

ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 4(40), ДЕКАБРЬ 2009

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н. КАДЫРЖАНОВ К.К.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: к.х.н. АРТЕМЬЕВ О.И., д.ф.-м.н. БАТЫРБЕКОВ Э.Г.,
БЕЛЯШОВА Н.Н., к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В. к.т.н. ГИЛЬМАНОВ Д.Г.,
д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – **заместитель главного редактора**, к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А.,
д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф., д.г.-м.н. КРАСНОПЕРОВ В.А., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н.,
д.т.н. МУКУШЕВА М.К., д.г.-м.н. НУРМАГАМБЕТОВ А.Н., д.б.н. ПАНИН М.С.,
к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., д.т.н. САТОВ М.Ж., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

4(40) ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2009 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 4(40), DECEMBER 2009

Сообщаем Вам, что периодический научно-технический журнал "Вестник НЯЦ РК", решением Комитета по надзору и аттестации в сфере науки и образования включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций по физико-математическим наукам. В настоящее время редакция располагает возможностью быстрой публикации статей.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЫСОКАЯ НАГРАДА – ПРОРЫВНЫМ РАБОТАМ	4
ВЫВОЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ВВР-К ИЗ КАЗАХСТАНА	8
Тулеушев А.Ж., Чакров П.В., Накипов Д.А.	
НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-60 В г. АСТАНА	15
Амангелды Н., Буртебаев Н., Бугыбаев Е., Горлачев И., Кислицын С., Колобердин М., Лысухин С., Нестерова А., Пеньков Ф., Платов А., Шериф Хамада	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ПРОВЕДЕННЫЕ В ИАЭ.....	26
Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Жданов В.С., Зуев В.А., Кенжин Е.А., Колодешников А.А., Пахниц А.В.	
РАЗВИТИЕ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ В КАЗАХСТАНЕ.....	55
Кадыржанов К.К.	
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	70
Масягин Д.Г., Пустовалов И.А.	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т	77
Цай К.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н., Щербинина Н.В., Мережко М.С., Рубан С.В.	
ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРНОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ	87
Алиев Б.А., Козтаева У.П.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ВЕЛИЧИН ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ НАКАПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ.....	91
Алиев Б.А.	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ТОЧЕЧНЫХ СВЯЗЕЙ.....	95
Берикханова Г.Е.	
АКАДЕМИК Ш.Ш. СӘРСЕМБИНОВТЫҢ ЕСІМІН АРДАҚТАУ ТУРАЛЫ	105

ВЫСОКАЯ НАГРАДА – ПРОРЫВНЫМ РАБОТАМ

Указом Президента Республики Казахстан от 9 ноября 2009г. №885 сотрудники Национального ядерного центра Республики Казахстан МЭМР РК **Кадыржанов К.К., Батырбеков Г.А., Борисенко А.Н., Дуйсебаев А.Д., Жотабаев Ж.Р., Лысухин С.Н., Максимкин О.П., Тулеушев А.Ж.** были удостоены государственной премии за работу в области науки «Фундаментальные исследования в области ядерной и радиационной физики на базе усовершенствованных экспериментальных ядерно-физических установок Института ядерной физики Национального ядерного центра Республики Казахстан и создание на их основе ядерных и радиационных технологий».



КРАТКАЯ СПРАВКА О РАБОТЕ

1. По созданию многофункциональной экспериментальной базы для фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной и радиационной физики:

Впервые в мировой практике осуществлена модернизация исследовательского ядерного реактора ВВР-К что **является крупнейшим научно-техническим достижением и техническим прорывом** в атомной отрасли. В результате **впервые** в мировой практике в центре активной зоны был создан сквозной экспериментальный канал с уникальными экспериментальными возможностями: большого диаметра для размещения крупногабаритных изделий и петлевых каналов, в котором оперативно регулируются величина и пространственное распределение плотности потока, спектр нейтронов по диаметру и высоте созданного канала. Проведены масштабные эксперименты по испытанию новых ядерных технологий, термоэмиссионных преобразователей ядерной энергии в электричество, лазеров с ядерной накачкой, крупных сборок термоизоляционных материалов, получили большие экспериментальные возможности исследования по радиационному материаловедению, нейтронно-активационному анализу, атомной физике. Созданы крупные внутриреакторные и вне реакторные установки, позволившие эффективно использовать экспериментальные возможности реактора в научных и практических целях.

Усилиями ученых и специалистов ИЯФ НЯЦ РК был не только сохранен, но и **впервые в мировой практике** введен в повторную эксплуатацию после



десятилетнего (с 1988 по 1999гг.) останова реактор ВВР-К с системами повышенной технологической и сейсмической безопасности, вследствие чего в настоящее время реактор ВВР-К классифицируется как один из лучших исследовательских реакторов в мире. Реактор ВВР-К, являющегося **национальным достоянием** страны, как мощный инструмент для атомной науки и развития прорывных ядерных технологий, играет важную роль в становлении и развитии ядерно-энергетической отрасли Казахстана. Кроме того, вследствие сокращения в настоящее время в мире количества исследовательских реакторов из-за выработанных ресурсов возрастает заинтересованность в использовании реактора ВВР-К зарубежными исследователями.

Впервые предложена новая принципиальная схема гомогенного жидкосолевого реактора, относящегося по мировой классификации к одному из шести перспективных реакторов четвертого поколения, разработаны и испытаны модели принципиально новых систем, обеспечивающих эффективную и безопасную работу реактора. Разработки, имеющие характер **прорывных ядерных технологий**, защищены **девятью авторскими свидетельствами и патентами**, что свидетельствует об их **новизне**. Одним из главных преимуществ такой реакторной установки является возможность изготовления для него основного оборудования и ядерного топлива в Казахстане, поднять уровень и темпы развития других отраслей промышленности страны, что позволит существенно снизить стоимость сооружения и эксплуатации атомной станции, являющейся важным

показателем будущей атомной энергетики Республики Казахстан.

Впервые в Казахстане был разработан, изготовлен, построен и запущен ядерный реактор малой мощности – **критический стенд**, предназначенный для моделирования и исследований активной зоны реактора ВВР-К с различными установленными в ней петлевыми каналами и экспериментальными установками. С применением критического стенда выполнен большой комплекс экспериментальных исследований по изучению нейтронно-физических характеристик электрогенерирующих петлевых каналов, обоснованию возможности испытания полномасштабного ядерного модуля термоэмиссионного реактора-преобразователя ЯЭУ космического назначения, по изучению обеспечения безопасности космической ЯЭУ в различных нештатных ситуациях, в частности при падении активной зоны быстрого реактора в воду.

Модернизирован циклотрон У-150М, созданы каскадный перезарядный ускоритель УКП-2-1, ускоритель электронов ЭЛВ-4, в результате которых открыты новые направления фундаментальных и прикладных научных исследований, таких как ядерная астрофизика, ионная имплантация тяжелых ионов, ядерно-физические методы анализа с использованием ионных пучков, **созданы современные прорывные ядерные технологии** по производству радиоизотопной продукции с выходом на мировой рынок. Впервые в Казахстане реализованы и поставлены на промышленный уровень **радиационные технологии** с использованием мощных электронных пучков для радиационной сшивки полимеров, радиационной стерилизации медицинских изделий. **Создан** при Евразийском национальном университете им. Гумилева в г. Астана современный уникальный Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс (МНИК), являющийся важным этапом в развитии экспериментальной базы университетской науки. Он основан на тяжелоионном циклотроне ДЦ-60, предоставляющий уникальные возможности для развития ионно-трековых технологий, производства ядерных фильтров, экспериментальной физики на пучках тяжелых ионов. В развитие экспериментальной базы ИЯФ НЯЦ РК **для решения задач социального значения и фундаментальной науки** в настоящее время **реализуются проекты национального масштаба** по созданию Центра ядерной медицины и биофизики и Ускорительного комплекса по синтезу новых сверхтяжелых элементов.

II. По результаты фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики, физики твердого тела и радиационного материаловедения:

Впервые исследованы сечения квазиупругих и неравновесных процессов инициированных нуклидами водорода и гелия в диапазоне энергий 30-60 МэВ на изотопах ядер от лития до свинца, **об-**

наружены эффекты «аномального рассеяния назад» (АРН) и «ядерной радуги» (ЯР). Установлено, что сечения АРН и ЯР ионов ^3He и α -частиц обусловлены преломляющими свойствами ядерного потенциала при минимальных прицельных параметрах и зависят от массы, энергии и структуры сталкивающихся систем. **Эти результаты явились основой** получения оптимальных значений параметров оптического потенциала ядер, изучения кластерных аспектов структуры ядра - **нового направления в ядерной физике** - приступить к реализации проекта, связанного с возможностью существования экстремальных альфа-кластерных конфигураций в ядрах, ассоциируемых как ядерный Бозе-Эйнштейна конденсат или существование еще одной новой формы ядерной материи.

Впервые, в результате идентификации компонентов дифференциальных сечений каналов реакций обусловленных механизмом предравновесного распада и равновесными компаундными, **установлено**, что основной вклад в формирование предравновесной компоненты сечения вносят многоступенчатые прямые процессы проходящие через открытые конфигурации. **Впервые** в рамках модели на основе экспериментальных результатов исследованы и определены величины парциальной скорости эмиссии сложных частиц из множественно-несвязанных состояний, изучена их роль в реакциях с нуклидами гелия. Предложена **новая** версия экситонной модели, основанная на квантовомеханическом формализме, позволяющая в едином подходе рассчитать дифференциальные сечения статистического многоступенчатого прямого и статистического многоступенчатого компаунд процессов и их предравновесных компонент. Исследования по фундаментальной ядерной физике находятся в русле мировых приоритетных направлений и вклад ядерщиков Казахстана в нее, оцененный согласно данным Nuclear Science Referents (NSR) за 2003-2005 г. Database version, October 21, 2005 (<http://www2.nndc.bnl.gov/nsr/>) по плотности публикаций составляет 0.5 % от мировых. Казахстан входит в число (не более 20) стран, обладающей высокой степенью компетенции в области фундаментальной ядерной физики.

На основе анализа современного состояния физики и химии никелевых суперсплавов, используемых для создания элементов машин и механизмов, работающих в условиях максимально возможных в современной технике высоких температур, агрессивных сред и радиационных полей (лопатки турбин ракет и самолетов, элементы конструкций атомных реакторов и др.), сформулирована проблема создания устойчивых физико-химически совместимых с материалом подложки поверхностных металлических слоев. В результате авторами **создан новый оригинальный термодинамический подход** к созданию стабильных многослойных металлических материалов с изменяющимся по глубине фазово-структурным состоянием

для обеспечения различных функциональных требований, предъявляемых к поверхности и объему сплава, дано его экспериментальное и теоретическое обоснование. На примерах большого числа сплавов отработаны основные этапы технологии и получены результаты, подтверждающие основные положения предложенной теории.

Представлены результаты цикла научно-исследовательских работ по комплексным исследованиям фазовых бездиффузионных превращений в облученных нержавеющей стали, широко применяемых в реакторостроении и промышленности Казахстана. **Впервые показано**, что использование мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения не только в качестве упрочняющего фактора, но и как релаксационный механизм позволяет одновременно повысить прочностные и пластические свойства материалов. На этом основании **открыт** новый экономически более выгодный способ обработки таких материалов с применением **радиационных технологий**, суть которого состоит в том, что создавая облучением нейтронами или заряженными частицами (с использованием созданного комплекса ядерно-физических установок) заданную дефектную структуру в кристаллической решетке можно целенаправленно изменять условия зарождения мартенситной α -фазы и развития $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения по оптимальной кинетике, улучшая физико-механические свойства сталей. **Впервые** экспериментально найдены структурные и энергетические условия начал а локализации деформации, значения основных параметров и закономерности фазового $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращения, а также установлены оптимальные технологические режимы деформации нержавеющей стали, облученных различными высокоэнергетическими частицами, что может способствовать более широкому их использованию, например, в процессах высокоскоростного выдавливания формообразующих деталей, пресс-форм и штампов для изготовления термосов, гильз для снарядов, шестигранных чехлов тепловыделяющих сборок атомных реакторов и др. Представленный нами цикл научно-исследовательских публикаций по мартенситным $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращениям в облученных нержавеющей стали **являются физическими основами перспективных прорывных радиационных технологий**, тщательно разработанных и введенных до практического применения с целью создания новых или модификации имеющихся реакторных материалов, а также безопасного обращения с высокооблученным ядерным топливом атомных реакторов.

III. По созданию ядерных, радиационных и ионно-плазменных технологий:

Открыто новое явление термофлуктуационного плавления, состоящее в спонтанном переходе наночастиц вещества через энергетический барьер, разделяющий жидкое и твердое состояние. На ряде примеров двойных металлических систем на основе наиболее тугоплавких металлов, таких как ниобий и тантал,

экспериментально показан спонтанный переход морфологических компонент тонких пленок через границу между жидким и твердым состоянием с образованием твердых растворов при комнатной температуре в двойных системах. Полученные в результате термофлуктуационного плавления наночастиц металлов макроскопические двойные растворы являются термодинамически устойчивыми. С использованием эффекта повышения растворимости компонентов при термофлуктуационном плавлении синтезированы новые интерметаллиды Ta₃Pb, Nb₃Be, Nb₃Pb, которые являются **новыми сверхпроводниками** в гелиевом интервале температур. Разработаны **новые** промышленные технологии бездиффузионного синтеза ленточных сверхпроводников на основе Nb₃Sn и Nb₃Al. Материалы **открытия** изложены в пяти статьях в зарубежных реферируемых научных журналах и послужили основой для **ряда изобретений**.

Впервые в мире экспериментально и теоретически обоснована возможность создания космической ядерно-энергетической установки (ЯЭУ), генерирующей мощное лазерное излучение разного диапазона длин волн в стационарном, и в импульсном режимах генерации. **Впервые** в условиях стационарного ядерного реактора созданы внутриреакторные лазеры и получены генерации когерентного излучения электроионизационных инфракрасных CO₂- и CO-лазеров с ядерной ионизацией, и электроразрядного ультрафиолетового эксимерного XeF*-лазера с ядерной ионизацией в ядерном реакторе. Показано, что при электрической мощности ЯЭУ 500 кВт, можно получить суммарную мощность инфракрасного излучения CO-лазеров в стационарном режиме генерации – 160 кВт, а для CO₂ – лазеров - 70 кВт. Суммарная средняя мощность ультрафиолетового излучения эксимерных XeF-лазеров при высокой частоте повторения импульсов может составить 4,5 кВт.

Впервые в СНГ создан времяпролетный спектрометр с возбуждением вторичных ионов осколками деления урана, являющийся примером применения **ядерной технологии в новом направлении развития техники** для анализа термически нестабильных органических и неорганических веществ с большими молекулярными весами. Как **новое техническое средство** имеет большую перспективу в исследованиях в области химии высокомолекулярных соединений и фармакологии, а также в **фундаментальных исследованиях** по установлению закономерностей и механизмов взаимодействия быстрых тяжелых ионов с веществом.

Впервые организовано производство радиоактивных изотопов для медицины и промышленности. В результате оснащения реактора ВВР-К и изохронного циклотрона У-150М специальными облучающими устройствами, разработки комплекса радиохимических технологий **создана** возможность производства широкого круга радиоактивных материалов.



Изотопы, произведенные в ИЯФ НЯЦ РК, успешно поставляются в медицинские и промышленные организации страны и мировой рынок.

IV. Организована система подготовки кадров, использующая развитую экспериментальную базу и научные школы, работающие в области фундаментальных и прикладных исследований. Для наиболее полного использования возможностей МНИК в подготовке кадров, развитии научных исследований и передовых технологий создана **международная кафедра «Ядерная физика, новые материалы и технологии»**, создана **Инженерная лаборатория по развитию технологий использования ядерных трековых мембран**. Студенты бакалавриата и магистратуры, а также докторанты PhD этой кафедры принимают непосредственное участие в научной и технологической работе МНИК в области ядерной физики, радиационного материаловедения и производстве новых материалов на базе ускорителя ДЦ-60.

По темам представленной работы в процессе ее выполнения авторами были защищены **3** кандидатских и **5** докторских диссертаций и под их руководством защищены **22** кандидатские и **4** докторские диссертации. Получены **26** авторских свидетельств на изобретение и патенты, выпущены **15** монографий и учебных пособий, опубликованы по изложенным темам исследований в республиканских и зарубежных реферируемых научных журналах более **400** статей.

УДК 621.039.74

ВЫВОЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ВВР-К ИЗ КАЗАХСТАНА

Тулеушев А.Ж., Чакров П.В., Накипов Д.А.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

В 2009 году успешно завершён вывоз крупной партии отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) из Института ядерной физики Национального ядерного центра в Российскую Федерацию. 278 отработавших топливных сборок, содержащих около 74 кг облученного высокообогащенного урана и большое количество радиоактивных продуктов его деления, был осуществлён несколькими рейсами специального транспорта в период с декабря 2008 года по май 2009 года. Подготовка и реализация проекта выполнена совместными усилиями специалистов Казахстана, России, США и Международного агентства по атомной энергии. Работы профинансированы Национальной администрацией по ядерной безопасности Министерства энергетики США в рамках инициативы по уменьшению глобальной угрозы. В Институте ядерной физики ОЯТ было накоплено при работе исследовательского реактора ВВР-К, который используется для производства радиоизотопов медицинского и промышленного назначения, радиационных испытаний материалов, нейтронно-активационного анализа и научных исследований. Ликвидация многолетних запасов ОЯТ, вывезенных с площадки института впервые после распада СССР, существенно повысила безопасность и ресурс дальнейшей работы реактора.

Реактор ВВР-К – крупнейшая исследовательская установка Института ядерной физики Национального ядерного центра Республики Казахстан. Это многоцелевой исследовательский реактор бассейнового типа с легководным замедлителем, теплоносителем и отражателем. По своей конструкции и физическим особенностям он относится к самым безопасным типам реакторов, а по экспериментальным и технологическим возможностям – к числу лучших реакторов, так как является самым молодым из реакторов такого типа, созданных в СССР.

Реактор был введен в эксплуатацию в 1967 году и в течение 20 лет интенсивно использовался для исследований и испытаний материалов и компонентов ядерной техники, прежде всего разрабатывавшихся в СССР космических ядерных энергоустановок. В октябре 1988 года эксплуатация реактора ВВР-К была приостановлена для проведения работ по повышению его безопасности в условиях высокой сейсмичности, которые были завершены уже в независимом Казахстане. В 1997 году были успешно

произведены физический и энергетический пуски реактора ВВР-К, а с 1998 года возобновлена его регулярная эксплуатация.

В настоящее время реактор используется для радиационных испытаний перспективных материалов ядерных и термоядерных реакторов, производства радиоизотопов для медицины и промышленности, нейтронно-активационного анализа элементного состава различных материалов. Запас реактивности позволяет реактору непрерывно работать на номинальном уровне мощности до 20 суток.

Наряду с технологическими системами реактора, реакторный комплекс включает следующие установки:

- критический стенд;
- «горячие» камеры;
- универсальная петлевая установка;
- установка нейтронной радиографии;
- гидро- и пневмопочта.

Основные физические характеристики реактора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные физические характеристики реактора.

Параметр	Значение
Номинальная мощность, МВт	6
Вид топлива	уран
Обогащение U-235, %	36
Тип тепловыделяющей сборки (ТВС)	ВВР-Ц
Замедлитель, теплоноситель, отражатель	вода
Высота активной зоны, мм	600
Диаметр активной зоны, мм	720
Масса U-235 в рабочей загрузке при среднем выгорании 18%, г.	6300
Материал рабочих органов СУЗ	карбид бора
Количество рабочих органов СУЗ, шт.	8

В реакторе используются топливные сборки типа ВВР-Ц. Конструкция сборки показана на рисунке.

Конструкция пятитвэльной ТВС ВВР-Ц (Рисунок 1). Применяется в исследовательском ядерном реакторе бассейнового типа. В данной конструкции заложена возможность варьирования количества твэлов в ТВС (пяти- и трехтвэльные модификации).

Модификация ТВС ВВР-Ц с тремя твэлами имеет внутреннюю свободную полость шестигранной формы (размер под ключ 32,7 мм), предназначенную для размещения в ней органов системы управления реактором, а также различных экспериментальных устройств.

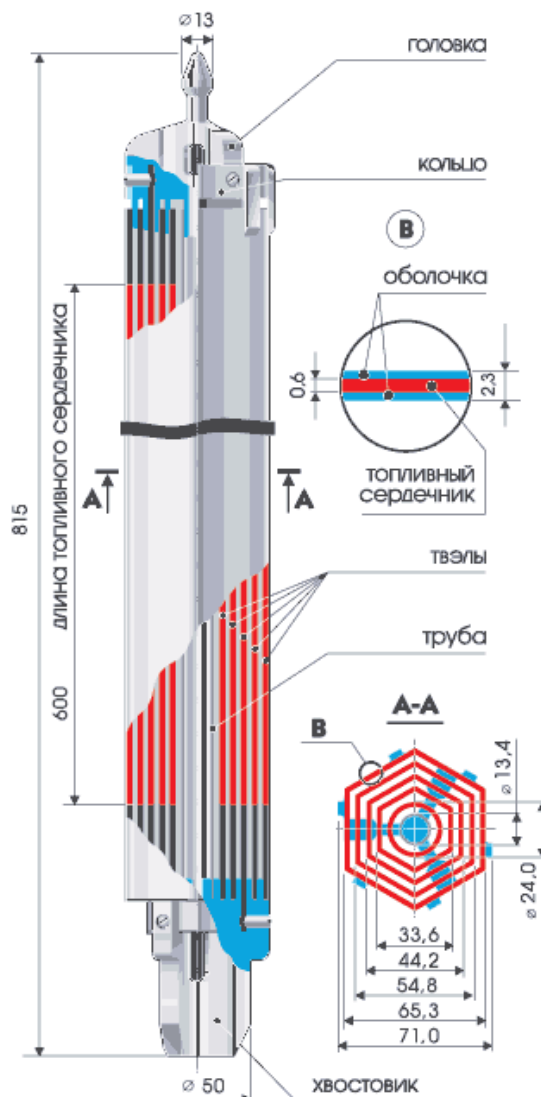


Рисунок 1. Тепловыделяющая сборка ВВР-Ц (пятитрубная)

Таблица 2. Технические характеристики и условия эксплуатации ТВС ВВР-Ц

Количество твэлов в ТВС, шт.	5 (3)
Тип твэла	трехслойный, дисперсионный
Толщина стенки твэла, мм	2,3
Обогащение топлива по U^{235} , %	36
Масса U^{235} , г	109 (83)
Содержание U^{235} в единице объема активной зоны, г/л	45,1 (34,3)
Поверхность теплосъема в единице объема активной зоны, $см^2/см^3$	3,54 (2,71)
Материал оболочек твэлов и концевых деталей	алюминиевый сплав
Топливо	металлокерамика
Масса, кг	3,9 (2,9)
Теплоноситель	вода обессоленная
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	35
Температура оболочки твэла, °С	до 95 (кипение на поверхности твэлов не допускается)
Средняя глубина выгорания U^{235} в выгружаемой ТВС, %	не менее 40

По достижении максимального выгорания урана в топливе, ТВС выгружаются из активной зоны реактора в хранилище отработавшего ядерного топлива (далее ОЯТ), где они должны «остывать», т.е. выдерживаться для распада короткоживущих про-

дуктов деления урана, не менее 3 лет. При этом необходимо обеспечить вентиляцию хранилища, постоянный дозиметрический контроль вентилируемого воздуха, а также поддерживать следующие химические параметры воды:

Таблица 3. Химические параметры воды

рН	Удельная электропроводность (мкСм/см)	Жесткость (мкг*экв/кг)	Cl (мкг/кг)	Al (мкг/кг)	Fe (мкг/кг)	Cu (мкг/кг)
5,5-6,5	<4,0	<3,0	<50	<50	<50	<10

Отклонение от этих параметров может привести к коррозии поверхности алюминиевых оболочек тепловыделяющих элементов топливных сборок, вплоть до их разгерметизации с выходом радиоактивных продуктов деления урана в воду хранилища ОЯТ. С такой проблемой столкнулись исследовательские реакторы в нескольких странах. Риск разгерметизации ТВС растет с увеличением времени их хранения в воде, поэтому выдержанные сборки необходимо отправлять на переработку на специализированные предприятия. Альтернативой является упаковка «остывших» отработавших топливных сборок в герметичные пеналы из нержавеющей стали и размещение их в «сухом» хранилище, однако этот метод является весьма затратным и не дает полной гарантии безопасности при дальнейшем длительном хранении.

В Советском Союзе ОЯТ всех исследовательских реакторов каждые 5-7 лет вывозилось на переработку в ПО «Маяк» (Челябинская область). Последний такой вывоз ОЯТ реактора ВВР-К состоялся в 1986 году. После распада СССР в 1991 году эта система была нарушена, и Институт ядерной физики вынужден был решать проблему обращения с ОЯТ самостоятельно. В связи с отсутствием на территории республики заводов по переработке ОЯТ, отработавшие ТВС просто накапливались в бассейнах «мокрых» хранилищ.

Аналогичная ситуация складывалась и в других странах бывшего социалистического лагеря, исследовательские реакторы которых использовали топливные сборки российского производства. Проблема не осталась незамеченной международным сообществом. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) с участием США и Российской Федерации инициировало программу возвращения отработавшего ядерного топлива исследовательских реакторов российского производства в страну происхождения. Предложение принять участие в этой программе было направлено Генеральным директором МАГАТЭ в 15 стран, 14 из которых, включая Казахстан, выразили свое согласие.

В 2003 году Казахстан посетила специальная миссия МАГАТЭ, в составе которой были специалисты министерства энергетики США и Росатома. В результате совместной работы были определены основные задачи, которые необходимо было решить для организации вывоза ОЯТ. За этим последовал длительный период переговоров и согласований. В частности, МАГАТЭ способствовало достижению соглашений о принятии Российской Федерацией отработавшего ядерного топлива исследовательских реакторов, использовавших топливо, произведенное в России, и о финансировании данных работ Правительством Соединенных Штатов Америки. Соглашение между правительствами Российской Федерации и Соединенных Штатов Америки о сотрудничестве по вывозу ОЯТ было подписано в мае 2004 года.

Следует отметить, что в Казахстане к этому времени уже существовала основная нормативная база для участия в совместном с США и Россией проекте по вывозу ОЯТ: одними из первых документов суверенного Казахстана в области атомной энергии стали Соглашение между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о сотрудничестве в области мирного использования атомной энергии, подписанное в сентябре 1993 года, и Соглашение между Правительством Соединенных Штатов Америки и Правительством Республики Казахстан относительно уничтожения шахтных пусковых установок межконтинентальных баллистических ракет, реагирования в чрезвычайных ситуациях и предотвращения распространения ядерного оружия, подписанное в декабре 1993 года.

В 2005 году в ИЯФ НЯЦ РК было организовано совещание с представителями Министерства энергетики США, где обсуждался проект вывоза ОЯТ на территорию Российской Федерации. В 2006 году по согласованию с Министерством энергетики и минеральных ресурсов РК Институту ядерной физики НЯЦ РК заключил контракт с Национальной администрацией по ядерной безопасности Министерства энергетики США на проведение работ по подготовке к вывозу ОЯТ.



Рисунок 2. Специальная миссия МАГАТЭ

В рамках подготовительных работ были разработаны и согласованы с соответствующими государственными органами программа транспортировки ОЯТ, которая включала программу физической защиты и инструкцию по аварийному реагированию, и оценка воздействия транспортировки на окружающую среду. Было распространено на территорию Республики Казахстан действие российского сертификата на конструкцию и перевозку транспортных упаковочных комплексов типа ТУК-19. Получены сертификат происхождения товара и лицензии на транспортировку ядерных материалов и экспорт ОЯТ. Произведен ремонт помещений и оборудования, которые предполагалось использовать при транспортировке ОЯТ. Приобретены и дооборудованы грузовые автомобили для транспортировки контейнеров с ОЯТ от Института ядерной физики до железнодорожной станции. Установлена видеосистема для дистанционного управления мостовым краном при проведении погрузочных работ. Для каждой отработавшей топливной сборки был произведен расчет следующих параметров:

- выгорание;
- остаточное тепловыделение;
- активность;
- радионуклидный состав.

Одной из основных проблем стала подготовка железнодорожной станции, где должна была производиться загрузка транспортных упаковочных комплексов в специализированный состав. В реестре назначений железнодорожных станций в Алматинском регионе не оказалось станции для работы с опасными грузами класса 7. Станции, использовавшиеся в советский период, к настоящему времени не отвечают требованиям безопасности из-за близкого их расположения к жилым массивам или автозаправочным станциям. В связи с этим была создана сов-

местная комиссия Национальной компании «Казахстан темир жолы» и Института ядерной физики по определению станции, соответствующей требованиям отправки ОЯТ. Из нескольких рассмотренных комиссией вариантов были выбраны станция и тупик, наиболее приемлемые с как с технической точки зрения, так и точки зрения радиационной и физической безопасности. После включения данной станции в реестр была проведена инспекционная проверка состояния железнодорожного тупика и подъездных путей на соответствие предъявляемым требованиям для работы с радиоактивным грузом класса 7. Акт, составленный по результатам проверки, содержал большое количество замечаний. Все они были устранены силами Института ядерной физики. К моменту отправки первой партии ОЯТ железнодорожный тупик и подъездные пути были приведены в соответствие с предъявляемыми требованиями.

В сентябре 2008 года было получено разрешение Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК уже непосредственно на вывоз ОЯТ из Казахстана в Российскую Федерацию для дальнейшей переработки. В ноябре был подписан контракт между ИЯФ НЯЦ РК и Федеральным центром по ядерной и радиационной безопасности Росатома (ФЦЯРБ) – организацией, уполномоченной Правительством Российской Федерации заключать внешнеторговые сделки на ввоз ОЯТ, на услуги по вывозу и переработке отработавшего ядерного топлива исследовательского реактора ВВР-К. В рамках этого контракта была произведена поэтапная отгрузка ОЯТ ИР ВВР-К в период с декабря 2008 года по май 2009 года.

Для транспортировки ОЯТ ИР ВВР-К были использованы транспортные упаковочные комплексы типа ТУК-19 российского производства. Общая характеристика их приведена в таблице 4.

Таблица 4. Общая характеристика ТУК-19

Характеристика	Значение
Наружные размеры (мм)	D 910 x H 2170
Размер полости (мм)	D 220 x H 1400
Масса с полной загрузкой (кг)	4750
Вместимость для ТВС типа ВВР-Ц (шт.)	4
Максимальное обогащение урана по ^{235}U (%)	90
Максимальное тепловыделение (Вт)	112
Время охлаждения ТВС (лет)	3
Количество комплектов (шт.)	16 + 4
Способ транспортировки	Ж.д. (ТК-5); авто



Рисунок 3. Транспортный упаковочный комплект типа ТУК-19

Транспортные упаковочные комплекты типа ТУК-19 предусматривают два вида загрузки «мокрый» и «сухой». «Мокрый» метод загрузки заключается в следующем: ТУК-19 опускается под воду в хранилище ОЯТ, вскрывается крышка, вручную загружаются отработавшие топливные сборки в количестве четырех штук. Затем ТУК-19 закрывается крышкой, извлекается из воды и выдерживается на воздухе для стока воды над бассейном хранилища. Такой вид загрузки имеет некоторые недостатки, а именно:

1. Необходимо держать транспортные упаковочные комплекты типа ТУК-19 на весу, так как при установке их на пол емкости хранилища, конструкция бассейна хранилища может не выдержать вес ТУК-19 (4750 кг, как видно из таблицы 2).

2. Необходимо иметь два подъемных крана, один из которых используется для опускания в хранилище и извлечения из него самого транспортного упаковочного комплекта типа ТУК-19, а второй - для открывания и закрывания крышки транспортного упаковочного комплекта.

3. Для загрузки установленного в хранилище ТУК-19 отработавшие топливные сборки (ОТВС) необходимо поднимать до высоты 3,2 метра от дна хранилища, при полной глубине его 4 метра. Оставшаяся толщина воды не может обеспечивать радиационную защиту оператора, загружающего ОТВС.

4. Размер свободной внутренней полости хранилища при размещении в нем ТУК-19 мал для того, чтобы перемещать ОТВС, и для проведения каких-либо измерений инспекторами МАГАТЭ.

Второй метод загрузки - «сухой». При использовании этого метода транспортный упаковочный комплект типа ТУК-19 устанавливается рядом с хранилищем, из него извлекается внутренний чехол, который опускается в хранилище и под водой загружается отработавшими ТВС, после чего извлекается из хранилища и переносится обратно в ТУК-19. При этом снятие и закрытие крышки, транспортировка самого ТУК-19 производится одним краном. Но и этот метод имеет недостатки:

1. Требуется специальное захватывающее устройство, автоматически освобождающее чехол при его загрузке в ТУК-19, так как из-за высокой активности отработавшего топлива доступ персонала к месту погрузки в этот момент невозможен. Это устройство должно обладать высокой надежностью, так как при его незапланированном срабатывании ликвидация аварии будет весьма затруднена.

2. Точность визуального контроля дистанционного процесса загрузки через окна защитных кабин управления подъемным краном недостаточна.

В результате проведенного анализа, использование первого метода загрузки было отвергнуто в связи с невозможностью устранения его недостатков, и выбран второй («сухой») метод загрузки. Для устранения недостатков этого метода было разработано и изготовлено автоматически освобождающееся захватывающее устройство, приобретена и установлена система видеонаблюдения с 4-мя камерами для дистанционного управления подъемным краном.



Рисунок 4. Перенос чехла из хранилища в ТУК-19



Рисунок 5. Загрузка чехла в ТУК-19



Рисунок 6. Расцепление специального захватывающего устройства

Также были проанализированы все возможные нестандартные ситуации и разработаны инструкции по действиям персонала в этих ситуациях. До начала реальной погрузки ОЯТ было проведено около 20 предварительных тренировок персонала с использованием специально подготовленных макетов. Это позволило выполнить реальную загрузку отработавших ТВС в упаковочные комплекты быстро и без сбоев.

До железнодорожной станции груз доставлялся на двух специально оборудованных грузовиках марки КАМАЗ, в каждом из которых устанавливалось по два транспортно-упаковочных комплекта ТУК-19. После перегрузки ТУК-19 в железнодорожные ваго-

ны-контейнеры типа ТК-5 спецсостав отправлялся на станцию назначения в Российской Федерации.

Четырьмя рейсами спецсостава из Казахстана в Россию было отправлено 278 штук отработавших ТВС, которые содержали около 74 кг облученного урана и большое количество радиоактивных продуктов его деления. Груз был благополучно доставлен в место назначения. Таким образом, совместными усилиями специалистов из Казахстана, России и США задача вывоза отработавшего ядерного топлива реактора ВВР-К в страну происхождения была успешно решена в запланированные сроки.



Рисунок 7. Специально оборудованный грузовик



Рисунок 8. Спецсостав с железнодорожными вагон-контейнерами типа ТК-5

**ҚАЗАҚСТАННАН ССР-Қ ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНЫҢ
ЖҰМЫСТАЛҒАН ЯДРОЛЫҚ ОТЫНЫН ТАСЫМАЛДАУ**

Түлеушев А.Ж., Чакров П.В., Накипов Д.А.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

2009 жылы Ресей федерациясына Ұлттық ядролық орталықтың Ядролық физика институтынан жұмысталған ядролық отынның (ЖЯО) ірі партиясын тасымалдау табысты аяқталды. 2008 жылғы желтоқсан мен 2009 жылғы мамыр аралығында 74 кг сәулеленген жоғары байытылған ураны мен оның үлкен мөлшердегі радиактивтік өнімдері бар 278 жұмысталған отындық жинақты арнайы көлікпен бірнеше рейспен тасу іске асырылды. Жобаны дайындау мен іске асыру Қазақстанның, Ресейдің, АҚШ-тың және Атом энергиясы бойынша халықаралық Агенттіктің мамандарының бірлескен күшімен орындалды. Жұмыстарды жаһандық қауіпті азайту бойынша бастама шеңберінде АҚШ-тың энергетика Министрлігінің ядролық қауіпсіздік жөніндегі Ұлттық әкімшілігі қаржыландырды. Ядролық физика институтында ЖЯО ССР-Қ зерттеу реакторының жұмыс істеу барысында жиналды, ол медициналық және өнеркәсіптік мақсаттарға арналған радиоизотоптарды өндіру, материалдардың радиоактивтік сынақтары және нейтрон-активациялық талдау мен ғылым зерттеулер үшін пайдаланылады. Институт алаңынан тасып шығарылған ЖЯО-ның көпжылдық қорын жою ССРО-ның ыдырауынан кейін алғаш реактордың ары қарай жұмыс істеу мүмкіншілік қоры мен қауіпсіздігін едәуір арттырды.

**SHIPMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL OF THE WWR-K
RESEARCH REACTOR FROM KAZAKHSTAN**

A.Zh. Tuleushev, P.V. Chakrov, D.A. Nakipov

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

In 2009, the Institute of Nuclear Physics of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan has successfully completed a shipment of spent nuclear fuel to the Russian Federation. 278 spent fuel assemblies containing about 74 kg of irradiated highly enriched uranium and large amount of radioactive fission products were shipped in four runs of special transport in the period of December 2008 – January 2009. Preparation and implementation of the project were performed jointly by specialists from Kazakhstan, Russia, USA and International Atomic Energy Agency. The project was funded by National Nuclear Security Administration in the framework of the Global Threat Reduction Initiative. Spent fuel was accumulated in the Institute of Nuclear Physics as a result of operation of WWR-K research reactor, which is used for production of radioisotopes for medicine and industry, irradiation testing of materials, neutron activation analysis and scientific research. Elimination of large amount of spent nuclear fuel, first after disintegration of the USSR, has substantially reduced radiation risks and increased the resource of further safe operation of the reactor.

УДК 621.384.633.5/6

НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-60 В г. АСТАНА

Амангелды Н., Буртебаев Н., Бугыбаев Е., Горлачев И., Кислицын С.,
Колобердин М., Лысухин С., Нестерова А., Пеньков Ф., Платов А., Шериф Хамада

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Приводятся результаты научно-исследовательских и технологических работ, проведенных сотрудниками ИЯФ НЯЦ РК на циклотроне ДЦ-60, расположенном в Междисциплинарном научно-исследовательском комплексе при Евразийском Национальном университете им. Л.Н.Гумилева в г. Астане, в области ядерной физики, физики твердого тела, элементного анализа и технологии получения трековых мембран.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке и создании циклического ускорителя ДЦ-60 предусматривался широкий спектр возможностей, который позволит проводить исследования в различных областях науки и техники. По спектру ускоряемых ионов имеется возможность ускорения элементов от лития до ксенона. Диапазон энергий ускоряемых ионов лежит в диапазоне от 0.35 МэВ/нукл. до 1.75 МэВ/нукл. и может плавно регулироваться настройками ускорителя. Кроме того, для задач, требующих низких энергий ионов предусмотрен отдельный канал низких энергий, в котором ионы ускоряются до энергий 20 - 400 кэВ, в зависимости от заряда. Для обеспечения высокой эффективности использования пучкового времени на ускорителе предусмотрены четыре канала: три канала высокой энергии и один канал низкой энергии. Каждый из каналов имеет свое оборудование, ориентированное на определенный круг задач.

Гибкость технологических решений, заложенная на стадии проектирования циклотрона, и уникальность технических возможностей установки позволили в достаточно короткие сроки развить в Междисциплинарном научно-исследовательском комплексе ряд новых научных и технологических направлений с перспективой создания на базе комплекса нового научного центра.

Ускорительный комплекс ДЦ-60 открывает возможности для постановки экспериментов в тех направлениях радиационной физики твердого тела, ядерной физики, элементного анализа, которые без этой установки ранее были недоступны.

УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-60

Основой Междисциплинарного научно-исследовательского комплекса при Евразийском Национальном университете им. Л.Н.Гумилева в г. Астана является тяжелоионный циклотрон ДЦ-60 со следующими характеристиками:

- ускоряемые ионы - от лития до ксенона
- диапазон энергий ускоренных ионов - 0.4-1.7 МэВ/нуклон
- диаметр полюса магнита - 1.6 м
- среднее магнитное поле - 1.25-1.65 Т

Циклотрон ДЦ-60 оборудован ионным источником с электрон-циклотронным резонансом (ЭЦР) способным генерировать пучки ионов в широком диапазоне масс и зарядов. Он может работать как инжектор тяжелых ионов в циклотрон для получения пучков ионов высокой энергии, так и в автономном режиме, обеспечивая проведение экспериментов на пучках низкой энергии. Система аксиальной инжекции, состоящая из электромагнитных ионно-оптических элементов, блоков диагностики пучка, банчера и электростатического инфлектора, обеспечивает согласование инжектируемого в циклотрон пучка с ускоряющей структурой и оптимальный захват частиц в режим ускорения. Ускорение происходит на 4 и 6 гармонике частоты обращения частиц в магнитном поле, сформированном 4-х секторным магнитом. Ускорительная структура состоит из двух четверть волновых резонаторов, двух 45-градусных дуантов с рабочим напряжением 50 кВ расположенных в долинах магнита и соединенных перемычкой. Питание ВЧ системы осуществляется от одного генератора с частотой от 11 до 17,4 МГц и мощностью 20 кВт. Вывод пучка из циклотрона осуществляется электростатическим дефлектором и пассивным магнитным каналом, снижающим влияние рассеянного магнитного поля. Система транспортировки обеспечивает разводку пучка к конечным экспериментальным станциям при помощи коммутирующего магнита и ионно-оптических элементов, формирующих пучок с необходимыми пространственными характеристиками. Для обеспечения максимальных возможностей для физических исследований и развития радиационных технологий, ускоритель оборудован двумя камерами для ионной имплантации, камерой рассеяния для экспериментов в области ядерной, атомной физики и ядерно-физических методов анализа поверхности, а так же, специализированной камерой облучения полимерных пленок для производства трековых мембран [1-4]. Схема циклотрона ДЦ-60 приведена на рисунке 1.

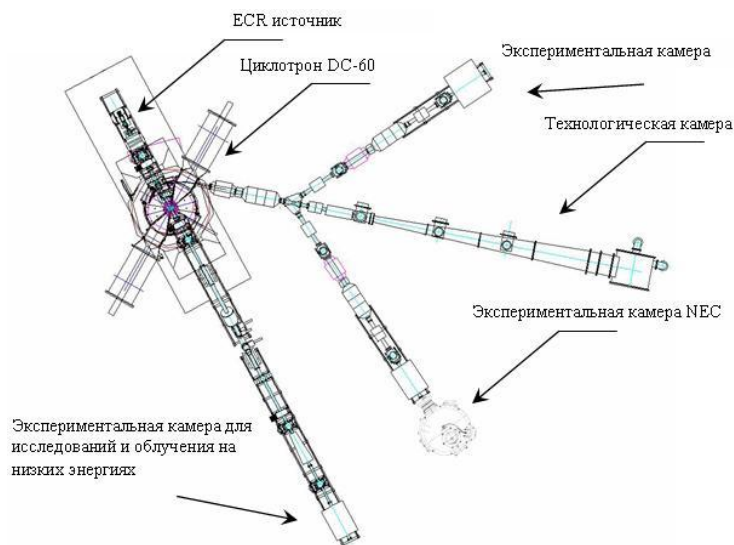


Рисунок 1. Схема циклотрона ДЦ-60

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ

Метод анализа элементного состава материалов, использующий спектры характеристического рентгеновского излучения возбужденного ускоренными ионами (PIXE), широко используется в исследовательской практике. В большинстве случаев он реализован на электростатических ускорителях генерирующих пучки легких ионов (протоны, альфа-частицы) с энергией 1-2 МэВ/нуклон. Этот метод, безусловно, не обладает такой гибкостью и экспрессностью как традиционный метод рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением исследуемого материала излучением рентгеновской трубки или радиоактивного источника. Однако, в специальных случаях, например при анализе тонких пленок или микрообъектов, метод PIXE позволяет достигать существенно лучших результатов. Тяжелые ионы с энергией 1-2 МэВ/нуклон используются крайне редко для такого вида анализа. Это объясняется отсутствием систематизированных и взвешенных данных по сечениям возбуждения характеристического рентгеновского излучения тяжелыми ионами а так же трудностями, связанными с обработкой спектров такого излучения. Изучение процессов взаимодействия тяжелых ионов с веществом, в частности, измерение сечений возбуждения рентгеновского излучения, является серьезной задачей атомной и радиационной физики имеющей прикладное значение.

Ускоритель тяжелых ионов, циклотрон ДЦ-60, введенный в эксплуатацию в 2007 году в Междисциплинарном научно-исследовательском комплексе при Евразийском Национальном университете им. Л.Н.Гумилева в г. Астана и оснащенный необходимым оборудованием для проведения такого рода экспериментов предоставляет уникальные возможности для проведения работ в этой области.

PIXE эксперименты проводились в мишенной камере, изготовленной из цельного блока алюминия с внутренним диаметром - 430 мм и внутренней высотой - 200 мм. Основой вакуумной системы камеры являются турбомолекулярный насос производительностью 250 л/с и форвакуумным насосом с производительностью 190 л/мин. Управляемые электромагнитные и пневматические затворы с соответствующими контроллерами и средствами измерения обеспечивают автоматическую откачку камеры или напуск воздуха. Схема экспериментальной мишенной камеры представлена на рисунке 2.

Камера оснащена мишенным манипулятором с вакуумными двигателями и повторителями, обеспечивающими вращательное и возвратно-поступательное перемещение образца: X и Z движение на ± 8 мм и Y движение на ± 50 мм с разрешением 0,0025 мм, Y или тета ось вращения (θ) на 90° с разрешением $0,01^\circ$. Вдоль оси Z или Фи (ϕ) вращение непрерывное с разрешением 0.01° .

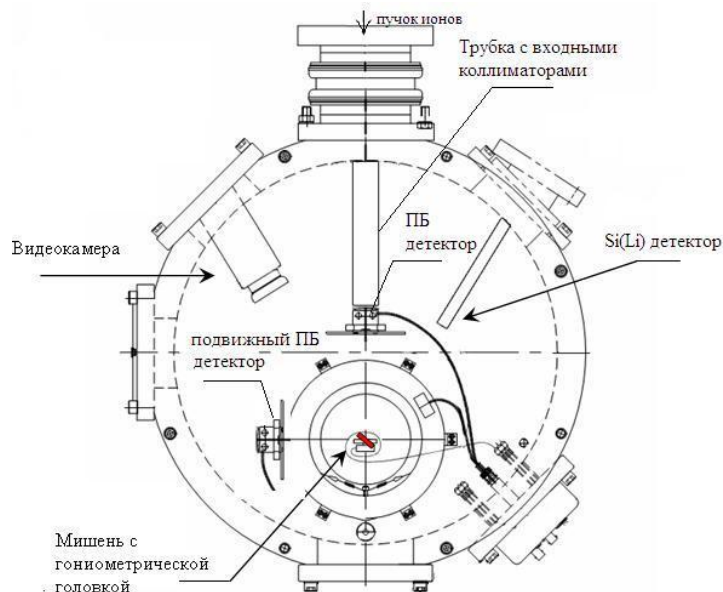


Рисунок 2. Мишенная камера NEC

Для регистрации вторичного рентгеновского излучения в камере предусмотрен 30 мм^2 Si(Li) детектор, расположенный под углом 45° к направлению движения пучка, в комплекте со сменщиком рентгеновских фильтров, предусилителем, спектрометрическим усилителем и аналого-цифровым преобразователем. Перед детектором для уменьшения вклада в интегральную загрузку спектрометра мягкого рентгеновского излучения может быть расположен фильтр. Ручное перемещение детектора с шагом 1 мм позволяет легко менять расстояние от мишени до кристалла анализатора, изменяя, таким образом, телесный угол, стягиваемый детектором. Программа GUPIXE, разработанная в университете GUELTH, позволяет обрабатывать полученные спектры, определять интенсивности рентгеновских пиков, вычислять содержания химических элементов и вычислять пределы обнаружения элементов для тонких и толстых образцов. Программа использует нелинейную подгонку методом наименьших квадратов с модификацией формы пика и учитывает наложения пиков, пики вылета, фон, материал фильтра, матричную коррекцию и вторичную флуоресценцию для толстых мишеней.

В экспериментах использовались ускоренные пучки N^{2+} , Ar^{5+} , Kr^{12+} с энергией 1 МэВ/нуклон, а также N^{2+} , Ar^{8+} , Kr^{13+} с энергией 1.4 МэВ/нуклон. Пучки транспортировались в мишенную камеру через входную диафрагму диаметром 3 мм.

Расчет сечений проводился по формуле:

$$\sigma (\text{см}^2) = N_x \cdot M \cdot \cos \Theta / t \cdot \epsilon / N_p / N_0 \quad (1)$$

где N_x – число зарегистрированных рентгеновских квантов; M (г/моль) – атомная масса мишени; Θ – угол между направлением движения пучка и нормалью к мишени; t – толщина мишени (г/см²); ϵ – эф-

фективность регистрации рентгеновского излучения; N_p – число заряженных частиц, упавших на образец за время набора рентгеновского спектра; N_0 (1/моль) – число Авогадро.

Ниже приведены геометрические условия проведения эксперимента:

Расстояние от входной диафрагмы до мишени – 11.2 см;

Расстояние от мишени до детектора – 19.3 см;

Угол между детектором и осью пучка - 32° ;

Углы между пучком и нормалью к мишени - 16° .

Измерение количества упавших на образец во время эксперимента частиц осуществлялось с помощью интегратора тока 439 фирмы ORTEC. Корректность измерения интеграла заряда во многом определяется в этом случае учетом вклада вторичной электронной эмиссии. Для исключения вклада выбитых электронов в регистрируемый ток ионного пучка было разработано устройство подавления вторичных электронов на основе постоянных магнитов, расположенных в непосредственной близости от облучаемой мишени.

Измерение толщин напыленных пленок проводилось в ИЯФ на ускорителе УКП-2-1 методом Резерфордского обратного рассеяния (ROP). В экспериментах использовался ускоренный пучок протонов с энергией 1 МэВ. При обработке полученных спектров и вычислении толщин пленок использовалась программа RUMP. Энергетические потери ионов в веществе были рассчитаны с помощью программы TRIM.

В результате проведенных экспериментов были измерены сечения выхода K и L линий характеристического рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии ускоренных тяжелых ионов N, Ar и Kr с энергией 1 и 1.4 МэВ/нуклон с атомами

мишеней. В экспериментах в качестве мишеней использовались пленки Cr, Ti, Cu, Ge, Nb, Ag, Sn, W, Ta, Pb толщиной до 200 мкг/см^2 , осажденные на органическую подложку.

Как показали эксперименты, рентгеновские спектры, полученные при взаимодействии тяжелых ускоренных частиц с атомами мишеней, имеют ряд особенностей в сравнении с аналогичными спектрами с возбуждением характеристическим рентгеновским излучением (РФА анализ) и при возбуждении атомов мишени протонами:

- В спектрах помимо рентгеновских линий, соответствующих атомам облучаемых мишеней, присутствуют K и L линии налетающей частицы. Излучение этих квантов возникает вследствие ионизации внутренних оболочек ускоренных ионов атомами мишени (инверсный вариант PIXE).

- Рентгеновские спектры, полученные при возбуждении атомов мишеней тяжелыми частицами, имеют высокий уровень фона, обусловленного тормозным излучением тяжелых частиц и вторичных электронов, что приводит к ухудшению чувствительности метода при анализе элементного состава образцов.

- Полученные результаты показывают, что для K переходов аргона энергетическое смещение практически отсутствует. В то же время для криптона L переходы, так же как и большинство переходов для атомов мишеней, смещены в более высокоэнергетичную область, а K переходы криптона наоборот – в низкоэнергетичную область.

- Все линии характеристического излучения сильно уширены и асимметричны – присутствует затянутые высокоэнергетичные хвосты. Уширение пиков приводит к существенным искажениям формы линий и, как следствие, может привести к появлению дополнительных погрешностей в определении площади пиков. Поэтому для решения поставленных задач чрезвычайно важно понимание физических основ наблюдаемого явления и корректное описание уширенных пиков.

Явление уширения рентгеновских пиков при ионизации атомов мишени тяжелыми ионами известно с 1977, когда была опубликована монография S. Morita и M. Kamiya [5]. Однако исследований этого явления до сих пор в мире проведено немного.

Уширение рентгеновских пиков вызвано многократной ионизацией внутренних оболочек атомов мишени. При столкновении налетающего иона с атомом мишени электроны внутренних оболочек атомов мишени с определенной долей вероятности переходят на стабильные уровни налетающего иона, что приводит к ионизации атомов мишени. Это явление называется эффектом передачи заряда. Таким образом, имеется вероятность одновременной многократной ионизации, например ионизация K-оболочки сопровождается ионизацией L-оболочки. Обычно эти эффекты невелики – менее нескольких

процентов в случае легких налетающих ионов. В случае бомбардировки мишени тяжелыми ионами, однако, вероятность многократной ионизации становится больше и приводит к серьезному влиянию на выход флуоресценции или вероятности переходов Coster-Kronig. В спектрах можно наблюдать также различные сателлитные структуры K-линий, обусловленные одновременной многократной ионизацией, полученные при бомбардировке мишени.

Для описания таких спектров требуется специализированное программное обеспечение, учитывающее все возможные варианты сателлитных переходов. С этой целью рассматривается два подхода спектральной обработки. Первый из них, описанный в статье [6], используя общие аргументы центральной граничной теоремы, подгоняет комплексные рентгеновские спектры как профиль Vogtian подгонки с входными параметрами ширины пиков, которые могут быть получены из многоконфигурационных Dirac-Fock (MCDHF) вычислений. Пример обработки рентгеновского спектра, полученного при облучении палладиевой мишени пучками 279 МэВ O^{7+} и 178 МэВ Ne^{6+} . Альтернативный подход к анализу рентгеновских спектров, испускаемых многократно-ионизованными атомами описан в современной работе Horvat et al. [7].

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ИОНОВ КИСЛОРОДА И АЗОТА НА ЯДРАХ ^{12}C , ^{16}O ПРИ ЭНЕРГИЯХ ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА

Изучение упругого рассеяния тяжелых ионов на легких ядрах при энергиях вблизи кулоновского барьера представляют интерес как с точки зрения установление достоверных значений параметров потенциалов взаимодействия тяжелых ионов при низких энергиях, так и для изучения механизма кластерных передач в процессах рассеяния.

Например, можно выделить систематическое изучение упругого рассеяния $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})^{12}\text{C}$ в диапазоне энергии от 14 до 300 МэВ. Важной особенностью этих данных является значительное увеличение сечения в области задних углов, начиная с 80° , при энергиях от 17 МэВ до 80 МэВ. Проявление эффекта аномального рассеяния назад говорит об обладании ядром кластерной структурой и указывает на то, что в сечение могут вносить существенный вклад обменные механизмы, связанные с развалом налетающей частицы. Существует предположение о том, что значительный вклад в сечение рассеяния $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ под большими углами может вносить упругая передача α -частицы.

Аналогичная ситуация наблюдается и в упругом рассеянии ^{16}O на ^{11}B . К сожалению, ограниченное количество экспериментов выполнены в узком интервале энергии от 27 до 64 МэВ, причем угловое распределение процессов ограничены, в особенности в передних углах. Угловое распределение в передних углах показывает слабые осцилляции, тогда как в углах обратного рассеяния они проявляют себя

довольно резко, причем такая характеристика этих процессов нарастает более резко, с ростом энергии падающего иона. Такое поведение углового распределения упругого рассеяния тяжелых ионов плохо поддается теоретическому описанию по оптической модели. В ряде работ [8-10] для описания угловых распределений используются различные варианты оптической модели, в которых рассматривается передача пяти нуклонами или наличием связи с другими ядерными каналами, в частности процессами компонд-упругой реакции.

То же самое имеет место в упругом рассеянии ионов ^{12}C на ядрах 1р-оболочки. В частности, при энергиях вблизи кулоновского барьера на ядрах 1р-оболочки в процессах рассеяния на ядрах ^{11}B и ^{16}O также имеет место заметный подъем сечений под обратными углами [11, 12]. Во всех этих случаях не выполнен системный анализ поведения подъема сечений в зависимости от энергии налетающих ионов и массы ядра-мишени из-за отсутствия подробных экспериментальных данных при энергиях вблизи кулоновского барьера. Таким образом, к настоящему моменту, механизмы формирования сечений упругого рассеяния тяжелых ионов на легких ядрах остаются противоречивыми из-за кластерных особенностей структур взаимодействующих ядер.

В результате проведенных экспериментальных работ на ускорителе ДЦ-60 получены первые результаты по подробному изучению механизмов упругого рассеяния ионов кислорода и азота на ядрах 1р-оболочки при энергиях вблизи кулоновского барьера. Дифференциальные сечения упругого рассеяния ионов кислорода и азота на ядрах ^{16}O , ^{12}C были измерены на выведенном пучке циклотрона ДЦ-60 ИЯФ НЯЦ РК (г. Астана) в интервале углов 24° - 124° в системе центра масс при энергии 1,75 МэВ/нуклон. В качестве мишеней были использованы пленки окиси Al_2O_3 и углерода с толщиной порядка 20 мкг/см². Энергетические спектры рассеянных частиц регистрировались полупроводниковым кремниевым детектором фирмы ORTEC с толщиной чувствительного слоя 100 мкм. Энергетическое разрешение системы регистрации составило 250-300 кэВ, которое, в основном, определялось энергетическим разбросом первичного пучка. Эксперименты проводились с использованием мишенной камеры, показанной на рисунке 2. Описание камеры приведено выше.

Как и следовало ожидать, предварительные экспериментальные результаты по упругому рассеянию ^{16}O на ^{12}C при энергии $E = 1.75$ МэВ показывают заметный подъем сечения упругого рассеяния под большими углами. В то же время в угловых распределениях рассеянных ионов ^{14}N на этих же ядрах не наблюдается подъема сечений в области больших углов рассеяния, что свидетельствует о низкой кластеризации ядра азота.

Процесс рассеяния ионов ^{16}O на ядрах ^{12}C ядра вполне удовлетворительно описывается в передних углах рассеяния оптической моделью, тогда как рассеяние на задние углы значительно расходится с описанием по этой модели, с установленными в настоящей работе потенциалами. При этом, в ходе анализа экспериментальных данных в рамках оптической модели получены дискретные наборы параметров потенциала взаимодействия для систем $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ и $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$. Проблему однозначного определения глубины потенциала можно разрешить с привлечением к анализу угловых распределений упругого рассеяния экспериментальных данных в широком диапазоне энергии. Для оценки вклада обменных эффектов за счет кластерных проявлений в упругое рассеяние кислорода на ядре углерода под обратными углами был использован борновское приближение метода искаженных волн с точным учетом конечности радиуса взаимодействия. Формализм расчета реакции в рамках борновского приближения метода искаженных волн подобно изложен в работе [13].

На рисунке 3 представлены экспериментальные и теоретически рассчитанные в рамках оптической модели и метода искаженных волн сечения упругого рассеяния ионов кислорода на ядрах углерода. Как видно из рисунка совместное описание угловых распределений упругого рассеяния по оптической модели и методу искаженных волн позволяет воспроизвести абсолютное сечение во всем диапазоне углов.

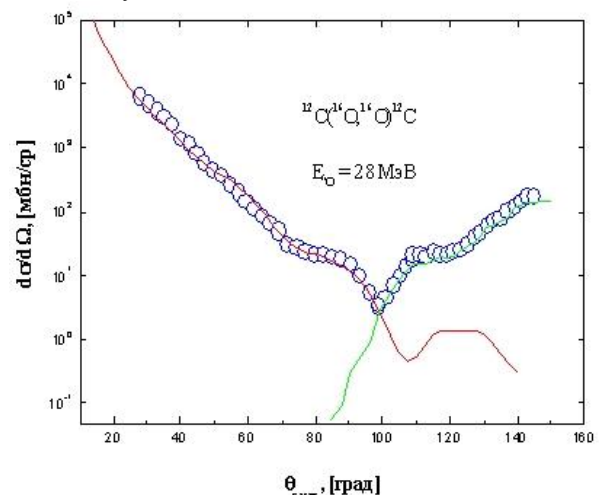


Рисунок 3. Угловые распределения дифференциальных сечений ^{16}O на ядре ^{12}C при энергии 28 МэВ. Символы – экспериментальные данные, красная кривая – расчет по оптической модели, зеленая кривая – сечения упругой передаче α -частицы, рассчитанные методом искаженных волн

Таким образом, продемонстрировано достаточно сильное влияние обменного процесса в области задних углов для рассматриваемых систем.

Для дальнейшего уточнения влияния степени кластеризации взаимодействующих ядер на

формирование сечений рассеяния тяжелых ионов планируется изучить процесс взаимодействия сильно кластеризованных ионов ^{12}C с ядрами 1p-оболочки.

ПРОИЗВОДСТВО ТРЕКОВЫХ НАНОФИЛЬТРОВ

Ядерные мембраны – это особый вид ультра- и микрофильтрационных мембран, получаемых из тонких полимерных пленок путем облучения высокоэнергетичными тяжелыми заряженными частицами и последующего химического травления. По оценкам зарубежных специалистов, технология производства ядерных мембран является одной из наиболее перспективных технологий последних десяти лет, имеющей самое широкое применение. В последнее время происходит бурное развитие мембранных технологий на основе трековых мембран, изготавливаемых с использованием ускорителей тяжелых ионов и ядерных реакторов. При этом, развитие собственно мембранных технологий и достигнутые в этом направлении результаты выводит на новый уровень исследования в таких важных отраслях как клиническая медицина, молекулярная генетика и микробиология, коллоидная химия, микроэлектронная промышленность, охрана окружающей среды.

Наиболее хорошо отработана технология производства мембран на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ), которые являются в настоящее время коммерческими продуктами. Для облучения ПЭТФ пленок применяют ускоренные ионы с удельными потерями энергии dE/dx на уровне 6-10 МэВ/мкм. В указанном диапазоне dE/dx скорость травления треков в ПЭТФ принимает максимальные значения. Пучки ионов Kг с энергиями около 1 МэВ/н и 1,5 МэВ/н могут считаться оптимальными для бомбардировки ПЭТФ пленок толщиной 10 и 20 мкм, соответственно. Варьируя условия химической обработки, получают мембраны с диаметрами пор от ~ 0.01 мкм до 10-12 мкм. Данный тип мембран остается на мировом рынке уникальным в плане точности геометрического размера пор и узкого распределения пор по размерам. Их области применения связаны в основном с аналитическими приложениями, а также биологическими и медицинскими задачами. Мембраны характеризуются умеренной химической стойкостью и неплохой термостойкостью (до 120-150°C).

Освоение технологии производства трековых мембран является инновационной работой, направленной на становление передовой технологии, не представленной ранее в Казахстане и являющейся до настоящего времени прерогативой небольшого числа наиболее развитых промышленных стран.

При отработке технологии производства трековых мембран основное внимание уделяется удовлетворению требований конечных потребителей продукции:

1. Гарантированный диаметр пор, минимальное количество перекрывающихся пор.
2. Высокая производительность мембран.
3. Достаточная механическая прочность.
4. Точность соблюдения параметров мембран.

Исходя из этого, были сформулированы технологические условия облучения ПЭТФ пленок на ускорителе ДЦ-60, позволяющие максимально удовлетворить потребительские требования к трековым нанопористым мембранам:

1. Поперечная однородность поля облучения.
2. Продольная однородность облучения
3. Высокий процент сквозного прошивания ускоренными ионами всей толщины пленки.
4. Облучение исходной пленки ускоренными ионами под разными углами и достижение максимальной равномерности углового распределения скрещенных треков.
5. Контроль режима облучения *online* для получения заданной плотности треков в конечном продукте.

Выполнению этих условий и были посвящены работы на ДЦ-60.

Измерение поперечного профиля пучка ионов криптона в плоскости облучения трековых мембран

Одной из проблем, возникающей при измерении пространственного распределения пучка в поле облучения ПЭТФ пленок, является низкая плотности тока, лежащая в диапазоне 0.1-5 нА/см². Это затрудняет непосредственное измерение тока с помощью цилиндра Фарадея. Для решения этой проблемы была разработана система измерения, основанная на регистрации характеристического рентгеновского излучения, от медной фольги, расположенной перед сцинтилляционным детектором, показанная на рисунке 4.

Калибровка разработанной системы проводилась в экспериментальной мишенной камере, показанной на рисунке 2. Испытания продемонстрировали хорошую линейность и чувствительность системы в диапазоне токов, запланированных для облучения полимерной пленки.

Для реализации пространственного перемещения детектора в поле облучения было изготовлено устройство сканирования, включающее управляемый двухкоординатный перемещаемый стол со сменой диафрагмой.

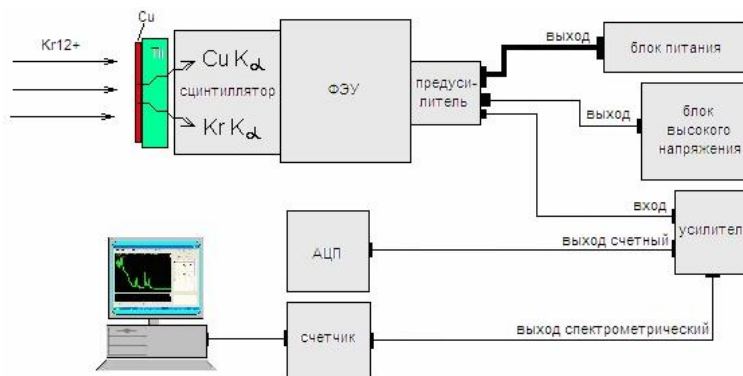


Рисунок 4. Принципиальная схема системы измерения потока ионов по вторичным рентгеновским квантам

В результате испытаний было показано, что устройство контроля пространственного распределения пучка позволяет прогнозировать плотность пор в облучаемом материале, позволяет получить качественную картину распределения плотности пор и имеет динамический диапазон измерений не хуже трех порядков. Калибровочный коэффициент $2,2 \cdot 10^{-6}$ отсчетов на трек. Использование сменных диафрагм позволяет расширить динамический диапазон еще на два порядка. Кроме измерения поперечной однородности засветки полимерной пленки, устройство измерения плотности пучка может быть использовано для измерения вертикального распределения в пучке тока, что позволит знать угловое распределение треков в облученной пленке.

Повышение продольной однородности облучения

Для контроля временных вариаций потока ускоренных частиц был изготовлен монитор, позволяющий измерять ток пучка ионов во время облучения. Монитор представляет собой изолированную выдвижную рамку, с натянутой сеткой прозрачностью 85%. Разработанный монитор пучка не вносит принципиальных искажений в форму и распределение плотности тока. Потери, составляющие порядка 15%, распределены равномерно по всей области облучения.

Испытания монитора пучка показали его пригодность для оперативного контроля тока. Коэффициент пропорциональности, составивший 2.31, указывает на то, что ток на измерительной сетке больше, чем на цилиндре. Фарадея. Это связано с большой коэффициентом эмиссии вторичных электронов (~ 130 электронов/ион). В течение всей сессии облучения (около 4 часов) все параметры монитора оставались неизменными. Таким образом, устройство позволяет контролировать ток пучка во время облучения с высокой точностью, при условии предварительной его калибровки перед началом сессии облучения.

Определение пробега ионов криптона в ПЭТФ пленке

Одним из перспективных направлений повышения плотности треков без снижения прочности мем-

браны является использование скрещенных треков, для получения которых используются специальные маски, вырезающие из потока ионов пучки, движущиеся под различными углами. Угловые вариации создаются за счет изменения наклона облучаемой пленки на подающем барабане. При этом увеличивается длина пробега ионов в пленке обратно пропорционально косинусу угла наклона. Для определения диапазона допустимых углов наклона были проведены эксперименты по определению пробега ионов Kr в материале пленки.

Первые эксперименты показали, что расчетные значения пробега, получаемые с использованием программы SRIM, скорее всего, завышены. Так, расчетный пробег криптона в полиэтилентерефталате для энергии 1.6 МэВ/нукл. (134.4 МэВ) составляет 24.9 мкм, при продольном страгглинге – 0.69 мкм. Этого пробега было бы вполне достаточно для производства трековых мембран толщиной 23.4 мкм на скрещенных пучках с угловыми отклонениями $\pm 15^\circ$, но на практике даже в случае отсутствия углового отклонения, наблюдается очень небольшой процент сквозных треков. При этом имеется большая разница в диаметре пор с разных сторон облучаемой пленки.

Для измерения пробега ионов в лавсановой пленке необходимо было создать такие условия, при которых часть пор остаются глухими. Для оценки пробега были сделаны следующие допущения, не вносящие большой ошибки в окончательный результат:

- глубина залегания концов треков имеет нормальное распределение;
- страгглинг принимался расчетный из программы SRIM;
- скорость планарного травления равна радиальной скорости травления.

Оценка пробега производилась из отношения количества пор на лицевой и обратной стороне пленки в условиях вариации толщины пленки. Подсчет количества пор менее 100 нм в диаметре затруднителен, поэтому подсчитывались только поры с диаметром более 100 нм. Всего было проведено три эксперимента:

1. Измерения длины пробега в лавсановой пленке и ее разброс производились на образце, сложенном из 10 пленок, толщиной 2,5 мкм. Облучение производилось пучком $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с энергией 1.6 МэВ/нукл, параллельным нормали к облучаемой поверхности. После облучения пленки были протравлены при одинаковых условиях до диаметра пор примерно 0.3 – 0.5 мкм. Количество треков после девятой пленки бралось как среднее от числа выходных треков на девятой пленке и входных на десятой пленке. Отношение количества треков после девятой пленки к среднему количеству треков на предыдущих пленках составило 0.855, что соответствует 1.06 σ .

Таким образом, длина пробега может быть рассчитана, как: $L = 2.5 \cdot 9 + 1.06 \cdot 0.586 \approx 23$.

Полученная длина пробега ниже теоретически рассчитанной (24.9 мкм), но процедура не позволяет точно определить пробег, из-за достаточно грубого шага (2.5 мкм) по толщине и возможной неточности в определении толщины отдельных пленок.

2. Лавсановая пленка, толщиной 23.4 мкм была облучена ионами $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с энергией 1.6 МэВ/нукл. Плотность облучения 1.4×10^8 ион/см².

Наблюдаемая картина: Поры с лицевой стороны имеют одинаковый диаметр и растравливаются с одинаковой скоростью. Поры с обратной стороны имеют значительно меньший диаметр и имеют большой разброс по площади. Отношение количества треков более 100 мкм к общему числу входных треков для разных образцов составило 0.317 – 0.367, что соответствует значениям (-0.34) – (-0.47) σ . Средняя глубина залегания концов треков 0.4-0.6 мкм, а полный пробег 22.8 – 23 мкм.

3. Была облучена лавсановая пленка ионами $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с энергией 1.75 МэВ/нукл. (максимально достигнутая на сегодняшний день энергия). Плотность облучения 2.6×10^7 ион/см². Полученные трековые мембраны имеют одинаковый размер входных пор и небольшой разброс диаметров на обратной стороне. Более половины выходных пор имеют тот же диаметр, что и входные. В третьем эксперименте присутствует большой процент изначально сквозных треков, которые имеют одинаковый диаметр, примерно равный диаметрам входных треков. Отношение количества сквозных треков к суммарному количеству треков на выходе мембраны 0.676, что соответствует значению 0.46 σ .

Таким образом, длина пробега может быть рассчитана, как $L = 23.4 + 0.46 \cdot 0.612 = 23.68$.

