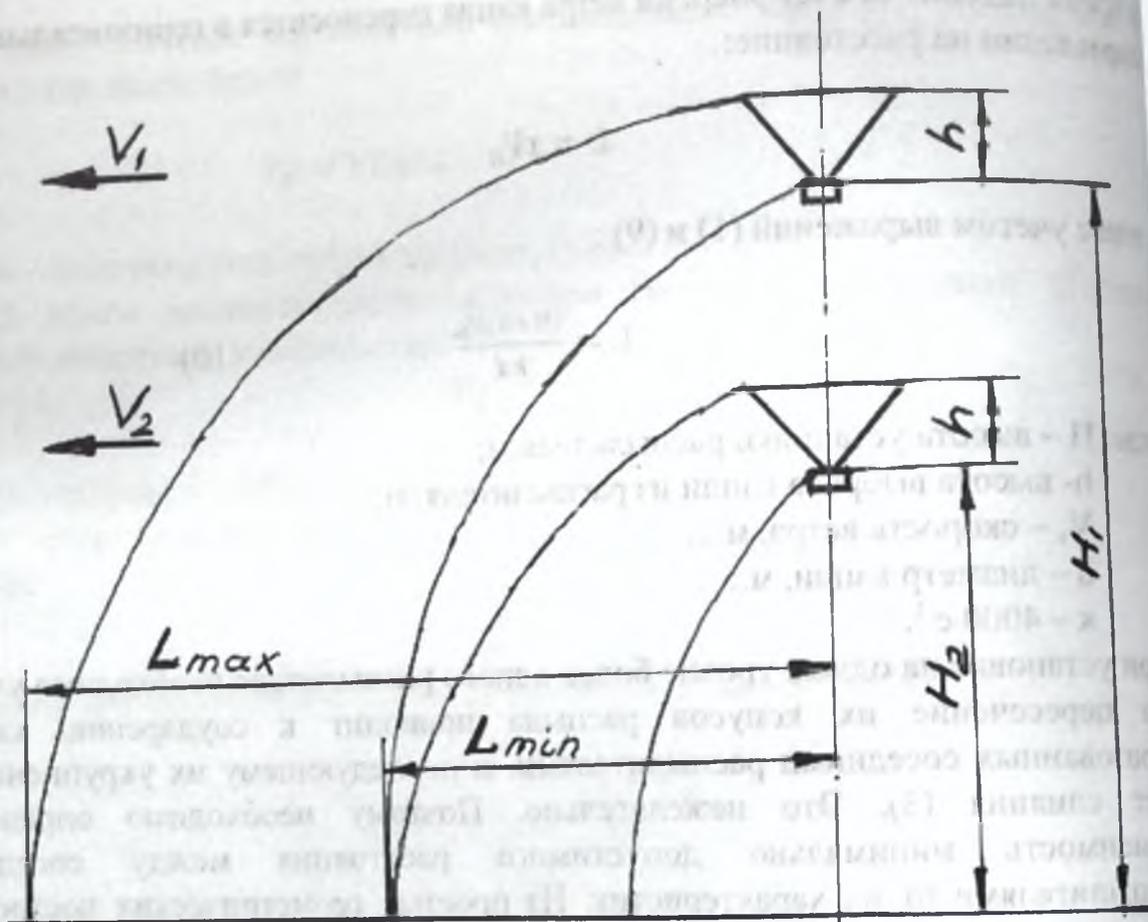


Рис.1. Схема для расчета высоты установки распылителей МДД над орошаемым участком.

Схема расчета уровней установки распылителей приведена на рис.1. Выбранный тип распылителя обеспечивает массовый медианный диаметр 0,34мм и согласно данным, изложенным в [4] образует капли диаметром от 0,1 до 0,8 мм. Капли диаметром 0,1 мм, а капли диаметром 0,5 – 0,8 мм составляет менее 5% [1] поэтому в расчете примем, что $d_{min}=0,2мм$ и $d_{max}=0,5мм$. Используя выражение (12), заданные условия и полученное значение определим уровни установки распылителей, учитывая, что образуемая им влага должна выпадать таким образом, чтобы перекрыть расстояние L_{max} . Необходимо учесть, что капли меньшего диаметра дальше переносятся ветром:

$$H_1 = \frac{kd_{min} L_{max}}{V_{в1}} - h = \frac{4000 \cdot 0,0002 \cdot 30}{5} - 0,82 = 4,7 \quad [м]$$

От распылителя, установленного на этом уровне капли d_{max} улетят:

$$L_{min} = \frac{(H_1+h)V_{в1}}{kd_{max}} = \frac{(4,7+0,82) \cdot 5}{4000 \cdot 0,0005} = 13,8 \quad [м]$$

Принимаем, что полученное значение L_{min} является максимальной дальностью переноса капель от распылителя МДД, установленного на более низком уровне H_2 . Исходя из этого и учитывая градиент скорости ветра на высоте ($V_{в2}=2,5-3,0$ м/с) находим этот уровень:

$$H_2 = \frac{kd_{min} L_{min}}{V_{в2}} - h = \frac{4000 \cdot 0,0002 \cdot 13,8}{2,6} - 0,82 = 3,12 \quad [\text{м}]$$

Капли диаметром 0,5 мм от этого распылителя упадут на расстоянии:

$$L = \frac{(H_2+h)V_{в1}}{kd_{max}} = \frac{(3,12+0,82) \cdot 2,8}{4000 \cdot 0,0005} = 5,5 \quad [\text{м}]$$

Чтобы расширить фронт действия МДД, установим на каждом уровне по два распылителя, с шагом, определенным из выражения:

$$L = 2htg\alpha = 2 \cdot 0,82 \cdot tg55^\circ = 2,34 \quad [\text{м}]$$

Самая простая конструкция МД – дождевателя представляет собой водопроводящий стояк с двумя поперечными патрубками с распылителями на концах. Геометрические размеры МД – дождевателя для примера расчета (рис.2.):

- высота стояка 4,7;
- уровни расположения поперечных патрубков с распылителями на концах 4,7 и 3,1 м.

Расчет конструкции МД – дождевателя сводится, к определению сечения труб стояка из условия прочности при аварийных ветровых нагрузках на него. Примем, что скорости ветра, соответствующие аварийным ветровым нагрузкам, составляют 10.20 и 30 м/с (что согласно классификации, изложенной в [6], соответствует свежему ветру и сильной буре). В основу расчета положены теоретические положения, изложенные в [7], известные методы прочностных расчетов [9] и полученный в примере размер поперечного сечения патрубка. Схема расчета приведена в на рис.2. Сила ветра действует по нормали к стояку л/с. Материал используемых в конструкции труб - дюралюминий с допусаемым напряжением $|\sigma|=14\text{кгс/мм}^2$.

Условные проходы труб стояка и патрубков определяем на условия обеспечения требуемого расхода [8]:

$$d \geq 1130 \sqrt{\frac{q}{V}} \quad [\text{мм}] \quad (13)$$

где: Q – требуемый расход, м³/с;

V – скорость тока 2,0 – 4м/с [8], принимаем 3м/с.

Условный проход стояка:

$$d \geq 1130 \sqrt{\frac{0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{3}} \geq 9,2 \quad [\text{мм}]$$

Условный проход патрубков:

$$d \geq 1130 \sqrt{\frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{3}} \geq 4,6 \quad [\text{мм}]$$

Сечение трубы поперечных патрубков, из условия максимального прогиба при заполнении их водой, равно 16мм при толщине стенки 2мм патрубка и двумя распылителями 1,3 кг.

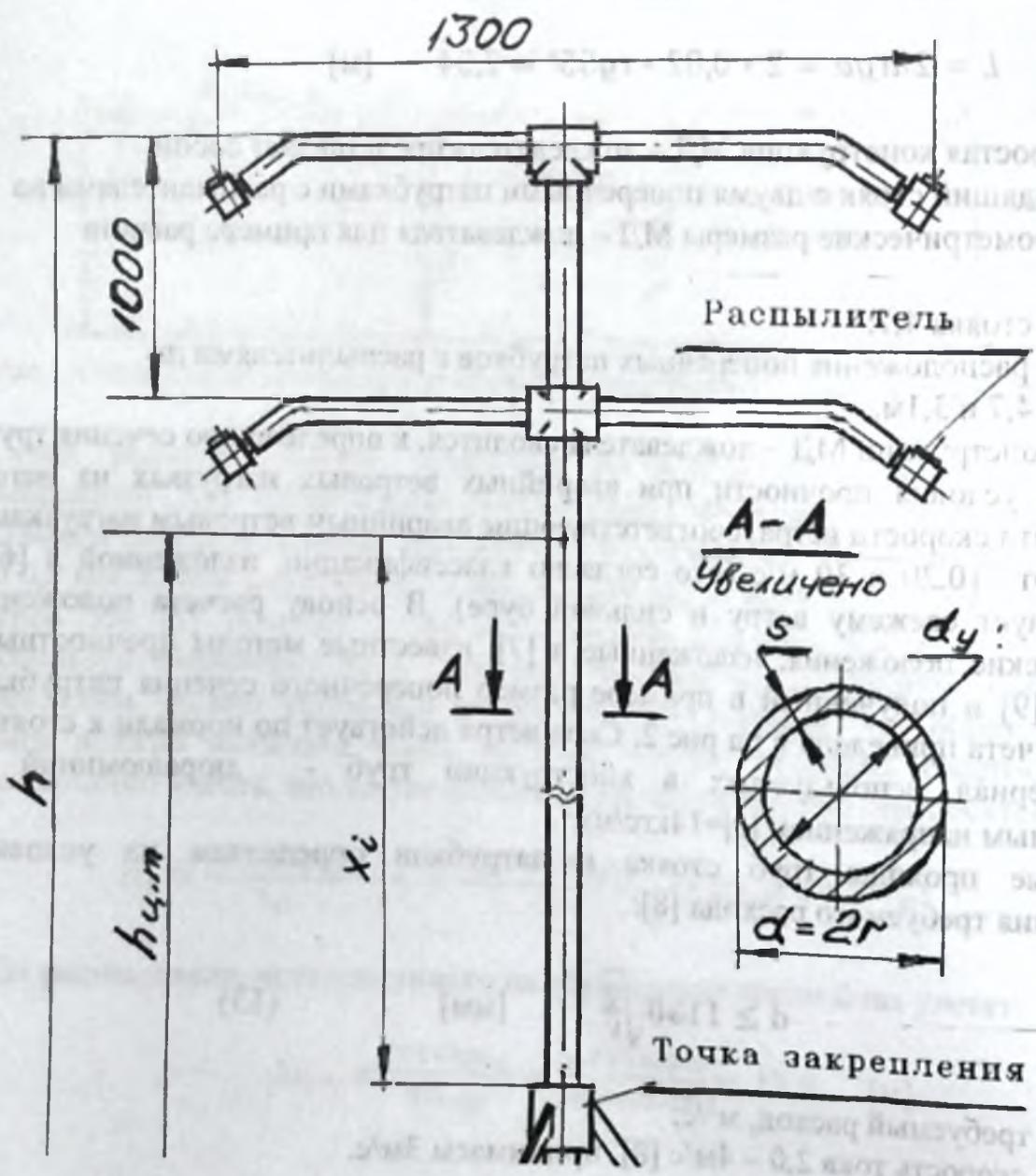


Рис. 2. Расчетная схема конструкции МДД дождевателя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны теоретические положения, с помощью которых определяются основные геометрические размеры мелкодисперсного дождевателя, для поливов в зонах с повышенными ветрами. Предложена методика выбора серийных дождевальных аппаратов для использования их в качестве мелкодисперсных дождевателей в безветренных зонах.

Стационарный характер использования установок МДД обеспечит, в дальнейшем, возможность автоматизации процессов орошения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуйшеев Т. Тонкое распыление жидкости без внешнего подвода энергии возмущения, Физика, 2015г. №2-с.89-93.
2. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков», Л.: Гидрометеиздат, 1979. с.143.
3. Осмонов М.М. «Стационарная система мелкодисперсного дождевания». Гидротехника и мелиорация, 1983, №10 с. 68-69.
4. Хавкин Ю.И. «Центробежные форсунки». Л.: Машиностроение, 1976. с.168.
5. Шамаев Г.П. «Механизация защиты сельхозкультур от вредителей», М.Колос, 1978, с.256.
6. Прох Л.З. Словарь ветров, Л: Гидрометеиздат, 1983.
7. Справочник по проектированию линий электропередач, М.: Энергия, 1980, с. 295.
8. Лебедев В.М. Дождевальные машины, Изд. 2-е М.: Машиностроение, 1977, с.256.
9. Сборник задач по сопротивлению материалов. Под ред. А.В. Александрова, М.: Стройиздат, 1977, с. 335.

УДК 538.9

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЁНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н. Сыдык уулу, А. Б. Кушманов

Институт физики им. академика Ж.Ж. Жеенбаева,

Национальная Академия наук, Чуй проспект 265-а, Кыргызская Республика

Аннотация. В работе рассматривается влияние контролируемой термической обработки в условиях высокого вакуума на структурные и морфологические характеристики тонкоплёночного аморфного кремния (a-Si), полученного методом магнетронного напыления. Показано, что при нагреве начиная примерно с 300°C в плёнке появляются кристаллитные зародыши, которые при дальнейшем повышении температуры и выдержке растут, коалесцируют и формируют направленную кристаллическую структуру с преимущественными ориентациями (111) и (100). Установлено, что контролируемая термическая обработка позволяет управлять степенью кристалличности и морфологией

поверхности, что имеет ключевое значение для формирования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) на основе кремния.

Ключевые слова: аморфный кремний, магнетронное напыление, термическая обработка, кристаллизация, дифракционные структуры.

CHANGES IN THE STRUCTURE OF AMORPHOUS SILICON FILMS UNDER THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT

N. Sydyk uulu, A. B. Kushmanov

Institute of Physics named after academician Zh.Zh. Zheenbaeva NAS KR,
Bishkek, Chui Avenue 265-a

Abstract. This work examines the effect of controlled thermal treatment under high-vacuum conditions on the structural and morphological characteristics of thin-film amorphous silicon (a-Si) obtained by magnetron sputtering. It is shown that when heating begins at approximately 300°C, crystalline nuclei appear in the film, which, with further temperature increase and annealing, grow, coalesce, and form an oriented crystalline structure with predominant orientations (111) and (100). It has been established that controlled thermal treatment makes it possible to regulate the degree of crystallinity and surface morphology, which is of key importance for the formation of silicon-based diffractive optical elements (DOEs).

Keywords: amorphous silicon, magnetron sputtering, thermal treatment, crystallization, diffraction structures

Введение. Аморфный кремний (a-Si) является одним из наиболее востребованных материалов современной оптоэлектроники и фотоники благодаря сочетанию уникальных электрических, оптических и технологических свойств [1–3]. Его использование охватывает широкий спектр областей — от солнечных элементов до тонкоплёночных транзисторов и дифракционных оптических структур [4, 5]. Как показано в работах [6,7], структура аморфного кремния существенно зависит от условий осаждения, содержания водорода, скорости охлаждения и последующей термической обработки. В работе [8,9] было продемонстрировано, что при лазерной записи дифракционных элементов в поверхностных слоях аморфного кремния протекают сложные морфологические и фазовые преобразования, сопровождающиеся частичной кристаллизацией. Однако точный механизм этого перехода оставался недостаточно изученным. В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния термической обработки на морфологические и структурные характеристики аморфных кремниевых плёнок, полученных методом магнетронного напыления, в условиях высокого вакуума.

Подготовка образцов аморфного кремния методом магнетронного напыления. Плёнки аморфного кремния были получены методом магнетронного распыления. Установка выполнена на базе турбомолекулярного насоса ТМН-500 и форвакуумного насоса. Перед напылением на магнетрон устанавливают катод-мишень, закрепляют подложку на держателе и откачивают вакуумную камеру до $\sim 10^{-4}$ Па, напускают рабочий газ аргон, обычное рабочее давление которого равно $(0,5 \div 5) \cdot 10^{-1}$ Па. На катод подают

отрицательное напряжение относительно анода. На индуктор подают от генератора переменное напряжение частотой 13,56 мГц. Осаждение проводилось на подложки из кварцевого стекла. Толщина плёнок варьировалась в пределах 0,1–2,0 мкм. Исследование морфологии поверхности проводилось с помощью электронного микроскопа BS-300, а структурные характеристики определялись рентгеновским дифрактометром.

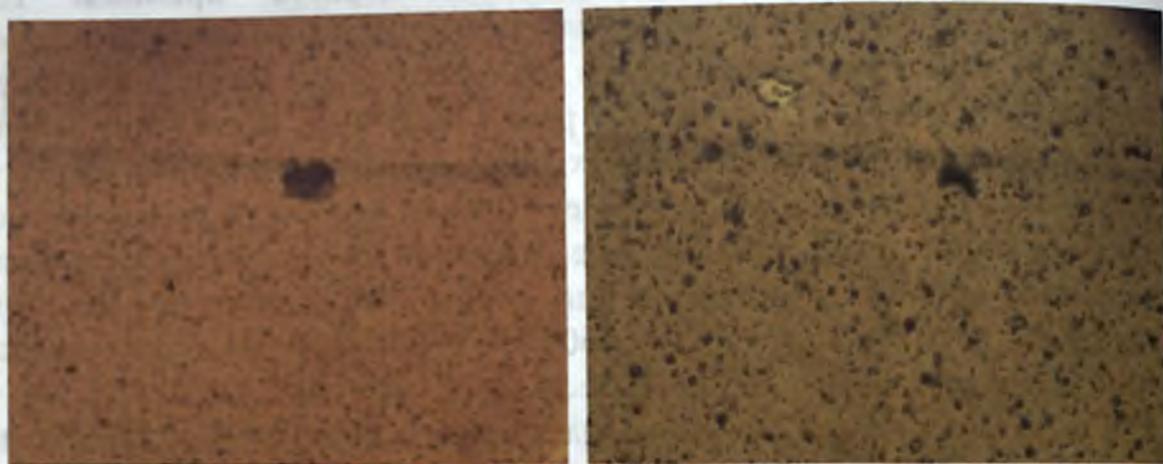
Термической обработка пленок аморфного кремния. Пленки аморфного кремния после проведения вышеперечисленных исследований подвергали тепловому воздействию в условиях вакуума во избежание процесса окисления кремния во время нагрева. Методика проведения теплового воздействия, с целью выявления механизма морфологической и структурной перестройки, заключалась в следующем. Пленки аморфного кремния помещали в нагревательное устройство, которое позволяло в условиях высокого вакуума производить контролируемый нагрев (время и температура). Температура изменялась ступенчато от 200°C до 600°C с выдержкой 1–10 минут на каждом этапе. Контроль температуры осуществлялся термопарой с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Контроль температуры и времени нагрева позволял наглядно проследить за изменениями, происходящими в пленках и получить температурные и временные параметры этого изменения, оптические, электронномикроскопические и рентгеноструктурные исследования позволили наглядно проследить за этими изменениями.



Рисунок 1. Фотография поверхности пленки аморфного кремния без тепловой обработки (x 500).