Возможно, что цифра занижена, так как кривая страгглинга имеет затянутый низкоэнергетичный хвост.

Исходя из полученных данных, были определены угловые пределы облучения ПЭТФ пленок. Так, для производства трековых мембран из пленки толщиной 23.4 мкм при энергии ионов Kr 1.75 МэВ/нукл. можно использовать только нор-

мальные по отношению к поверхности облучаемого материала пучки. При производстве трековых мембран из пленки толщиной 19.4 мкм, при тех же условиях облучения, можно использовать скрещенные пучки вплоть до углов $\pm 30^\circ$.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

В рамках научно-исследовательской программы на ДЦ-60 были проведены работы, направленные на изучение процессов взаимодействия тяжелых ионов низких и высоких энергий с металлическими материалами, с целью модификации их свойств за счет имплантации тяжелых ионов и исследование деградации приповерхностных слоев конструкционных материалов под воздействием тяжелых ионов, моделирующих облучение оболочек тепловыделяющих элементов осколками деления ядерного топлива.

Изучение влияния облучения заряженными частицами низких энергий металлических систем на структуру и физико-механические свойства приповерхностных слоев

Три образца сплава Ni-Ti имплантированы ионами $^{16}\text{O}^+$ с энергией 1 МэВ до доз 1×10^{21} м⁻² (НТ-13) и 5×10^{21} м⁻² (НТ-14, НТ-15) при токе 0,01 А/м² на ускорителе УКП-2-1 Института ядерной физики НЯЦ РК. Площадь облучения $S = 1 \times 10^{-4}$ м². Температура образцов при имплантации не превышала 370 К.

На ускорителе ДЦ-60 были облучены шесть образцов сплава Ni-Ti имплантированы ионами $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с энергией 1,75 МэВ/а.е.м. до флюенса 5×10^{19} м⁻² (НТ-7, НТ-8), 1×10^{20} м⁻² (НТ-9, НТ-10) и энергией 280 кэВ до флюенса 5×10^{20} м⁻² (НТ-11), 1×10^{21} м⁻² (НТ-12) и покрытия различного состава ионами $^{131}\text{Xe}^{18+}$ с энергией 360 кэВ до флюенса $\geq 8 \times 10^{18}$ м⁻².

Результаты исследования микроструктуры имплантированного тяжелыми ионами сплава Ni-Ti методом растровой электронной микроскопии показали, что в процессе имплантации ионов $^{16}\text{O}^+$ с энергией 1 МэВ происходит частичное распыление поверхности сплава Ni-Ti и ионное вытравливание частиц $\text{Ti}_2\text{Ni}(\text{C})$. Характер воздействия ионов $^{16}\text{O}^+$, особенно, на изолированные частицы, аналогичен воздействию химического травления. Это является доказательством протекания процесса ионного травления при имплантации тяжелых ионов химически активного элемента. Кроме того, наблюдается повышение (в ~2 раза) концентрации частиц. Тогда как в случае имплантации ионов ^{84}Kr эффектов распыления и травления не обнаружено, а имеет место лишь повышение концентрации частиц темного цвета.

Методом микрорентгеноспектрального анализа обнаружено, что в результате имплантации ионов $^{16}\text{O}^+$ и $^{84}\text{Kr}^{14+}$ элементный состав аустенита незначительно изменяется. В то же время элементный со-

став частиц $Ti_2Ni(C)$ претерпевает существенные изменения. Так, независимо от сорта и энергии имплантируемых ионов, возрастает содержание в них титана. Обращает на себя внимание поведение кислорода. Так, при имплантации ионов $^{16}O^+$ он не зафиксирован в матрице, а лишь в частицах $Ti_2Ni(C)$. По-видимому, имплантированный кислород накапливается преимущественно в частицах $Ti_2Ni(C)$. При этом его содержание увеличивается в $\sim 1,5$ раза с повышением энергии ионов $^{16}O^+$ от 400 кэВ до 1 МэВ при одинаковом флюенсе облучения. Тогда как факт обнаружения кислорода как в матрице, так и в частицах после имплантации ионов $^{84}Kr^{+14}$ может быть объясним более интенсивным окислением поверхности сплава Ni-Ti.

Дифрактограммы сплава показывают, что интенсивность дифракционных линий аустенита в результате имплантации до флюенса 1×10^{21} ион/м² значительно увеличивается по сравнению с неимплантированным сплавом, тогда как высота пиков рефлексов мартенсита при этом существенно уменьшается. Это указывает на протекание радиационно-стимулированного превращения мартенсит-аустенит в процессе имплантации ионов средней энергии.

Превращение мартенсит-аустенит может полностью завершаться уже при флюенсе имплантации 5×10^{21} ион/м², на что указывает отсутствие дифракционных линий мартенсита. При этом, чем ниже концентрация мартенсита в исходных образцах, тем меньше флюенс, необходимый для превращения мартенсит-аустенит.

Также следует отметить, что явно выявляется пик рефлекса фазы Ti, и это подтверждает высказанное выше предположение о наличии в исходном сплаве Ni-Ti, помимо фаз TiNi, незначительного количества фазы Ti. Однако из-за наложения дифракционных линий мартенсита она не всегда проявляется. С уменьшением же количества мартенситной фазы вследствие радиационно-стимулированного превращения мартенсит-аустенит, либо в результате предварительной обработки образцов сплава обнаружение фазы Ti становится возможным. При этом линия титана уширена в большей степени после имплантации ионов $^{16}O^+$ с энергией 1 МэВ, что свидетельствует о дополнительной деформации данной фазы.

В случае имплантации ионами $^{84}Kr^{+14}$ с энергией 1.75 МэВ/а.е.м. наблюдается более резкое увеличение высоты пиков рефлексов аустенита и отсутствие дифракционных линий мартенсита уже при флюенсе 5×10^{19} м⁻². Полученные данные свидетельствуют о том, что необходимый для завершения радиационно-стимулированного превращения мартенсит-аустенит флюенс имплантации тем ниже, чем тяжелее имплантируемый ион.

В результате исследования имплантированных образцов сплава Ni-Ti методами рентгеноструктурного анализа и измерения температурного гистерезиса электросопротивления экспериментально выяв-

лены радиационно-стимулированные превращения под воздействием тяжелых ионов $^{16}O^+$ и $^{84}Kr^{+14}$ средней энергии и установлена их связь с изменением эффекта памяти формы. Выбор методик исследования структуры приповерхностного поврежденного слоя и объемной величины измерения структурно-фазовых изменений в имплантированном образце оказался оправданным и перспективным. На основе полученных данных можно сделать вывод, что вклад в изменение величины электросопротивления имплантированного образца сплава Ni-Ti обусловлен как изменениями структурно-фазового состояния в поврежденном слое, так и в запробежном (>134 нм) слое за счет деформационных процессов, присущих имплантации тяжелых ионов, т.е. имеет место проявление эффекта дальнего действия.

Исследование радиационной стойкости покрытий на основе нитрида титана к воздействию заряженных частиц низких и средних энергий

Дифрактограммы покрытий различного состава после облучения ионами $^{132}Xe^{+18}$ с энергией 360 кэВ до дозы $\sim 8 \times 10^{18}$ м⁻² показали, что новых твердых растворов не образуется в результате облучения ионами $^{132}Xe^{+18}$ низкой энергии. Однако после облучения наблюдается увеличение в ~ 2 раза интенсивности линии отражения от Si-подложки по сравнению с необлученными покрытиями, что указывает на уменьшение толщины покрытий различного состава за счет распыления поверхности. Облучение также приводит к уширению всех рентгеновских линий, возможно, в результате создания дополнительных микроискажений и/или уменьшения размера кристаллитов под воздействием тяжелых ионов $^{132}Xe^{+18}$. Кроме того, отметим уменьшение интенсивности линий, принадлежащих твердым растворам тройных покрытий и ее незначительное увеличение для двойных покрытий.

В результате облучения ионами $^{132}Xe^{+18}$ соотношение концентраций металлических элементов (Ti, Zr) в покрытии изменяется для всех составов, а концентрация N при этом остается практически постоянной. Однако для двойных покрытий Ti(Zr)N, независимо от типа металлического элемента, состав в процентном отношении соответствует соотношению элементов 55-45. Тогда как отношение STi/CZr наиболее сильно увеличивается для тройного покрытия TiZrN с максимальной концентрацией Ti. По оценкам пробег ионов ^{132}Xe с энергией 360 кэВ в тройных покрытиях не превышает 130 нм. По-видимому, изменение стехиометрического состава в покрытии обусловлено процессом ионного перемешивания при имплантации ионов $^{132}Xe^{+18}$.

Структура облученных ионами ^{132}Xe с энергией 360 кэВ до флюенса $\sim 8 \times 10^{18}$ м⁻² двойных и тройных покрытий, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии, показала, что в результате облучения тяжелыми ионами на поверхности имплантированных покрытий, содержащих до

≤ 50 ат. % Zr, происходит образование протяженных дугообразных пятен, природа которых не ясна. Тогда как для имплантированных покрытий с содержанием ≥ 75 ат. % Zr такие пятна не обнаружены. Отсюда следует, что большей радиационно-структурной стабильностью к воздействию ионов ^{132}Xe низкой энергии обладают покрытия с высоким (≥ 75 ат. %) содержанием Zr.

Результаты изменения нанотвердости облученных покрытий различного состава в зависимости от отношения концентраций $\text{Zr}/(\text{Zr}+\text{Ti})$ продемонстрировали, что для облученных ионами $^{132}\text{Xe}^{+18}$ с энергией 360 кэВ до флюенса $\sim 8 \times 10^{18} \text{ м}^{-2}$ покрытий наблюдается практически линейная зависимость увеличения нанотвердости с ростом содержания Zr, тогда как для необлученных покрытий имеет место провал в области равных содержаний Ti и Zr. При этом отметим максимальное (на 13%) упрочнение для тройного покрытия с равным содержанием металлических компонентов, незначительное размягчение двойных покрытий и практически никакого

изменения прочности для покрытий с неравным отношением Ti и Zr.

Модуль Юнга покрытий различного состава уменьшается в результате облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{+18}$ с энергией 360 кэВ до флюенса $\sim 8 \times 10^{18} \text{ м}^{-2}$, за исключением двойного покрытия состава TiN. При этом с ростом отношения $\text{Zr}/(\text{Ti}+\text{Zr})$ от 0 вплоть до 0.75 модуль Юнга снижается для облученных покрытий и остается практически неизменным для необлученных покрытий. Кроме того, модуль Юнга двойного покрытия состава ZrN как в облученном, так и необлученном состоянии превышает соответствующие величины для всех остальных необлученных покрытий, хотя следствием облучения является его значительное (на 4.5%) снижение.

Из сравнения результатов определения механических характеристик следует, что замена Ti, химически активного элемента, на Zr приводит к незначительному упрочнению покрытий под воздействием ионов $^{132}\text{Xe}^{+18}$ низкой энергии, за исключением тройного покрытия с равным содержанием металлических элементов, и снижению их пластичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гикал, Б.Н. Проект специализированного ускорителя ДЦ-60 для междисциплинарного лабораторного комплекса при Евразийском Государственном университете им. Л.Н.Гумилева / Б.Н. Гикал [и др] // Ядерная и радиационная физика, докл. Междунар. конф., Алматы, Казахстан, 4 – 7 июня 2001. с. 52-53.
2. Gikal, B.N. Project of the DC-60 cyclotron with smoothly ion energy variation for Research Center at L.N.Gumilev Eurasia State University in Astana (Kazakhstan) / B.N. Gikal, [et al.] // Proc. XVII Int. Conf. On Cycl. And Their Appl., 2004, Tokyo, Japan - p.205-207.
3. Commissioning of DC-60 cyclotron of scientific research centre /B.N.Gikal [et al.] // XXXV European Cyclotron Progress Meeting, ECPM 2006, Nice, France, November 2-4, 2006. – p.23.
4. Гикал Б.Н. Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий циклотрона ДЦ-60 / Б.Н.Гикал [и др] // Дубна, 2006. – 12 с. - Препринт ОИЯИ Р9-2006-38.
5. Morita S. Inner-shell Ionization by Heavy Charged Particles / S. Morita, M. Kamiya // Chinese Journal of Physics – 1977 - vol. 15 N. 3. – p. 199-228.
6. Czanota, M. Multiple Ionization Effects in X-ray Emission Induced by Heavy Ions / M. Czanota [et.al.] // Brazilian Journal of Physics. – 2006 - vol. 36, N. 2B - p. 546-549.
7. Czarnota M. Observation of L-x-ray (hyper-) satellites in collisions of O and Ne ions with mid-Z atoms / M. Czarnota [et.al] // Nuclear Instruments and Methods. – 2003. –B 205. – 133-138.
8. Ursula, C. Schlotthauer-Voos, Bohlen H.G., Von Oertzen W., Bock R., Nuclear spectroscopy with heavy-ion induced proton-transfer reactions in light nuclei / C. Ursula, H.G. Bohlen, W. Von Oertzen, R. Bock // Nuclear Physics – 1972 - A180 – p. 385-401.
9. Delic, G., Optical model parameter searches for $^{16}\text{O}+^{11}\text{B}$ elastic scattering / G. Delic // Phys. Lett. – 1974 -49B - p. 412-414.
10. Anjos, R.M. Competing reaction mechanisms for the $^{16,17,18}\text{O}+^{10,11}\text{B}$ and $^{19}\text{F}+^9\text{Be}$ systems / Anjos R.M., Added N., Carlin N., Fante L., Jr., Figueira M.C.S., Matheus R., Szanto E.M., Tenreiro C., Szanto de Toledo A. // Phys. Rev. – 1994 - C49 - p. 2018-2035.
11. Duck, P. Analysis of elastic scattering of ^{12}C on ^{11}B in the framework of the molecular wave function method / P. Duck, W. Treu, W. Galster, E. Haindl, F. Siller and H. Voit // Nuclear Physics – 1975 - A251 - p. 344-352.
12. Charles, P., Auger F., Badawy I., Berthier B., Dost M., Gastebois J., Fernandez B., Lee S. M. and Plagnol E. Resonant behaviour of the $^{16}\text{O}-^{12}\text{C}$ elastic scattering cross section / P. Charles, F. Auger, I. Badawy, B. Berthier, M. Dost, J. Gastebois, B. Fernandez, S.M. Lee and E. Plagnol // Phys. Lett. – 1976 - B62, N 3 - p. 289-292.
13. Satchler, G.R. The distorted – waves theory of direct nuclear reaction with spin-orbit effect / G.R. Satchler // Nucl. Phys. – 1964 - A55 - p. 1-33.

**АСТАНА ҚАЛАСЫНДА ДЦ-60 АУЫР ИОНДАР ҮДЕТКІШІНДЕ
ШЕШІЛЕТІН ҒЫЛЫМИ ЖӘНЕ ҚОЛДАНБАЛЫ МӘСЕЛЕЛЕР**

**Амангелді Н., Буртебаев Н., Бұғыбаев Е., Горлачев И., Кислицын С.,
Колобердин М., Лысухин С., Нестерова А., Пеньков Ф., Платов А., Шериф Хамада**

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Мақалада ядролық физика, қатты дене физикасы, элементтік талдау мен іздік жарғақтарды алудың технологиясы салаларында Астана қаласында Л.Н.Гумилев атындағы Ұлттық Еуразиялық университеті жанындағы Пәнаралық ғылыми-зерттеу кешенінде орналасқан ДЦ-60 циклотронында ҚР ҰЯО ЯФИ қызметкерлері өткізген ғылыми-зерттеу мен технологиялық жұмыстардың нәтижелері келтіріледі.

**SCIENTIFIC AND APPLIED PROBLEMS SOLVED
AT THE HEAVY ION ACCELERATOR DC-60 IN ASTANA**

**N. Amangeldy, N. Burtebaev, E. Butybaev, I. Gorlachev, S. Kislitchyn,
M. Koloberdin, S. Lysukhin, A. Nesterova, F. Penkov, A. Platov, Sherif Khamada**

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

In the paper it is reviewed the researched and applied activities performed INP NNC RK investigators at the DC-60 cyclotron located in interdisciplinary scientific-research complex of L.N. Gumilyov Eurasian National University in Astana in the fields of nuclear physics, solid-state physics, element analysis and development of technology for track membrane production.

УДК 621.039.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ПРОВЕДЕННЫЕ В ИАЭ

Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Жданов В.С., Зуев В.А., Кенжин Е.А., Колодешников А.А., Пахниц А.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Представлен обзор работ по исследованию процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических легководных и быстрых реакторов с плавлением активной зоны, проведенных на реакторных установках и вне реакторных стендах ИАЭ. Показаны результаты исследования взаимодействия расплава, моделирующего корию легководного реактора с теплоносителем, материалом днища корпуса реактора, материалом и строительным материалом (бетоном); результаты исследования работоспособности способов и устройств для исключения возникновения повторной критичности при аварии быстрых реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

Безусловная безопасность АЭС на всех этапах жизненного цикла является одним из определяющих требований при принятии решения об использовании ядерных энергетических источников в экономике любой страны.

Деятельность в области повышения безопасности атомной энергетики на современном этапе можно условно разделить на два главных направления: разработка систем безопасности проектируемых АЭС и повышение эффективности систем безопасности для действующих АЭС.

Несмотря на существующие глубоко эшелонированные системы безопасности реакторных установок АЭС все еще существует возможность маловероятного события, которое может привести к плавлению активной зоны реактора с перемещением расплава на днище силового корпуса реактора и/или даже за его пределы. Указанная авария по принятой терминологии является запроектной, т.е. она вызвана не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождается дополнительными, по сравнению с проектными авариями, отказами систем безопасности сверх единичного отказа или реализацией ошибочных действий персонала. По степени повреждения активной зоны реактора и по сценарию дальнейшего развития такие аварии относятся к классу тяжелых аварий. Поскольку радиоэкологические и социально-экономические последствия таких аварий могут быть весьма значительными, нормами и правилами регламентируется необходимость их анализа при проектировании и разработке мероприятий по управлению с целью:

- предотвращения развития аварии и ослабления ее последствий;
- защиты контейнмента от разрушения и поддержания его работоспособности;
- возвращения АЭС в контролируемое состояние, при котором прекращается цепная реакция деления, обеспечивается постоянное охлаждение топлива и удержание радиоактивных веществ в установленных границах.

В результате широкомасштабных теоретических, экспериментальных и конструкторских работ в реакторных установках нового поколения появились новые системы, предназначенные для управления тяжелыми авариями путем захлаживания, управляемого перемещения и локализации расплава активной зоны как внутри силового корпуса, так и за его пределами.

За время существования атомной энергетики технологии обоснования безопасности АЭС, в целом, и реакторных установок, в частности, претерпели также значительные эволюционные изменения. Эти изменения обусловлены необходимостью оптимизации затрат на обеспечение безопасности АЭС и, следовательно, оптимизации стоимости строительства АЭС и стоимости производимой ими энергии. Наиболее значительным проявлением этой эволюции является постепенный отказ от консервативного энергетического подхода, при котором меры безопасности выбирались исходя из предположения о теоретически максимально возможном нежелательном выходе энергии при развитии аварийной ситуации, в пользу детального расчетного моделирования. Применение детального расчетного моделирования позволяет в значительной степени снизить консервативно завышенные требования к системам обеспечения безопасности, а в некоторых случаях – и полностью отказаться от них. Вместе с тем, переход к детальному расчетному моделированию процессов, развивающихся в ядерном реакторе в случае аварии, требует максимально точного описания в аналитических моделях граничных и начальных условий, что, в свою очередь, предопределяет необходимость проведения широкомасштабных экспериментальных исследований поведения элементов конструкции ядерных реакторов в натурных и модельных эксплуатационных и аварийных условиях, моделирующих реальные режимы работы и состояния энергетических реакторов.

В ИАЭ НЯЦ РК на протяжении более чем 20 лет выполняются исследования по изучению поведения реакторного топлива в аварийных и переходных режимах эксплуатации; реакторные и вне реакторные

эксперименты по моделированию различных аварийных ситуаций в активной зоне реакторов различных типов. За это время созданы уникальные экспериментальные установки, получен большой объем результатов по моделированию различных стадий тяжелых аварий, накоплен опыт в организации и выполнении экспериментов [1-9]. Сочетание натурных внутриреакторных экспериментов с модельными экспериментами на внереакторных установках позволило получить экспериментальные результаты по работоспособности твэлов и ТВС, нашедшие признание во всем мире.

Наличие уникальных экспериментальных установок и достижения в области исследования аварийных процессов позволили ИАЭ получить заказы на проведение исследований процессов протекания тяжелых аварий в кооперации с крупными японскими исследовательскими организациями и компаниями, такими как NUPEC, JNC, JAERI JAEA (образовавшееся в результате объединения JNC и JAERI) и JAPC. За прошедший период в рамках совместных казахстанско-японских проектов были успешно выполнены «внереакторные» экспериментальные исследования по проблемам безопасности легководных энергетических реакторов АЭС (проекты COTELS и IVR-AM), начаты и продолжаются исследования в обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах (проект EAGLE). В рамках работ по проекту COTELS были выполнены исследования по изучению процессов, сопровождающих последние стадии тяжелой аварии водоохлаждаемого энергетического реактора с плавлением его активной зоны. Программа проекта IVR-AM была направлена на исследование взаимодействия корриума с материалом модели нижнего днища корпуса реактора при имитации остаточного тепловыделения в топливе и имитации работы систем охлаждения, подавляющих это взаимодействие. Параллельно с выполнением описанных выше исследований в рамках проекта EAGLE на экспериментальной базе ИАЭ НЯЦ РК проводились работы по подготовке и проведению исследований в обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах. Целью этих исследований было решение проблемы смягчения последствий или предотвращения возникновения повторной критичности в процессе постулированной аварии с плавлением активной зоны на создаваемом в настоящее время коммерческом реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Исследовательские программы проектов COTELS, IVR-AM и EAGLE были успешно завершены.

В настоящее время реализуется новая международная программа работ (проект EAGLE-2), предусматривающая продолжение исследований в обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах. В рамках проекта EAGLE-2 создаются новые экспериментальные устройства и проводятся новые внутриреакторные и внереакторные экспери-

менты. Выполнение новой исследовательской программы планируется завершить в 2011 году. Исследования по обоснованию безопасности реакторов различных типов (включая исследования по проблемам тяжелых аварий) проводятся ИАЭ также в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

В настоящей статье представлен обзор и основные результаты работ по изучению процессов характерных для отдельных стадий развития тяжелых аварий легководных реакторов и реакторов на быстрых нейтронах, проведенных в ИАЭ НЯЦ РК с начала 90 годов прошлого века.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ ДЛЯ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ

При разработке мероприятий по локализации корриума разработчики и пользователи тяжелоаварийных кодов, а также проектировщики АЭС, сталкиваются с проблемами, среди которых можно выделить следующие:

- понимание и описание высокотемпературных теплофизических и физико-химических процессов в широком диапазоне изменения параметров (прежде всего, температуры и состава сред);
- выявление ключевых эффектов для адекватного прогноза развития аварии;
- получение данных по физико-химическим свойствам смесей тугоплавких окислов в широком диапазоне температуры;
- оценка неопределенностей расчетных моделей;
- верификация расчетных программ.

Прогресс в решении указанных проблем может быть достигнут только на основе систематических экспериментальных исследований, при реализации которых также возникают значительные трудности.

Очевидно, что проведение экспериментов в натурных условиях невозможно. Отметим, что даже результаты детальных исследований послеаварийного состояния реакторов АЭС ТМІ-2 и ЧАЭС-4 имеют ограниченное применение вследствие особенностей развития этих аварий и конструкций реакторов. Поэтому большинство экспериментов проводят во внереакторных условиях в уменьшенном масштабе, а для применения полученных результатов требуется, во-первых, проектирование экспериментальной установки, адекватно моделирующей исследуемый процесс, во-вторых, тщательный анализ и экстраполяция данных на реальную реакторную ситуацию, что зачастую является нетривиальной задачей. При невозможности применения в полном объеме теории подобия вследствие комплексности и многообразия процессов протекающих при тяжелой аварии возрастает роль сравнительного анализа и приближенных оценок.

Можно выделить следующие основные технические и технологические проблемы, которые необхо-

димо решать при проведении вне реакторных экспериментальных исследований:

- подготовка и удержание высокотемпературного, радиоактивного и химически агрессивного расплава кориума в экспериментальном объеме, состав и свойства которого изменяются в широком диапазоне;
- необходимость физического моделирования остаточного тепловыделения в расплаве (ПД);
- технологические сложности, связанные с требованием к вариации состава атмосферы над расплавом (нейтральная, воздушная, паровая);
- методические, инструментальные и материаловедческие проблемы высокотемпературных измерений;
- наличие технических и организационных мер, обеспечивающих ограничение воздействия на окружающую среду исследуемых материалов.

Необходимость решения вышеуказанных проблем объясняет, с одной стороны, уникальность выполненных в этой области экспериментальных исследований, а с другой стороны, обуславливают высокую актуальность работ в этом направлении. Несмотря на то, что экспериментальными исследованиями по тяжелой аварии в мире занимаются уже более 20 лет, имеется весьма ограниченное число экспериментальных данных по кориуму и процессам его взаимодействия с различными материалами, которые необходимы для разработки замыкающих зависимостей в математических моделях, а также для верификации расчетных кодов. Кроме того, большинство опытов выполнено на имитаторах кориума (расплавах металлов, солей и термитных смесей), значительно отличающихся от прототипного кориума по теплофизическим и физико-химическим свойствам.

1. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

Детальное описание развития гипотетической аварии с плавлением активной зоны водоохлаждаемого реактора появилось впервые в известном докладе Рассмусена комиссии Ядерного регулирования США, затем оно было уточнено в серии публикаций исследовательского центра FzK в Карлсруэ, посвященных обширным исследованиям по программе CORA [10-13]. Авторы описали процессы, происходящие в топливных сборках, вызванные разрывом главного трубопровода и потерей теплоносителя первого контура.

Важным фактором при тяжелой аварии является быстрое окисление циркония и нержавеющей стали паром при температуре выше 1200 °С, т.к. тепло, выделяющееся при этих экзотермических реакциях, приводит к локальному неконтролируемому росту температуры внутри активной зоны с максимумом температуры выше 2000 °С. С началом плавления циркониевой оболочки (при нагреве выше 1760 °С), твердый диоксид урана может быть химически расплавлен в расплаве циркония, что приведет к умень-

шению температуры его плавления почти на 1000 °С. В результате температура плавления топлива может опуститься ниже 2000 °С.

Многие из этих физических и химических процессов можно идентифицировать в экспериментах с отдельными эффектами, реакторных и вне реакторных интегральных экспериментах по моделированию тяжелой аварии, а также при изучении материалов активной зоны после аварии на ТМІ-2. Все эти взаимодействия имеют отношение к тяжелой аварии, потому что перемещение и/или затвердевание фрагментов расплава может привести к локальным блокировкам каналов теплоносителя и вызвать перегрев областей активной зоны из-за неадекватности потока теплоносителя, с последующим прогрессирующим плавлением и перемещением материалов в нижнюю область силового корпуса.

С точки зрения электротермического моделирования аварии с плавлением активной зоны очень важным событием является взаимодействие между расплавленным цирконием и диоксидом урана [14, 15]. Удельная энергия, поглощаемая при растворении диоксида урана, сопоставима со скрытой теплотой плавления диоксида урана и циркония, т.е. находится в диапазоне 269...274 кДж/кг [16]. Именно этот факт следует учитывать при расчете режимов разогрева исходных компонентов для получения расплава прототипного кориума (в первых расчетах режимов разогрева исходных компонентов учитывались только скрытая теплота плавления отдельных компонентов, что приводило к непрогнозируемым колебаниям температуры в тигле).

Разгерметизация оболочек твэлов может привести к первичному контакту топлива с теплоносителем. В результате взаимодействия (FCI) возможна первичная фрагментация топлива, приводящая к первому пику давления в силовом корпусе реактора. При дальнейшем развитии аварии происходит разрушение несущих конструкций ТВС и падение расплава материалов активной зоны на днище силового корпуса.

Взаимодействие кориума с материалом силового корпуса может развиваться по двум сценариям, в зависимости от мощности реактора, массы падающего кориума и систем локализации аварии внутри корпуса. Обосновано, что при мощности реактора менее 800 МВт возможно удержание кориума внутри корпуса за счет охлаждения расплава внутренним заливом кориума и внешним водяным охлаждением корпуса [17]. При отсутствии водяного охлаждения, а также в реакторах большей мощности может происходить проплавление стенки корпуса и выход кориума в шахту реактора [18].

Сценарий дальнейших событий зависит от наличия или отсутствия воды на бетонном основании контейнмента. При наличии воды произойдет энергичное взаимодействие кориума с теплоносителем, которое может привести к повышению давления

внутри контейнмента и значительной генерации водорода.

Образование бассейна расплава на бетонном основании приводит к тепловому и химическому взаимодействию между компонентами кориума и бетоном (МССИ) и абляции бетона.

Задача исследователей состоит в оценке кинетических характеристик взаимодействия и разработке предложений по локализации кориума в бетонной шахте, например, при подаче воды на поверхность бассейна расплава и/или растекании расплава по большой поверхности.

Основные направления, на которых сосредоточены усилия специалистов, связанных с проектированием и эксплуатацией АЭС, можно сформулировать следующим образом.

Сценарий выхода кориума из корпуса. Необходимо определение наиболее вероятных сценариев выхода кориума и эволюции во времени расхода расплава, его состава и температуры.

Взаимодействие струи кориума с конструкционными материалами - связанное с выходом кориума за пределы корпуса.

Абляция бетона при МССИ при различных типах бетонов, которые рассматриваются для использования в качестве конструкционного или жертвенного материала для бетонной шахты и ловушек расплава активной зоны.

В рамках совместного проекта COTELS между Корпорацией по проектированию атомной энергетики (NUPEC) Японии и Национальным ядерным центром республики Казахстан в ИАЭ выполнены двумерные (2-D) эксперименты МССИ с подачей воды и без подачи воды на поверхность расплава и при наличии боковой бетонной стенки

Теплопередача от расплава с внутренним энерговыделением к ограничивающим бассейн расплава поверхностям, в том числе при наличии газовой фазы в расплаве.

Совместные тепло-гидравлические и физико-химические эффекты в процессе кристаллизации многокомпонентных расплавов кориума при МССИ. При низкой скорости затвердевания на холодной поверхности раздела может формироваться твердый слой тугоплавких компонентов расплава.

Когда горячий расплав кориума поступает в водный бассейн, может формироваться слой фрагментов. Охлаждаемость таких слоев фрагментов может быть достигнута при заливке водой.

Падение струи кориума в воду во внутрикорпусных условиях с диаметром струи от 3 до 10 см формирует слой фрагментов не менее 50 % от массы упавшего расплава на слитке нефрагментированного кориума. Наблюдались паровые взрывы малой интенсивности, но только тогда, когда они были специально инициированы. Эти результаты, тем не менее, не могут быть однозначно экстраполированы на сценарий аварии за пределами корпуса, например,

из-за различий в конечном составе расплава и большого недогрева воды.

Во внекорпусных условиях возможна фрагментация струи падающего расплава, что создает хорошие условия для охлаждения. В то же время отмечен, существенный для процессов в контейнменте, значительный выход пара и водорода после резкого охлаждения расплава. Механизмы генерации водорода из полностью окисдных расплавов в процессе закалки заслуживают дальнейшего рассмотрения, чтобы прояснить подробности взаимодействия кориум/вода.

Помимо падения струи кориума в воду эксперименты COTELS также охватывали процесс залива расплавов сверху для внекорпусных условий. Эти испытания впервые показали возможность охлаждаемости продуктов взаимодействия кориума с бетоном, в отличие от экспериментов MACE [19]. Хотя прекращение абляции бетона не гарантируется, верхний залив расплава кориума в процессе взаимодействия расплава с бетоном может быть полезен в процессе поздней фазы аварии и для снижения выброса радиоактивных аэрозолей в контейнмент. Следует отметить, что паровые взрывы не наблюдались при подаче воды на поверхность расплава в экспериментах MACE, COTELS и KATS со стратифицированной геометрией.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальный стенд, созданный в ИАЭ НЯЦ РК [20], позволяет плавить до 60 кг прототипной смеси материалов активной зоны ЛВР методом индукционной плавки в "горячем тигле" с последующим сливом расплава в экспериментальную секцию. В экспериментальной секции выполнялись исследования взаимодействия кориума с теплоносителем, материалом силового корпуса реактора или бетоном, в зависимости от целей эксперимента. При этом моделировалось остаточное тепловыделение в расплаве при создании условий взаимодействия кориума с бетоном и работа систем безопасности с помощью имитаторов штатных систем. Работы выполнялись в содружестве с японской корпорацией NUPEC, поэтому условия в некоторых экспериментах были ориентированы на моделирование аварий в японских ЛВР [21].

Экспериментальная установка "ЛАВА" включала в себя два основных функциональных блока: электроплавильную печь (ЭПП) для подготовки расплава прототипного кориума и устройство приема расплава (УПР), в котором размещалась экспериментальная секция для моделирования исследуемых процессов.

Электроплавильная печь индукционного типа подключена к генератору частотой 2400 Гц, номинальной мощностью 200 кВт. Исходная смесь материалов активной зоны реактора помещалась в графитовый тигель. Слив расплава из ЭПП установки "ЛАВА" осуществлялся через отверстие диаметром ~50 мм, которое образуется в днище тигля после

скола пробки с помощью пневматического механизма. В нижней части печи был предусмотрен затвор для отсечки полости устройства приема расплава (УПР) от полости ЭПП после слива расплава. Регулирование давления внутри ЭПП при разогреве шихты выполнялось сбросом газов через теплообменник и специальный фильтр.

Основной проблемой при реализации индукционного метода нагрева является взаимодействие расплава с материалом тигля. При разогреве до температуры выше 1500 °С молекулы углерода, "испаряющиеся" с внутренней поверхности тигля создают восстановительную среду в полости тигля, что приводит, в конечном итоге, к высокому содержанию карбидов и оксикарбидов в результирующем расплаве. Это, в свою очередь, существенно искажает характеристики бассейна расплава и последующих тепловых и физико-химических процессов при дальнейшем взаимодействии расплава с теплоносителем и материалами реактора. Так, например, исследования РНЦ КИ по программе "РАСПЛАВ" [23] свидетельствуют об изменении макроструктуры бассейна расплава кориума даже при малой концентрации углерода в расплаве вследствие плотностной стратификации. Для решения указанной проблемы был предложен и экспериментально отработан метод подавления активности углерода, "испаряющегося" при высокой температуре из стенок тигля, за счет предварительного покрытия внутренней поверхности графитового тигля карбидами тантала, ниобия или циркония циркония.

Предварительные эксперименты по изучению материалов деталей электроплавильной печи, эффективности мер по защите компонентов кориума от взаимодействия с углеродом и исследованию взаимодействия компонентов кориума между собой при их разогреве вплоть до температуры плавления изучались на маломасштабном стенде с индукционным нагревом ВЧГ-135. При подготовке к серии экспериментов IVR-AM на стенде ВЧГ-135 выполнялись эксперименты по оценке электрического сопротивления смеси материалов активной зоны при высокой (вплоть до 2600 °С) температуре.

3. ПРОЦЕДУРА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе проведения экспериментов кориум сливался из ЭПП при достижении температуры примерно 3000 °С. Диаметр отверстия, вскрываемого в дне тигля, соответствовал диаметру штатного стержня СУЗ. Реальная высота сброса расплава моделировалась в некоторых экспериментах за счет увеличения давления между электроплавильным узлом и экспериментальной секцией.