На рис.1. представлена картина поверхности исходной пленки аморфного кремния (без тепловой обработки). Исходная поверхность гладкая и однородная и такая однородность не изменяется до 250°C. После нагрева до 300°C и выдержке при этой температуре в течении 1 минуты начинают появляться зародыши новой фазы (рис.2а), которые растут с увеличением температуры нагрева (рис.2б). Дальнейшее увеличение температуры нагрева приводит к появлению направленных структурных образований, указывающих на рост новой фазы – кристаллической, с преимущественным направлением $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$. На рис.2б представлена поверхность аморфного кремния нагретой до 450°C. Наблюдается увеличение размеров центров кристаллизации, которые

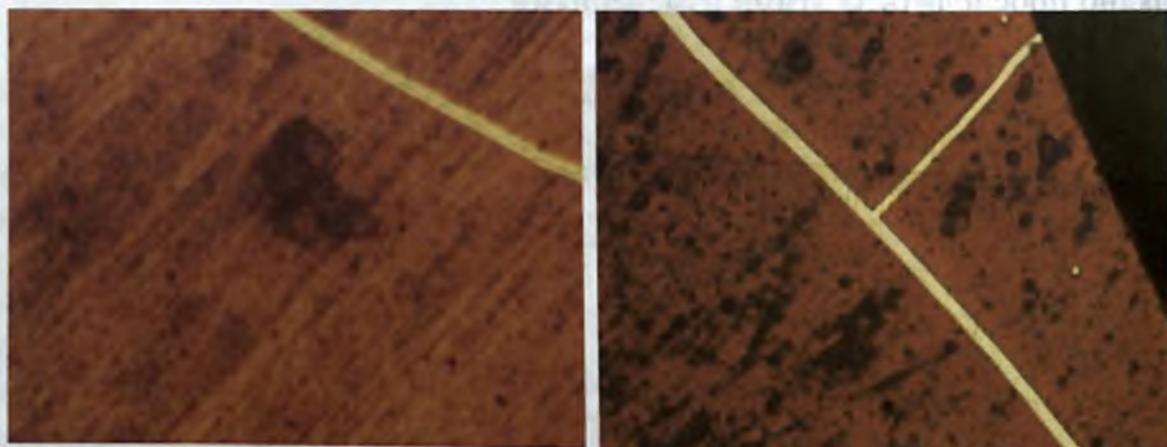
при повышении температуры нагрева (см.рис.3а и рис.3б) объединяются и создают направленные образования под углом 60° , что соответствует кристаллографическому направлению $\langle 111 \rangle$ в кубической структуре кремния. Эти процессы сопровождаются уменьшением свободной энергии и увеличением размеров нанокристаллов, что согласуется с данными Ткачёва и Дьяконова [10].



а)

б)

Рисунок 2. Фотография поверхности пленки аморфного кремния предварительно нагретой до 300°C (а) и 450°C (х 500).



а)

б)

Рисунок 3. Фотография поверхности пленки аморфного кремния, предварительно нагретой до 500°C (а) и 550°C (х 500).

Заключение. Таким образом, управляя температурой и временем нагрева можно контролировать структуру и свойства плёнки – добиваться нужного размера кристаллов и степени кристалличности. Полученные результаты имеют важное значение для управляемого формирования дифракционных оптических элементов, где структура кремния напрямую влияет на его оптические характеристики.

Список литературы

1. Street, R. A. Hydrogenated Amorphous Silicon / R. A. Street // - Cambridge University Press, 2005. - 432 p. ISBN 978-0-521-01934-7.

2. Lucovsky, G., Structural, optical, and electronic properties of hydrogenated amorphous silicon. / G. Lucovsky, et al. // Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 97–98, 1987, - P 1313–1320.
3. Powell, M. J. The physics of amorphous-silicon thin-film transistors / M. J. Powell // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1989. – Vol. 36, No. 12. – P. 2753–2763.
4. Hutley, M. C. Diffraction Gratings / M. C. Hutley // - Academic Press, 1982. – 330 p.
5. Бойко, В. С. Кристаллизация аморфного кремния при термическом воздействии / В. С. Бойко, Ю. В. Колосов // Поверхность, № 5 - 2008 – С. 67–72.
6. Горбатов, В. И. Механизмы структурных превращений в аморфных полупроводниках / В. И. Горбатов, А. В. Ключев // Физика твердого тела. - № 46(9) – 2004. - С. 1625–1631.
7. Киселёв, А. И. Исследование процессов кристаллизации тонких плёнок кремния / А. И. Киселёв, Н. И. Степанов // Журнал технической физики. - №79(3) - 2009. – С. 103–108.
8. Гочияев, В.З. Полутонная оптическая запись на пленках α -Si / В.З. Гочияев, В.П. Корольков, А.П. Соколов, В.П. Чернухин // Квантовая электроника. - № 11 - 1989. – С. 2343-2347
9. Kutanov, A. Laser writing system for direct laser recording of diffractive optical elements on α -Si film / A. Kutanov, A. Poleshcuk, V. Makarov, I. Snimshcikov, N. Sydyk uluu // Proc. Int. Seminar “Optics and Photonics”, Issyk-Kul, Kyrgyzstan, - 2012, - P. 89–92.
10. Ткачёв, С. В. Оптические свойства нанокристаллического кремния в зависимости от условий термообработки. / С. В. Ткачёв, П. В. Дьяконов // Оптика и спектроскопия. т. 116, № 116(2) -2014. - С 285–290.

УДК 666.65

ОБЗОР МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОГНЕУПОРНОЙ КЕРАМИКИ

Куйкеев А.Б. Касмамытов Н.К.

Институт физики имени академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, 720071, г.Бишкек, пр. Чуй 265-а

Аннотация. В статье рассматриваются сырьевая база Кыргызской Республики для производства огнеупорной керамики. Даны рекомендации по выбору сырья, составу масс и технологии производства огнеупорной керамики.

Ключевые слова: огнеупорные глины, каолинит, монтмориллонит.

OVERVIEW OF THE MINERAL RESOURCES OF THE KYRGYZ REPUBLIC FOR THE MANUFACTURE OF REFRACTORY CERAMICS

Kuikееv A.B., Kasmamytov N.K.

Academician J.Jeenbaev Institute of Physics of National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, Chui Ave 265-A.

Abstract: The raw material base of the Kyrgyz Republic is being considered for the production of refractory ceramics. Recommendations on the choice of raw materials, the composition of the masses and the technology of production of refractory ceramics are given.

Keywords: refractory clays, kaolinite, montmorillonite

Введение Огнеупоры — материалы и изделия преимущественно на основе минерального сырья, обладающие (огнеупорность 1580-1770 °С) высокоогнеупорные (1770-2000 °С) и высшей огнеупорности (свыше 2000°С).

Развитие технологий обработки глины и минералов, устойчивых к высоким температурам, привело к появлению огнеупорной керамики. Огнеупорные глины пользуются большим спросом на отечественном и мировом рынках сырья. Огнеупорные изделия находят широкое применение в производстве изделий строительной и тонкой керамики, огнеупорных материалов, цемента, глинистых растворов для буровых установок, в литейном производстве, в бумажной промышленности, для очистки нефтепродуктов и жиров, в производстве минеральных красок и т.д. Производство алюмосиликатных материалов в мире составляют 62 %, материалы из древесины - 23%, черные металлы -12 % и др [2].

Огнеупорные глины подразделяют на три минералогических типа: 1) Каолинитовые; 2)Монтмориллонит;3)Гидрослюдистые.Встречаются глины промежуточных типов, наиболее распространены каолинитовые глины [3,4].

Цель работы: Произвести обзор минерально-сырьевых ресурсов Кыргызской Республики для получения огнеупорной керамики по физико-химическому составу.

Главным требованием к огнеупорным материалам является их способности выдерживать высокую температуру свыше 1500 °С без расплавления и без деформации и разрушения, что является основным критерием их классификации. Как правило, к огнеупорам предъявляют дополнительно три важных требования по свойствам с учетом особенностей эксплуатационных условий: термостойкость - это термоустойчивость огнеупоров к резким перепадам температуры; химическая стойкость – это устойчивость к сопротивлению воздействия агрессивных сред, таких как шлаки, металлы и газы), ну и наконец механическая прочность (сопротивлению износу).

Для получения огнеупоров проводят тщательный анализ природного сырья на стадии обжига, когда протекают физико-химические процессы синтеза огнеупорного материала и формируются конечные свойства. В связи с этим важно знать информацию о составе и свойствах природного сырья, и

случае её отсутствия требуется изучить физико-технические и физико-химические характеристики огнеупорной глины.

В целях получения огнеупорных материалов из местного сырья необходимо изучить: сырьевые ресурсы; физико-химические свойства; химико-минералогический состав.

В настоящее время в Кыргызстане отсутствует собственное производство огнеупорных материалов, в связи с этим в данной работе была поставлена задача изучить местное сырье для производства огнеупорных материалов. Необходимо отметить, что комплексные исследования и разработка новых керамических составов для создания огнеупорных материалов являются важной задачей для импортозамещения огнеупорных материалов, которые на 100% завозятся из-за рубежа в Кыргызстан и экономического развития в целом Кыргызской Республики.

На настоящем этапе экономического развития Кыргызстана выделяется ряд приоритетных отраслей минерально-сырьевого комплекса, одной из которых является освоение и использование нерудных полезных ископаемых, которые имеются в достаточном количестве.

На Государственном балансе Кыргызской Республики минеральных ресурсов нерудных полезных ископаемых числится месторождения с разведанными или находящимися в состоянии активной разведки запасами минерального сырья, где освоение и использование которых способно значительно увеличить ВВП страны и налоговые поступления в государственный бюджет.

Для поднятия экономики и развития промышленного потенциала республики должна быть изучена местная сырьевая база и предложена система кластерного освоения имеющихся минеральных ресурсов, т.е. развития технологий добычи и переработки полезных ископаемых, транспортной доставки (организации дорог) и вплоть до организации производства огнеупорных материалов и их реализации.

На основе анализа научных публикаций на территории Кыргызской Республики зарегистрировано 568 месторождений глинистых пород, в том числе представленных 10 - месторождений огнеупорных глин и остальными лессовидными суглинками, камнеподобными глинами, глинистыми сланцами, которые представлены в таблице №1 [5, 6].

Таблица №1-Запасы нерудного сырья Кыргызской Республики

Наименование сырья	Единица измерения	Количество месторождений	Количество
Флюорит	тыс. тонн	4	2258
Гипс	тыс. тонн	11	40286
Каменная соль	тыс. тонн	6	32708
Облицовочный камень	тыс. тонн	15	44503

Строительный камень	тыс. тонн	26	101280
Бентонитовые глины	тыс. тонн	1	587
Гончарные глины	тыс. тонн	1	10
Кремнеземное сырье	тыс. тонн	8	24203
Пески строительные	тыс. тонн	11	73664
Серный колчедан	тыс. тонн	1	2547
Фарфоровый камень	тыс. тонн	1	9673
Каолин	тыс. тонн	1	1401
Волластонит	тыс. тонн	2	2904
Суглинки и глины для строительной керамики	тыс. тонн	105	254015
Известняк строительный	тыс. тонн	8	30998
Сырье для производства керамзита и аглопорита	тыс. тонн	5	110270
Сырье для производства минеральной ваты	тыс. тонн	1	1398
Песчано-гравийная смесь	тыс. тонн	126	501031
Известняки и доломиты	тыс. тонн	15	751060
Суглинки и глин.сланцы;	тыс. м ³	10	128142
- глиежи	тыс. тонн	3	15614
Барит	тыс. тонн	1	13

Обсуждение полученных результатов.