В экспериментах по изучению FCI кориум сливался в бассейн с водой и аккумулировался на фальшднище с бетонной вставкой, моделирующей основание контейнмента. В процессе эксперимента в УПР измерялись статическое давление в воде и в газовой полости; импульс давления в начальный мо-

мент взаимодействия кориума с водой; температура воды и температура газа над водным бассейном. В некоторых экспериментах в УПР устанавливалась бетонная ловушка, заполненная водой, для имитации мелкого бассейна на основании контейнмента при наличии боковых стенок.

Для выполнения экспериментов по взаимодействию кориума с бетоном (экспериментов МССИ) устройство приема расплава несколько раз модифицировалось. В устройстве приема расплава размещалась бетонная ловушка, оснащенная термопарами для измерения температурного поля в бетонной стенке. Остаточное тепловыделение в кориуме для экспериментов по изучению МССИ моделировалось индукционным нагревателем, окружающим бетонную ловушку с расплавом. Мощность индукционного нагревателя кориума, находящегося в бетонной ловушке, составляла от 25 до 75 кВт... Для имитации систем охлаждения расплава применялись специальные распылители (форсунки), расположенные над бетонной ловушкой и обеспечивающие подачу воды на поверхность кориума. Вода после конденсации собиралась в специальном баке для последующей оценки водного баланса.

В экспериментах МССИ применялись бетонные ловушки диаметром 20 мм, 26 мм и 36 мм. Это позволяло варьировать толщину слоя кориума в ловушке при одинаковой слитой массе расплава. Таким способом моделировались различные варианты охлаждения расплава. При выполнении экспериментов измерялись температурное поле в бетоне; электрическая мощность, сообщаемая индуктору системы моделирования остаточного тепловыделения; импульс давления, возникающий при подаче на поверхность кориума охлаждающей воды.

В экспериментах по изучению взаимодействия кориума с материалом корпуса реактора (экспериментах LHI) расплав сливался в модель корпуса, установленного вместе с бетонным основанием в устройство приема расплава.

В рамках программы по изучению поведения кориума на днище силового корпуса была разработана и изготовлена система для моделирования остаточного тепловыделения в кориуме, находящемся в модели корпуса реактора. Система включала в себя три коаксиальных плазматрона с системой питания постоянного тока и систему электропитания переменного тока от силовой трехфазной сети. В нескольких экспериментах был испытан комбинированный способ энерговыделения в кориуме. Во-первых, каждый из электродов разогревался внутренней дугой от источника постоянного тока, во-вторых, внешние электроды коаксиальных плазматронов были включены в трехфазную цепь переменного тока 50 Гц, что обеспечивало протекание переменного тока между электродами через кориум. Суммарная мощность системы комбинированного нагрева составля-

ла около 70 кВт. Данная серия экспериментов имела название IVR-AM.

Модель корпуса оснащалась термопарами для измерения температурного поля в стальной стенке на разной глубине от внешней поверхности и датчиками перемещения стенки модели. Перед сливом расплава УПР заполнялось перегретым паром, а в модель днища наливалась вода. После слива расплава в УПР на его поверхность подавалась вода от специальных форсунок. Была обеспечена возможность варьирования способа верхнего залива – распылением или струями. В экспериментах применялись модели корпуса двух размеров: с диаметром полусферической части 800 мм и 500 мм. Это позволяло варьировать толщину слоя кориума при одинаковой массе слитого расплава.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ ТОПЛИВА С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ (FCI)

В экспериментах на установке "ЛАВА" исследованы два вида сценариев взаимодействия топлива с теплоносителем. Первая группа экспериментов была посвящена исследованию взаимодействия внутри силового корпуса при наличии остаточной воды на его днище и с последующей имитацией внутрикорпусного залива. Данная группа экспериментов имела обозначение "серия LHI". Во второй группе экспериментов изучалось взаимодействие расплава кориума с водой за пределами корпуса. Для моделирования данного сценария применялся кориум с повышенным содержанием стали, что имитировало проплавление корпуса и увеличение доли корпусной стали в расплав, а слив кориума выполнялся через отверстие диаметром 50 мм, что соответствует разрушению канала СУЗ в днище корпуса японских реакторов. Кориум падал в бассейн с водой, на дне которого располагалась бетонная подложка. Данная группа экспериментов имела обозначение "серия А" (хронологически эта серия экспериментов выполнялась первой).

4.1. Эксперименты по взаимодействию топлива с остаточной водой внутри корпуса (серия LHI)

В экспериментах по изучению взаимодействия кориума с материалом силового корпуса ЛВР были использованы модели днища из нержавеющей стали двух типоразмеров - с внутренним радиусом 0,245 и 0,391 м, установленные на бетонном основании. Толщина стенки моделей в обоих случаях составляла 25 мм. Для измерения температуры и деформации стенки модели использовались термопары, вмонтированные в стенку модели на различную глубину и индуктивные датчики перемещения. В экспериментах LHI в ЭПП загрузалось до 60 кг смеси

$\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2 + \text{Zr}$ + Нержавеющая сталь, что соответствует тяжелой аварии в реакторе с кипящей водой (BWR). Начальная температура расплава перед его сливом в экспериментальную секцию составляла 2650...2800 °С. Кориум сливался в модель, заполненную горячей водой, с высоты около 1,5 м. Глубина остаточной воды в модели днища (при температуре насыщения) составляла 0,16 м. Через некоторое время после слива расплава из ЭПП на поверхность кориума начинала подаваться вода из специальных форсунок.

Пост-экспериментальный анализ состоял, как правило, из исследования состояния экспериментальных секций и дебриса (фрагментов застывшего расплава) после каждого испытания и последующего сравнения полученных результатов с параметрами, зарегистрированными в процессе экспериментов.

В результате экспериментов было установлено, что почти половина сливаемого кориума разбилась на частицы, и слой частиц располагался поверх агломератов и сплошного слитка. Высокая доля фрагментированного кориума могла быть вызвана большой высотой слива струи, и, как следствие, приводящая к увеличению скорости входа кориума в воду. Как показали результаты предварительных экспериментов на установке "СЛАВА" по изучению параметров струи кориума, сливаемого в экспериментальную секцию, приблизительно 30 процентов сливаемого кориума измельчается в процессе падения расплава.

Типичная схема расположения кориума в модели корпуса после взаимодействия с водой в эксперименте LHI-6 показана на рисунке 1. Подобная схема была характерна для большинства выполненных экспериментов, различие состояло только в соотношении масс "фрагменты/слиток".

Глубокая фрагментация кориума при его взаимодействии с теплоносителем приводит к значительному увеличению площади теплообмена, что может привести к взрывному испарению воды и, как следствие, разрушению активной зоны реактора. Механизм парового взрыва, в общем случае, представлен двумя базовыми моделями, а именно, спонтанной зародышевой моделью и моделью детонации давлением. В каждой из этих моделей необходимо знать степень и механизм фрагментации кориума. Информация о размерах результирующих фрагментов кориума (так называемый среднеобъемный диаметр частиц) используется в расчетах коэффициента конверсии тепловой энергии, запасенной в кориуме, в механическую энергию сжатия среды в корпусе реактора или контейнменте.

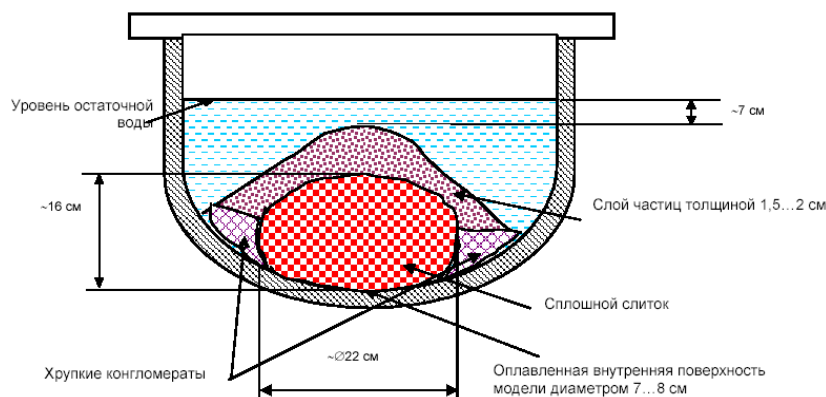


Рисунок 1. Схема расположения корнума в модели корпуса

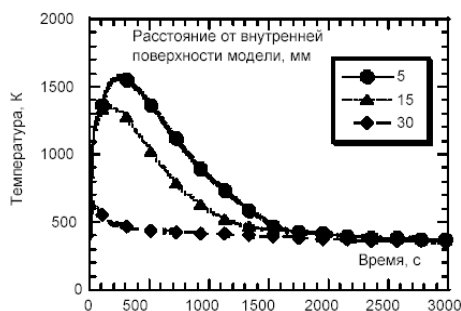


Рисунок 2. Температура стенки модели в эксперименте LHI-6

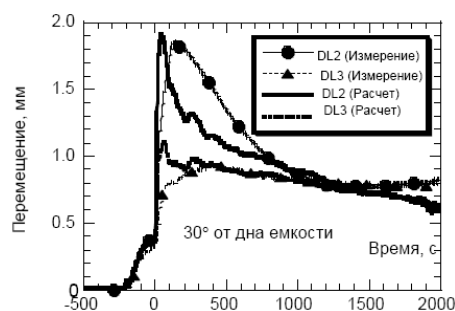


Рисунок 3. Измеренное и рассчитанное смещение стенки модели в эксперименте LHI-6

После формирования бассейна корнума на днище силового корпуса мелкие частицы, как правило, располагаются поверх слоя корнума. Возможность охлаждения корнума путем верхнего (внутрикорпусного) залива в значительной степени зависит от распределения частиц по размерам. Очевидно, что большая доля мелких частиц может сформировать плотную засыпку, препятствующую доступу воды к слою сплошного корнума.

Термопары, вмонтированные в стенку модели корпуса, показали резкое повышение температуры стенки сразу после соприкосновения корнума с моделью. На рисунке 2 показана измеренная температура стенки модели в эксперименте LHI-6. Аналогичная тенденция изменения температуры имела место в других экспериментах.

После достижения максимальной температуры стенка модели начинала постепенно охлаждаться до начальной температуры. Наблюдаемое изменение температуры стенки модели было аналогично экспериментам с расплавом окиси алюминия в качестве имитатора корнума. Наименьший подъем температуры и наибольшая скорость охлаждения модели наблюдались в эксперименте LHI-4 с малой моделью корпуса (с внутренним радиусом 0,245).

На рисунке 3 показаны измеренное смещение стенки модели в эксперименте LHI-6 и расчет с использованием температуры стенки модели вблизи размещения датчика перемещения и температурного коэффициента линейного расширения нержавеющей стали.

Рост смещения в отрицательный момент времени (до слива расплава) был вызван подачей горячей воды в модель перед сливом расплава. В целом расчеты хорошо согласуются с результатами измерений.

На основании результатов, полученных в серии экспериментов по взаимодействию расплава корнума с днищем силового корпуса при наличии внешнего охлаждения и внутреннего залива, разработан расчетный код. Основные явления, моделируемые кодом LIDEC [5], показаны на рисунке 4. Передача тепла в корку и в стенку модели рассчитывалась методом конечных элементов. В код LIDEC наряду с другими ключевыми моделями, включена модель охлаждаемости через зазор между корнумом и внутренней поверхностью корпуса, определяющая рост указанного зазора и проникновение в него воды. В модели роста зазора приняты во внимание тепловое расширение днища и усадка корнума, покрытого коркой. В модели проникновения воды предполагается, что поток воды в зазор вниз преобладает над генерацией пара с обеих поверхностей зазора, и поток тормозится на входе в зазор встречным потоком пара. Верификация кода LIDEC выполнена по результатам экспериментов LHI и аналогичных экспериментов с окисью алюминия. Подтверждено, что код LIDEC способен воспроизвести термические процессы в стенке корпуса. Но из-за феноменологических неопределенностей код LIDEC систематически переоценивает тепловую нагрузку на стенку силового корпуса реактора.

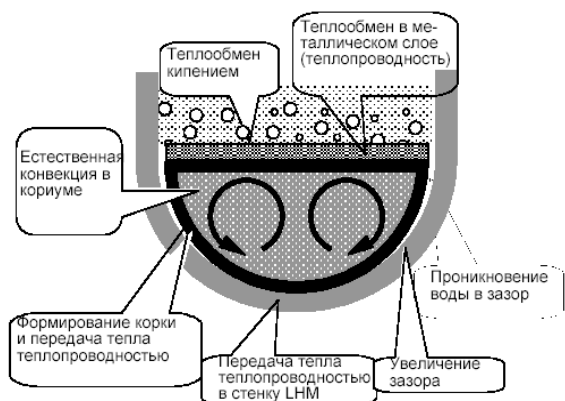


Рисунок 4. Основные явления, моделируемые кодом LIDEC

4.2. Эксперимент с моделированием остаточного тепловыделения в топливе

Эксперименты с моделированием остаточного тепловыделения в топливе, находящемся в модели днища, проводились в рамках серии IVR-AM. Всего в этой серии было проведено четыре эксперимента. В наиболее удачном эксперименте IVR-2 суммарная мощность плазматронов составила около 15 кВт, а энергия от прямого пропускания тока через кориум не превысила 6 кВт. В эксперименте выполнялось охлаждение внешней поверхности модели днища путем орошения через форсунки, расположенные между внешней стенкой модели и бетонным основанием. В результате этого эксперимента был получен прогар стенки модели, вызванный, наиболее вероятно, кризисом теплообмена на внешней поверхности из-за некорректно выбранного способа охлаждения. Этот результат является иллюстрацией одного из этапов сценария развития аварии с плавлением активной зоны ЛВР, когда кориум проникает за пределы силового корпуса в шахту реактора. Рисунок 5 визуализирует момент начала проникновения расплава через стенку силового корпуса.

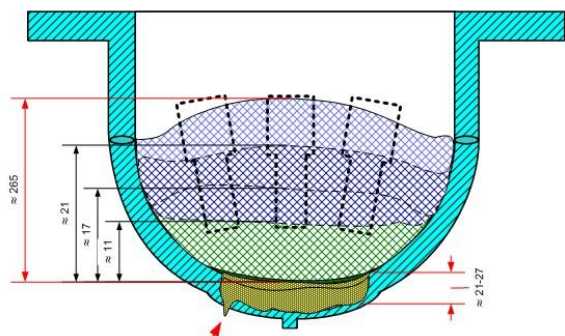


Рисунок 5. Результат эксперимента IVR-2

Результат эксперимента с проплавлением стенки корпуса можно рассматривать как переход к следующему сценарию развития тяжелой аварии, - взаимодействие расплава кориума с водой за пределами корпуса на бетонном основании контейнента.

4.3 Эксперименты по взаимодействию топлива с теплоносителем за пределами корпуса (серия А)

В экспериментах на установке "ЛАВА" экспериментально изучены основные явления, сопровождающие падение расплава кориума в бассейн с водой на бетонном основании, когда кориум соответствует композиции, являющейся результатом проплавления расплавом активной зоны стенки силового корпуса реактора.

В статье рассмотрены результаты экспериментов, в которых около 60 кг прототипного кориума сливалось в водный бассейн. В большинстве экспериментов длительность импульса давления, измеренного в экспериментальной секции, составила 0,5 секунды, что сравнимо с длительностью импульса, наблюдаемого при паровом взрыве, затем давление постепенно приближалось к квазистационарному значению в течение 10 секунд. Энергетически сильного парового взрыва не наблюдалось ни в одном из экспериментов. Большая часть слитого кориума фрагментировалась, и только незначительная часть расплава была найдена на дне бассейна в виде застывшего слитка. Размер частиц кориума хорошо соотносится с первым импульсом давления, - они значительно крупнее, чем обычно при паровом взрыве. Измеренное давление в квазистационарном режиме меньше расчетного вследствие генерации неконденсируемого газа в результате возможного окисления металлических компонентов кориума.

Сценарий тяжелой аварии BWR предполагает наличие небольшого количества воды на полу контейнента (около 0,4 м глубиной с относительно равномерной температурой по объему) перед разрушением перед разрушением активной зоны в результате потери теплоносителя. Для экспериментального моделирования взаимодействия кориума с водой и бетоном в мелком водном бассейне на дне устройства приема расплава было установлено бетонное основание. В некоторых конструкциях легководных реакторов полость корпуса заполняется водой (как вторая фаза управления аварией) перед повреждением силового корпуса, чтобы предотвратить воздействие на стальную оболочку или подавить взаимодействие кориума с бетоном в контейнente реактора с кипящей водой. В обоих случаях используется холодная вода. В экспериментах на установке "ЛАВА" имитировалось и это условие управления аварией.

Во всех экспериментах большая часть кориума фрагментировалась в водяном бассейне. Соотношение "масса фрагментированного кориума/масса слитого кориума" находилось в диапазоне от 0,88 до 1,0. Степень фрагментации не зависела от глубины бассейна и массы кориума в исследуемом диапазоне параметров. В большинстве случаев наблюдалось только несколько килограммов кориума в слитке. Не обнаружено слитков в экспериментах с увеличенной скоростью падения кориума (А8 и А10).

На рисунке 6 представлена группа графиков Розина–Раммлера, которая позволяет сравнивать результаты фрагментации в экспериментах по изучению FCI. В процессе изучения результатов фракционирования замечено, что исключение из анализа самых крупных и самых мелких фракций приводит к лучшему согласованию расчетных и экспериментальных данных. Можно предположить, что наиболее мелкие фракции являются результатом вторичной фрагментации, либо это фрагменты более крупных частиц, разрушенных в результате просеивания.

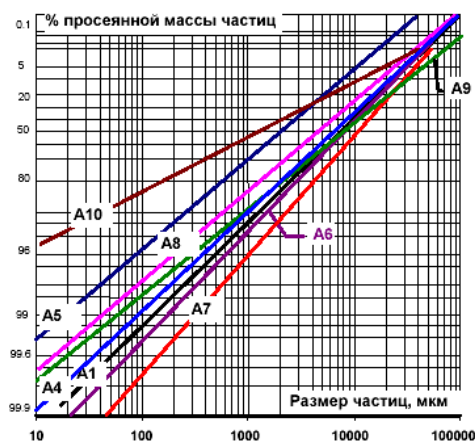


Рисунок 6. Графики Розина-Раммлера
для частиц в экспериментах FCI

Регистрация изменения давления над бассейном воды показала, что практически во всех экспериментах кривая давления имеет сходный характер и может быть условно разделена на три области (рисунок 7).

- Зона А – резкое нарастание давления в миллисекундном диапазоне времени.
- Зона В – относительно небольшое снижение давления.
- Зона С – вторичный рост давления в УПР в секундном диапазоне времени.

Область А - характеризует период с момента касания кориумом поверхности воды до первого пика давления. В этой области давление быстро нарастает и достигает первого максимума в течение первых 0,5 с за счет генерации пара при передаче тепла от падающего кориума в воду. Следует отметить, что во всех экспериментах не наблюдалось пика давления, характерного для парового взрыва.

После первого пика измеренное давление временно снижается в области В вследствие конденсации пара в недогретом бассейне. Затем давление постепенно переходит (как правило, в течение 10 с) в квазистационарное состояние в области С. Это вызвано передачей тепла от кориума, накопленного на

дне бассейна. Конечное установившееся давление меньше, чем рассчитанное по запасенной энергии в кориуме, вероятно, за счет генерации неконденсируемых газов в результате окисления металлических компонентов кориума.

Несмотря на то, что в эксперименте A10 получен наибольший первый пик давления, он хорошо согласуется с остальными данными. Это также подтверждает отсутствие парового взрыва в A10, а первый пик давления в этом эксперименте был обусловлен, главным образом, теплообменом между падающими частицами кориума и водой в бассейне, как и в других опытах.

Анализ концентрации элементов в частицах показал, что содержание урана в частицах возрастает с уменьшением размера частиц. Содержание циркония, наоборот, более высокое в крупных частицах. Такая тенденция наблюдалась во всех экспериментах.

Таким образом, по результатам экспериментов серии А можно сделать вывод, что паровой взрыв не происходил при условиях экспериментов и отсутствии внешнего триггера. Коэффициент фрагментации кориума составил 88...100 % даже при наличии только мелкого водного бассейна. При этом присутствие большой доли металлических компонентов повышают степень диспергирования струи кориума, что подтверждается значительным количеством частиц, характерных для первичной фрагментации.

Первоначальный выброс давления хорошо согласуется со среднемассовым размером частиц фрагментированного кориума. Это подтверждает вывод о том, что первоначальный рост давления вызван, главным образом, теплообменом между частицами кориума и водой. Наиболее сильный подъем давления наблюдался при повышенной скорости падения расплава в воду, более холодном бассейне и большей массе кориума. Конечное равновесное давление после охлаждения кориума было больше, чем рассчитанное по начальной энергии. Не исключена возможность проникновения воды в зазор между кориумом и бетонной подложкой, о чем свидетельствует слабая адгезия между слитком кориума и бетоном, пористая нижняя поверхность слитка, а также малые размеры самого слитка.

В целом, результаты взаимодействия кориума с водой внутри силового корпуса и за его пределами имеют много общего. Основное отличие состоит в различном соотношении масс "фрагменты/слиток", что может быть объяснено особенностями теплообмена на нижней границе между упавшим кориумом и подложкой.

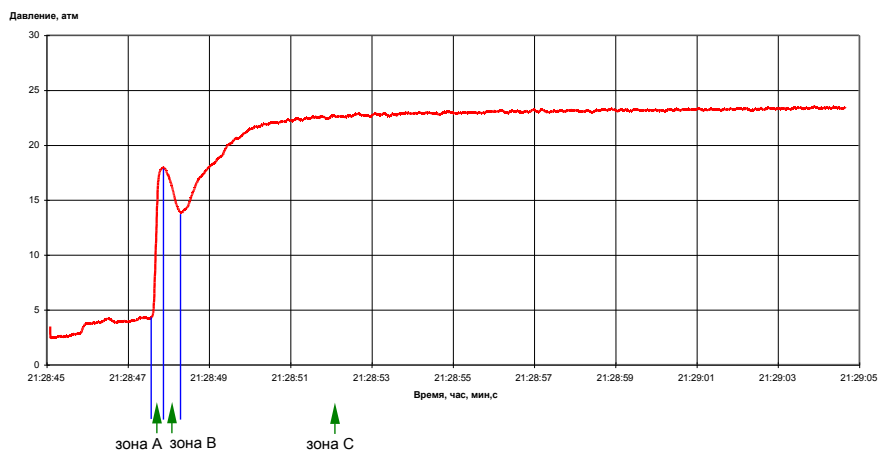


Рисунок 7. Диаграмма изменения давления в УПР при сливе расплава в воду

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ С БЕТОНОМ (МССИ)

В нескольких сериях экспериментов COTELS выполнено в общей сложности 25 экспериментов по исследованию взаимодействия прототипного кориума с бетоном, в которых варьировались следующие параметры:

- Толщина слоя кориума на бетонной поверхности;
- Расход воды на поверхность кориума и задержка начала орошения после падения расплава в ловушку;
- Мощность индукционного нагревателя, имитирующего остаточное тепловыделение в топливе;
- Состав прототипного кориума;
- Тип бетона.

В отдельных экспериментах исследовано взаимодействие бетона с расплавом нержавеющей стали, одномерное взаимодействие прототипного кориума с бетоном (за счет изоляции внутренней боковой поверхности бетонной ловушки втулкой из спеченной

оксида магния), а также взаимодействие прототипного кориума с цементным раствором. Во всех экспериментах моделировалось остаточное тепловыделение в топливе методом индукционного нагрева. Основные типы бетонных ловушек для исследования МССИ приведены на рисунке 8.

В целом можно разделить проведенные эксперименты на две большие группы по конечному результату взаимодействия кориума с бетоном. В первой группе в результате взаимодействия обнаружен слиток кориума, на поверхности которого сформировалась засыпка из мелких частиц продуктов взаимодействия. Во второй группе экспериментов не было обнаружено слоя частиц поверх слитка. Наиболее вероятно, условия охлаждения расплава в бетонной ловушке были таковы, что кориум успел закристаллизоваться до значительного взаимодействия с бетоном. К такому же результату могла привести недостаточная мощность индукционного нагревателя, имитирующего остаточное тепловыделение в топливе, или слишком большая пауза между сбросом расплава в ловушку и включением индуктора.

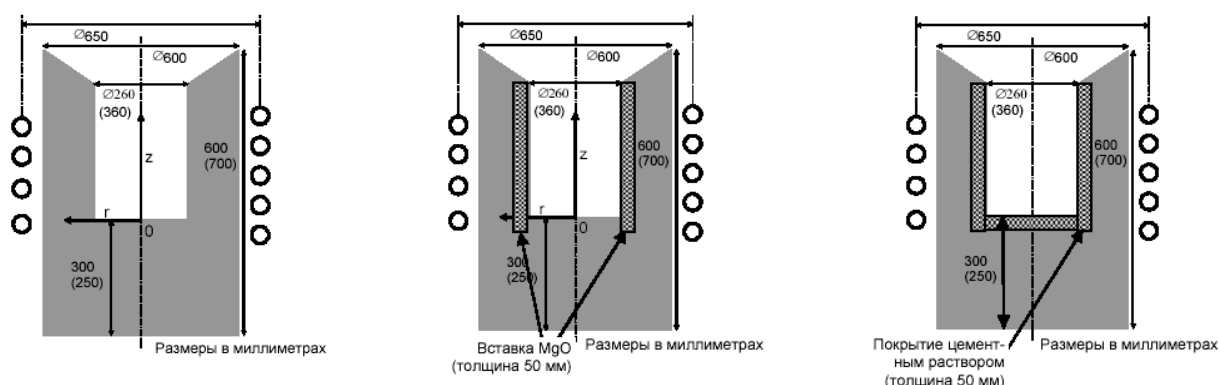


Рисунок 8. Типы бетонных ловушек для исследования МССИ

Эрозия и деградация бетона определена как для основания, так и для стенки во всех вариантах, независимо от наличия или отсутствия фрагментированных продуктов МССИ. Отличие состоит только в глубине эрозии и деградации бетона. Максимальная эрозия бетона достигнута в эксперименте ВС10 и составила 48 мм, когда кориуму было передано максимальное количество энергии до начала орошения водой. Тем не менее, глубина эрозии была меньше, чем в экспериментах SWISS, WETCOR и MACE.

Затвердевшие продукты МССИ состояли, в большинстве случаев, из сплошного слитка, лежащего на дне бетонной ловушки и слоя фрагментов поверх слитка. В общем случае, слиток продуктов МССИ имел множество каверн диаметром от 1,5 до 15 мм. Некоторые каверны содержали в себе фрагменты щебня. Кроме того, слиток содержал множество каналов в направлении от бетонного основания до поверхности слитка. Стенки некоторых каналов имели коричневую или белую окраску, что могло являться результатом окисления металлических компонентов при прохождении через кориум (в расплавленном состоянии) продуктов разложения бетона.

Распределение частиц "рыхлой" фракции продуктов МССИ по размеру хорошо коррелирует с логарифмическим законом Розина-Раммлера. Однако графики существенно отличались от тех, которые получены в экспериментах FCI. В общем случае в серии экспериментов МССИ получены более мелкие частицы.

На рисунке 9 приведен анализ распределений частиц по размерам для двух экспериментов, в одном из которых не было орошения расплава водой (ВС5а). В эксперименте ВС5 вода подавалась на поверхность расплава со скоростью 2 литра в минуту. Сходство распределений частиц по размерам доказывает, что МССИ продолжается даже при орошении расплава водой, а частицы кориума формируются, преимущественно, в результате взаимодействия "кориум/бетон". Наличие или отсутствие воды, в данном случае, может влиять на интенсивность образования частиц за счет изменения температуры расплава.

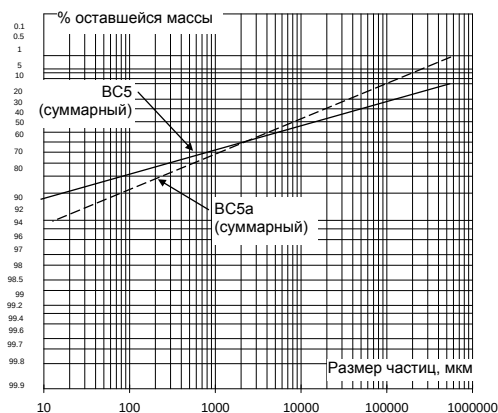


Рисунок 9. Сравнение распределения Розина-Раммлера для экспериментов ВС5 и ВС5а

Количество образовавшихся фрагментов в большой степени зависит от запасенного в расплаве тепла до начала орошения его водой. На рисунке 10 показана масса фрагментированных продуктов МССИ в зависимости от интегрального тепла в расплаве для всех экспериментов с диаметром ловушки 36 см. Наибольшее количество частиц образовалось в экспериментах ВС2, ВС3 и ВС10, несмотря на то, что соотношение "высота/диаметр" ловушки составило 0,19. Исключение составляет эксперимент ВС4, в котором имело место прерывание орошения расплава водой в процессе эксперимента.

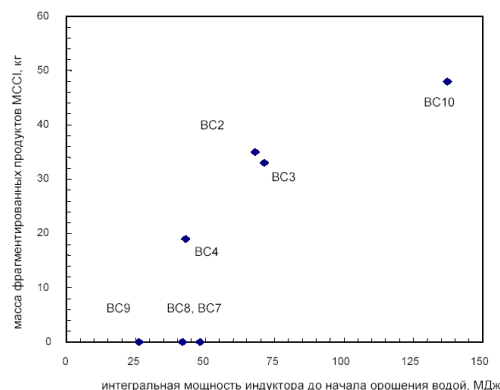


Рисунок 10. Масса фрагментов в зависимости от запасенного в кориуме тепла до начала орошения

В процессе разогрева шихты в электроплавильной печи (ЭПП) до полного плавления компонентов металлические компоненты шихты взаимодействуют между собой с образованием металлических и керамических расплавов. При этом оксиды, содержащиеся в шихте, частично или полностью теряют кислород, который дренируется из ЭПП. Таким образом, сливаемый расплав имеет более высокое содержание металлических компонентов, чем исходная шихта.

Механизм формирования слоя частиц кориума на поверхности слитка можно объяснить на основе сравнения результатов экспериментов ВС5 и ВС5а. В процессе эксперимента ВС5 орошение расплава водой производилось в течение 90 минут после слива кориума в бетонную ловушку. В то же время, в эксперименте ВС5а орошение водой не выполнялось. Тем не менее, в эксперименте ВС5а также сформировался слой частиц на поверхности сплошного кориума. Сравнение результатов этих двух экспериментов позволило предположить, что частицы формируются в результате выброса жидких продуктов МССИ из зоны взаимодействия "кориум/бетон" в виде "грязевых вулканов" по действием повышенного давления газообразных продуктов МССИ, формирующихся под первичной коркой. Анализ распределения частиц по размерам показал, что в ВС5а средний размер частиц больше, чем в ВС5. Данный факт можно объяснить более полным окислением верхнего слоя кориума при контакте с водой с последую-

щим хрупким разрушением (вторичной фрагментацией) оксидных частиц.

В небольшой серии из 3-х экспериментов (экспериментах Д11, Д12 и Д13) были существенно изменены условия их проведения. Во-первых, из начальной загрузки была исключена нержавеющая сталь, т.к. было установлено, что именно присутствие компонентов нержавеющей стали в шихте приводит к глубокой эрозии стенки плавильного тигля ЭПП и, как следствие, к существенному "загрязнению" кориума углеродом и продуктами его взаимодействия с металлическими и оксидными компонентами загрузки при разогреве и плавлении. Во-вторых, были изменены размеры бетонной ловушки и индуктора, моделирующего остаточное тепловыделение в топливе, что позволило увеличить удельное энерговыделение в кориуме. В-третьих, дно ловушки было покрыто слоем цементного раствора (без гравия), толщиной примерно 2 см, что привело к интенсивному взаимодействию "кориум/бетон" на начальной стадии эксперимента сразу после слива расплава в ловушку. (В боковые стенки бетонной ловушки также были внесены горизонтальные прослойки из цементного раствора, как мера от растрескивания бетона при высокой температуре.) Конструкция и основные размеры бетонной ловушки показаны на рисунке 11.

Параллельно внутренней боковой поверхности ловушки был установлен тонкостенный цилиндр массой 6 кг из нержавеющей стали, чтобы при сливе расплава цилиндр плавился за счет запасенного в кориуме тепла, создавая кориум реального состава. Индуктор бетонной ловушки перекрывал внутреннюю полость в вертикальном направлении примерно на

0,2...0,25 м для того, чтобы эффективно подогреть кориум даже в случае значительного смещения кориума вниз при абляции бетонного основания.

Следует отметить, что, несмотря на вариации мощности индуктора от эксперимента к эксперименту, конечная картина примерно одинакова для всех испытаний. Бетон полностью деградировал в сторону боковой стенки, остаточная толщина стенки составила от 2 до 6 см (при начальной толщине 12,5 см).

Удельная мощность в кориуме в экспериментах Д11...Д13 была намного больше, чем в реальной ситуации, принимая во внимание электрическую мощность индуктора, к.п.д. нагрева и объем кориума. Удельная мощность в экспериментах была увеличена намеренно, чтобы установить постоянный тепловой поток в бетон. Средний постоянный тепловой поток может быть грубо оценен делением мощности в кориуме на площадь поверхности кориума.

Графики глубины абляции и радиус основания и боковой стенки в зависимости от времени для эксперимента Д11 приведены на рисунке 12.

Процесс абляции боковой стенки замедлился после начала подачи воды в бетонную ловушку, особенно в верхней зоне. Перепад температуры между фронтом абляции и внешней поверхностью боковой стенки показал некоторые девиации вверх и вниз после плавного роста для всех экспериментов. На основании наблюдения за абляцией и изменением температуры высказано предположение, что вода могла проникать через термически деградированный бетон и трещины в боковой стенке. Это было также замечено в более ранних экспериментах COTELS MCCI [6, 7].

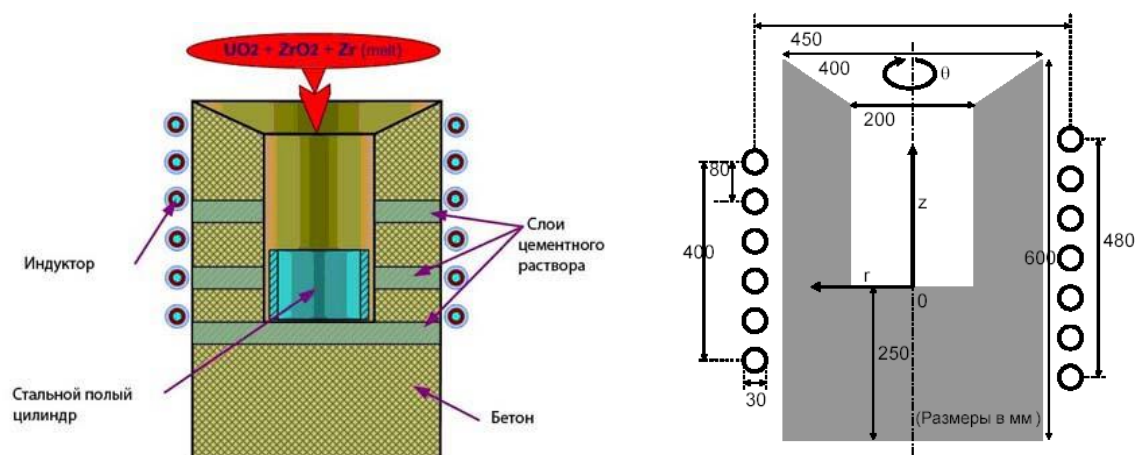


Рисунок 11. Схема и основные размеры бетонной ловушки

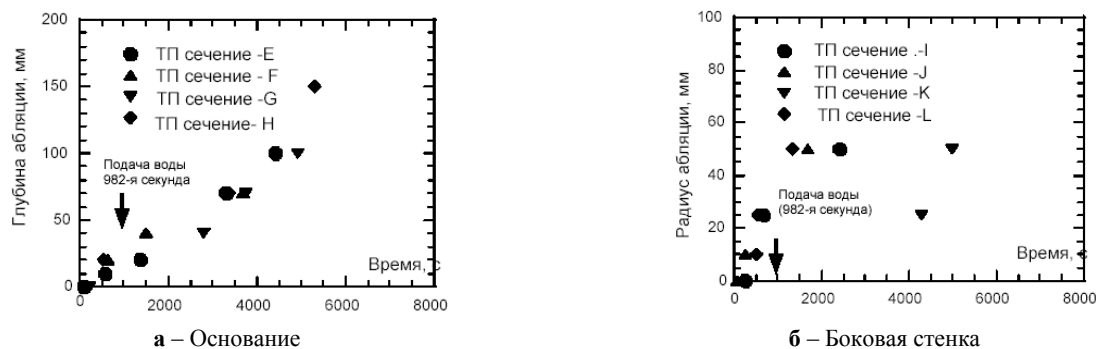


Рисунок 12. Глубина и радиус абляции в зависимости от времени (эксперимент Д11)

В отличие от боковой абляции, абляция основания не подавлялась подачей воды, даже в эксперименте Д13 с пониженной мощностью индуктора. Чтобы отвести от кориума водой всю мощность, сообщаемую индуктором, тепловой поток с верхней поверхности кориума должен быть не менее 600 кВт/м^2 для эксперимента Д13. Такой тепловой поток не обеспечивался в предыдущих 1-D экспериментах с прототипом кориума, поскольку формировалась верхняя корка застывшего кориума, сцепленная с тугоплавкой боковой стенкой, изолирующая лежащий под ним кориум, что привело к ослаблению теплообмена между кориумом и верхним бассейном воды. В результате пост-экспериментального изучения продольного разреза ловушки было замечено, что в 2-D МССИ экспериментах также образовалась корка, сцепленная с боковой бетонной стенкой.