Выбор сырья для производства керамических огнеупоров – это многогранный процесс, требующий глубокого понимания химических и физических свойств используемых материалов. Основными компонентами, как правило, являются оксиды металлов, такие как Al_2O_3 , SiO_2 , MgO и Cr_2O_3 и других оксидных примесей, каждый из которых определенным образом вносит свой вклад в термическую стабильность, механическую прочность и химическую устойчивость конечного огнеупорного материала.

Как правило, на практике полукислые огнеупорные изделия изготавливают из огнеупорных глин или каолинов, отощенных шамотом из полукислых глин и

первичных каолинов, а также кварцевым песком, молотым кварцитом и кварцевым перлитом.

Одним из разновидностей огнеупорных материалов являются полукислые огнеупорные материалы – это алюмосиликатные огнеупоры, занимающие промежуточное положение между кислыми (кремнеземистыми) и нейтральными (шамотными) материалами. Их состав и свойства определяются соотношением основных компонентов – оксидов кремния и алюминия.

Основными компонентами полукислых огнеупоров являются: оксид кремния с содержанием до 70% и оксида алюминия с содержанием от 15 до 30%. В качестве сырья используют огнеупорные глины и каолины с высоким содержанием SiO_2 иногда с добавлением шамота.

Таким образом, полукислыми огнеупорами называют алюмосиликатные материалы, основными компонентами которых являются оксид алюминия- Al_2O_3 и диоксид кремния - SiO_2 . Они обладают высокой огнеупорностью (до 1580°C), прочностью при высоких температурах, но имеют среднюю химическую стойкость к щелочным средам [1].

К полукислым огнеупорам также относят шамотные и высокоглиноземистые огнеупоры или так называемые динасовые, муллитовые огнеупоры. Шамотные огнеупоры: изготавливаются из обожженной глины (шамота), состав которой включает оксид алюминия и диоксид кремния в различных пропорциях.

Например, оксид алюминия - Al_2O_3 является одним из фундаментальных компонентов огнеупоров, обеспечивающий высокую температуру плавления огнеупора (до 2050°C) и превосходную химическую стойкость. Высокоглиноземистые огнеупоры, содержащие более 90% Al_2O_3 , на практике используются в наиболее требовательных приложениях, таких как футеровка стен доменных печей и крекинг-установках. Микроструктура огнеупора на основе Al_2O_3 (более 90%) состоит из плотно упакованных зерен кристаллов Al_2O_3 , которые обеспечивают высокую прочность и устойчивость к термическому удару данных огнеупоров.

Кремнезем - SiO_2 , в виде кварца, тридимита или кристобалита, являются важными компонентами в огнеупорах и широко используются в них в качестве матрицы огнеупора, в которой распределяются другие оксидные компоненты. Кремнезем способствует формированию стеклофазы при достаточно высоких температурах обжига. Однако SiO_2 имеет более низкую температуру плавления (около 1710°C), чем Al_2O_3 , и его присутствие в больших количествах может снизить общую огнеупорность материала.

Оксид магния - MgO , известный как периклаз, является важным компонентом основных огнеупоров. MgO обладает высокой температурой плавления (около 2850°C) и хорошей устойчивостью к щелочным средам. Магнезиальные огнеупоры используются в цементных печах и сталеплавильных агрегатах, где требуется высокая устойчивость к химической коррозии.

Оксид хрома, Cr_2O_3 , добавляется в огнеупоры для повышения их стойкости к шлакам и агрессивным химическим условиям. Cr_2O_3 образует твердые

растворы с другими оксидами, такими как Al_2O_3 и MgO , улучшая их термическую стабильность и механическую прочность. Хромомагнезиальные огнеупоры широко применяются в черной металлургии.

В Кыргызской Республике находятся большое количество месторождений глинистых минералов в составе которых имеются монтмориллонит и каолинит а также бентонит.

В таблице №2 представлены данные некоторых видов алюмосиликатных огнеупоров с различными физико-химическими составами [1].

Полукислые изделия, изготовленные из первичных каолинов с природной примесью кварца, имеют огнеупорность не ниже $1710\text{ }^{\circ}C$, в этих изделиях содержится приблизительно 66...82 % SiO_2 и 15...28 % Al_2O_3 . Полукислые изделия, приготовленные из запесоченных глин, имеют огнеупорность 1610...1700 $^{\circ}C$.

Шамотные огнеупоры изготавливаются путем обжига огнеупорных глин или каолинов с отощением их шамотом или непластичной глинистой породой. Шамот – обожженная до спекания тонкомолотая огнеупорная глина.

Все шамотные огнеупоры подразделяются по количеству содержания шамота в огнеупорной массе и классифицируются на так называемые бесшамотные, малешамотные и многешамотные огнеупорные материалы. Если содержание шамота не превышает 20...30% называют малешамотными огнеупорами; если содержание шамота в огнеупоре составляет порядка 40...65 % среднешамотными; если его в объеме огнеупора более 80 % многешамотными.

Таблица №2 -Составы и физические свойства алюмосиликатных огнеупоров

Огнеупоры	Содержание основных компонентов, %		Температура службы, $^{\circ}C$	Плотность, $г/см^3$	Пористость, %	Доп. усадка, %
	Al_2O_3	SiO_2				
Полукислые	15-28	66-82	1300-1400	1,6-2,3	18-25	$\pm(0-2)$
Шамотные	28-45	51-66	1350-1450	2,5-2,7	15-20	-(0-2)
Шамотно-каолиновые	40-45	52-57	1450-1550	2,3-2,5	12-15	-(0-1)
Муллитовые	60-75	21-40	1500-1700	2,2-2,8	12-30	-(0-1)
Корундовые	95-99		1700-1900	3,7-3,9	13-20	-(0-1)

К шамотным огнеупорным изделиям относятся также шамотно-каолиновые материалы. Целесообразность использования каолина в шамотных огнеупорах в качестве составляющего сырья приводит к повышению содержания Al_2O_3 после обжига и может достигать 28...45 % с уменьшением содержания плавней с 5-6% до 2,5-3 % мас. Огнеупорность таких шамотных материалов при этом увеличивается по сравнению с материалами.

изготовленными на чисто глинистом сырье, на 30-50 °С и составляет 1750...1780 °С.

Высокоглиноземистые огнеупоры содержат более 45% Al_2O_3 и в зависимости от содержания глинозема подразделяются на муллитокремнеземистые (силлиманитовые), содержащие 45-62% Al_2O_3 ; муллитовые (62-72% Al_2O_3); муллитокорундовые (72-90% Al_2O_3).

Муллитовые огнеупоры изготавливают из смеси глинозема и огнеупорной глины. При изготовлении керамических высокоглиноземистых огнеупоров применяется высокоглиноземистый шамот, который получают из минералов силлиманитовой группы, природного гидратированного глинозема или смеси глины и глинозема.

С целью выбора оптимального состава исходного сырья для получения огнеупорного керамического материалов были изучены физико-химические свойства разновидностей алюмосиликатного сырья Кыргызской Республики [7].

В таблице 3. представлены имеющиеся в Кыргызской Республике некоторые огнеупорные глины, каолин и бентонит, которые могут быть использованы в качестве огнеупорного сырья для получения из них огнеупорных материалов различного назначения.

Таблица №3 -Фазовый количественный состав некоторых природных минералов Кыргызской Республики

Наименование минерала	Название месторождения	Среднее содержание полезных ископаемых в мас. %											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	CaO	п,п,п,					
Каолин	Согутинское	53,51	33,0	1,96	0,61	0,29	0,21	п,п,п, 11,14,					
Каолин	Учкурт	81	11,78	3,84	Калиевый модуль 13,2		Fe ₂ O ₃ + Ti 02-2,42						
Каолин	Талды-Булакское	65,32	22,1 S	0,9	024	0,6-2 6	п,п,п, 9,8						
Каолин	Бельдеме	72,0	17,0	0,38	0,35	0,12	0,07	0,63	1,28	3,29			
Каолин	Аксуйское -1	61,42	19,15	1,95	0,9	0,92	Na ₂ O +K ₂ O 2,87		CO ₂ 0,05	плл, 7,65			
Каолин	Чокобулакское	Si O ₂ 46,0-51,01		Al ₂ O ₃ 28,23-32,57		Fe ₂ O ₃ 1,17-1,59		Пластичность 2,31-2,48					
Каолин	Кара-Киче	61,84	21,63	1,65	0,40	0,88	0,81	02	2,12	0,1	0,43	0,81	
Бентонит	Бешкентское	50,70	9,26	14,79	4,21	5,06	3,18	0,94	3,10	0,28	0,56	16,02	5,19

Огнеупорная глина	Кок-Мойнок	SiO ₂ 52,7	Al ₂ O ₃ 29,55	Fe ₂ O ₃ 1,95	MgO 0,79	CaO 0,80	TiO ₂ 0,31	плл, 8,43	
Огнеупорная глина	Орго-Черское	SiO ₂ 59.96	Al ₂ O ₃ 25.69	Fe ₂ O ₃ 1.20	MgO 0.40	CaO 0.49	K ₂ O 3.89	Na ₂ O 0.58	TiO ₂ 0.09

Список литературы

1. Основные огнеупоры: Кайнарский И.С., Дегтярева Э.В. // М «Металлургия», 1974. - 367с.
2. Солодкий Н.Ф. Минерально-сырьевая база Урала для керамической огнеупорной и стекольной промышленности. Справочное пособие / Н.Ф. Солодкий, А.С. Шамриков, В.М. Погребенков // Под ред. проф. Г.Н. Масленниковой. - Томск: Аграф-Пресс, 2009. - 332 с.
3. Абдыкалыков А.А. «Сырьевые ресурсы перспективы развития основных строительных материалов в Кыргызской Республике» Абдыкалыков А.А., Абдылдаев Н.С., Асанакунов Б.Т., Степовая Н.М. -Бишкек: Национальный информационный центр Кыргызской Республике. -1996. 48с.
4. Стрелов К.К. Технология огнеупоров. Издание третье переработанное., Издательство «Металлургия» П.С. Мамыкин.// Москва, 1978. С. 188-196.
5. Минерально сырьевая база строительных материалов Кыргызской ССР (Справочник) – Фрунзе: «Илим» 1989. – 447 с.
6. Геология СССР. Гл. ред. А. В. Сидоренко. Т. XXV. Кыргызская ССР Полезные ископаемые. (Управление геологии Кирг. ССР). Ред. Тома К. Д. Помазков. – М.: «Недра», 1977. – 152 с.
7. Реестр месторождений и проявлений полезных ископаемых (Каталог месторождений и проявлений полезных ископаемых, вынесенных на Карту полезных ископаемых Кыргызской Республики, (масштаба 1:500000) - 2024. - 250с., Кыргызская геологическая служба Министерства природных ресурсов, экологии и технического надзора Кыргызской Республики
[URL:https://www.geology.kg/wp-content/uploads/2024/01/Reestr-PI.pdf](https://www.geology.kg/wp-content/uploads/2024/01/Reestr-PI.pdf) (дата публикации: 01.2024).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ НИТРИДА КРЕМНИЯ

¹Кайрыев Н.Ж., ²Касмамытов Н.К.

- 1 - Кыргызско-Российский Славянский Университет им. 1-Президента Б.Н.Ельцина Российской федерации, Естественно-технический факультет, Бишкек, проспект Шабдан Баатыра, 140, E-mail: n.kajryev@mail.ru
- 2- Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук 720071, Бишкек, проспект Чуй 265-А, E-mail: nurkas@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке математическому моделированию процесса микроволнового реакционного спекания нитрида кремния (Si_3N_4) в цилиндрическом резонаторе (2,45 ГГц). Традиционный метод получения реакционно-связанного нитрида кремния (RBSN) характеризуется длительностью цикла (до 100 ч), тогда как СВЧ-нагрев позволяет сократить время процесса, но сопряжен с риском тепловой неустойчивости. Двумерная осесимметричная модель включает в себя уравнения электродинамики, нестационарной теплопроводности, диффузии газа в порах и химической кинетики. Ключевой особенностью модели является учет изменения эффективных диэлектрических и теплофизических свойств материала в зависимости от температуры и степени протекания реакции. Модель позволяет прогнозировать распределение электромагнитного поля, динамику теплового разгона кремния и фронт распространения экзотермической реакции азотирования. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов спекания и предотвращения перегрева изделий.

Ключевые слова: нитрид кремния, микроволновое реакционное спекание, мультифизическое моделирование, теплоперенос, химическая кинетика, уравнения Максвелла, метод конечных элементов.

MODELING OF MICROWAVE REACTION SINTERING OF SILICON NITRIDE

¹Kairyev N.J., ²Kasmamyrov N.K.

1- Kyrgyz-Russian Slavic University named after the 1-st President of the Russian Federation B.N. Yeltsin, Natural Sciences and Engineering Faculty, Bishkek, 140 Shabdan Baatyra Ave, n.kairyev@mail.ru.

2- Academician J.Jeenbaev, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 720071, Bishkek, Chui Ave 265-A, E-mail: nurkas@mail.ru

Abstract. This work is devoted to the development of mathematical modeling of the microwave reactive sintering process of silicon nitride (Si_3N_4) in a cylindrical resonator (2.45 GHz). The traditional method of producing reaction-bonded silicon nitride (RBSN) is characterized by a long processing cycle (up to 100 hours), whereas microwave heating makes it possible to shorten the process time, but is associated with the risk of thermal instability. The two-dimensional axisymmetric model includes the equations of electrodynamics, transient heat conduction, gas diffusion in pores, and chemical kinetics. A key feature of the model is the consideration of changes in the effective dielectric and thermophysical properties of the material depending on temperature and the extent of the reaction. The model makes it possible to predict the distribution of the electromagnetic field, the dynamics of silicon thermal runaway, and the propagation front of the exothermic nitridation reaction. The results obtained can be used to optimize sintering regimes and prevent overheating of the products.

Keywords: silicon nitride, microwave reactive sintering, multiphysics modeling, heat and mass transfer, chemical kinetics, Maxwell's equations, finite element method.

ВВЕДЕНИЕ

Нитрид кремния (Si_3N_4) является одним из наиболее востребованных конструкционных керамических материалов благодаря уникальному сочетанию высокой твердости, износостойкости, химической инертности и стойкости к термоудару. Особый интерес для промышленности представляет технология реакционного спекания (RBSN — Reaction Bonded Silicon Nitride),

позволяющая получать изделия сложной формы с минимальной усадкой непосредственно из отформованного порошка кремния в атмосфере азота [1,2].

Однако традиционный метод получения RBSN сопряжен с значительными энергетическими и временными затратами. Процесс азотирования в резистивных печах длится от 70 до 100 часов из-за необходимости медленного нагрева для предотвращения плавления кремния ($T_{пл} \approx 1414^\circ\text{C}$) и закупоривания пор на ранних стадиях реакции [3].

В последние годы перспективной альтернативой традиционному нагреву рассматривается микроволновое (СВЧ) спекание. Использование энергии электромагнитного поля частотой 2,45 ГГц позволяет реализовать механизм объемного нагрева, что приводит к возникновению «обратного» температурного градиента (когда температура внутри образца выше, чем на поверхности). Это интенсифицирует диффузионные процессы, снижает эффективную энергию активации химической реакции и позволяет сократить время синтеза в 10–20 раз [4–6].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение СВЧ-технологии сдерживается сложностью управления процессом. Кремний является материалом с ярко выраженной температурной зависимостью диэлектрических свойств. При комнатной температуре он практически прозрачен для микроволн, однако при достижении критической температуры (600–800 °C) происходит лавинообразный рост проводимости, приводящий к эффекту теплового разгона [7,8].

Дополнительную сложность вносит экзотермический характер реакции азотирования ($3\text{Si} + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$), сопровождающийся выделением значительного количества тепла, а также изменением фазового состава материала в процессе синтеза. По мере протекания реакции проводящий кремний становится диэлектрическим нитридом кремния (т.е. порождает фазовую неоднородность материала), что кардинально меняет картину взаимодействия электромагнитного поля с веществом и приводит к явлению «волны просветления» (transparency wave).

Экспериментальная отработка требуемых режимов реакционного синтеза может быть сопряжена с риском разрушения оборудования и исходных образцов заготовок. В связи с этим численное моделирование становится необходимым инструментом для прогнозирования температурных полей и степени превращения [9,10]. Существующие модели часто пренебрегают взаимосвязью между диффузией газа в порах, изменением пористости вследствие объемного расширения фаз и нелинейной кинетикой реакции.

Целью данной работы является разработка и анализ комплексной мультифизической модели микроволнового реакционного спекания кремния учитывающей:

- температурную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости порошковой среды.
- кинетику гетерогенной химической реакции, описываемую моделью Яндера.

- диффузионный транспорт азота в пористой структуре с учетом изменения пористости.
- эффекты теплового разгона и самоограничения нагрева по мере образования продукта реакции.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается процесс микроволнового нагрева пористого керамического изделия (образца) в цилиндрической камере-резонаторе (см. рис.1). Камера имеет радиус R и высоту H . Изделие цилиндрической формы (радиус $-r_s$, высота $-h_s$) расположено коаксиально в центре камеры. Камера заполнена газообразным азотом (N_2) при атмосферном давлении. Стенки камеры охлаждаются и поддерживаются при постоянной температуре $-T_{wall}$.

Возбуждение поля осуществляется радиально-симметричной волной частотой 2,45 ГГц. Электромагнитное поле в камере соответствует типу волны ТМ, имеющей в цилиндрических координатах компоненты электрического поля E_r и E_z .

Нагрев керамического изделия происходит за счет диэлектрических потерь при поглощении СВЧ-мощности. При нагреве происходит диффузия окружающего азота в поры материала. При достижении температуры активации инициируется экзотермическая химическая реакция синтеза, описываемая степенью превращения α (где $\alpha = 0$ — исходное вещество, $\alpha = 1$ — продукт реакции).

В работе принимаются следующие допущения:

1. Задача рассматривается в двумерной осесимметричной постановке (координаты r, z).
2. Газовая среда в камере (азот) считается прозрачной для СВЧ-излучения ($\epsilon_{gas}'' \approx 0$).
3. Теплофизические и диэлектрические свойства образца зависят от температуры T и степени превращения α .
4. Конвективным переносом тепла в газе пренебрегаем (доминирует диффузия и теплопроводность), либо он учитывается через эффективный коэффициент теплопроводности.

В качестве внешних управляющих параметров задачи рассматриваются подводимая мощность и давление азота в камере.

Требуется найти: Пространственно-временное распределение температуры $T(r, z, t)$ и степени химического превращения $\alpha(r, z, t)$ в объеме изделия.

На рис. 1 приведена схематическая конфигурационная установка в виде упрощенной системы 3D геометрической модели, включающая в себя пространственное расположение цилиндрической камеры - резонатора, расположение цилиндрического кремниевого образца по оси камеры, расположение волновода и направление подвода СВЧ- мощности на опытный образец.

Математическая модель

Для описания физико-химических процессов нагрева и реагирования используется система связанных дифференциальных уравнений в частных производных, включающая уравнения электродинамики, теплопроводности и химической кинетики. Задача решается в двумерной осесимметричной постановке (координаты r, z).

Электромагнитная задача.

Распределение электрического поля внутри резонатора описывается векторным волновым уравнением [11], выводимым из уравнений Максвелла. Для гармонического поля с частотой ω уравнение имеет вид:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

где:

- \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля, В/м;
- $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ — волновое число в вакууме;
- ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала;
- σ — электропроводность, См/м;
- $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Для ТМ-волны в цилиндрических координатах вектор поля имеет вид $\mathbf{E} = (E_r, 0, E_z)$. Магнитное поле имеет только азимутальную компоненту H_ϕ .