Скорость абляции боковой стенки была почти вдвое больше, чем абляция бетонного основания. Большая скорость боковой абляции могла быть обусловлена наличием тонкостенного стального цилиндра в бетонной ловушке перед сливом кориума. Сталь плавилась под действием слитого кориума, образуя металлический слой с высокой теплопроводностью между кориумом и боковой стенкой ловушки, который разогревался индуктором. Альтернативное объяснение может быть связано с особенностями теплогидравлики бассейна расплава, в том числе вызванными барботажем газовых продуктов взаимодействия через расплав.

На основании результатов экспериментов было обнаружено, что скорость абляции в большинстве случаев пропорциональна мощности индуктора, а соотношение скоростей абляции в нижнем и боковом направлениях почти одинаково и не зависит от мощности индуктора. Поскольку тепловой поток от кориума в бетон можно оценить на основе скорости абляции и энтальпии, необходимой для абляции, соотношение скоростей абляции, полученное в описываемых экспериментах может служить полезным параметром для моделирования разделения энергии. Следует отметить, что за счет цилиндрической геометрии боковой стенки отношение теплового потока вниз к потоку в боковую стенку уменьшается относительно соотношения скоростей абляции примерно на 10 %.

При выполнении анализа эксперимента Д13 применялась усовершенствованная версия кода СОСО [7] для анализа МССИ, которая позволяет анализировать нестационарную теплопроводность в бетоне, теплообмен "кориум/бетон", абляцию бетона и генерацию газообразных продуктов разложения бетона, образование корки, кипение и лучистый теплообмен с верхней поверхности кориума, проникновение воды в верхнюю корку, выброс кориума через верхнюю корку и т.д.

Эксперименты по МССИ с повышенной мощностью нагревателя расплава показали, что подача воды ослабляет лишь абляцию бетона боковой стенки. Скорость абляции бетонного основания постоянна, даже в случае понижения мощности индуктора. Обнаружено, что образовалась верхняя корка, скрепленная с боковой стенкой, как это имело место в предыдущих экспериментах с тугоплавкой боковой стенкой, что могло привести к снижению отвода тепла в воду. Выполнена оценка скорости абляции бетона, как для бокового, так и для донного направления, после установления квазистационарной абляции. Результат оценки показал, что соотношение скоростей боковой и донной абляции, которое связано с распределением мощности, не зависит от мощности индуктора и практически постоянно.

Для объяснения отдельных явлений, влияющих на скорость абляции бетона и охлаждаемость кориума, выполнен сравнительный анализ результатов, полученных с применением бетонных ловушек различных типов. Так в эксперименте Д8а применялась бетонная ловушка, изготовленная целиком из базальтового бетона, в эксперименте Д9 внутренняя поверхность бетонной ловушки была покрыта слоем цементного раствора толщиной 5 см, а в эксперименте Д10 внутренняя боковая поверхность ловушки была закрыта цилиндрической втулкой из окиси магния для организации одномерного взаимодействия "кориум/бетон".

На рисунке 13 показана зависимость глубины абляции основания от интегральной мощности в кориуме для экспериментов Д8а и Д9.

Эффективность индукционного нагрева для экспериментов Д8а и Д9 оценивалась в пределах 10...25 % на основе результатов предыдущих экспе-

риментов [6], в которых взаимодействие было подавлено подачей воды, и был измерен тепловой поток от кориума в верхний водный бассейн. То есть, почти вся мощность индуктора, сообщаемая кориуму в этих экспериментах, была отведена верхним водным бассейном. В отдельном калибровочном эксперименте Д6 в качестве имитатора кориума применялся расплав нержавеющей стали. К.п.д индуктора для этого эксперимента составил около 30%.

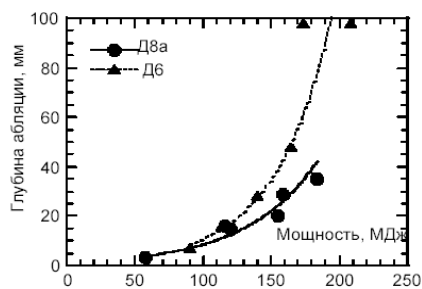


Рисунок 13. Сравнение глубины абляции основания в экспериментах Д8а и Д9

Скорость абляции базальтового бетона оказалась значительно меньше по сравнению с абляцией цементного раствора без наполнителя в случае, когда на поверхности кориума образуется устойчивая корка. Между кориумом и бетоном сформировался слой деградированного бетона, включающий в себя крупные и мелкие фрагменты наполнителя в эксперименте с базальтовым бетоном, поскольку фрагменты наполнителя оказались термически более стойкими, чем цементный раствор.

В двух экспериментах внутренняя боковая стенка бетонной ловушки была защищена цилиндрической вставкой из окиси магния для реализации одномерной абляции бетона только в нижнем направлении. При этом в одном из экспериментов сверху на расплав кориума подавалась вода (Д10), а второй эксперимент (Д10б) выполнялся без охлаждения.

В эксперименте Д10 с охлаждением водой методом верхнего залива не образовалось слоя частиц поверх слитка. Тем не менее, глубина абляции бетона в вертикальном направлении на 25 % больше, чем в случае отсутствия охлаждения, даже при меньшей мощности индуктора.

Наличие эрозии на боковой поверхности вставки из окиси магния подтверждает существование высокой температуры расплава (порядка 2800 °С) в процессе взаимодействия. Общая особенность результирующего слитка кориума – плотный слой с повышенным содержанием оксидов железа в зоне взаимодействия с бетоном. В обоих случаях наблюдается сцепление периферии слитка с боковой стенкой с вогнутым мениском, подтверждающим смачивание расплавом кориума поверхности окиси магния.

Полученные результаты экспериментов по моделированию МСЦИ дают основания полагать, что формирование фрагментированных продуктов

МСЦИ обусловлено, главным образом, энергией, запасенной в расплаве до начала орошения его водой. В результате прохождения через расплав продуктов разложения бетона и сопровождающего этот процесс окисления металлических компонентов расплава, получено большое количество частиц с весьма малым поперечным размером. Верхний слой фрагментов содержит большое количество соединений бетона. Распределение частиц по характерному поперечному размеру хорошо согласуется с логарифмическим законом Розина–Раммлера.

На рисунке 14 показано влияние соотношения размеров бассейна кориума, аккумулированного в бетонной ловушке, на температуру бетона вблизи границы взаимодействия.

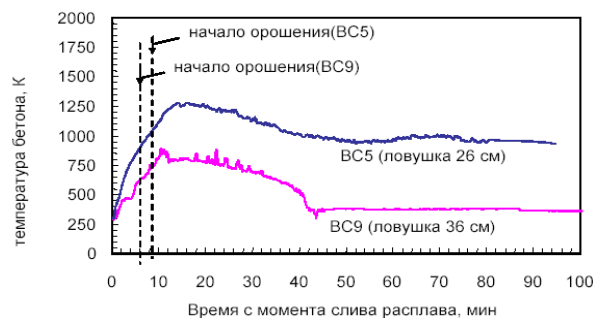


Рисунок 14. Эволюция температуры бетона при различной глубине бассейна кориума

В результате экспериментов по моделированию взаимодействия расплава активной зоны с бетоном с падением расплава в бетонную ловушку выявлено следующее.

- Падение расплава на бетон в ряде случаев приводит к формированию значительного слоя фрагментированных продуктов взаимодействия "кориум/бетон".
- Удельная доля фрагментов зависит, в первую очередь, от энергии, запасенной расплавом перед его сливом в экспериментальную секцию.
- Скорость абляции бетона при взаимодействии с кориумом зависит от удельной энергии, выделяемой в кориуме устройством для имитации остаточного тепловыделения.
- Применение в качестве наполнителя бетона термостойкого материала (например, природного кварцита) может обеспечить временное замедление абляции бетона за счет более высокой температуры плавления гравия и более высокой скрытой теплоты его плавления.
- В общем случае абляция бетона не может быть полностью остановлена за счет верхнего залива водой.

Исследование проблем безопасности реакторов на быстрых нейтронах (проект EAGLE)

В настоящее время большое внимание в научном мире уделяется работам по созданию предельно безопасного реактора на быстрых нейтронах. Проект

EAGLE является экспериментальной программой, призванной обеспечить ясные экспериментальные доказательства возможности применения неконсервативного подхода при решении специфической для реакторов на быстрых нейтронах проблемы повторной критичности, характерной для аварии активной зоны реактора, сопровождающейся плавлением топлива. Специалистам хорошо известно, что в случае аварии в активной зоне реактора на быстрых нейтронах может сформироваться бассейн расплавленного топлива, в котором может протекать самоподдерживающаяся цепная реакция деления. В любом случае, такой процесс не может привести к ядерному взрыву, но может стать причиной выброса значительного количества тепловой энергии, что, в свою очередь, может привести к повреждению защитных барьеров реакторной установки и выходу радиоактивных продуктов деления за пределы силового корпуса реактора. Наиболее простым технически и, одновременно и зачастую, наиболее экономически неэффективным решением проблемы является увеличение характеристик устойчивости защитных барьеров - например, прочности за счет наращивания толщины защитного барьера. С другой стороны, может оказаться, что наиболее эффективным, окажется такое решение, в результате которого будет снята полностью сама проблема, даже несмотря на серьезные затраты.

В конкретном случае, для обсуждаемой проблемы «повторной критичности», эффект «ликвидации» проблемы может быть достигнут, если исключить самую возможность образования бассейна расплава, осуществив своевременное удаление расплава из активной зоны. Одним из вариантов решения задачи является использование специальных каналов внутри активной зоны, по которым будет происходить такое контролируемое удаление расплавленного топлива.

Исследования, проводимые по проекту EAGLE, были ориентированы на экспериментальное подтверждение реализуемости концепции контролируемого удаления (перемещения) расплавленного топлива из активной зоны (по специальным) в нижний пленум реактора или под реакторное помещение. Работы по обоснованию возможности проведения экспериментов направленных на исследование проблемы контролируемого перемещения расплава топлива были начаты в 1995 году. Проект EAGLE предусматривал проведение как реакторных, так и вне реакторных исследований. Однако, основная роль в программе проекта EAGLE отводилась подготовке и проведению внутриреакторных экспериментов. Исследовательская программа проекта EAGLE (EAGLE-1) была успешно завершена в 2006 году. Результаты выполнения проекта EAGLE стали основой для планирования содержания работ по второй, еще более интересной и сложной части проекта, получившего наименование EAGLE-2 и начавшегося в 2006 году.

1. ВНУТРИРЕАКТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

1.1. Программа внутриреакторных экспериментов и ее реализация

Во внутриреакторной части проекта EAGLE-1 в качестве основных были проведены два полномасштабных эксперимента. На подготовительном этапе им предшествовали три последовательно реализованных этапа (рисунок 15). При реализации такого подхода – «шаг за шагом» - всего было выполнено шесть внутриреакторных экспериментов с плавлением топлива.

Цели этих экспериментов могут быть представлены в следующей взаимосвязанной последовательности[24].

Маломасштабные эксперименты (GP-1, GP-2): расплавлялось около 36 г. топлива в виде топливного столба из таблеток типа ВВЭР-1000, при этом измерялось увеличение давления газа (**Gas Pressurization**) в замкнутом объеме в процессе плавления топлива.

Эксперимент среднего масштаба (WF): расплавлялось около 2 кг топлива в виде топливной сборки, сформированной из 12 твэлов, и расплав разрушил стенку из нержавеющей стали (Wall Failure), при этом определялся тепловой поток от расплава к стенке в момент ее разрушения и измерялись параметры, характеризующие тепловое состояние стенки[25].

Полномасштабный эксперимент без натрия (FD): расплавлялось около 8 кг топлива в виде топливной сборки, сформированной из 75 твэлов, и расплав, разрушив стенку внутренней трубы, слился в ловушку, при этом были измерены параметры, характеризующие как разрушение стенки трубы, так и условия перемещения расплава по трубе, незаполненной в исходном состоянии натрием. Этот последний подготовительный эксперимент позволил получить экспериментальные данные, которые использовались как при оценках параметров плавления топлива (**Fuel Disruption**), так и при анализе результатов заключительных экспериментов с целью выявления влияния натрия на параметры плавления стенки внутренней трубы и последующее перемещение расплава по трубе.

Полномасштабные эксперименты с натрием (ID1, ID2): расплавлялось около 8 кг топлива в виде топливной сборки, сформированной из 75 твэлов, и расплав, разрушив стенку внутренней трубы, заполненной натрием, слился в заполненную натрием ловушку, которая моделировала нижний пленум реактора на быстрых нейтронах, при этом были измерены параметры, характеризующие как разрушение стенки трубы, так и перемещение расплава по трубе в условиях влияния на изучаемые процессы ~8.5 кг натрия. Два эксперимента ID отличались диаграммами мощности и величиной интегрального энерговыделения в топливе, при этом оба эксперимента позволили получить уникальные экспериментальные данные, характеризующие процесс перемещения то-

плива по внутренней трубе в условиях взаимодействия с натрием, и продемонстрировали (*Integral Demonstration*) состоятельность идеи вывода расплава из активной зоны реактора по внутренним трубам, встроенным в конструкцию ТВС быстрого реактора. В настоящей статье приводятся краткие ре-

зультаты только эксперимента ID1, так как анализ результатов ID2 все еще продолжается. Вместе с тем, эксперименты ID очень схожи по условиям проведения, поэтому описание эксперимента ID1 может быть практически полностью отнесено к эксперименту ID2.

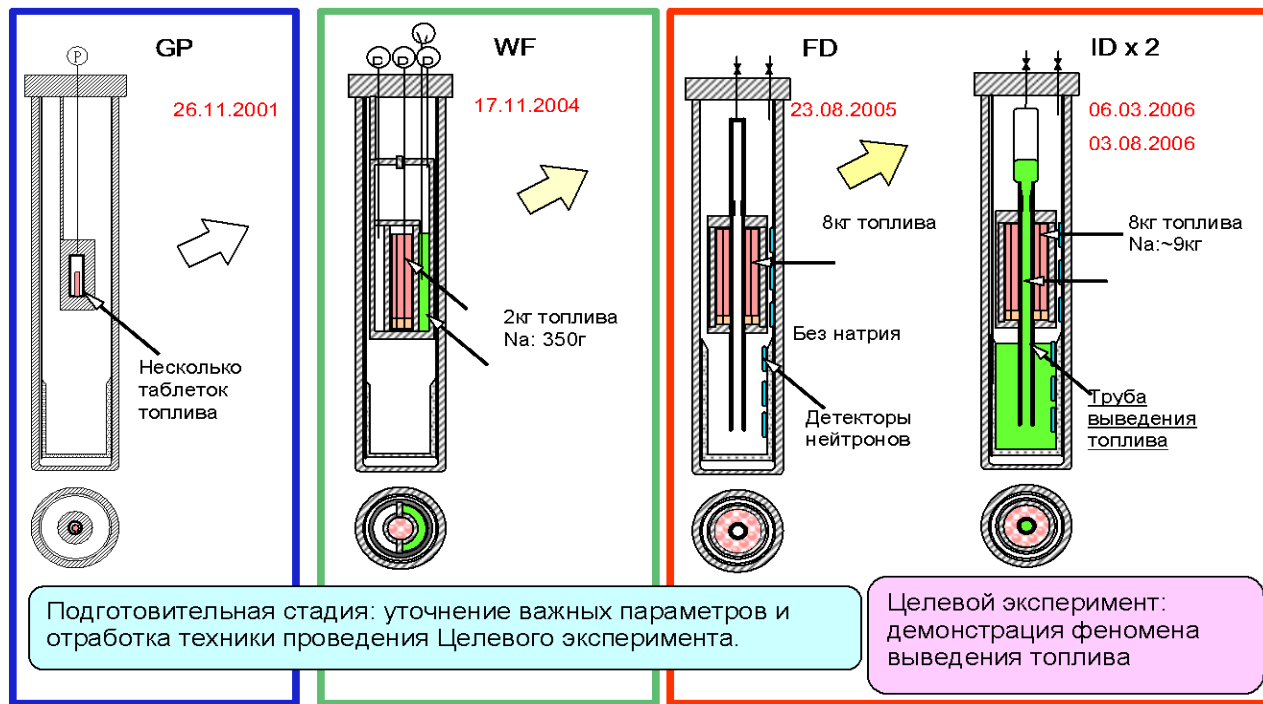


Рисунок 15. Последовательность экспериментов проекта EAGLE-1

В экспериментах WF, FD и ID фактически моделировалась одна из сборок реактора на быстрых нейтронах с локально высоким энерговыделением, обусловленным пустотным эффектом реактивности, как это постулируется в одном из сценариев CDA. Для достижения желаемых результатов и условий эксперимента проводилась тщательная предварительная подготовка, включая расчетно-теоретическое и экспериментальное обоснование форм диаграмм изменения мощности и интегрального энерговыделения в экспериментальных ТВС, обоснование условий безопасного проведения экспериментов. Особое значение придавалось натурным предварительным внутриреакторным экспериментам на, так называемых, физических макетах, которые позволили методом прямых измерений определить параметры объемного распределения энерговыделения в экспериментальном топливе и установить связь этих параметров с величиной энерговыделения в реакторе.

В выполняемой в настоящее время внутриреакторной части проекта EAGLE-2 эксперименты не разделены на вспомогательные и основные, так как каждый из них должен принести важные взаимно дополняющие результаты. Более того, экспериментальный подход, реализуемый в рамках проекта EAGLE-2, предполагает необходимость учета ре-

зультатов предыдущих экспериментов не только для корректировки условий проведения последующих экспериментов, но и для возможного отказа от ранее запланированных последующих экспериментов в пользу новых, ранее не обсуждавшихся в деталях.

Вместе с тем, отличительной особенностью экспериментального подхода проекта EAGLE-2 является использование основных конструктивных решений, проверенных в рамках первой части проекта. Этим, в частности, объясняется сходство названий некоторых внутриреакторных экспериментальных устройств (WF2, ID3, ID4), эксперименты с которыми запланированы в проекте EAGLE-2, с названиями экспериментальных устройств, испытанных в рамках проекта EAGLE-1. Принципиальные отличия внесены в конструкцию экспериментальных устройств в связи с иной целью экспериментов – в отличие от проекта EAGLE-1, в котором решалась задача подтверждения возможности перемещения расплава топлива в нижний пленум, в проекте EAGLE-2 необходимо обосновать возможность перемещения топлива вверх, в верхний пленум реактора на быстрых нейтронах.

В связи с тем, что реализация программы внутриреакторных экспериментов EAGLE-2 находится на начальной стадии, в рамках которой проведен

один внутриреакторный эксперимент WF2, обработка его результатов далека от завершения. В этой связи авторы приносят извинения за отсутствие описания этого эксперимента в настоящей статье и готовят соответствующую публикацию по завершении анализа материалов, полученных его проведения.

1.2. Условия экспериментов и основные результаты

1.2.1 Эксперименты GP [26].

Перепад давления между областью, содержащей расплавленное топливо (поврежденная активная зона), и нижним пленумом является ключевым параметром, который определяет характеристики перемещения расплавленного топлива по внутренней трубе, соединяющей эти пространства. Для того, чтобы правильно моделировать этот перепад давления в экспериментальной ТВС, необходимо предварительно исследовать влияние плавления топлива на изменение давления в замкнутом объеме, в котором это топливо находится. Для этих целей были проведены внутриреакторные эксперименты, в которых в закрытой танталовой капсуле расплавляли 36 г топ-

ливных таблеток типа ВВЭР-1000 (рисунок 16), и в процессе плавления измерялось изменение давления в полости капсулы. Начальная температура капсулы топлива задавалась на уровне около 400 °С с помощью электрического нагревателя, после чего реализовывался импульс реактора ИГР и, следовательно, импульс внутреннего энерговыделения в экспериментальном топливе. В каждом из двух экспериментов энерговыделение в топливе составило 1.9 кДж/г- UO_2 and 3.37 кДж/г- UO_2 , соответственно.

В результате экспериментов было подтверждено паспортное низкое значение количества примесных газов, содержащихся в топливе. Было показано экспериментально, что примесные газы практически не оказывают влияния на рост давления в полости камеры плавления в процессе плавления топлива, и основной вклад в величину давления вносит разогрев газа, изначально заполняющего капсулу. Полученные результаты были учтены и использовались при определении и задании начального давления в полости экспериментальной ТВС и в полости ловушки расплава.

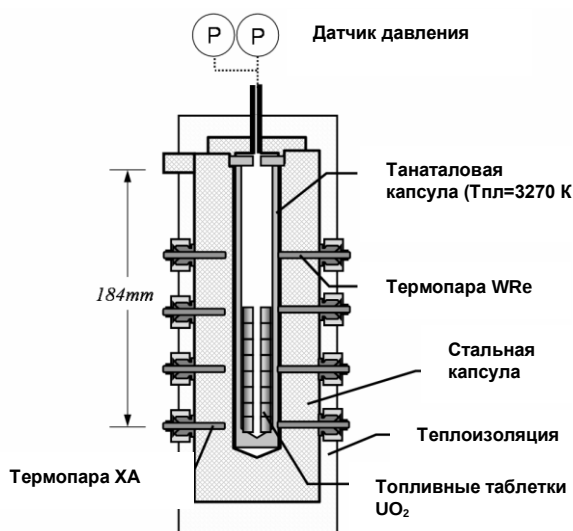


Рисунок 16. Экспериментальное устройство GP

1.2.2 Эксперимент WF [2 7,28]

Схема экспериментального устройства показана на рисунке 17. ТВС, сформированная из 12 твэлов, была установлена внутри стальной трубы с внешним диаметром 54 мм и толщиной стенки, равной 3 мм. Каждый из твэлов содержал топливные таблетки с наружным диаметром 7.55 мм (с центральным отверстием диаметром 1.5 мм), помещенные внутри стальной цилиндрической оболочки с наружным диаметром 9 мм и с толщиной стенки, равной 0.5 мм. Топливный столб твэла был составлен из таблеток типа ВВЭР-1000 с обогащением 4.4% (активная часть топливного столба длиной 400 мм в верхней части твэла) и из таблеток с природным обогащением урана (бланкетная часть топливного

столба длиной 50 мм в нижней части твэла). В общей сложности ТВС содержала 2.311 кг двуоксида урана UO_2 (обогащенное топливо - 2.07 кг и бланкета - 0.241 кг). Заданное исходное положение твэлов в сечении ТВС задавалось дистанционирующими решетками. Наружная поверхность стальной трубы, внутри которой была установлена ТВС, была разделена диаметрально на две части, так что одной стороны наружной поверхности трубы была устроена полость (шириной 3 мм), заполненная аргоном, а с другой стороны – полость (шириной 10 мм), заполненная натрием. Такая конструкция позволяла обеспечить одновременно одинаковую тепловую нагрузку на стенку, охлаждаемую аргоном, и на противоположную стенку, охлаждаемую натрием. Такой

подход позволил экспериментально выявить влияние натрия на тепловое состояние стенки и на параметры ее разрушения.

Описанное экспериментальное устройство было снабжено защитным силовым корпусом, затем установлено в реактор ИГР, нейтронный импульс которого обеспечил разогрев топлива до температуры, выше точки плавления топлива UO_2 ($3100\sim 3200^\circ\text{C}$). Непосредственно перед пуском экспериментальное устройство WF было разогрето электрическими нагревателями до заданной начальной температуры, равной $\sim 400^\circ\text{C}$. Диаграмма изменения мощности энерговыделения в реакторе ИГР и рассчитанное значение интегрального энерговыделения в топливе экспериментальной ТВС показаны на рисунке 18.

Основываясь на результатах прямых измерений температуры, давления в газовых полостях и импульса давления в жидком натрии, параметров кипения натрия, акустических шумов, была восстановлена общая картина эксперимента и определена последовательность основных процессов, которые протекали на стеках, граничащих с каждым из зазоров (рисунок 19). Эксперимент показал, что разрушение стенки, контактирующей с натрием, произошло приблизительно через ~ 1 секунду после разрушения стенки, контактирующей с аргоном. Датчики пустот, установленные в натрии, зафиксировали кипение натрия и даже полное осушение стенки, тем не менее, натрий эффективно охлаждал стенку вплоть до момента ее разрушения.

Изменение температуры на поверхности трубы для каждого из зазоров показано на рисунке 20. Последующий расчетный анализ показал, что при пря-

мом контакте расплава с внутренней поверхностью стальной трубы, тепловой поток от расплава составлял $\sim 20 \text{ МВт/м}^2$. Этим - мощным тепловым потоком – объясняется довольно быстрое разрушение стенки, контактирующей с натрием, несмотря на ее эффективное охлаждение.

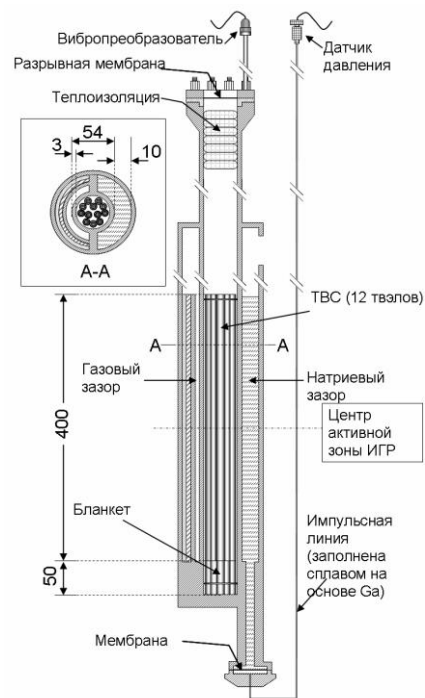


Рисунок 17. Схема экспериментальной секции устройства WF

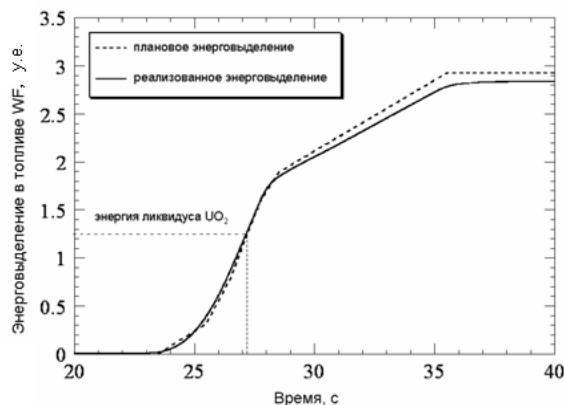
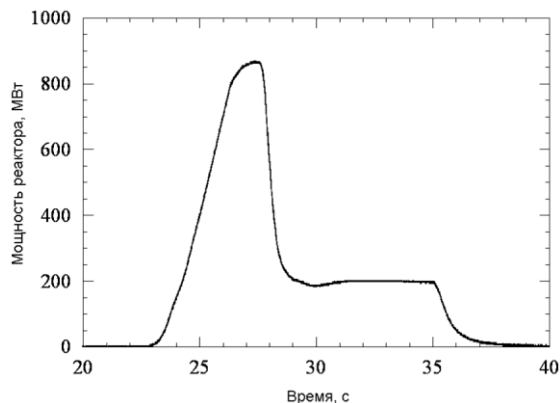


Рисунок 18. Диаграмма изменения мощности реактора ИГР и удельное энерговыделение в топливе экспериментального устройства WF

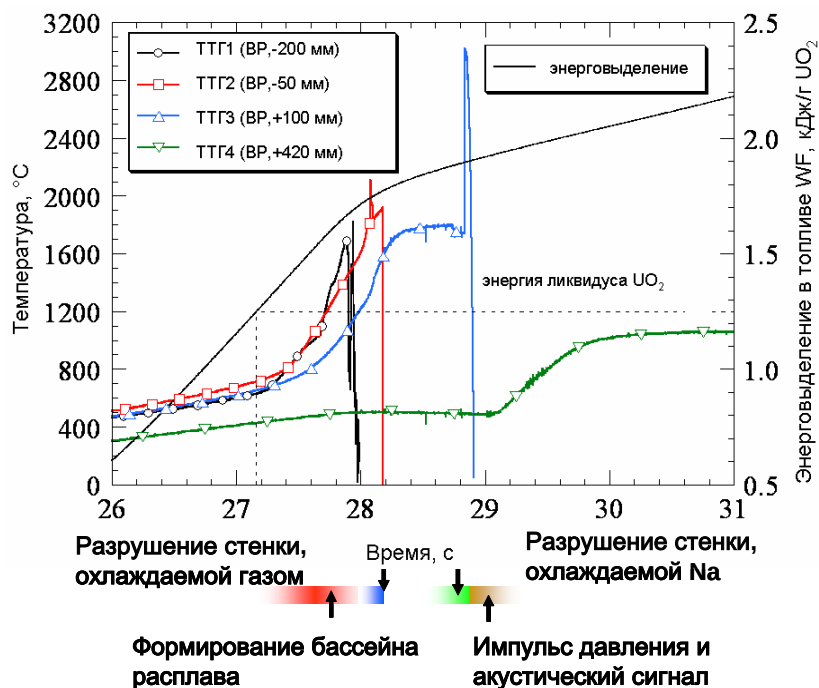


Рисунок 19. Последовательность основных событий в эксперименте WF.

1.2.3 Эксперименты FD, ID1/29, 30, 31].

Условия эксперимента

В соответствии с выбранным экспериментальным подходом, устройства FD и ID были практически идентичными по конструкции, однако имели то существенное различие, что одно из устройств не имело натрия (FD), а в другом (ID) натрий заполнял внутреннюю трубу и нижнюю ловушку. Кроме этого, нижние ловушки экспериментальных устройств были сделаны из разных материалов — из графита в FD и из стали в ID (рисунок 21). К числу общих для обоих устройств конструктивных элементов относятся внутренние трубы с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенки 2 мм, которые устанавливались вертикально в центре ТВС и были концентрически окружены 75-ю твэлами. ТВС были сформированы из твэлов с длиной топливного столба, равной 450 мм, масса топлива в которых составляла около 7.9 кг И в том и в другом эксперименте для получения расплава топлива использовались таблетки типа БН-350 из диоксида урана UO_2 с обогащением 17%.

Верхняя часть внутренней трубы соединялась с расширительной емкостью с помощью короткого канала с внутренним диаметром, равным 6 мм. Экспериментальные секции снабжались двойными защитными силовыми корпусами и затем устанавливались в центральный экспериментальный канал реактора ИГР. Перед экспериментом производился предварительный разогрев экспериментальных устройств до температуры 300–400°C, и затем производился пуск реактора ИГР. Топливо ТВС расплавлялось за счет внутреннего энерговыделения, обуслов-

ленного действием на топливо нейтронного импульса ИГР, при этом температура топлива достигала значения около 3000°C.

Процедура выбора параметров работы реактора ИГР при проведении этих экспериментов заслуживает особого внимания, так как за время проведения эксперимента как в реакторе ИГР, так и в экспериментальных устройствах происходят значительные изменения как пространственной конфигурации элементов, так и физических свойств материалов, что, в первую очередь, их значительным разогревом. Тщательная предварительная проработка вопроса определения параметров диаграмм изменения мощности экспериментальных устройств и параметров настройки системы управления мощностью реактора опиралась не только на анализ накопленного опыта проведения экспериментов на реакторе ИГР, но и на расчетно-экспериментальное обоснование. В частности, для прямых измерений нейтронно-физических параметров экспериментальных устройств были изготовлены их физические макеты, которые позволили определить объемное распределение энерговыделения в ТВС и измерить коэффициенты связи между мощностью реактора ИГР и мощностью энерговыделения в ТВС экспериментальных устройств FD и ID. В результате была не только решена задача реализации заданного энерговыделения в экспериментальных устройствах, но и обеспечено совпадение интегральных значений энерговыделения, что является одним из важных условий для прямого сравнения результатов испытаний устройств FD и ID (рисунок 22).