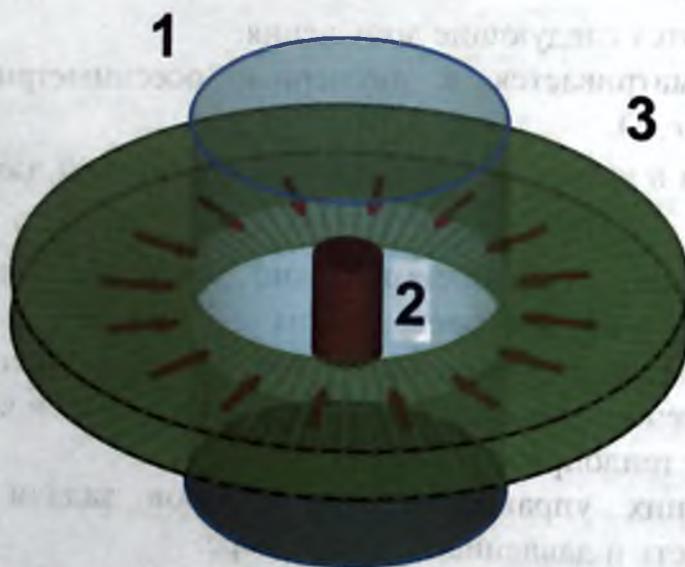


Рис. 1. Геометрическая модель системы микроволнового спекания: 1 — цилиндрический резонатор (камера); 2 — керамический образец (Si); 3 — ввод энергии (волновод). Красными стрелками показано направление подвода СВЧ-мощности.

Мощность тепловых источников Q_{em} (Вт/м³), возникающих за счет диэлектрических потерь, определяется как:

$$Q_{em}(r, z) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_{eff}''(T, \alpha) |\mathbf{E}|^2 \quad (2)$$

где ε_{eff}'' — мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости (фактор потерь), зависящая от температуры T и степени превращения α .

Тепловая задача.

Нестационарное температурное поле $T(r, z, t)$ в образце и газе описывается уравнением теплопроводности с учетом внутреннего тепловыделения от СВЧ-поля и экзотермической химической реакции:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_{em} + Q_{chem} \quad (3)$$

где:

- ρ — плотность, кг/м³;
- C_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
- λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
- Q_{chem} — источник тепла химической реакции (существует только внутри образца).

Источник тепла реакции выражается через скорость химического превращения:

$$Q_{chem} = (-\Delta H_r) \cdot \rho_{eff} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (4)$$

где ΔH_r — энтальпия реакции (Дж/кг, для экзотермической реакции $\Delta H_r < 0$).

Химическая кинетика и массоперенос.

Кинетика реакции синтеза описывается уравнением для степени превращения α (безразмерная величина, $0 \leq \alpha \leq 1$):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = K(T) \cdot f(\alpha) \cdot g(P_{N_2}) \quad (5)$$

Константа скорости реакции $K(T)$ подчиняется закону Аррениуса [12]:

$$K(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

где:

- A — предэкспоненциальный множитель;
- E_a — энергия активации, Дж/моль;
- R — универсальная газовая постоянная.

Для протекания реакции необходим подвод реагента (азота) в зону реакции.

Транспорт азота в порах описывается уравнением диффузии:

$$\frac{\partial(\phi c_{N_2})}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{eff} \nabla c_{N_2}) = -R_{cons} \quad (7)$$

где:

- c_{N_2} — молярная концентрация азота, моль/м³;
- D_{eff} — эффективный коэффициент диффузии в пористом теле;
- ϕ — пористость материала;
- R_{cons} — скорость потребления азота в ходе реакции (стехиометрически связана с $\partial \alpha / \partial t$).

Граничные и начальные условия.

Начальные условия (при $t = 0$):

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad \alpha(r, z, 0) = 0, \quad c_{N_2}(r, z, 0) = c_{atm}$$

Граничные условия для электродинамики:

- На металлических стенках камеры ($r = R$ и $z = 0, H$): условие идеального проводника (тангенциальная компонента поля равна нулю):

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (\Rightarrow E_z|_{r=R} = 0, E_r|_{z=0, H} = 0)$$

- На оси симметрии ($r = 0$):

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = 0, \quad E_r = 0$$

Граничные условия для теплообмена:

- На внешних стенках камеры (охлаждение):

$$T = T_{wall}$$

- На границе «Образец — Газ» (непрерывность потоков):

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = -\lambda_g \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_g$$

Граничные условия для массопереноса:

- На поверхности образца (свободный доступ газа):

$$c_{N_2} = c_{gas}^{chamber}$$

Свойства материалов

В процессе реакционного спекания рассматриваемая среда представляет собой гетерогенную пористую систему, состоящую из трех фаз: твердого реагента (кремний, Si), твердого продукта реакции (нитрид кремния, Si_3N_4) и газовой фазы (азот, N_2), заполняющей сообщающиеся открытые поры.

Поскольку явный расчет микроструктуры пор невозможен на макроскопическом уровне, в модели используется приближение сплошной среды. Эффективные свойства материала зависят от локальной температуры T и степени превращения α .

В ходе реакции $3Si + 2N_2 \rightarrow Si_3N_4$ происходит увеличение объема твердой фазы (молярный объем нитрида кремния больше, чем у исходного кремния). Это приводит к изменению пористости ϕ .

Текущая объемная доля пор $\phi(\alpha)$ определяется выражением [1]:

$$\phi(\alpha) = \phi_0 - \Delta V_{exp} \cdot \alpha \cdot (1 - \phi_0) \quad (8)$$

где:

- ϕ_0 — начальная пористость образца;
- ΔV_{exp} — коэффициент объемного расширения при нитрировании (для пары Si- Si_3N_4 он составляет $\approx 22\%$).

Объемные доли компонентов (V_{Si} и V_{SiN}) в твердом скелете рассчитываются согласно соотношений:

$$V_{Si} = (1 - \alpha)(1 - \phi), \quad V_{SiN} = \alpha(1 - \phi) \quad (9)$$

Поглощение СВЧ-энергии определяется комплексной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{eff} = \epsilon' - j\epsilon''$. Свойства смеси рассчитываются по правилу смесей Лихтенекера [13,14]:

$$\epsilon'_{eff} = V_{Si}\epsilon'_{Si}(T) + V_{SiN}\epsilon'_{SiN}(T) + \phi\epsilon'_{N_2} \quad (10)$$

$$\epsilon''_{eff} = V_{Si}\epsilon''_{Si}(T) + V_{SiN}\epsilon''_{SiN}(T) \quad (11)$$

Диэлектрические потери в кремнии экспоненциально возрастают с температурой, что характерно для полупроводниковых материалов и является причиной теплового разгона [5, 7].

Теплопроводность λ_{eff} , плотность ρ_{eff} и теплоемкость $C_{p,eff}$ рассчитываются как взвешенные средние значения компонентов.

Плотность:

$$\rho_{eff} = V_{Si}\rho_{Si} + V_{SiN}\rho_{SiN} + \phi\rho_{N_2}(T, P) \quad (12)$$

Удельная теплоемкость:

$$C_{p,eff} = \frac{V_{Si}\rho_{Si}C_{p,Si}(T) + V_{SiN}\rho_{SiN}C_{p,SiN}(T)}{\rho_{eff}} \quad (13)$$

Теплопроводность:

Теплопроводность пористой среды существенно зависит от структуры пор. В модели используется выражение, учитывающее извилистость пор [15]:

$$\lambda_{eff} = ((1 - \alpha)\lambda_{Si}(T) + \alpha\lambda_{SiN}(T)) \cdot (1 - \phi)^n \quad (14)$$

где n — эмпирический коэффициент извилистости (обычно $n \approx 1.5 - 2$).

Учитывается, что теплопроводность газа пренебрежимо мала по сравнению с твердой фазой.

Доставка азота в зону реакции осуществляется посредством диффузии через поры. Эффективный коэффициент диффузии D_{eff} зависит от бинарного коэффициента диффузии азота $D_{N_2}(T)$ и текущей пористости:

$$D_{eff} = D_{N_2}(T) \cdot \frac{\phi}{\tau} \quad (15)$$

где τ — извилистость пор. Часто используется аппроксимация Арчи [1,10]:

$$D_{eff} = D_{N_2}(T) \cdot \phi^m \quad (16)$$

где $D_{N_2}(T) \propto T^{1.5}$ (согласно кинетической теории газов).

Методы расчета

Численное решение сформулированной системы связанных нелинейных дифференциальных уравнений проводится методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics. Задача решается в квазистационарном приближении по схеме «Frequency-Transient», разделяющей быстрые электромагнитные и медленные тепловые процессы.

Список литературы

1. Riley, F. L. (2000). Silicon nitride and related materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(2), 245-265.

2. Moulson, A. J. (1979). Reaction-bonded silicon nitride: its formation and properties. *Journal of Materials Science*, 14(5), 1017-1051.
3. Mangels, J. A. (1981). Sintering of reaction bonded silicon nitride. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2, 589-603.
4. Sutton, W. H. (1989). Microwave processing of ceramic materials. *American Ceramic Society Bulletin*, 68(2), 376-386.
5. Bykov, Y. V., Rybakov, K. I., & Semenov, V. E. (2001). High-temperature microwave processing of materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(13), R55.
6. Kiggans, J. O., & Tiegs, T. N. (1991). Characterization of silicon nitride synthesized by microwave heating. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*.
7. Rybakov, K. I., Olevsky, E. A., & Krichevsky, E. V. (2003). Microwave heating of conductive powder materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(4), 629-635.
8. Kriegsmann, S., et al. (2011). Dielectric properties of silicon nitride ceramics during microwave sintering. *Acta Materialia*.
9. Vaucher, S., et al. (2005). Numerical simulation of the thermal run-away during microwave heating of silicon. *Microelectronic Engineering*, 81, 370-376.
10. Dana, S. S., & Das, S. K. (2018). Multiphysics simulation of microwave heating of silicon powder. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*.
11. Metaxas, A. C., & Meredith, R. J. (1983). *Industrial Microwave Heating*. IET.
12. Messner, R. P., & Chiang, Y. M. (1990). Liquid-phase reaction-bonding of silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(5), 1193-1200.
13. Lichtenecker, K. (1926). Die dielektrizitätskonstante natürlicher und künstlicher mischkörper. *Physikalische Zeitschrift*, 27, 115-158.
14. Sihvola, A. (1999). *Electromagnetic mixing formulas and applications*. IET.
15. Carson, J. K., et al. (2005). Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(11), 2150-2158.

КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ АРГОНА

¹Кайрыев Н.Ж., ²Малкин А.В.

1 - Кыргызский Национальный университет им Ж.Баласагына, факультет физики и электроники, Бишкек, ул. Абдымомунова 328, E-mail: n.kairyev@mail.ru

2 - Кыргызско-Российский Славянский Университет им. 1-Президента Б.Н.Ельцина, Бишкек, проспект Шабдан Баатыра, 140.

Аннотация. В работе представлена самосогласованная численная модель непрерывного оптического разряда (НОР), поддерживаемого сфокусированным излучением

CO_2 - лазера в потоке аргона атмосферного давления. Модель объединяет уравнения Навье-Стокса для сжимаемого газа, уравнение энергии с учетом теплопроводности и радиационных потерь, а также волновое уравнение для лазерного пучка в параксиальном (квазиоптическом) приближении. Особое внимание уделено учету эффекта тепловой линзы (рефракции), возникающего из-за градиентов электронной плотности плазмы, и его влиянию на устойчивость разряда. Предложенный подход позволяет детально анализировать структуру плазменного шнура и условия его стабилизации набегающим потоком инертного газа.

Ключевые слова: непрерывный оптический разряд, лазерная плазма, аргон, радиационная газодинамика, квазиоптическое приближение, численное моделирование.

QUASI-OPTICAL MODEL OF A CONTINUOUS OPTICAL DISCHARGE IN AN ARGON FLOW

¹Kairyev N.J., ²Malkin A.V.

1 - Kyrgyz National University named after Z. Balasagyn, Faculty of Physics and Electronics, Bishkek, Abdymomunov St. 328, E-mail: n.kairyev@mail.ru

2 - Kyrgyz-Russian Slavic University named after the 1-st President of the Russian Federation B.N. Yeltsin, Natural Sciences and Engineering Faculty, Bishkek, 140 Shabdan Baatyra.

Abstract. This work presents a self-consistent numerical model of a continuous optical discharge (COD) sustained by focused CO_2 -laser radiation in a flow of argon at atmospheric pressure. The model combines the Navier–Stokes equations for a compressible gas, the energy equation with heat conduction and radiative losses, as well as the wave equation for the laser beam in the paraxial (quasi-optical) approximation. Special attention is given to accounting for the thermal lens (refraction) effect arising from electron density gradients in the plasma and its influence on discharge stability. The proposed approach makes it possible to analyze in detail the structure of the plasma filament and the conditions for its stabilization by the incoming inert gas flow.

Keywords: continuous optical discharge, laser plasma, argon, radiative gas dynamics, quasi-optical approximation, numerical simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный оптический разряд (НОР), поддерживаемый сфокусированным лазерным излучением, является объектом фундаментальных и прикладных исследований в физике плазмы. Впервые полученный в эксперименте и теоретически обоснованный в пионерских работах Райзера [1], этот тип разряда, часто называемый «лазерной волной горения», находит применение в аэрокосмических технологиях (лазерные двигатели), плазмохимии и создании источников света высокой яркости.

Ключевой задачей при генерации НОР является пространственная стабилизация плазменного образования. В неподвижном газе плазменный фронт стремится распространяться навстречу лазерному лучу («световое горение»), выходя из фокальной области и затухая из-за снижения интенсивности излучения. Для локализации разряда обычно используется поток газа. Ранние экспериментальные работы Кифера и др. [2], а также Генералова и др. [3] показали, что набегающий поток стабилизирует разряд, «сдувая» его обратно в фокус. При этом было установлено, что

газодинамическое поле вокруг разряда имеет сложную структуру: поток обтекает горячее ядро плазмы как твердое препятствие, и лишь малая часть холодного газа проникает внутрь разряда. Генералов [3] также определил границы устойчивости НОР, показав, что при скоростях потока выше критических происходит срыв разряда.

Для теоретического описания этих процессов широко применяются методы вычислительной гидродинамики. Суржигов и Ченцов [4] на основе двумерной радиационно-газодинамической модели численно исследовали области существования НОР в зависимости от мощности лазера и скорости потока, получив хорошее качественное согласие с экспериментальными данными [3]. Кулумбаев и Лелевкин [5] расширили этот подход для трехмерного моделирования взаимодействия оптического разряда с поперечным потоком газа. Большинство современных моделей базируются на решении полной системы уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа с учетом теплопроводности и радиационного переноса энергии.

Однако существенным ограничением большинства известных моделей является упрощенное описание распространения лазерного излучения. Как правило, используется приближение геометрической оптики, которое пренебрегает волновыми эффектами. В то же время, как отмечено в работе Рафатова и др. [6], в условиях оптического разряда критическую роль играют эффекты дифракции и рефракции. Неоднородно нагретая плазма действует как рассеивающая термическая линза, что приводит к дефокусировке пучка и изменению распределения интенсивности в зоне нагрева. Игнорирование этого эффекта, особенно при использовании длинноволновых CO_2 -лазеров, может приводить к существенным погрешностям в определении температуры и формы разряда.

В работе [6] была предложена модель, использующая параболическое волновое уравнение (квазиоптическое приближение) для самосогласованного расчета НОР в потоке воздуха. Данный подход позволил корректно учесть влияние плазменной рефракции на устойчивость разряда.

В настоящей работе развивается методология, предложенная в [6], применительно к моделированию непрерывного оптического разряда в потоке инертного газа (аргона) атмосферного давления.

В отличие от воздуха, аргон является одноатомным газом, что исключает затраты энергии на диссоциацию, однако требует корректного учета ионизационного баланса и специфических оптических свойств при расчете коэффициентов поглощения и рефракции. Целью работы является построение двумерной модели НОР в аргоне, учитывающей взаимодействие лазерного пучка с индуцированной им плазменной линзой в рамках квазиоптического приближения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается стационарный непрерывный оптический разряд (НОР), поддерживаемый сфокусированным излучением CO_2 -лазера ($\lambda = 10.6$ мкм) в

цилиндрической камере радиусом R и длиной L . Вдоль оптической оси z подается ламинарный поток холодного аргона.

Предполагается, что давление в камере близко к атмосферному ($p \approx p_0 = 10^5$ Па). При таком давлении плазма оптического разряда находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР). Это позволяет характеризовать состояние плазмы единой температурой $T(r, z)$, а все термодинамические и транспортные свойства считать функциями температуры и давления. Течение газа считается ламинарным, дозвуковым и осесимметричным.

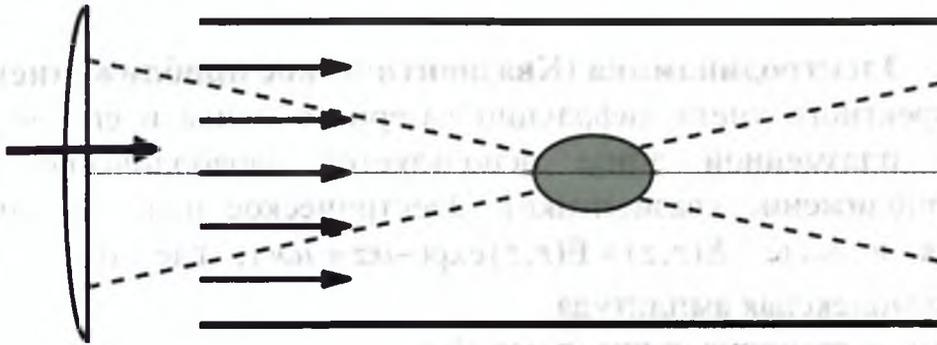


Рис.1. Схема непрерывного оптического разряда.

Газодинамика и теплопередача

В силу существенного изменения температуры (от 300 К до ~ 18 кК) плотность газа меняется на порядки, поэтому течение описывается системой уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа. Система уравнений сохранения массы, импульса и энергии в цилиндрических координатах (r, z) имеет вид:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = 0$$

Уравнения Навье-Стокса (проекция на оси z и r):

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \mathbf{V}) \right]$$

$$\rho \left(v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2 \eta v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \mathbf{V}) \right]$$

Уравнение энергии:

$$\rho C_p \left(v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_L - Q_R.$$

Здесь u, v — осевая и радиальная компоненты скорости, ρ — плотность, C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, η — динамическая вязкость, λ — теплопроводность.

Член Q_L описывает источник энерговыделения за счет поглощения лазерного излучения:

$$Q_L = \mu_\omega I(r, z) = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 \mu_\omega |E|^2 \quad (5)$$

где μ_ω — коэффициент поглощения лазерного излучения плазмой⁴.

Член Q_R описывает потери энергии на собственное тепловое излучение плазмы. Для аргоновой плазмы высокого давления допустимо использовать приближение объемного высвечивания: $Q_R(T) = 4\pi\varepsilon_N(T)$, где ε_N — коэффициент чистого излучения, учитывающий реабсорбцию излучения в линиях. В работе для воздуха применялось многогрупповое диффузионное приближение, однако для инертных газов часто достаточно табличных данных $\varepsilon_N(T)$.

Электродинамика (Квазиоптическое приближение)

Для корректного учета дифракции лазерного пучка и его рефракции в неоднородной плазменной линзе используется параболическое волновое уравнение (приближение квазиоптики). Электрическое поле лазерной волны представляется в виде $E(r, z) = E(r, z) \exp(-ikz + i\omega t)$, где E — медленно меняющаяся комплексная амплитуда.

Уравнение распространения пучка имеет вид:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + k^2 (\tau_c(T) - 1) E.$$

Где $k = \omega / c$ — волновое число, а $\tau_c(T)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы:

$$\tau_c = 1 - \frac{n_e(T)}{n_c} - i \frac{\mu_\omega(T)}{k}.$$

Здесь $n_c = \varepsilon_0 m_e \omega^2 / e^2$ — критическая концентрация электронов ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$)⁹.