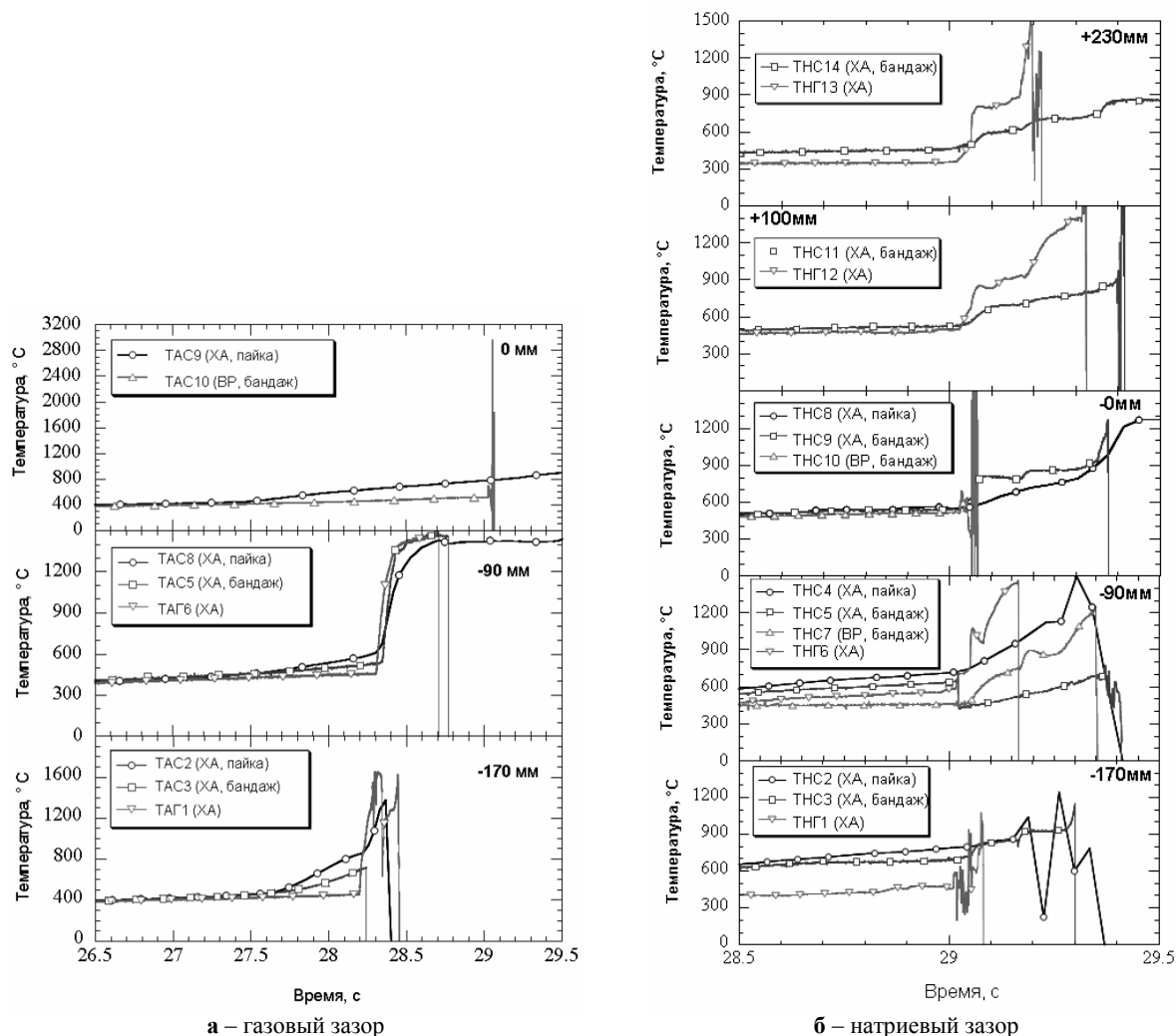


Рисунок 20. Изменение температуры стенки (эксперимент WF)

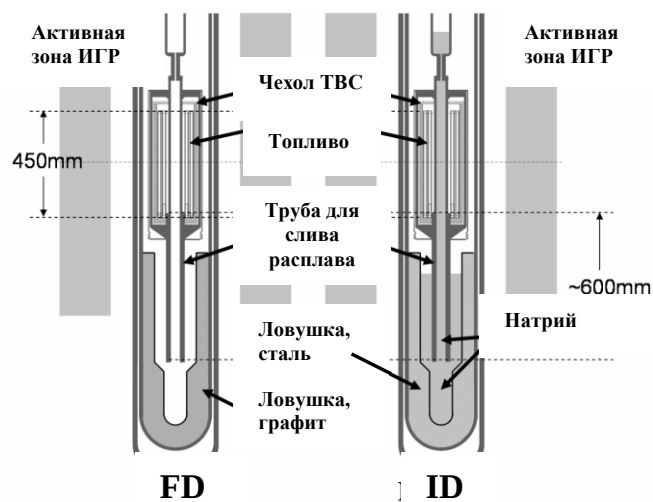


Рисунок 21. Экспериментальные устройства FD/ID

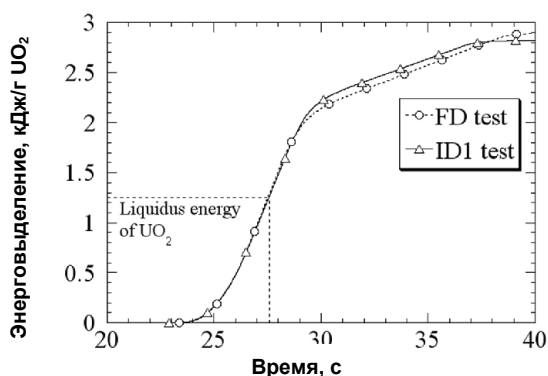


Рисунок 22. Энергосвечение в экспериментальных устройствах FD и ID1

Результаты эксперимента FD

Очевидно, что сразу же после образования бассейна расплава топлива в полости чехла ТВС, в момент времени ~ 27.8 с (рисунок 23) начала увеличиваться температура внутренней трубы. Это время приблизительно совпадает с временем, когда интегральное внутреннее энергосвечение в топливе достигает значения, соответствующего точке ликвидуса для UO_2 (рисунок 23). Исходя из экспериментально измеренной скорости роста температуры в точках TD6 и TD7 (на внутренней стороне трубы) в промежутке времени 27.8–28.5 с тепловой поток от расплава к стенке трубы достигал значения около 10 МВт/м^2 . После увеличения температуры, она достигла значения выше точки плавления нержавеющей стали ($\sim 1400^\circ\text{C}$) и, предположительно, в этот момент произошло разрушение стенки. Исходя из этого, было определено, что разрушение стенки про-

изошло в момент времени 28.5 с, то есть спустя всего ~ 0.7 с после начала интенсивной передачи тепла от расплава к стенке.

На рисунке 24 показано изменение температуры по показаниям термопар, размещенных внутри нижней части трубы на различной высоте и зависимость предполагаемого положения переднего фронта расплава от времени. Резкое повышение температуры выше 1400°C позволяет предположить, что в это время происходил контакт расплава с горячими спаями термопар, которые размещались внутри трубы (в 5 мм от стенки трубы). Эти данные позволяют оценить среднюю скорость расплава в трубе (около 3.5 м/с) и ускорение ($14\sim 18 \text{ м/с}^2$), что превышает гравитационное ускорение свободного падения. В момент разрушения стенки трубы имелась разница давления в полости чехла ТВС и в полости ловушки и это различие составляло 0.025 МПа . Этого относительно небольшого перепада давления оказалось достаточно для дополнительно, в сравнении с гравитационным, ускорения расплава.

Положение топлива после эксперимента было определено с помощью рентгеновского просвечивания всего экспериментального устройства, и хотя значительные слои металла затрудняют интерпретацию результатов рентгенографии, было сделано заключение о том, что практически все топливо было слито в ловушку расплава, за исключением небольшого количества топлива, которое затвердело на днище чехла ТВС. Впоследствии эти выводы были подтверждены в процессе детальных разрушающих материаловедческих исследований).

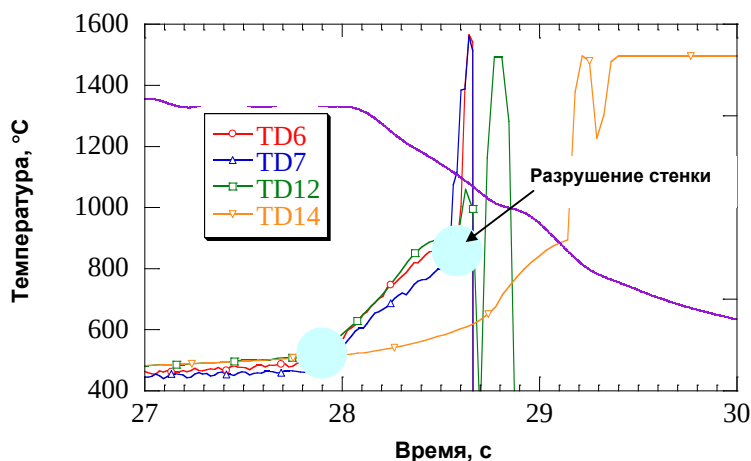
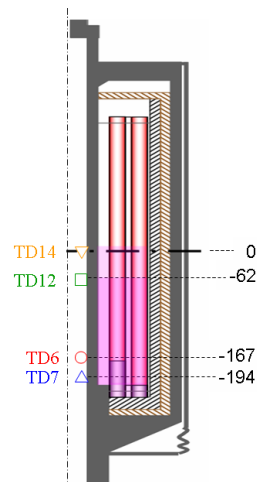


Рисунок 23. К определению времени разрушения стенки трубы



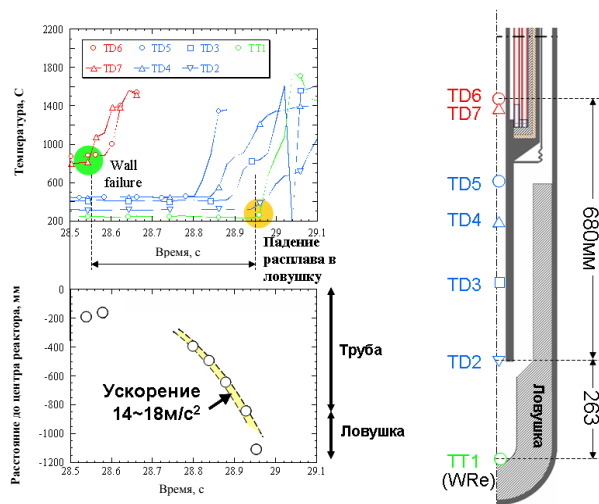


Рисунок 24. Интерпретация показаний термопар в эксперименте FD

Результаты эксперимента ID1

Обработка результатов эксперимента ID1 выполнена в подходе, проверенном и отработанном в процессе анализа результатов эксперимента FD, за исключением процедур, которые относились к интерпретации результатов измерения параметров жидкого натрия. По показаниям термопар были определены моменты времени, которые соответствовали началу формирования бассейна расплава, разрушению трубы и началу перемещения по трубе фрагментов топлива. Датчики пустот, которые предназначены для детектирования процессов кипения натрия, показали, что первая порция движущегося по трубе горячего материала представляла собой двухфазную смесь натрия и его паров, и движение этой смеси предшествовало перемещению горячего топлива. Стремительное расширение области двухфазного натрия произошло сразу же после разрушения внутренней трубы.

Было определено, что перепад давления между полостью чехла ТВС и полостью ловушки расплава непосредственно перед разрушением трубы составлял 0.03 МПа, то есть был почти таким же, как в эксперименте FD. Этот перепад увеличился до 0.06 МПа в течение ~180 мс и далее вырос до максимального зафиксированного ~0.12 МПа еще в течение 1 с. Первое увеличение давления произошло одновременно с упомянутым выше расширением области двухфазного натрия в трубе. Совершенно очевидно, что определенное количество натрия попало в бассейн расплавленного топлива сразу после разрушения трубы в результате взаимодействия топлива с натрием (FCI), после чего натрий быстро испарился, при этом давление в полости чехла ТВС увеличилось. Видимо, именно это повышение давления ускорило движение расплава через трубу. Рассчитанная по времени разрушения термопар средняя скорость движения топлива составляет ~31 м/с. Анализ параметров движения топлива по внутренней трубе продолжается, при этом анализ опирается как

на результаты измерений температуры, так и на результаты измерений распределения потока нейтронов вдоль трубы.

1.2.4 Теплопередача от расплавленного топлива к стальной стенке трубы

Одним из важных результатов экспериментов WF, FD и ID1 является величина теплового потока от расплавленного топлива к стенке стальной трубы, которая составляет 10~20 МВт/м². Одной из причин того, что в экспериментах FD и ID1 величина обсуждаемого теплового потока была меньше, чем в эксперименте WF, может быть различие в распределении энерговыделения в объеме бассейна расплава. В случае WF- геометрии, стальная стенка контактирует с внешней областью бассейна расплава, в которой локальное значение потока тепловых нейтронов является максимальным (вследствие внутреннего блок-эффекта). В то же время, в геометрии FD и ID1, стенка трубы контактирует с внутренней областью бассейна расплава, где по той же причине значение потока тепловых нейтронов должно быть минимальным.

Такой высоки тепловой поток, превышающий 10 МВт/м², ранее наблюдался при проведении экспериментов в рамках программы SCARABEE. В эксперименте BE+3 (моделирование полной мгновенной блокады проходного сечения ТВС из 37 твэлов), проплавление стальной чехловой трубы произошло через 21.5с после блокировки, при этом был измерен тепловой поток в области проплавления чехловой трубы. Примечательным является то, что стенка чехловой трубы охлаждалась достаточно интенсивно натрием, при этом была исключена возможность его кипения. Было зафиксировано, тепловой поток от стенки к натрию непосредственно перед разрушением стенки составлял 11 МВт/м², причем проплавление стенки произошло, спустя 6.5 с после предполагаемого начала кипения стали в бассейне расплава. В эксперименте PVA (иссле-

дование проплавления стенки расплавом $\text{UO}_2\text{-SS}$), проплавление стальной стенки между бассейном расплава и соседней ТВС произошло при максимальной мощности энерговыделения и после снижения расхода натрия через ТВС. Несмотря на трудности прямого определения величины теплового потока, был применен метод теплового баланса для стенки и натрия, и было определено, что тепловой поток составлял $8\sim 13 \text{ МВт/м}^2$. Следует отметить, что при таком высоком тепловом потоке на стенке, возможно, не может образовываться устойчивая корка затвердевшего расплава. Расчетный анализ, который был выполнен с использованием расчетного кода AFDM применительно к результатам эксперимента BF3 (эксперимент с устойчивым кипящим бассейном смеси диоксида урана и нержавеющей стали $\text{UO}_2\text{-SS}$), показал, что именно присутствие кипящей стали в двойном расплаве может являться причиной увеличения теплового потока до $\sim 15 \text{ МВт/м}^2$ в реальном эксперименте.

Таким образом, высокие тепловые потоки от расплава к стальным стенкам, который наблюдались в экспериментах EAGLE-1 и SCARABEE, имеют одну и ту же природу и совпадают по величине.

2. ВНЕРЕАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения вне реакторных исследований на территории Института Атомной энергии был создан экспериментальный стенд с вне реакторной установкой, получивший одноименное с проектом EAGLE название. Открытие первой очереди этого стенда состоялось в мае 2000 года. С момента сдачи в эксплуатацию стенда EAGLE было проведено в общей сложности 30 вне реакторных экспериментов.

Основной целью вне реакторных исследований по проекту EAGLE являлось экспериментальное подтверждение возможности перемещения расплава по стальной сливной трубе имитирующей трубную секцию входящую в состав конструкции ТВС) и определение параметров процессов, связанных с перемещения расплава по трубной секции (времени проплавления стенки сливной трубы; скорости перемещения расплава по сливной трубе; степень перекрытия сечения сливной трубы расплавом и условий взаимодействия расплава с натрием в сливной трубе). Вне реакторных эксперименты проводились как с заполнением внутренней полости установки EAGLE натрием (теплоносителем применяемым в реакторах на быстрых нейтронах) так и без использования натрия.

На рисунке 25 показана экспериментальная установка для проведения испытаний и ее конструктивная схема

Экспериментальная установка EAGLE включала в себя электроплавильную индукционную печь (ЭПП), предназначенного для получения расплава кориума и экспериментального устройства, в котором размещались исследуемая сливная труба и ловушка расплава (нижняя ловушка). ЭПП позволяет получить до 26 кг расплава, содержащего диоксид урана, окись циркония и нержавеющую сталь или до 15 кг окиси алюминия. При проведении экспериментов жидкий натрий находился в сливной трубе и/или в нижней ловушке. Заполнение установки EAGLE натрием осуществлялось от специальной транспортной емкости. При проведении экспериментов на установке EAGLE без использования натрия буферная и расширительная емкости отсоединялись.

В процессе эксперимента полученный в электроплавильной печи (ЭПП) расплав сливался в верхнюю ловушку расплава, имитирующую внутреннюю полость ТВС активной зоны реактора, проплавлял тонкостенный участок сливной трубы (с толщиной стенки 2 мм) и по толстостенному участку сливной трубы перемещался в нижнюю ловушку расплава, моделирующую нижний пленум реактора.

На первом этапе исследований проводились эксперименты без использования натрия, в которых расплав, содержащий диоксид урана (а в последних экспериментах этого этапа – окись алюминия), проплавлял пустую сливную трубу и сливался по ней в «сухую» ловушку. В общей сложности было выполнено около 20 экспериментов без натрия. В ходе этих экспериментов была отработана методика исследований, методы и средства измерения параметров эксперимента (некоторые из этих средств и методик измерения были использованы и для реакторных исследований). В результате этой серии экспериментов была позволила отработана технология получения расплава с различной композицией материалов и показана принципиальная возможность направленного перемещения кориума по сухой сливной трубе. Типичный вид сливной трубы после эксперимента и ее поперечные разрезы показаны на рисунке. На рисунке 26 видно, что существенного сужения проходного сечения сливной трубы за счет налипания расплава на ее стенки не происходит (заметное уменьшение проходного сечения трубы наблюдается только на ее входном участке, где расплав проплавляет сливную трубу). Этот результат наглядно иллюстрирует возможность удаления расплава из активной зоны реактора по трубной секции ТВС.

В результате экспериментов первого этапа были определены значения параметров, характеризующих процесс перемещения расплава в установке, которые приведены в таблице 1

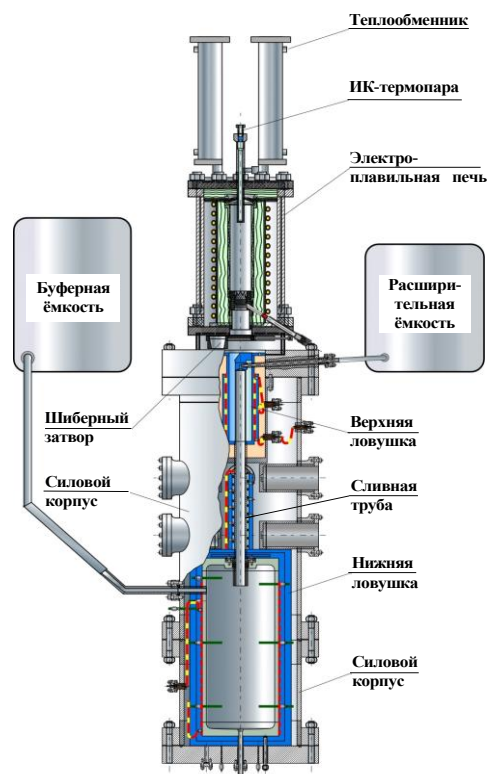


Рисунок 25. Экспериментальная установка EAGLE и ее конструктивная схема

При проведении экспериментов было установлено, что во время плавки шихты с диоксидом урана в графитовом тигле, высокотемпературный расплав, взаимодействует с материалом плавильного тигля ЭПП(графитом). В результате этого в расплаве образуются карбиды урана, которые по своим теплофизическим свойствам существенно отличаются от свойств расплава диоксида урана [32]. Поэтому в качестве имитатора оксидного корнума при испытаниях с натрием использовался расплав окиси алюминия, который по ряду теплофизических свойств близок к реальному расплаву топлива активной зоны реактора, но имеет более низкую температуру плавления ($\sim 2000^{\circ}\text{C}$), чем диоксид урана.[33]. Низкая температура плавления снижает вероятность взаимодействия расплава с материалом тигля и, как следствие, образование карбидов.



Рисунок 26. Общий вид сливной трубы и ее поперечные разрезы

Таблица 1. Параметров, характеризующих процесс перемещения расплава установке без натрия

Состав расплава	UO ₂	Al ₂ O ₃
Температура расплава, °C	~3200	~2200
Толщина проплавляемой стенки сливной трубы, мм	2-3	2
Масса расплава, слившаяся в верхнюю ловушку, кг	20,2	10,7
Масса расплава, слившаяся в нижнюю ловушку, кг	9,2	10,2
Продолжительность слива расплава в верхнюю ловушку, с	0,5÷0,6	0,35÷0,5
Длительность проплавления стенки сливной трубы, с	1,0÷1,2	2,6
Продолжительность движения расплава по сливной трубе, с	0,6÷1,0	0,46÷0,77
Средняя скорость перемещения расплава в сливной трубе, м/с	2,3	6,5

Основной целью вне реакторных экспериментов с использованием натрия (второго этапа экспериментов) являлось получение информации о принципиальной возможности перемещения расплава по сливной трубе, заполненной жидким натрием, т.е. в условиях взаимодействия расплава с теплоносителем. В ходе этих экспериментов модель трубной секции (сливная труба), установленная в верхнюю ловушку установки EAGLE (имитатор корпуса ТВС), заполнялась жидким натрием либо в полном объеме, либо частично. По трубной секции расплав сливался в нижнюю ловушку, также заполненную жидким натрием. При этом исследовались как процессы перемещения расплавленного топлива по сливной трубе заполненной натрием, так и взаимодействие имитатора расплава топлива с натрием. Всего было проведено десять экспериментов с использованием натрия.

В ходе этих экспериментов расплав окиси алюминия (имитатор кориума) с температурой $\sim 2100-2200^{\circ}\text{C}$ из электроплавильной печи сливался в верхнюю ловушку расплава, а затем, после проплавления стенки сливной трубы, расплав перемещался по сливной трубе в нижнюю ловушку расплава, заполненную натрием. Общее количество натрия в ловушке было равно $\sim 100\text{кг}$. В задачи проводимых экспериментов входило определение времени проплавления стенки верхнего (расплавляемого) участка сливной трубы, времени перемещения расплава по сливной трубе в нижнюю ловушку, заполненную натрием; количества расплава, переместившаяся по трубе в нижнюю ловушку расплава и влияния натрия на диспергирование и химический состав расплава. В качестве материала расплавляемого участка сливной трубы использовалась нержавеющая сталь или алюминий. Для улавливания мелкодисперсных фракций расплава

окиси алюминия и извлечения их после эксперимента из нижней ловушки в неё был установлен фильтр-ловушка, состоящий из корпуса и трех металлических сеток с различными размерами ячеек.

Первые эксперименты показали, что по сравнению с ранее проведенными экспериментами (без натрия в сливной трубе) продолжительность проплавления стенки сливной трубы существенно увеличилось за счет интенсивного отвода тепла от расплава в жидкий натрий. Большая потеря энергии расплавом в период проплавления стенки трубы приводила к снижению количества расплава поступающего в нижнюю ловушку, что нарушало адекватность моделирования процесса взаимодействия расплава с натрием. Поэтому для уменьшения времени проплавления стенки верхнего участка сливной трубы и, как следствие, уменьшения потерь тепловой энергии в расплаве, в последующих экспериментах использовался расплавляемый участок сливной трубы, изготовленный из алюминия. [34].

В таблице 2 приведены экспериментальные значения параметров, характеризующих процесс перемещения расплава в установке, заполненной жидким натрием (с температурой $\sim 400^{\circ}\text{C}$).

В экспериментах с участком сливной трубы из алюминия удалось реализовать время проплавления сливной трубы такое же, как в экспериментах с «сухой» сливной трубой. Это в свою очередь, способствовало существенному увеличению количества расплава, переместившегося по сливной трубе в нижнюю ловушку.

На рисунках 27и 28 показано состояние внутренней поверхности сливной трубы и вид фрагментов расплава после его взаимодействия с натрием.

Таблица 2. Параметров, характеризующих процесс перемещения расплава установке с натрием

Материал расплавляемого участка сливной трубы	Нержавеющая сталь	Алюминий
Масса расплава, слившаяся в верхнюю ловушку, кг	$\sim 8,2$	11,5
Масса расплава, слившаяся в нижнюю ловушку, кг	$\sim 2,26$	~ 7
Средняя скорость перемещения расплава по трубе, м/с	1,52	2
Продолжительность проплавления сливной трубы, с	4,8	2,5
Продолжительность перемещения расплава по трубе, с	0,7- 0,9	0,5



а – вид сверху



б – вид снизу



в – продольный разрез трубы

Рисунок 27. Состояние внутренней поверхности сливной трубы

Состояние внутренней поверхности трубы свидетельствует о том, что перекрытия трубы фрагментами расплава не происходит и расплав может беспрепятственно перемещается по трубе заполненной натрием. После взаимодействия с натрием расплав может находиться как в виде мелкодисперсной фракции, с размерами частиц до 5мм, так и в виде отдельных слитков (рисунка 18). Основной составляющей расплава после взаимодействия с натрием является окись алюминия, т.е. химического взаимодействия расплава с натрием не происходило [27]. Проведенная серия экспериментов с натрием подтвердила принципиальную возможность перемещения расплава имитатора расплавленного топлива по трубе заполненной натрием, а значить и возможность ре-

ализации концепции управляемого перемещения расплава в разрабатываемых конструкциях ТВС.

В описанных выше экспериментах моделировалось расплава перемещение из активной зоны вниз (в нижний пленум реактора). Однако существуют и другие возможные пути для управляемого отвода расплавленного кориума из активной зоны. Один из таких путей - это отвод расплава через направляющие трубы регулирующих стержней СУЗ в верхний пленум реактора. Для изучения возможности перемещение расплава вверх по заполненной жидким натрием трубе была модернизирована. Конструктивная схема модернизированной установки EAGLE показана на рисунке 29.

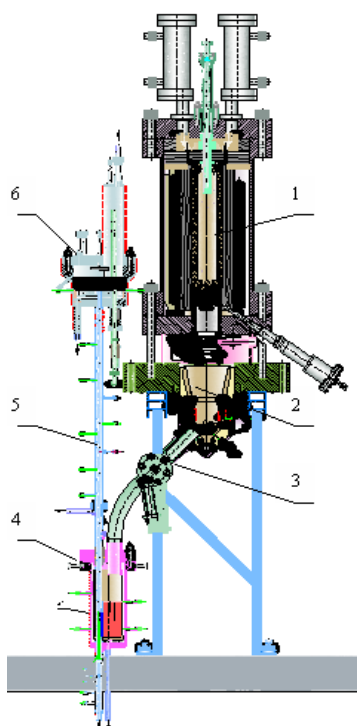


Фрагменты расплава (после отмывки их от натрия)



Слиток расплава

Рисунок 28. Фрагменты расплава окиси алюминия после взаимодействия с жидким натрием



1-Электроплавильная печь; 2-Верхняя ловушка расплава;
3- Труба слива расплава; 4- Емкость приема расплава;
5- Трубопровод –имитатор направляющей
рубы регулирующего стержня ; 6- Ловушка расплава;

Рисунок 29. Конструктивная схема модернизированной установки EAGLE

Основной задачей экспериментов, проводимых на модернизированной установке, являлось определение возможности перемещения расплава вверх по заполненной натрием трубе, имитирующей направляющую трубу регулирующего стержня. В этих экспериментах полученный в электроплавильной печи расплав окиси алюминия (с температурой 2100°C) сливается в верхнюю ловушку расплава, затем по трубопроводу с внутренним диаметром 60 мм расплав перемещается в емкость приема расплава, в которой установлена труба-имитатор. В емкости приема расплава происходит проплавление стенки трубы-имитатора, расплав попадает внутрь трубы и за счет взаимодействия с натрием перемещается вверх в ловушку расплава, моделирующую верхний пленум реактора. Проведен первый эксперимент новой серии. В результате этого эксперимента труба-имитатор была успешно проплавлена и 0,13 кг расплава переместилась вверх по трубе и достигла ловушки расплава.

На рисунках 30и 31 показана крышка ловушки расплава с налипшим на нее расплавом и фрагменты расплава, извлеченные из ловушки расплава. Проведенный эксперимент показал принципиальную возможность перемещения вверх расплавленного топлива взаимодействующего с натрием.

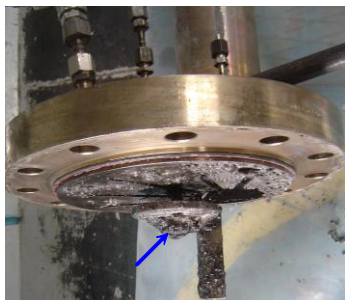


Рисунок 30. Крышка ловушки расплава
с фрагментом расплава на защитном экране



Рисунок 31. Фрагменты расплава,
извлеченные из ловушки расплава

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования проблем обеспечения безопасности ядерных установок при тяжелых авариях является одним из важных направлений исследовательской деятельности, которое давно и успешно реализуется ИАЭ НЯЦ РК

В рамках этой деятельности для комплексного моделирования процессов тяжелой аварии была создана крупномасштабная установка для экспериментального исследования процессов взаимодействия расплава кориума с водяным теплоносителем, материалом корпуса и бетоном. В установке реализована возможность приготовления до 60 кг расплава прототипного кориума с последующим его сливом в секцию, содержащую водный бассейн, инструментированные модели днища силового корпуса или бетонной шахты, и индукционным нагревом. Для отработки методических вопросов в обеспечение создания крупномасштабной установки и трактовки результатов проводимых на нем экспериментов, был создан маломасштабный стенд. С его применением были исследованы особенности разогрева и плавления кориума, проверена возможность применения графита в качестве материала горячего тигля, получены образцы кориума и определены его состав и свойства для последующего использования при пост тест анализах крупномасштабных экспериментов. Полученные количественные результаты крупно-

масштабных экспериментов и материаловедческого исследования продуктов взаимодействия кориума с водяным теплоносителем, материалом корпуса и бетоном были использованы при разработке моделей процессов взаимодействия и верификации соответствующих расчетных кодов

Для исследования путей решения проблемы «повторной критичности» были разработаны и изготовлены экспериментальные реакторные устройства, отработаны методики проведения реакторных экспериментов, создана вне реакторная экспериментальная установка, позволяющая проводить эксперименты с использованием жидкого натрия. Результаты проведенных реакторных и вне реакторных экспериментальных исследований подтвердили возможность управляемого вывода расплавленного топлива из активной зоны реактора (для исключения возникновения «повторной критичности») по трубной конструкции установленной в тепловыделяющей сборке реактора.

Уникальные экспериментальные установки ИАЭ НЯЦ РК позволили реализовать настолько же уникальные эксперименты и получить уникальные результаты, которые востребованы специалистами всего мира. Разработанные методики, экспериментальные установки и полученные результаты являются также основой для продолжения крупномасштабных исследований процессов, сценариев и способов предотвращения аварий реакторов различных типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nagasaka, H. COTELS Project (1): Overview of Project to study FCI and MCCI during a Severe Accident, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475 / H. Nagasaka, M. Kato, I. Sakaki, Yu. Cherepnin, Yu. Vasilyev, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov and V. Zuev. - Karlsruhe, Germany, 2000. - P. 285-292.
2. Nagasaka, H. COTELS Project (2): Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475 / H. Nagasaka, M. Kato, Yu. Vasilyev, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov. - Karlsruhe, Germany, 2000. - P. 293-300.
3. Nagasaka, H. COTELS Project (3): Ex-vessel Debris Cooling Tests, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475 / H. Nagasaka, M. Kato, I. Sakaki, Yu. Vasilyev, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov. - Karlsruhe, Germany, 2000. - P. 302-308.
4. Nagasaka, H. COTELS Project (4): Structural Investigation of Solidified Debris in MCCI, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475 / H. Nagasaka, I. Sakaki, Yu. Vasilyev, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov. - Karlsruhe, Germany, 2000. - P. 309-316.
5. Maruyama, Yu. Results of LHI tests and associated analyses on in-vessel debris coolability, NTHAS3 / Yu. Maruyama, M. Kato, H. Nagasaka, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov, Yu. Vassiliev; Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Kyeongju. - Korea, October 13 - 16, 2002.

6. Maruyama, Yu. Recent results of MCCI studies in COTELS project, NTHAS3 / Yu. Maruyama, M. Tahara, H. Nagasaka, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov, Yu. Vassiliev; Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Kyeongju. - Korea, October 13 - 16, 2002.
7. Maruyama, Yu. A study on concrete degradation during molten core/concrete interactions / Yu. Maruyama, Y. Kojima, M. Tahara, H. Nagasaka, M. Kato, A. Kolodeshnikov, V. Zhdanov, Yu. Vassiliev // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – 236. - P. 2237-2244.
8. Бакланов, В.В. Экспериментальное изучение способов ограничения взаимодействия компонентов корриума с углеродом / В.В. Бакланов, В.С. Жданов, Е.В. Малышева // Вестник НЯЦ РК. - март 2004. - Вып. 1. - С. 75-85.
9. Zhdanov, V. Facility for LWR Core Materials Studies at High Temperature / V. Zhdanov, V. Baklanov; Proceedings of ICAPP '05 congress. - Seoul, KOREA, May 15-19, 2005. P. 5242.
10. Hofmann, P. Reactor core materials interactions at high temperature / P. Hofmann, S.J.L. Hagen, G. Schanz, A. Skokan // Nuclear technology. - Aug. 1989. - Vol. 87. - P. 146-186.
11. Hagen, S. Physical and Chemical Behaviour of LWR Fuel Elements up to Very High Temperatures / S. Hagen, P. Hofmann. - Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1980. - KfK-4104.
12. Leistikow, S. Oxidation Kinetics and Related Phenomena of Zircaloy-4 Fuel Cladding Exposed to High Temperature Steam and Steam-Hydrogen Mixtures Under PWR Accident Conditions / S. Leistikow, G. Schanz // Nuclear Engineering and Design. - 1987. - 103, 65.
13. Hagen, S. Dry Core BWR Test CORA-33: Test Results / S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, G. Schanz, G. Schumacher, L. Sepold. - Kernforschungszentrum Karlsruhe, Dezember 1994. - Kf K 5261.
14. Kim, K. Dissolution of UO₂ by Molten Zircaloy / K. T. Kim and D. R. Olander // J. Nucl. Mater. - 1988. – 154. - P. 85-101.
15. Olander, D. R. The UO₂/Zircaloy Chemical Interactions/ D. R. Olander // J. Nucl. Mater. – 1983. – 115. - P. 271-285.
16. SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual // NUREG/CR-6150, Volume IV: MATPRO. A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis. - Idaho Falls, November 1993.
17. Безлепкин, В.В. Разработка проблемно-ориентированных подходов к обеспечению безопасности новых проектов АЭС с ВВЭР : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Санкт-Петербург, 2003. - 381 с.
18. Cognet, C. In-Vessel Core Melt Retention by RPV External Cooling for High Power PWR. MAAP4 Analysis on a LBLOCA Scenario without SI. / C. Cognet, P. Gandrille // In-Vessel Core Debris Retention And Coolability Workshop Proceedings 3-6 March 1998. - Garching near Munich, Germany.
19. Farmer, M. T. Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments / M. T. Farmer, [et al.] // Proc. the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany, November 15-18, 1999, FZKA 6475. – May 2000. - P. 317-331.
20. Колодешников, А.А. Исследования последствий тяжелых аварий водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов по проекту COTELS / А.А. Колодешников, О.С. Пивоваров, Ю.С. Васильев, В.С. Жданов, В.А. Зуев, В.И. Игнашев, А.В. Микиша // Вестник НЯЦ РК. - март 2002. - Вып. 1. - С. 5-17.
21. Nagasaka, H. Scenarios of Ex-vessel Debris Cooling as Related to Nuclear Power Safety / H. Nagasaka, R. Hamazaki and Y. Takahashi // Proc. Probabilistic Safety Assessment Methodology and Applications, Seoul Korea. - 1995. – P. 26-30.
22. Бешта, С.В. Высокотемпературные процессы с расплавами корриума в проблеме безопасности АЭС с ВВЭР : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. - Санкт-Петербург, 2004. - 38 с.
23. Asmolov, V. Challenges Left in the Area of In-Vessel Melt Retention / V. Asmolov, N.N. Ponomarev-Stepnoy, V. Strizhov, B.R. Sehgal // Nuclear Engineering and Design. – 2001. - Vol. 209. - P. 87-96.
24. The EAGLE-Project to Eliminate the Recriticality Issue of Fast Reactors, Progress and Results of In-Pile Tests. / Kensuke Konishi^{1*}, Shigenobu Kubo², Ikken Sato¹, Kazuya Koyama³, Jun-ichi Toyooka¹, Kenji Kamiyama¹, Shoji Kotake², Alexander D. Vurim⁴, Valery A. Gaidaichuk⁴, Alexander V. Pakhnits⁴ and Yuri S. Vassiliev⁴ // Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety. - Jeju, Korea, November 26-29, 2006. - NTHAS5-F001.
25. The Result of a Wall Failure in-Pile Experiment under the EAGLE Project./ Kensuke Konishi., Jun-Ichi Toyooka, Kenji Kamiyama, [et al.]; Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Japan Atomic Power Company (JAPC), с Advanced Reactor Technology Co. Ltd. (ARTECH); National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan (NNC/RK); Nuclear Engineering and Design. - Vol. 237(22). - 2007, November. - 2165-2174.
26. Исследования в обоснование безопасности энергетических реакторов на быстрых нейтронах. Эксперимент GR. Подготовка, проведение и результаты : отчет о НИР / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Ю.В. Алейников, А.Д. Вурим, В.А. Гайдайчук [и др.]. - Курчатов, 2002. - Инв. №240-02/295.
27. Исследования в обоснование безопасности энергетических реакторов на быстрых нейтронах. Эксперимент WF. Анализ результатов методических и физических исследований : отчет о НИР / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Ю.В. Алейников, А.Д. Вурим, В.А. Витюк [и др.]. – Курчатов, 2004. - Инв. №240-02/129.
28. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны. Анализ результатов эксперимента WF : отчет о НИР / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Ю.В. Алейников, А.Д. Вурим, В.А. Витюк [и др.]. - Курчатов, 2006. - Инв. №1982.
29. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны. Анализ результатов эксперимента FD : отчет о НИР / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Ю.В. Алейников, А.Д. Вурим, В.А. Витюк [и др.]. - Курчатов, 2006. - Инв. №2001.
30. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны. Анализ результатов эксперимента ID-1 : отчет о НИР / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Ю.В. Алейников, В.А. Витюк, А.С. Гунько [и др.]. – Курчатов, 2006. - Инв. №1999.

31. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны. Анализ результатов эксперимента ID-2 : отчет о НИР / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Ю.В. Алейников, В.А. Витюк, А.С. Гунько [и др.]. – Курчатов, 2007. - Инв. №45.
32. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны : отчет о НИР (промежуточный) / Институт Атомной энергии ДГП НЯЦ РК ; рук. А. Д. Вурим, А. А. Колодешников. - 2007. – 93 с. - № ГР 0207РК00911. – Инв. № 38, 2008.
33. Чиркин, В.С. Тепло-физические свойства материалов ядерной техники : справочник. – Москва: Атомиздат, 1968.
34. Экспериментальные исследования устройств и параметров управляемого перемещения кориума из активной зоны реактора : отчет о НИР (промежуточный)/ Институт Атомной энергии ДГП НЯЦ РК ; рук. А. Д. Вурим, А. А. Колодешников. - 2008. – 133с. - № ГР 028РК00948. – Инв. № 116, 2008.
35. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны : отчет о НИР (заключительный) / Институт Атомной энергии ДГП НЯЦ РК ; рук. А. А. Колодешников, А. Д. Вурим. - 2009. – 77с. - № ГР 0105РК00016. – Инв. № 0209РК00987.

АЭИ ЖҮРГІЗІЛГЕН ЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРЛАРДЫҢ АУЫР АПАТТАРЫНА АРНАЛҒАН ҚАТЫСТЫ ҮРДІСТЕРДІ ҮЛГІЛЕУ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕРІ

Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Жданов В.С., Зуев В.А., Кешжин Е.А., Колодешников А.А.

ҚР ҰАО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

АЭИ реакторлық қондырғылары мен реактордан тыс стендтерінде жүргізілген белсенді аймақтың балкуымен энергетикалық жеңіл енуші және жылдам реакторларымен қатар жүретін ауыр апаттарды, үрдістерді зерттеу бойынша жұмыстарға шолулар ұсыналады. Жеңіл енуші реактордың үлгіленуші кориум балқымасының жылу тасымалдағышпен, реактор түбі материалымен, материал және құрылыс материалымен (бетонмен) әсерін зерттеу нәтижесі; жылдам реакторлардың апаттары кезінде қайталану жағдайының пайда болуын болдырмауға арналған құрылғылар мен әдістердің жұмысқа жарамдылығын зерттеудің нәтижелері көрсетті.

EXPERIMENTAL STUDIES CARRIED OUT IN IAE ON SIMULATION OF PROCESS TYPICAL FOR REACTOR SEVERE ACCIDENTS

Yu.S. Vasiliev, A.D. Vurim, V.S. Zhdanov, V.A. Zuyev, Ye.A. Kenzhin, A.A. Kolodeshnikov

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The report presents review of studies into processes accompanying severe accidents of light-water and fast breeder power reactors with core melting, conducted at in-pile and out-of-pile test-benches of IAE. Research results on interaction between the melt simulating corium of light-water reactor and coolant, reactor vessel bottom material and construction material (concrete) are given; as well as results of study into efficiency of methods and devices to eliminate re-criticality during accident in fast reactors.

УДК 621.039.001.12/.18

РАЗВИТИЕ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ В КАЗАХСТАНЕ**Кадыржанов К.К.***Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов***ВВЕДЕНИЕ**

В сфере фундаментальных исследований в основном происходит увеличение объема знаний, тогда как в прикладной науке эти знания преимущественно используются для достижения практических целей, а также выявляются новые сферы применения результатов фундаментальных и прикладных исследований. В сфере разработок на основе достижений фундаментальных и прикладных исследований, а также практического опыта создаются новые материалы, продукты, процессы, услуги и т.п.

Одним из ярких примеров всестороннего использования совокупности фундаментальных знаний для разработки технологий, материалов является такая область применения, как ядерные технологии. На 52 ежегодной сессии МАГАТЭ отмечалась особая роль применения ядерных технологий в обеспечение устойчивой продовольственной безопасности, в расширении возможностей государств в удовлетворении потребностей, связанных с профилактикой, диагностикой и лечением болезней, в комплексном управлении водными ресурсами и в борьбе с деградацией почв.

В Послании Главы государства народу Казахстана от 28 февраля 2007 года «Новый Казахстан в новом мире» в числе важнейших направлений внутренней и внешней политики отмечена необходимость развития электроэнергетических ресурсов и создания основ атомной энергетики.

Эффективное решение комплекса проблем по созданию и развитию атомной отрасли возможно при ускоренном развитии атомной науки и техники, совершенствовании системы подготовки и повышения квалификации кадров.

Государственная программа развития атомной отрасли в Республике Казахстан, разрабатываемая министерством энергетики и минеральных ресурсов РК, способствует максимальному использованию результатов деятельности отечественных научных организаций, форсированному формированию научно-технологического потенциала ядерно-энергетической отрасли, а также развитию ядерных технологий для использования в различных отраслях экономики.

Реализация Программы развития ядерно-энергетической отрасли в Казахстане позволит решить целый ряд актуальных проблем, таких как создания условий ускоренного индустриального развития страны за счет внедрения наукоемких ядерных технологий, развития смежных отраслей науки и производства, повышения профессионально-кадрового потенциала страны.

1. КРАТКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИРЕ [1-32]

Когда говорят об использовании атомной энергии или о ядерных технологиях, чаще всего имеют в виду атомные электростанции, энергетические реакторы, обогащенный уран и т.д. При этом остается в тени использование в хозяйстве ядерных и радиационных технологий, не связанных с производством энергии.

Между тем, "неэнергетические" ядерные технологии прочно заняли свое место в современной экономике, которую трудно представить без использования пучков заряженных частиц и нейтронов, искусственных радиоактивных изотопов, ампульных радиоактивных источников, радиационной обработки материалов. О масштабах применения этих технологий можно судить, например, по американским данным:

- из 330 млрд. долларов годового вклада всего ядерного сектора в экономику США (5% валового внутреннего продукта), 257 млрд. (почти 45%) составил вклад неэнергетических ядерных технологий, в которых было занято 3% работающего населения.

Такая ситуация обусловлена тем, что часть применяемых ядерных методов просто не имеет замены, а другая часть имеет явные преимущества перед альтернативными методами (дешевле, качественнее, надежнее и т.д.).

Ниже приведены наиболее важные достижения в области развития ядерных технологий для различных отраслей народного хозяйства.

1.1. Ядерные технологии в продовольственной и сельскохозяйственной областях**Улучшение сельскохозяйственных культур**

Индукцированные мутации сельскохозяйственных культур стали методом, выбранным для выведения более высококачественных сортов сельскохозяйственных культур, что позволило официально ввести в сельскохозяйственную практику приблизительно 3000 мутантных сортов (рисунок 1). Мутанты 'первого поколения', в соответствии состоявшими в свое время перед селекцией задачами, решали проблему повышения урожайности посредством достижения более высокой эффективности использования питательных веществ и стойкости к биотическим и абиотическим стрессам.

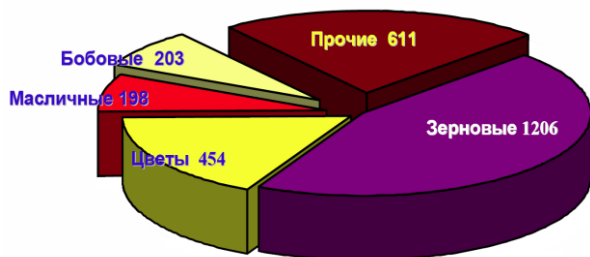


Рисунок 1. Мутантные сорта (2007 год) Источники: База данных ФАО/МАГАТЭ по мутантным сортам

По достижении плато урожайности наиболее важных сельскохозяйственных культур основное внимание в селекционных программах теперь перенесено на введение ценных признаков, обеспечивающих диверсификацию конечного использования, более высокие доходы благодаря повышенной конкурентоспособности и выполнение специфических диетических требований. Для введения этих признаков требуются лишь незначительные изменения наследственных факторов (генов), и эта проблема особенно эффективно решается методами индуцированного мутагенеза.

К недавно выведенным методом индуцированных мутаций сортам сельскохозяйственных культур, обладающим высококачественными признаками, которые удовлетворяют вышеупомянутым специфическим требованиям, относятся два высокопитательных сорта ячменя (пониженное содержание фитиновой кислоты потенциально увеличивает биодоступность железа, цинка и кальция), "Клируотер" и "Хералд". При использовании этих двух сортов, например, в качестве корма фермеры получают значительную экономию, избегая необходимости закупок дорогостоящих кормовых добавок, противодействующих эффектам фитиновой кислоты. Использование этих мутантных сортов также способствует сохранению более чистой окружающей среды, поскольку в значительной мере устраняется загрязнение подземных и поверхностных вод избыточным фосфором, связанным с кормлением сельскохозяйственных животных сортами ячменя с высоким содержанием фитиновой кислоты.

Индуцированные мутации также расширяют потенциальные возможности использования сои, повышая ее питательную ценность. Недавно выведенный в Японии сорт "Сакуеи 4" обладает способностью связывать азот и тем самым по существу становится для себя источником удобрений, устраняя необходимость во внесении других удобрений. Это приносит фермерам значительную экономию. К другим недавно выведенным сортам сои относятся сорт "Юменори", отличающийся высоким содержанием предшественника "хорошего" протеина, глицина, и сорт "Ичихиме", не содержащий липоксигеназы, природного растительного фермента, способствующего возникновению таких заболеваний, как астма и коронарные болезни сердца.

Совершенствование производства биотоплива

Многими странами установлены плановые цифры и графики перехода с бензина на топливо, производимое с использованием возобновляемых ресурсов. Для выполнения этих плановых цифр, многие из которых были установлены на ближайшее будущее, необходимо увеличить производство этилового спирта и дизельного биотоплива. Наряду с другими требуемыми мерами, при производстве этилового спирта необходимо будет перейти с использования крахмала на использование целлюлозы. Генетическое совершенствование сельскохозяйственных культур, являющихся источниками биомассы, позволяет повысить как общий выход биомассы, так и эффективность ее преобразования. Эффективным способом достижения этих целей является осуществление программы по селекции растений с использованием метода индуцирования мутаций, причем выбор базируется на индивидуальных генах, а не на больших участках хромосом, содержащих конкретный признак. Недавно с помощью высокопродуктивного метода генетического скрининга была проведена оценка состава стенок клеток кукурузы, что позволило отобрать мутантные сорта, которые могут теперь быть оценены с точки зрения эффективности преобразования биомассы. Мутантные гены могут быть включены в селекционную программу, или же генная последовательность может быть использована для определения естественных разновидностей, представляющих интерес.

Повышение продуктивности и борьба с болезнями в животноводстве

Применения ядерных технологий, которые были разработаны с целью выполнения специфических и уникальных требований, все шире используются для количественного и качественного улучшения сельскохозяйственных животных и продукции животноводства. Как показывают современные тенденции, важную роль в совершенствовании питания, воспроизводства и здоровья животных будут играть передовые методы. Например, радиоиммуноанализ используется в настоящее время для измерения концентрации определенных молекул в биологических пробах, мечения микробов в рубце жвачных животных, оценки кормов для животных и анализа превращения кормов в питательные вещества и их поглощения. Твердофазный иммуноферментный анализ (ТИФА) широко используется для оценки, идентификации и наблюдения за целевыми антителами с целью обнаружения воздействия патогенов на животных. Полимеразная цепная реакция (ПЦР) или последовательное выполнение операций ПЦР используется для обнаружения и характеристики на молекулярном уровне патогенов болезней животных путем прямой маркировки ДНК с целью выбора или подтверждения выбранных геномных признаков, являющихся желательными (более постное мясо, боль-

шие надои молока, болезнестойкость и т.д.), или для определения родословной или происхождения животного. Такие новые применения ядерных технологий постоянно внедряются в практическую ветеринарную деятельность.

Использование стабильных изотопов, облученных вакцин и позитронно-эмиссионной технологии открывает возможности в будущем. Стабильные изотопы по-прежнему используются в животноводстве и ветеринарии. Мечение углеродом-13 или азотом-15 используется в методах экспериментального контроля метаболизма углеводов и усвоения белков и питательных веществ. Метод разбавления меченой стабильными изотопами водой (окисью дейтерия) все более широко используется для определения безжировой компоненты массы тела, жировой массы, композиционного состава тела и общего усвоения крупным рогатым скотом воды и молока. Концентрацию окиси дейтерия в жидкости организма измеряют с помощью методов изотопной масс-спектрометрии или инфракрасной спектроскопии. Изотопная масс-спектрометрия также используется в исследованиях патогенности и других физиологических исследованиях и при неинвазивном определении географического происхождения продукции животноводства. Имея возможность точно отслеживать географическое происхождение продукции животноводства, государства в состоянии расширить свои экономические возможности. Например, если та или иная болезнь может быть уничтожена во всех регионах страны, кроме конкретных небольших регионов, то экспорт продукции животноводства из других регионов может быть обоснованно разрешен, если удастся точно доказать, что такая продукция была произведена в зонах, где нет болезни.

Кроме того, этот подход может быть потенциально использован для определения возможной роли, которую играют дикие животные как переносчики болезней животных, например, для определения влияния перелетных птиц на распространение птичьего гриппа из эндемических в незараженные зоны.

Инактивация вакцин облучением позволяет получить мертвые патогены, которые лучше имитируют модель индуцирования иммунного ответа живых патогенов. Это открывает новый подход к вакцинации против таких конкретных болезней, как малярия, ящур, энзоотический гепатит или неоспороз крупного рогатого скота, поскольку полученные с помощью методов генетической инженерии вакцины оказались малоэффективными. Начаты исследования на облученных вакцинах против паразитов крови сельскохозяйственных животных.

В последние годы происходит внедрение в ветеринарную практику многих медицинских технологий, разработанных для лечения людей. Одним из примеров является позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ). Ветеринары используют ПЭТ для ди-

агностики опухолей и других нерегулярных тканевых образований у высокоценных животных, таких, как скаковые лошади и племенные быки. Благодаря использованию ПЭТ удастся сократить расходы и обеспечить щадящее обращение с животными ввиду снижения необходимости применять диагностическую хирургию.

Облучение пищевых продуктов

Потери пищевых продуктов, связанные с насекомыми-вредителями, загрязнением и порчей продукции, громадны. Согласно оценке, 42% производства восьми основных пищевых продуктов и товарных культур мира теряются из-за насекомых-вредителей, а потери после сбора урожая добавляют к этой цифре еще 10%. Несмотря на использование современных систем производства и распределения пищевых продуктов, болезни, переносимые с пищевыми продуктами, также являются широко распространенной угрозой для здоровья человека, а также важным фактором снижения производительности экономики во всех странах. Поэтому обеспечение безопасности и качества пищевых продуктов и сельскохозяйственных товаров является одним из важнейших аспектов национальных подходов к решению двойной проблемы, связанной с ростом урбанизации и повышением уровня здравоохранения.

Облучение пищевых продуктов - ценный инструмент для решения проблемы сокращения потерь из-за порчи и ухудшения пищевых продуктов, борьбы с микробами и другими организмами, вызывающими болезни, передающиеся через пищевые продукты, и выполнения санитарных и фитосанитарных требований. Помимо продолжающегося использования облучения для санитарных целей, расширяется использование облучения для фитосанитарных применений, и особенно применений, связанных с карантинными мерами. Международные нормы и своды положений, направленные на содействие применению этой технологии производства пищевых продуктов, разработаны в сотрудничестве с Совместной комиссией ФАО/ВОЗ по Codex Alimentarius и Международной конвенцией по защите растений.

1.2 Здоровье человека

Индивидуализированный подход к лечению рака с использованием методов ядерной медицины

Для успешного лечения рака необходимо всестороннее понимание сложного взаимодействия между различными факторами, приводящими к росту раковых образований. Понимание специфических особенностей рака у отдельных лиц на клеточном, генетическом и молекулярном уровне играет важнейшую роль при определении метода лечения конкретного пациента и намного повышает шансы на излечение. Молекулярная визуализация в ядерной медицине с помощью позитронно-эмиссионной томогра-

фии (ПЭТ) переопределила и модернизировала медицинский подход к лечению раковых больных. То, что рак классифицируется исключительно по его анатомическому месту нахождения, может быть одной из причин того, почему пациенты, которые, как предполагают, страдают одними и теми же раковыми заболеваниями, реагируют на лечение совершенно различным образом. В настоящее время имеются инструментальные средства, позволяющие понять на молекулярном уровне причины столь сильного различия реакций пациентов. Это позволяет выбрать правильные режимы лечения. Оказалось, что раковые образования, выявленные в удаленных друг от друга частях тела, могут быть более сходны, чем две опухоли, находящиеся в одном и том же органе, в зависимости от того, какой тип канцерогенных мутаций они вызывают. Детальное понимание патогенных процессов, обеспечиваемое благодаря ПЭТ, можно использовать для рациональной выработки лекарственных препаратов, обеспечивающих проведение целенаправленной терапии.

В области лечения рака гематологи, педиатры и онкологи начинают исследовать комплексные подходы к терапии с применением химиотерапии, иммуномодулирующих или модулирующих клеточную передачу сигнала агентов в сочетании с целевыми разыскивающими опухоли молекулами (пептидами, антителами или олигонуклеотидами), с тем чтобы повысить возможности излечения раковых больных. Подходы к лечению на основе радиационного нацеливания с применением изотопов обладают многочисленными преимуществами при лечении как локализованных или распространенных солидных раков, так и переносимых с кровью злокачественных образований.

Радиационная онкология

Технологические достижения в областях планирования терапии и доставки радиации позволили принять стратегии облучения опухолей с использованием подхода трехмерной конформно-лучевой терапии (3D-CRT) и даже таких методов с высокой конформностью, как стереотактическая радиотерапия (SRT) или лучевая терапия с модулированным по интенсивности пучком (IMRT). Конформная терапия описывает радиотерапевтический метод лечения, при котором создается высокодозный объем, точно соответствующий по форме желательному объему мишени, и в то же время в максимально возможной степени сводится к минимуму доза на критические нормальные ткани. Внедрение наиболее передовых методов, таких, как SRT и IMRT, а также лучевой терапии под визуальным контролем (IGRT) и респираторно-синхронизированной радиотерапии (RGRT) привело к улучшению понимания важности запасов и перемещений органов. Кроме того, крупным достижением в области лучевой терапии в по-

следние годы явилось введение в процесс планирования лечения функциональной информации, полученной методом визуализации. Например, использование сканирования методом ПЭТ в сочетании со сканированием методами традиционной компьютерной томографии позволяет получать изображения с биологическими/метаболическими маркерами, которые дают возможность более точно задавать зоны радиотерапевтического воздействия и дозы для индивидуальных пациентов, что приводит к лучшим результатам лечения.

Положительная оценка этих технологий вытекает из предположения о том, что более точная локализация опухоли, более прецизионное формирование распределения доз и более индивидуализированное их задание улучшат результаты лечения за счет снижения токсичности или улучшения локального контроля опухолей путем применения стратегий эскалации доз. Эти подходы активно изучаются во всем мире.

Первостепенное значение для широкого применения новых технологий имеют аспекты, связанные с обучением. Виртуальное обучение на базе Интернета может оказаться эффективным, поскольку оно позволяет снизить общие затраты и более быстро внедрять эти технологии в повседневную клиническую практику. В то же время в глобальных масштабах предпринимаются усилия, направленные на повышение стандартов образования медицинских физиков, обеспечивающих поддержку применения этих новых технологий лечения. Во многих странах созданы организации, определяющие компетенцию медицинских физиков и проводящие аккредитацию местных программ подготовки в условиях клиник.

Помимо достижений в области внешней лучевой радиотерапии, недавнее усовершенствование источников с высокой мощностью дозы (ВМД) на кобальте-60 может позволить проводить современные процедуры брахитерапии ВМД с менее частой заменой источников, чем это необходимо в случае других источников. Это позволит сделать радиотерапию более эффективной с точки зрения затрат и повысит доступность лечения для пациентов. Что касается мультимодального лечения, то в результате ряда высококачественных клинических испытаний было подтверждено, что сочетание радиотерапии с применением фармацевтических средств повышает выживаемость пациентов с множественными общими формами рака.

1.3 Радиационная технология в промышленности

Производство радиоизотопов

Проблемы обеспечения надежных поставок апробированных радиоизотопов для устойчивых медицинских и промышленных применений, а также разработки новых видов продукции, удовлетворяющих

появляющимся новым требованиям, остаются актуальными во всем мире. Из числа почти 25 - 30 млн. процедур диагностической визуализации, выполненных в 2008 году, на долю процедур с использованием технеция-99m и фтора-18 по-прежнему приходилось соответственно порядка 80% и 10%. В случае продукции для радионуклидной терапии, растущая популярность более легко и широкопроизводимого лютеция-177 и новая система генерации иттрия-90, основанная на электрохимическом разделении со стронцием-90, - это два заметных события в 2007 году. Еще одним важным событием является рост в некоторых государствах интереса к созданию новых установок для производства молибдена-99 с использованием НОУ (низко-обогащенный уран) мишеней. Важное совещание всех заинтересованных сторон, участвующих в настоящее время в производстве данного радиоизотопа, состоялось в декабре 2007 года в Сиднее, Австралия. Оно было организовано совместно Национальным управлением по ядерной безопасности (ННСА) министерства энергетики США и Австралийской организацией по ядерной науке и технике (АНСТО). В докладе совещания были определены все аспекты, которые необходимо учитывать, и помощь, которая требуется для содействия использованию технологии мишеней из НОУ таким образом, чтобы это не сказалось на поставках молибдена-99 и тем самым привело к сокращению применения ВОУ (высокообогащенный уран) для крупномасштабного производства этого изотопа. В Австралии начато крупномасштабное регулярное производство молибдена-99 с использованием мишеней из НОУ.

Промышленные применения радиоизотопов и радиационной технологии

Широко развивается метод нейтронного облучения для легирования кремния с целью изготовления полупроводниковых материалов, усиления цвета низкосортных полудрагоценных ювелирных камней для увеличения их ценности, а также с целью производства трековых мембран для медицинских применений. Индия, Индонезия, Китай и Республика Корея уже разработали установки для нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) кремния, и Индия планирует наладить производство в коммерческих масштабах. Индонезия и Таиланд начали коммерческую эксплуатацию оборудования по окрашиванию ювелирных камней, а Пакистан и Вьетнам приступили к испытаниям, направленным на развитие соответствующего потенциала. Проведены начальные исследования по изготовлению трековых мембран с использованием нейтронного облучения.

Кувейт приступил к внедрению межскважинной радиоиндикаторной технологии в целях поддержки национальных усилий в осуществлении планов по увеличению нефтеотдачи пластов.

Природные полимеры

Природные полимеры существуют во многих формах, и многие из них могут быть подвергнуты радиационной обработке с целью получения ценных продуктов (рисунок 2). К таким природным полимерам относятся крахмал (в картофеле и зерне), целлюлоза (в растениях и деревьях), хитин (в креветках, крабах и омарях), альгинаты (в морских водорослях) и полипептиды, такие, как шелк, кератин и волосы. Эти природные полимеры нетоксичны, разлагаются микроорганизмами и их можно получать с низкими затратами.



Рисунок 2. Радиационная обработка природных полимеров

Радиационная обработка является чистым и не вносящим примесей методом создания новых, более ценных материалов на основе этих природных полимеров. Например, продукция из хитина может использоваться в качестве гидрогелевых повязок на раны, не вызывающих пролежни постельных матрацев, очищающих кожу лица косметических масок, устройств для доставки лекарственных препаратов и адсорбентов загрязняющих веществ, таких, как ионы металлов, красители, белки, твердые частицы и другие. Продукты с низким молекулярным весом обладают особыми свойствами антибиотиков, антиоксидантов и агентов, активизирующих рост растений.

Радиационная обработка природных полимеров становится перспективной областью, поскольку уникальные характеристики полимерных материалов могут быть использованы для практических применений в медицине, косметике, сельском хозяйстве, биотехнологии и охране окружающей среды.

Опасные биоагрессоры

Использование ионизирующих излучений для инактивации микробов является апробированной технологией в областях обеспечения гигиены пищевых продуктов, лучевой стерилизации изделий медицинского назначения и биологических тканей и, в более крупных масштабах, обработки шлама сточных вод. В последнее время было продемонстрировано использование радиационной технологии для снижения угрозы, создаваемой биологическими загрязнителями, такими, как сибирская язва в почтовых отправлениях. Результаты показывают полезность использования ионизирующих излучений для противодействия таким угрозам, как преднамеренное распространение биологических загрязнителей. Основные преимущества использования радиационной технологии по сравнению с другими методами заключаются в способности обеспечивать обработку материалов в самых различных масштабах - от малых до самых больших, и в том, что единственным параметром, который необходимо контролировать, является доза, воздействующая на целевой объект/зону. Представленные до настоящего времени результаты показывают, что в будущих разработках следует учесть некоторые дополнительные аспекты, например, аспекты обращения и обработки загрязненных продуктов и обучения работе в полевых условиях.

Автоматизированное компьютерное отслеживание радиоактивных частиц

Метод под названием "автоматизированное компьютерное отслеживание радиоактивных частиц" (CARPT) стал признанным методом исследования сложных многофазных потоков (например, газа и жидкости) в химической, нефтехимической и биоинженерной отраслях промышленности. В методе CARPT используются небольшая гамма-излучающая частица радиоиндикатора такой плотности и размеров, что она увлекается исследуемой фазой, и ряд

детекторов гамма-излучения, особым образом расположенных вокруг химического реактора и способных отслеживать положение частицы и таким образом надежно регистрировать перемещение фазы.

Метод отслеживания является неинвазивным и позволяет определять динамические параметры конкретной представляющей интерес фазы. Полученные данные о структуре, скорости, турбулентности и других параметрах потока помогают оптимизировать процессы на уровне экспериментальной установки и, в свою очередь, предоставляют информацию для принятия решений относительно окончательной конструкции узлов реальной установки. Метод CARPT будет применяться прежде всего в нефтехимической промышленности, где используются псевдооживленные слои и барботажные колонны, и при производстве продукции на основе биопроцессов.

Еще один усовершенствованный метод предусматривает использование для отслеживания частиц радиоиндикаторов, испускающих позитроны. Этот метод под названием "отслеживание частиц, испускающих позитроны" (РЕРТ), обладает дополнительным преимуществом, заключающимся в регистрации совпадений излучения позитронной аннигиляции, что обеспечивает повышенную точность отслеживания частицы радиоиндикатора даже в системах с высокоскоростным потоком, обычно входящих в состав некоторых промышленных систем. Общая цель применения CARPT и РЕРТ сводится к обеспечению более высокой производительности и эффективности промышленных технологических процессов.

Анализ современного состояния развития ядерных технологий показывает, что в настоящее время расширяются области применения ядерной науки как средства для экономического развития, охраны окружающей среды и здоровья населения.

2. ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКОНОМИКИ КАЗАХСТАНА XXI ВЕКА

Практическое применение ядерных методов и технологий в промышленности, медицине и сельском хозяйстве вносит достойный вклад и в развитие экономики Казахстана. На протяжении ряда последних лет Институт ядерной физики Национального ядерного центра Республики Казахстан проводит работы в этом направлении, используя уникальную техническую базу, основу которой составляют комплекс исследовательского реактора ВВР-К и экспериментальные ускорительные комплексы.

2.1 Радионуклиды

Одной из важнейших задач института является организация производства отечественной радиоизотопной продукции.

1. Радиофармацевтика — фармацевтические препараты на основе искусственных радионуклидов, широко используемые в медицине для диагностики и лечения заболеваний различных внутренних органов и систем.

Радионуклидная диагностика основана на регистрации гамма-излучения изотопа, входящего в состав введенного пациенту препарата, с помощью специального детектора, сканера, планарной гамма-камеры или ее более современного аналога - эмиссионного томографа (рисунок 3).

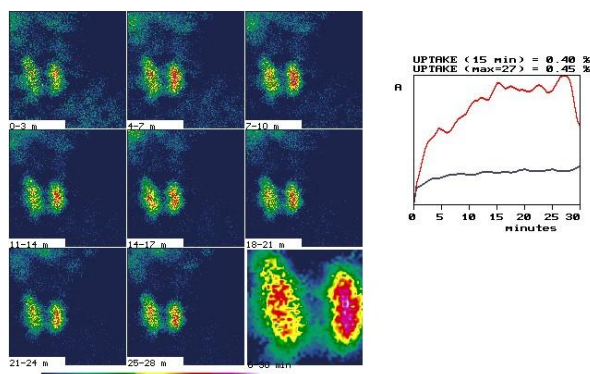


а – Планарная гамма-камера
(Научный центр хирургии
им. А.Н. Сызганова, г. Алматы)

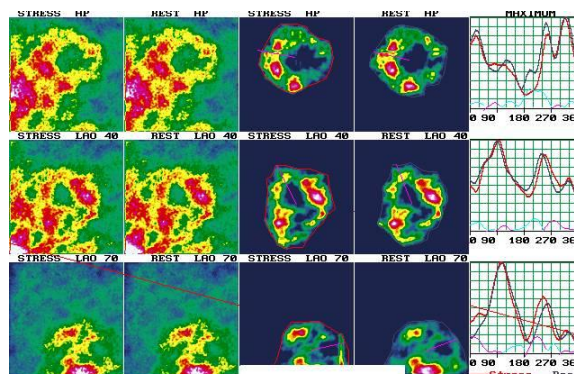


б – Эмиссионный томограф
(Республиканский клинический госпиталь
инвалидов отечественной войны, г. Алматы)

Рисунок 3.



а – Серия изображений щитовидной железы,
полученная при радионуклидном обследовании



б – Серия изображений сердечной мышцы,
полученная при радионуклидном обследовании

Рисунок 4.

Для производства радиофармпрепаратов используются достаточно сложные технологии, включающие в общем случае облучение мишени, содержащей исходный материал, в реакторе или на циклотроне, радиохимическую переработку облученной мишени и выделение нужного изотопа, синтез, кондиционирование, фасовку и стерилизацию препарата, проведение многочисленных анализов для контроля его качества. Работы с высокоактивными облученными материалами проводятся в защитных "горячих" камерах, что требует создания специальной дистанционно управляемой химической аппаратуры (рисунок 5).

Усилия казахстанских ученых были сконцентрированы на четырех наиболее необходимых препаратах, по которым удалось добиться значительных результатов:

Препарат *Таллия-201* (^{201}Tl), используемый для ранней диагностики инфаркта миокарда, регулярно выпускается по заявкам клиник г. Алматы.

Препарат *Технеция-99м* ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, универсальный изотоп, используется в сочетании со специальными наборами реагентов для диагностики состояния печени, почек, сердца, легких, поджелудочной и щитовидной желез, гепатобилиарной, кровеносной, лимфатической и костной систем) в 2001 году успешно прошел доклинические и клинические испытания в нескольких медицинских центрах г. Алматы.

Также успешно проведены доклинические и клинические испытания препарата *Йода-131* (^{131}I), применяемого для диагностики и лечения щитовидной железы.

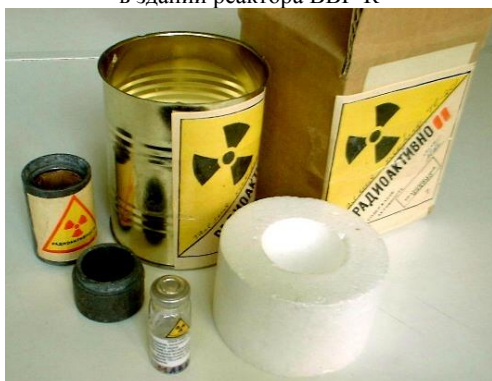
Препарат *Галлия-67* (^{67}Ga), используемый для выявления злокачественных опухолей, успешно прошел доклинические испытания.



а – Цепочка горячих камер в здании реактора ВВР-К



б – Установка для получения препарата Тс-99м в горячей камере



в – Транспортно-упаковочный комплект для доставки готового препарата в клинику



г – Устройство для фасовки готового радиофармпрепарата

Рисунок 5. Производство радиофармпрепаратов

2. Закрытые радиоактивные источники – компактные источники ионизирующих излучений, содержащие радиоактивные изотопы в герметичных оболочках и применяемые в приборах для дефектоскопии, технологического контроля и экспрессного химического анализа в различных отраслях промышленности, в аппаратах для лучевой терапии в онкологии, в научных аналитических приборах (рисунок 6).



Рисунок 6.

В ИЯФ НЯЦ РК получены опытные образцы источников на основе изотопов *Кадмий-109*, *Кобальт-57*; отрабатываются технологии изготовления источников с изотопами *Иридий-192*, *Кобальт-60*.

3. Радиоактивные метки (трассеры) – радиоизотопы, применяемые в ничтожно малых количествах

в качестве радиоактивных меток в медицинских, биологических и экологических исследованиях.

В институте регулярно получают изотопы *Стронций-85* (^{85}Sr), *Иттрий-88* (^{88}Y), *Цезий-134* (^{134}Cs), *Плутоний-237* (^{237}Pu) для высокочувствительного анализа экологических проб. Планируется освоение выпуска радиоактивных меток и для медико-биологических исследований.

2.2 Радиационная обработка материалов

Институт успешно осваивает современные технологии радиационной обработки материалов с использованием электронных пучков и гамма-излучения.

1. На промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-4 на регулярную основу поставлена **радиационная стерилизация** партий медицинских изделий и материалов (шприцы, перчатки, катетеры, бинты, вата и т.д.), произведенных различными предприятиями Казахстана. Пучок высокоэнергетических электронов мощностью 50 кВт создает стерилизующую дозу облучения (25 кГр) за считанные секунды, что позволяет использовать конвейерную обработку материалов и обеспечивает высокую производительность процесса (рисунок 7). Перед обработкой изделия упаковываются в герметичную оболочку, гарантирующую сохранение их стерильности в течение длительного времени.



а – Зона загрузки



б – Камера облучения



в – Выгрузка готовой продукции



г – Стерилизация медицинских изделий и материалов



д – Стерилизация сыворотки крови КРС в гамма-установке РХМ-γ-20

Рисунок 7.

В случаях, когда требуется высокая проникающая способность и однородность облучения (например, для стерилизации различных растворов, биологических материалов), используется гамма-излучение радиоизотопа ^{60}Co . Источники ^{60}Co с общей активностью ~ 20000 Ки в гамма-установке РХМ-γ-20 создают мощность дозы около 1 Гр/с в объеме 2 л, что позволяет, в частности, проводить стерилизацию небольших партий сыворотки для получения вакцин.

2. С использованием метода **радиационной сшивки полимеров** на электронном ускорителе налажено промышленное производство полимерного кровельного материала "Кровлен-2" (рисунок 8), не уступающего по эксплуатационным характери-

кам лучшим импортным аналогам при значительно более низкой цене.

Материал, получаемый из резиновой смеси на основе синтетических каучуков, приобретает в результате радиационной обработки высокую прочность, эластичность, стойкость к атмосферным воздействиям и солнечной радиации. Гарантированный срок службы кровли – 20 лет. Кроме того, материал может применяться для гидроизоляции строительных фундаментов, водоемов, хранилищ промышленных отходов. С 2001 года в ИЯФ начат серийный выпуск "Кровлена-2", производственная мощность – до 20 тысяч квадратных метров в месяц.