Действительная часть τ_c описывает рефракцию: так как в центре разряда T максимальна, то n_e максимально, а значит показатель преломления $n \approx \sqrt{\text{Re}(\tau_c)}$ минимален. Это приводит к эффекту рассеивающей линзы. Мнимая часть описывает поглощение энергии.

Свойства плазмы аргона

Коэффициент поглощения μ_ω для CO_2 -лазера в аргоне определяется механизмом обратного тормозного излучения электронов при столкновениях с ионами и нейтральными атомами. Зависимость имеет вид, аналогичный формуле Крамерса-Унзольда:

$$\mu_\omega \propto \frac{n_e^2}{T^{3/2}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) \right)$$

Равновесная концентрация электронов n_e определяется из уравнения Саха для однократной ионизации аргона ($\text{Ar} \leftrightarrow \text{Ar}^+ + e^-$), так как вклад второй ионизации при температурах НОР ($T < 20 \text{ кК}$) пренебрежимо мал. Плотность газа $\rho(T)$ находится из уравнения состояния идеального газа $\rho = p_0 M_{\text{Ar}} / RT$.

Транспортные коэффициенты (η, λ, C_p) задаются интерполяционными функциями на основе справочных данных.

Граничные условия

Расчетная область представляет собой прямоугольник $0 \leq z \leq L, 0 \leq r \leq R$. Граничные условия соответствуют НОР в свободном пространстве:

1. Вход ($z = 0$): Задан профиль скорости набегающего потока $u(r) = u_0, v = 0$. Температура равна комнатной $T = T_0 = 300$ К. Поле задается как гауссов пучок, сфокусированный в точку $z = f$:

$$E(r, 0) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2} - i\frac{kr^2}{2f}\right),$$

где w_0 — радиус пучка на входе, E_0 связана с полной мощностью лазера P_L :

$$E_0 = \frac{1}{w_0} \sqrt{\frac{2P_L}{\pi\epsilon_0 c}}.$$

2. Выход ($z = L$): «Мягкие» условия для гидродинамики (давление $p = p_0, \partial(\rho u) / \partial z = 0$).
3. Ось симметрии ($r = 0$): Условия симметрии: $\partial T / \partial r = 0, \partial u / \partial r = 0, v = 0, \partial E / \partial r = 0$.
4. Боковая граница ($r = R$): Стенка находится далеко от зоны разряда, температура фиксирована $T = T_0$, условия прилипания $u = v = 0$, поле отсутствует $E = 0$.

ВЫВОДЫ

В работе сформулирована двумерная самосогласованная численная модель непрерывного оптического разряда, поддерживаемого излучением CO_2 -лазера в ламинарном потоке аргона атмосферного давления. На основе проведенного теоретического анализа можно сделать следующие выводы:

1. **Преимущества квазиоптического подхода.** Предложенное использование параболического волнового уравнения (вместо приближения геометрической оптики) является необходимым условием для корректного моделирования НОР. Показано, что данный подход позволяет учесть волновые эффекты — дифракционное уширение пучка и, что наиболее важно, рефракцию лазерного излучения на градиентах электронной плотности плазмы.
2. **Эффект «тепловой линзы».** Математическая модель явно учитывает взаимодействие лазерного поля с индуцированной плазменной линзой. В аргоновой плазме, где концентрация электронов в ядре разряда достигает высоких значений, дефокусировка пучка может существенно изменять распределение интенсивности в фокальной области, влияя на пороговую мощность поддержания разряда.
3. **Газодинамическая стабилизация.** Система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа, связанная с уравнением теплопередачи, позволяет

описывать сложную картину обтекания горячего плазменного ядра холодным газом. Модель пригодна для исследования механизмов стабилизации фронта горения и определения критических скоростей потока, при которых происходит срыв разряда или его смещение из фокуса.

4. **Специфика аргона.** В отличие от моделей для воздуха, предложенная формулировка для атомарного аргона исключает затраты энергии на диссоциацию, но требует точного учета ионизационного равновесия (уравнение Саха) для расчета коэффициентов поглощения и преломления. Это делает модель более устойчивой и применимой для фундаментальных исследований физики оптических разрядов.

Дальнейшее развитие работы предполагает численную реализацию представленной модели методом конечных элементов и проведение параметрического исследования зависимости формы и температуры разряда от мощности лазера и скорости прокачки газа.

Список литературы

1. Raizer Yu. P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 1991.
2. Keefer D. R., Henriksen B. B., Braerman F. Experimental study of a continuous optical discharge in a converging beam // Journal of Applied Physics. 1975. Vol. 46. P. 1080.
3. Generalov N. A., Zakharov A. M., Kosynkin V. D., Yakimov M. Yu. Continuous optical discharge in a gas flow // Fizika Goreniya i Vzryva. 1986. Vol. 22, No. 2. P. 91.
4. Surzhikov S. T., Chentsov A. A. Numerical simulation of a continuous optical discharge in a gas flow // Plasma Physics Reports. 1996. Vol. 22. P. 957.
5. Kulumbaev E. B., Lelevkin V. M. Numerical modeling of a continuous optical discharge in a transverse gas flow // Plasma Physics Reports. 1999. Vol. 25. P. 517.
6. Rafatov I. R., Yedierler B., Kulumbaev E. B. Modelling of a continuous optical discharge stabilized by a gas flow in quasi-optical approximation // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. Vol. 42. 055212.

СОДЕРЖАНИЕ

Касмамытов Н.К.	История развития лаборатории физики порошковых материалов института физики НАН КР	5
Касмамытов Н.К., Айтимбетова А.Н.	Исторические аспекты развития и современное состояние технологии порошковой металлургии: достоинство и преимущества (обзор)	21
Джураев Д.С., Мукашова А.Б.	Установка для измерения теплофизических свойств магнитных жидкостей	31
Гайнутдинова Р.Д., Крымская Д.Н., Жунушова Г.Ш.	Изменения температурного режима нижней атмосферы средних широт в связи с изменением уровня гелиогеофизической активности	34
Аманова Н. Т., Аккозов А. Д.	Расчет оценки азотного статуса зеленой растительности по данным дистанционного зондирования земли на основе хлорофилльного индекса ReCL	39
Ласанху К. А., Кыдыралиев Э. М.	Нитрид кремний легированный карбидом кремния и оксидом алюминия	48
Дуйшеев Т.	Разработка установки для мелкодисперстного дождевания горных пастбищ	54
Сыдык у. Н., Кушманов А. Б.	Изменение структуры пленок аморфного кремния под влиянием термообработки	61
Куйкеев А.Б., Касмамытов Н.К.	Обзор минерально-сырьевых ресурсов Кыргызской Республики для получения огнеупорной керамики	65
Кайрыв Н.Ж., Касмамытов Н.К.	Моделирование микроволнового реакционного спекания нитрида кремния	72
Кайрыев Н.Ж., Малкин А.В.	Квазиоптическая модель непрерывного оптического разряда в потоке аргона	80

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Документы

- Сопроводительное письмо на имя главного редактора журнала печатается на бланке учреждения, представляющего статью;
- Рецензия.

Составные части статьи и порядок их следования

1. Объем материала от 4 до 10 страниц набранного текста оформленного в текстовом редакторе Microsoft Word, файл в формате .doc или .docx (шрифт 14, Times New Roman, интервал 1). Поля: верхнее, нижнее-20мм, левое-2,5мм, правое-15мм. Графический материал должен быть четким, разрешение не менее 300 пикселей;
2. В верхнем левом углу указывается универсальная десятичная классификация (УДК);
3. Следующий абзац – название статьи указывается по центру (шрифт 14 полужирный **ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ**);
4. Во втором ряду фамилия имя отчество автора(ов);
5. В третьем ряду указывается полное название учебного заведения (место работы или учебы), город и страна;
6. Дальше через строку (шрифт 12, Times New Roman, интервал 1):
 - Аннотация не менее 50 слов на языке статьи (на русском и английском языках);
 - *Ключевые слова от 3 до 5 слов и словосочетаний, курсив* (на русском и английском языках);
7. Дальше через строку идет изложение материала (шрифт 14, Times New Roman):
 - **Введение** (состояние проблемы, задачи исследования);
 - **Основная часть** – название в текст не вносится. Основную часть рекомендуется разбивать на разделы с названиями, отражающими их содержание: постановка задачи, методы исследования, математическая модель, обсуждение результатов и т.д.;
 - **Заключение** (выводы).
8. После основного текста указывается список литературы (Список использованной литературы). Список литературы оформляется не по алфавиту, а по мере того, как она встречается в тексте статьи. Схема **списка литературы**:
Авторы (обычный шрифт) → **название статьи** (обычный шрифт) → **выходные данные** (город, издательство) → **цифровые данные** (год, страницы). (Острейковский В. А., Карманов Ф. И. Статистические методы обработки экспериментальных данных с использованием пакета MathCAD. М.: ИНФРА-М, 2015. 207 с.);
9. Рисунки и таблицы набираются шрифтом Times New Roman 12 с одинарным междустрочным интервалом. Рисунки, диаграммы и таблицы создаются с использованием черно-белой гаммы. Использование цвета и заливок не допускается! Все рисунки и таблицы должны иметь название:
 - Рис. 1. Название (точка), выравнивание по центру;
 - Таблица 1 – Название (точка в конце не ставится) выравнивание по левому краю;
10. Формулы следует набирать с помощью редактора формул Microsoft Equation и нумеровать в круглых скобках (2).
11. Отдельным файлом подаются сведения об авторе:
 - контактный телефон, Viber, WhatsApp, Telegram, Mail.Ru Агент и т. п.;
 - Электронная почта e-mail – @mail.ru, gmail.com, @yandex.ru и т. п.;
12. Авторы и рецензенты несут полную ответственность за актуальность, содержание, стиль и качество оформление статьи, а так же за ее актуальность.

Басууга 25.11.2025-ж. кол коюлду.
№30 офсет кагазы.
Форматы 84x60 1/16
Көлөмү 7,5 б.т.
Нускасы 50. Заказ 2025.

«Avrasya Press» басмаканасы
Бишкек ш., 7-апрель көч. №1а. Тел: 0(312)299 300
E-mail: avrasyapress2003@mail.ru
www.avrasyapress.com