а – Производство "Кровлена-2"



б – Готовая продукция



в – Ремонт мягкой кровли

Рисунок 8. Кровлен

3. В сотрудничестве с учеными КазГУ им. Аль-Фараби освоена оригинальная технология *радиационного синтеза полимерных гидрогелей* медицинского назначения на основе отечественного сырья (рисунок 9).

Полимерные гидрогели используются в качестве контактной среды для ультразвуковой диагностики, гидрофильной основы для лекарственных средств, хирургических дренажей и т.д. Гидрогелевая композиция "Полигель", обеспечивающая акустический контакт между кожей пациента и поверхностью ульт-

развукового датчика, полностью соответствует гигиеническим требованиям и разрешена к применению в РК. Гидрогелевые мази обеспечивают оптимальный контакт лекарственного средства с раневой поверхностью, не травмируют рану, сорбируют экссудат, легко удаляются и не требуют частой замены. В отличие от зарубежных аналогов, они наряду с водорастворимыми лекарственными веществами могут содержать масляные экстракты, что обуславливает их особую эффективность при лечении обширных ран, ожогов.



Рисунок 9. Образцы полимерных гидрогелей медицинского назначения

Технологические возможности ядерной науки далеко не исчерпываются приведенными примерами. Среди перспективных задач, стоящих перед Институтом ядерной физики, можно перечислить также использование пучков реакторных нейтронов для терапии злокачественных опухолей, освоение технологии нейтронного трансмутационного легирования кремния, производство термоусаживающихся полимерных пленок, радиационный синтез прочных, износостойких и химически стойких полимерных покрытий, производство мембранных фильтров с помощью ионных пучков, и ряд других, решение которых позволит поднять уровень отечественной медицины, преодолеть зависимость от импорта и открыть возможности экспорта соответствующей наукоемкой продукции, в целом будет способствовать успешному социально-экономическому развитию Республики Казахстан.

2.3 Ядерно-физические методы анализа состава материалов

Традиционно сильным направлением деятельности Института ядерной физики является развитие и применение методов анализа элементного и радионуклидного состава различных материалов. Наряду с широко распространенными методами, серьезное внимание уделяется применению уникальных возможностей имеющихся в Институте ядерно-физических установок. Так, на электростатическом ускорителе УКП-2-1 развивается комплекс методов анализа, использующих взаимодействие пучков ускоренных ионов с веществом (протон-индуцированное рентгеновское излучение, резонансные ядерные реакции, резерфордовское обратное рассеяние). Действующий исследовательский атомный реактор ВВР-К дает возможность реализации одного из наиболее

чувствительных методов анализа элементного состава - нейтронно-активационного анализа (НАА).

Проект создания коммерческого участка НАА

В условиях Казахстана практический интерес к НАА связан с применением в медицинских и биологических исследованиях, металлургии, экологии и геологии. Согласно предварительным оценкам, наибольший коммерческий потенциал имеют последние две позиции. Особенности промышленной деятельности на территории Республики обусловили необходимость постоянного мониторинга состояния объектов окружающей среды, включая контроль содержания в них различных химических элементов. В последние годы на эти цели выделяются значительные средства. Переживает второе рождение и геология - развивающаяся экономика Казахстана испытывает растущую потребность в разведке и уточнении запасов минерального сырья.

Требуемая чувствительность анализа зависит от решаемой задачи и экономической целесообразности и лежит в диапазоне 10^{-4} - 10^{-8} %. Технологический процесс будет включать стадии пробоподготовки, облучения, выдержки образцов, измерения спектров и обработки результатов. Каждая из этих стадий должна быть организована так, чтобы обеспечить высокую производительность и экономическую эффективность. При этом одним из важнейших условий успеха является обеспечение гарантированного качества анализа, требующее внедрения соответствующих процедур. Планируемая производительность участка – 10 000 образцов в год.

2.4 Производство ядерных трековых мембран базе ускорителя тяжелых ионов ДЦ-60

Проведенный мониторинг развития науки и техники за последнее десятилетие показал, что наибольшие возможности для создания собственных национальных научных школ по физике, материаловедению, химии, биологии и высоким технологиям в настоящее время представляет освоение технологий с использованием ядерных мембран. Ядерные мембраны («ядерные фильтры», «трековые мембраны») – это особый вид ультра- и микрофильтрационных мембран, получаемых из тонких полимерных пленок путем облучения высокоэнергетичными тяжелыми заряженными частицами и последующего химического травления. Получение ядерных мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важнейших направлений применения ядерных технологий, способным объединить различные дисциплины и отрасли и стать основой ряда нанотехнологий и наукоемкого бизнеса.

Следует подчеркнуть, что технологический прорыв в производстве ядерных мембран стал возможным в результате отказа от устаревшей и практически не используемой (из-за низкого качества продукции и большого количества жидких радиоактивных отходов) реакторной технологии и перехода к более совершенным в технологическом и экологическом отношении технологиям производства ядерных мембран с использованием ускорителей тяжелых ионов. Возможность производства ядерных мембран на ускорителях появилась лишь при использовании пучков ускоренных ионов с энергиями не ниже 1,5 МэВ/нуклон.

По оценкам зарубежных специалистов, технология производства ядерных мембран является самой перспективной ядерной технологией последних десяти лет, имеющей весьма широкое применение. Например, в Дубне (Россия) коммерческой организацией «Альфа» в настоящее время строится специализированный завод по производству ядерных мембран. Резкое увеличение выпуска продукции с использованием ядерных мембран имеет место практически во всех индустриально развитых странах. В Казахстане предполагается развернуть производство ядерных мембран на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60, обладающего подходящими для этого рабочими характеристиками.

Ядерные трековые мембраны на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и поликарбоната (ПК) являются в настоящее время коммерческими продуктами. Технология их производства хорошо отработана. Для облучения ПЭТФ пленок применяют ускоренные ионы с удельными потерями энергии dE/dx на уровне 6-10 МэВ/мкм. В указанном диапазоне dE/dx скорость травления треков в ПЭТФ принимает максимальные значения. Пучки ионов Кг с энергиями около 1 МэВ/нуклон и 1,5 МэВ/нуклон могут считаться оптимальными для бомбардировки ПЭТФ пленок толщиной 10 и 20 мкм, соответственно. По-

ликарбонат более чувствителен к радиационным воздействиям, вследствие чего для производства трековых мембран из ПК пленок могут применяться более легкие ионы, например Аг. Химическое травление облученных ионами ПЭТФ и ПК пленок проводят в растворах щелочи. Варьируя условия химической обработки, получают мембраны с диаметрами пор от ~ 0,01 мкм до 10-12 мкм. Данный тип мембран остается на мировом рынке уникальным в плане точности геометрического размера пор и узкого распределения пор по размерам (рисунок 10). Области их применения связаны в основном с аналитическими приложениями, а также биологическими и медицинскими задачами. Мембраны характеризуются умеренной химической стойкостью и неплохой теплостойкостью (до 120-150°C).

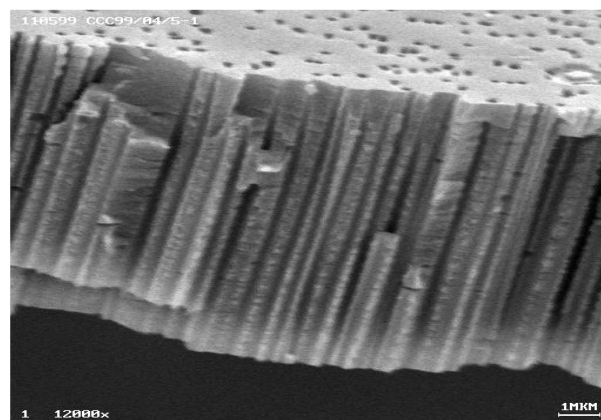


Рисунок 10. Ядерная трековая мембрана

Для фильтрации агрессивных технологических сред были разработаны трековые мембраны из полипропилена (ПП) и поливинилиденфторида (ПВДФ). Эти полимеры отличаются высокой химической стойкостью, что позволяет использовать мембраны для очистки растворов крепких минеральных кислот и щелочей. С другой стороны, это же свойство существенно усложняет технологию травления. Химическое проявление треков проводится в растворах сильных окислителей при высоких температурах. Технические сложности, высокая токсичность отходов и конкуренция с другими типами химстойких фильтрующих материалов не позволили к настоящему времени организовать промышленное производство ПП или ПВДФ трековых мембран. Аналогичная ситуация имеет место в случае полиимидных мембран. Полиимид является чрезвычайно перспективным материалом, производство и потребление которого быстро растет. На основе полиимида были разработаны трековые мембраны с уникальной термической и радиационной стойкостью. Удовлетворительное качество мембран достигается лишь при облучении достаточного тяжелыми ионами (не легче криптона).

2.5 Создание центра ядерной медицины и биофизики

В настоящее время наблюдается серьезное отставание Республики по показателям применения методов ядерной медицины для диагностики и лечения социально-значимых заболеваний. Как никогда остро ощущается потребность здравоохранения в отечественных технологиях современного уровня. Но проблема вовсе не в отсутствии нужных отечественных технологий. В 2004 году Институт ядерной физики по решению Правительства Республики Казахстан начал работу по созданию в Алматы Центра ядерной медицины и биофизики (рисунок 11). В центре будет налажено производство широкого

спектра радиоизотопной продукции медицинского назначения; внедрены современные методы радионуклидной диагностики и терапии заболеваний; разработка и испытание новых радиофармпрепаратов, подготовка Казахстанских специалистов в области радионуклидной диагностики и терапии.

Уникальность Центра ядерной медицины и биофизики заключается в том, что именно здесь планируется впервые в Казахстане внедрить метод позитрон-эмиссионной томографии (ПЭТ) - один из самых современных и эффективных методов радионуклидной диагностики, а также создать отделение радионуклидной терапии для лечения онкологических и ряда других заболеваний.



Рисунок 11. Общий вид лечебно-диагностического комплекса Центра ядерной медицины и биофизики

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Обзор и анализ состояния и развития ядерных технологий показал возрастающую роль инновационных, наукоемких технологий в успешном развитии экономики страны и улучшении благосостояния жителей планеты.

Миллионы людей получают пользу от самых различных применений ядерных технологий. В число этих применений входят повышение продовольственной безопасности, эффективное управление водными ресурсами и медицинские процедуры, направленные на спасение жизни.

В Казахстане, благодаря имеющейся инфраструктуре и наличию научно-технического потенциала РГП Национальный ядерный центр РК, развитие ядерных технологий охватывает почти все области жизнедеятельности.

Однако отсутствие широкого взаимодействия институтов развития и научных институтов тормозит полномасштабное внедрение наукоемких технологий в производство. Финансирование в рамках научных прикладных задач позволяет только разрабо-

тать технологии, а их дальнейшее внедрение и совершенствование возможно только в рамках проектов, финансируемых либо частным капиталом, либо институтами развития.

Опыт зарубежных стран показывает, что только тесное взаимодействие науки и производства позволит успешно продвигать разработки ученых.

В мире на сегодняшний день сложилось большое разнообразие различных структур, объединяющих умы ученых и государственный, частный капитал.

Одним из распространенных форм взаимодействия науки и капитала является создание научных технопарков.

Выступая 4 апреля 2003 года с посланием к народу Казахстана об основных направлениях внутренней и внешней политики на 2004 год, Президент Назарбаев отметил, что целью стимулирования развития инновационного потенциала страны предполагается создание технопарков: в поселке Алатау - центра информационных технологий, в Степногорске - биотехнологического центра, и в Курчатове - центра ядерных технологий.

Во исполнение пункта постановления Правительства Республики Казахстан от 1 марта 2004 года №256 "Об утверждении Плана действий по реализации первоочередных задач индустриально-инновационной политики на 2004 год" Министерством индустрии и торговли Республики Казахстан разработана и утверждена "Концепция развития сети технопарков в Республике Казахстан".

Указанная Концепция предусматривает создание в Казахстане технопарков на двух уровнях:

1. национальные технопарки;
2. региональные технопарки.

Национальные технопарки, должны быть ориентированы на создание в Казахстане новых отраслей, которые будут способствовать обеспечению будущей конкурентоспособности казахстанской экономики, и должны иметь выраженную отраслевую, секторальную специализацию. С развитием системообразующих отраслей, каковой является ядерная отрасль, создается база для развития в Казахстане и других производств.

Создание специализированных технопарков позволит, во-первых, сэкономить затраты по инфраструктуре, так как предприятия, работающие в одной отрасли используют одни и те же объекты инфраструктуры.

Стратегия создания национальных технопарков, обозначенная в Концепции, ориентируется на привлечение в технопарки крупных транснациональных корпораций (ТНК), производящих высокотехнологичную и наукоемкую продукцию, вокруг которых государство может выстроить малый и средний бизнес, направленный на выпуск инновационной продукции. При этом возможна совместная реализация проектов с государственными институтами развития (Инвестиционный фонд Казахстана, Банк развития Казахстана) и крупным казахстанским частным бизнесом (банки второго уровня, инвестиционные компании и т.д.).

Источники экономической активности в виде ТНК создадут благоприятную среду для создания предприятий национального малого и среднего бизнеса. Усилия государства должны быть направлены на стимулирование роста национальных предприятий и абсорбирования ими технологий, применяемых ТНК.

В процессе формирования на территории технопарков казахстанских компаний, производящих продукцию с использованием компонентов системообразующей отрасли, должны сыграть значительную роль государственные институты развития.

Мировой опыт инновационного развития как развитых, так и новых индустриальных стран подчеркивает важное место государства в построении комплексной системы инновационного развития страны. Признанные эксперты в данной области отмечают, что инновации не являются одномоментным процессом. Во всех странах на становление технопарков уходит 10-15 лет, при этом важным яв-

ляется создание комплексных мероприятий по обеспечению непрерывности процесса инновационного развития. Государство, посредством целенаправленной государственной политики способно обеспечить такую непрерывность

Как отмечено в Концепции, опыт западных стран и стран Юго-восточной Азии свидетельствует о том, что для успешного развития технопарка и, самое главное, компаний в технопарках необходимы значительные государственные инвестиции в виде бюджетных программ или средств финансовых институтов развития, ассистирующих частным компаниям в становлении, обучении, внедрении стандартов, реализации НИОКР.

В своей деятельности технопарк взаимодействует с высшими учебными заведениями, ведущими научными организациями, научно-исследовательскими центрами, расположенными на данной территории.

На сегодня в Казахстане функционируют порядка 43 специализированных объекта инфраструктуры поддержки, из них 39 бизнес-инкубаторов и 4 технопарка. **Технопарки в нынешнем виде представляют собой, в основном, места сконцентрированной стандартной инфраструктурной поддержки, где компании арендуют помещения, оплачивают коммунальные услуги, а не места поддержки роста предприятий, основанных на новых технологиях.**

В последние годы в мире наблюдается новый подход в отношении мобилизации материально-технических и кадровых ресурсов для развития науки и наукоемких технологий. Сюда относится, прежде всего, межрегиональные проекты, международные программы, научно-исследовательские коалиции, международные базы данных.

Целью межрегиональных проектов является удовлетворение общих потребностей нескольких государств-членов в различных регионах. Межрегиональные проекты могут включать трансрегиональную, глобальную или совместную деятельность. В рамках трансрегиональных проектов решаются вопросы, которые касаются стран из нескольких, но не обязательно из всех регионов, такие, как, например, координация национальной деятельности по оценке радионуклидов в бассейне Средиземного моря. Глобальные проекты используются для обеспечения равного участия всех государств-членов в разработке материалов и развитии знаний, которые будут применяться в глобальных масштабах. Такие проекты могут включать разработку руководящих принципов, норм, учебных планов, учебных материалов и документации по образцовой практике. К этой категории относятся проекты, осуществляемые совместно с МЦТФ в Триесте (STEP), Всемирным ядерным университетом (ВЯУ) или SESAME.

МАГАТЭ предпринята новая инициатива по содействию коалициям исследовательских реакторов, играющим роль международных пользовательских центров, которые позволят странам, не имеющим

исследовательских реакторов или рассматривающим вопрос о закрытии старого реактора, использовать близлежащие установки с современным техническим потенциалом. Предпринятые в 2007 году усилия привели к созданию ряда потенциальных коалиций исследовательских реакторов. Необходимость таких коалиций получила решительную поддержку в заключительном докладе Международной конференции Агентства "Исследовательские реакторы: безопасное управление и эффективное использование", проведенной в Сиднее.

Международные усилия, направленные на использование термоядерного синтеза как будущего источника энергии, получили серьезную поддержку со стороны семи стран (Европейского союза, Индии, Китая, Республики Корея, Российской Федерации, США и Японии), участвующих в осуществлении проекта Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), когда 21 ноября 2006 года на совещании министров в Париже было завершено и подписано Соглашение о совместной реализации проекта ИТЭР (ССР). Это соглашение было впоследствии ратифицировано всеми соответствующими правительствами. ССР вступило в силу 24 октября 2007 года, и Международная организация ИТЭР по термоядерной энергии стала официальным юридическим лицом.

Можно привести еще ряд примеров успешного международного сотрудничества и сделать вывод о том, что международное сотрудничество является ключом к успеху в деле удовлетворения потребностей ученых и пользователей и что консорциумы, коалиции могут развивать и поддерживать эффективное использование эксплуатирующих исследовательских комплексов.

В настоящее время казахстанские ученые не имеют полного доступа к работе на имеющихся международных комплексах. Государству необходимо пересмотреть политику участия Казахстана в международных организациях и программах. Небольшой финансовый взнос Казахстана позволит тысячам ученых иметь хорошую инфраструктуру для продолжения своих исследований. Ярким примером успешного международного сотрудничества является участие Республики Казахстан в Объединенном ин-

ституте ядерных исследований. За прошедшие годы благодаря этому сотрудничеству в нашей стране достигнуты заметные успехи в развитии различных направлений исследований в ядерной физике, ядерных технологиях и подготовке кадров. Совместными усилиями ученых Казахстана и Дубны создан уникальный Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс Института ядерной физики НЯЦ РК в г. Астана, функционирует международная кафедра ядерной физики при Евразийском государственном университете им. Л.Н. Гумилева.

Участие Казахстана, как страны-партнера в таких международных программах позволит получить новые материалы, продукцию и решить вопросы инновационного развития страны.

В заключении необходимо выделить главную проблему в развитии любой области знаний – это **кадровый потенциал**. Индустриально-инновационный путь развития экономики страны делает чрезвычайно актуальным переход на новый, качественно иной уровень развития образовательных технологий. Одним из необходимых этапов этого перехода является интеграция науки и образования на основе сотрудничества вузов и научно-исследовательских центров и институтов. Яркими примерами такого сотрудничества являются такие всемирно известные административно-территориальные образования, центрами которых были и являются Оксфорд и Кембридж в Англии. Такими примерами могут служить созданные в бывшем СССР такие научные центры, как Обнинск, Пущино, Протвино и др. В советские времена в Казахстане был создан как научный центр поселок Алатау под Алматы, были сформированы научные центры, работавшие в оборонных отраслях в Курчатове, Ленинске, Степногорске и т.д. Сейчас Национальный ядерный центр делает первые шаги на этом пути. На базе экспериментальных комплексов и лабораторий предприятий РГП НЯЦ РК организованы филиалы кафедр ядерной физики ЕНУ им.Л.Н. Гумилева и технической физики СГУ им. Шакарима, подписаны трехсторонние договора между РГП НЯЦ РК, вузами Казахстана и Томским политехническим университетом, и Японским агентством по атомной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccqm/>
2. <http://www.copenhagenconsensus.com/>
3. <http://www.fao.org/docrep/007/y5686e/y5686e00.htm>
4. <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>
5. <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>
6. <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/>
7. <http://www.iaea.org/programmes/>
8. <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>
9. <http://www.iaea.org/water>
10. <http://www.ingentaconnect.com/content/klu/jofe>
11. http://www.ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_SPM.pdf
12. <http://www.iupac.org/divisions/II/II.1/index.html>

13. http://www.jaif.or.jp/english/aij/aij_index.html
14. <http://www.kernenergie.de/kernenergie/Service/Fachzeitschrift-atw/>
15. <http://www.nea.fr/html/trw/docs/neastatus99/>
16. <http://www.neutron.kth.se/publications/library/KamilPhD.pdf>
17. <http://www.new.ans.org/pubs/journals>
18. <http://www.nuclearplantjournal.com/>
19. <http://www.nucleus.iaea.org/NUCLEUS/nucleus/Content/Applications/FICdb/FoodIrradiationClearances.jsp?module=cif>
20. <http://www.nucleus.iaea.org/NUCLEUS/nucleus/Content/index.jsp>
21. <http://www.nwtrb.gov/meetings/2007/may/laidler.pdf>
22. <http://www.ornl.gov/info/ornlreview/>
23. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=as>
24. <http://www.rpop.iaea.org>
25. <http://www.sfen.org/>
26. <http://www.siteresources.worldbank.org/NUTRITION/Resources/2818461131636806329/NutritionStrategy.pdf>
27. http://www.tc.iaea.org/tcweb/participation/recipientcountry/nlo_roles/nv_eng_2008-02-28.pdf
28. http://www.unfccc.int/files/meetings/cop_13/application/pdf/cp_bali_action.pdf
29. <http://www.unsystem.org/SCN/Publications/AnnualMeeting/SCN31/SCN5Report.pdf>
30. http://www.who.int/child-adolescenthealth/publications/NUTRITION/WHO_FCH_CAH_01.24.htm
31. <http://www-mvd.iaea.org>
32. <http://www-naweb.iaea.org/nafa/emergency/index.html>
33. <http://www-naweb.iaea.org/nahu/nahres/default.shtm>
34. <http://www-nfcis.iaea.org/>
35. <http://www-ns.iaea.org/>
36. <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Meetings.asp>
37. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1310_start.pdf
38. Жотабаев, Ж.Р. Применение плазменно-десорбционной времяпролетной масс-спектрометрии в медицине и биологии / Ж.Р. Жотабаев, К.С. Сеилова, Д.К. Даукеев : Препринт ИЯФ АН КазССР, 1991. - 31с.
39. Лунин, В.Т. Возможности метода РФА для диагностики некоторых патологий глаза / В.Т. Лунин, С.Н. Абрамович, М.Э. Бузуверя. [и др.] // Труды 2-ой международной конференции по ядерной и радиационной физике. - Алматы, 1999. - С. 278-281.
40. Арзуманов, А.А. Использование ускорительного комплекса УКП-2-1 в ядерно-физических исследованиях / А.Н.Борисенко, И.Д. Горлачев, С.Н. Лысухин, А.В.Платов, А.Елисеев : Препринт №20, , 2002.
41. Арзуманов, А.А. Проект специализированного ускорителя ДЦ-60 для междисциплинарного лабораторного комплекса при Евразийском Государственном университете им. Л.Н. Гумилева / А.А. Арзуманов, А.Н. Борисенко, Б.Н. Гикал, М.Г. Иткис, С.Н. Дмитриев, Г.Г. Гульбекян, Й. Франко, К.К. Кадыржанов, С.Н. Лысухин // III Межд. Конференция "Ядерная и радиационная физика", Алматы, 2001.
42. Arzhumanov, A.A. Technique for irradiation of Nb-Ga targets at Kazakhstan isochronous cyclotron /A.A. Arzumanov, V.V.Alexandrenko, A.Borissenko, D.N.Ignatenko, V.K.Koptev, S.N.Lyssukhin, Yu.Popov, G.I.Sychikov, B.A.Volkov. // Proc. XVII Int. Conf. On Cycl. And Their Appl. - Tokyo, Japan, 2004. - P.28-30.
43. Arzhumanov, A.A. Radioisotope production at the Kazakhstan cyclotron /A.A. Arzumanov, V.N. Batischev, N. Berdinova, A. Borissenko, G. Chumikov, N. Gorodisskaya, A. Knyazev, V. Koptev, S. Lyssukhin, Yu. Popov, G.I. Sychikov, D. Zheltov. //Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. - 2003. - Vol. 257, №1. - P. 215 - 218.
44. Кадыржанов, К.К. Ядерно-энергетическая отрасль Республики Казахстан / К.К. Кадыржанов, Ж.Р. Жотабаев. - Курчатов, 2007.
45. Arzhumanov, A.A. Development of cyclotron based high beam current technique for Ga-67 production / A.A. Arzumanov, V.N. Batischev, N. Berdinova, A. Borissenko, G. Chumikov, S.N. Lukashenko, S. Lyssukhin, G.I. Sychikov. // 7-th EPAC. - Vienna, Austria, 2000. - P. 2498 - 2499.
46. Arzhumanov, A.A. Production of Plutonium, Yttrium and Strontium tracers for using in environmental research / A.A. Arzumanov, V.N. Batischev, N. Berdinova, A. Borissenko, G. Chumikov, S.N. Lukashenko, S. Lyssukhin, Yu. Popov, G.I. Sychikov. // Proc. XVI Int. Conf. On Cycl. And Their Appl. - East Lansing, USA, 2001. - P.34 -36.

УДК 622.235.213

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Масягин Д.Г., Пустовалов И.А.

Казахский государственный научно-производственный центр взрывных работ НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

В ДГП «КГЦВР» разработаны различные взрывчатые материалы от простейших эмульсионных гранулитов до помышленных шашек детонаторов, которые нашли широкое применение и внедрены на ведущих горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан.

На пороге своей независимости горнодобывающие предприятия Казахстана остались практически без взрывчатых материалов, так как основные производства располагались в России, в связи с распадом СССР нарушились экономические связи и практически прекратились поставки взрывчатых материалов (ВМ). Горно-металлургическая продукция нового суверенного Казахстана имела значительный удельный вес в экономике и практически все твердые полезные ископаемые добывались с применением буровзрывного способа со значительным расходом взрывчатых веществ (ВВ - 120-150 тысяч тонн в год) и различных средств взрывания, горнодобывающие предприятия республики встали в зависимость от импортных поставок.

В это непростое время с целью организации в республике новых производств взрывчатых материалов, а также серийного выпуска специализированного оборудования, приборов и средств механизации взрывчатых работ постановлением Кабинета Министров Республики Казахстан от 7 июня 1993г. № 464 создан Казахский государственный научно-производственный центр взрывных работ (КГЦВР) Министерства промышленности Республики Казахстан. Этим постановлением КГЦВР определен головным по республике в области развития промышленности взрывчатых материалов, разработки и внедрению простейших аммиачно-селитренных взрывчатых веществ (с изготовлением их на местах потребления), технологических комплексов, машин и оборудования для механизации взрывных работ.

Для предотвращения зависимости от импортных поставок специалистами КГЦВР были разработаны простейшие составы ВВ, которые благодаря своей простоте изготовления, доступном сырью и безопасности технологий изготовления легко могли быть внедрены на предприятиях ведущих взрывные работы.

Таким взрывчатым веществом стал Гранулит Э – сыпучая механическая смесь гранулированной аммиачной селитры – 85% и водомасляной эмульсии (ВМЭ) – 15%. Компонентный состав ВМЭ состоит из воды, аммиачной селитры, дизельного топлива и хозяйственного мыла в качестве эмульгатора. состава ВВ позволяет осуществлять приготовление гранулита Э непосредственно на местах производства взрывных работ (в карьере, на блоке), что значи-

тельно упрощает и удешевляет технологию производства взрывных работ, а также сводит к минимальной безопасности при обращении с ВМ взрыв-персонала. Наряду с промышленной безопасностью при применении гранулита Э наблюдается рост экономической эффективности взрывных работ.

На горнодобывающих предприятиях России лидирующее место занимают взрывчатые вещества, базирующиеся на применении эмульсии порэмита. Порэмита – эмульсионное ВВ, представляющее собой пластичную массу от светло-бежевого до коричневого цвета. Присутствие газогенерирующей добавки в качестве сенсibilизатора позволяет применять эмульсию порэмита индивидуально, исключая сухую фазу – аммиачную селитру. Такой приём в основном используют при зарядании сильно обводнённых скважин, так как резко увеличивается расход водомасляной эмульсии, что приводит к удорожанию взрывных работ.

Остановившись на стоимости взрывных работ необходимо заметить существующую разницу между эмульсиями порэмита и эмульсией предназначенной для приготовления гранулита Э. Первое, на что хотелось бы обратить внимание – это капитальные затраты на приобретение оборудования и монтаж пунктов приготовления ВМЭ.

В основном практически все пункты приготовления эмульсий для взрывчатых веществ состоят из одного или нескольких модулей (узлов), представляющих собой технологическое оборудование, смонтированное на рамах с площадками обслуживания в комплексе с технологическими трубопроводами. Модули могут быть расположены в одном или нескольких производственных зданиях. На некоторых предприятиях, совокупность таких технологических модулей представлено целыми мини-заводами по производству эмульсионных взрывчатых веществ. Доминирующим фактором при строительстве таких пунктов приготовления эмульсии прежде всего является сочетание высокой безопасности в процессе приготовления эмульсий, которая прежде всего зависит от крайне низкой чувствительности компонентов эмульсии к механическим и тепловым воздействиям, а также надёжности оборудования, и минимальных финансовых затрат связанных с монтажом и последующим обслуживани-

ем оборудования, задействованного в процессе приготовления эмульсии.

Этот фактор напрямую задействован на стационарных пунктах приготовления водомасляной эмульсии для простейшего эмульсионного ВВ – гранулита Э, смонтированных на нескольких крупнейших горнодобывающих предприятиях Казахстана (рисунок 1).

Основной компонент гранулита Э и ЭМ - водомасляная эмульсия изготавливается на компактной установке (рисунок 2).

Установка для приготовления водомасляной эмульсии состоит из рамы 1 на которой крепятся емкости исходных компонентов 2-6, электропит 7 и манометр 8, основного бака смешения исходных компонентов 9 и платфор-

мы 10 на которой монтируются пластинчатый насос, электродвигатель и гидроакустический смеситель.

Техническая производительность установки для изготовления водомасляной эмульсии 150 л/цикл (на 1 тонну ВВ). Обслуживает установку 2 человека. Таким образом, из простых компонентов в течении смены два специалиста прошедшее обучение (без специального образования) наработают ВМЭ эквивалентного для 10-20 тонн ВВ.

Установка для приготовления водомасляной эмульсии отличается практичностью, не высокой стоимостью, технологической безопасностью, компактностью размеров узлов и агрегатов, простотой использования и обслуживания. Схема изготовления ВМЭ приведена на рисунке 3.



Рисунок 1. Действующие и проектируемые стационарные пункты приготовления ВМЭ и ВВ по технологиям ДПП "КГЦВР"

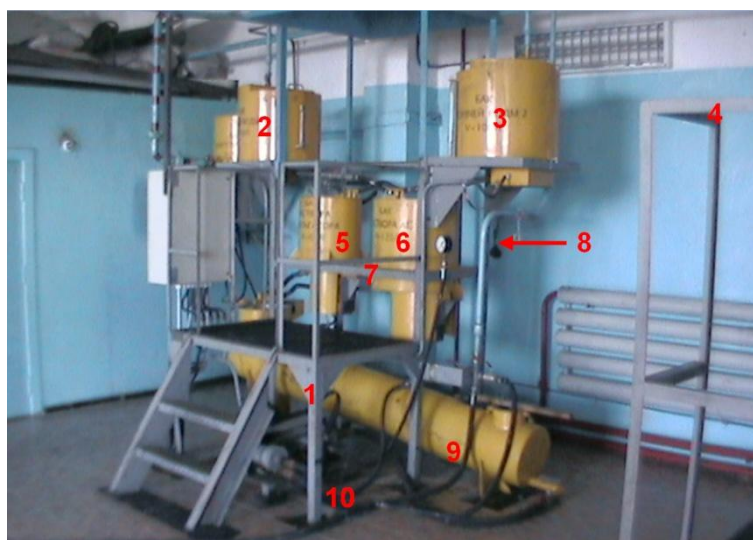


Рисунок 2. Установка для изготовления ВМЭ

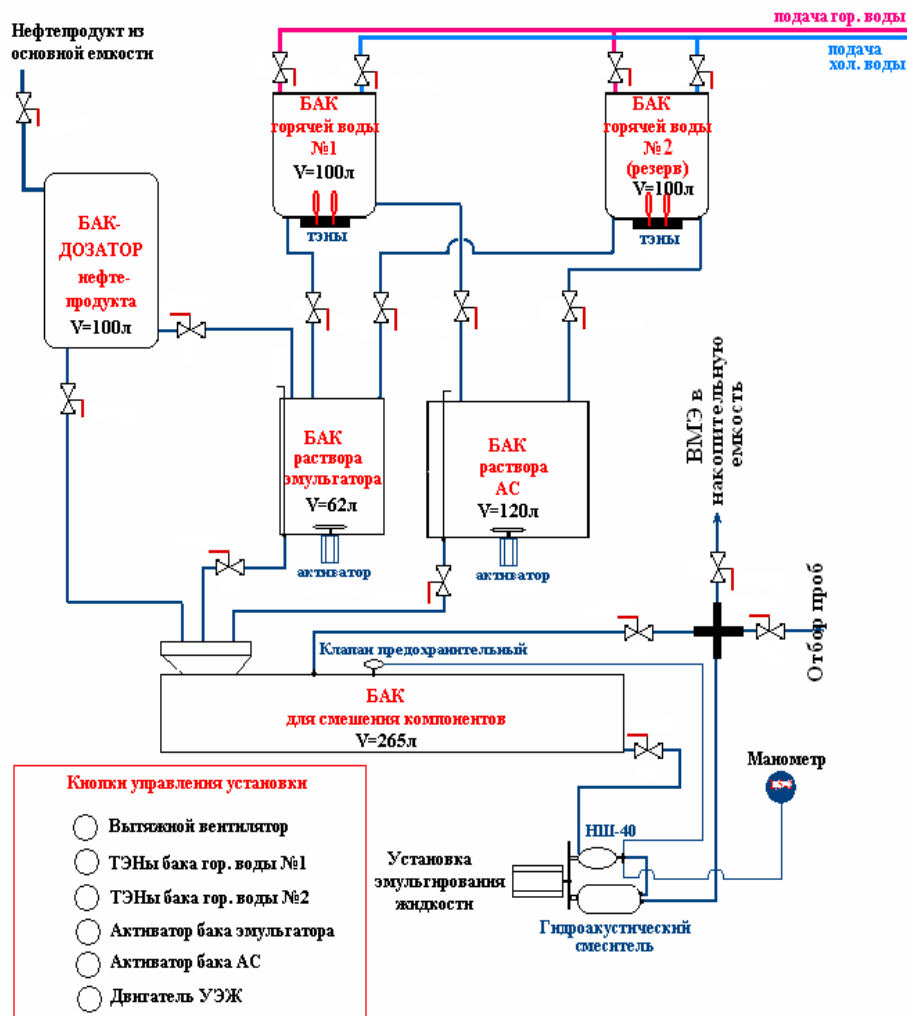


Рисунок 3. Технологическая схема изготовления ВМЭ

В отличие от мини-заводов по производству порэммитов и других иностранных аналогов, на которых применение дорогостоящего оборудования импортного производства достигает 60-70%, на стационарном комплексе приготовления эмульсии для гранулиата Э полностью задействовано оборудование отечественного производства с некоторыми внесёнными специалистами КГЦВР технологическими изменениями. В большинстве случаев импортное оборудование не сочетается с отечественной сырьевой базой и в последствии подлежит реконструкции, на что также затрачивается немало материальных средств и усилий.

Установленное на комплексе приготовления водомасляной эмульсии для гранулиата Э оборудование является по своим параметрам практически универсальным, что позволяет приспособить его к аналогичному технологическому процессу приготовления ВМЭ для Гранулиата ЭМ. Ярким тому примером послужила совместная разработка специалистов АО «ССГПО» и Казахского государственного научно-

производственного центра взрывных работ по разработке водоустойчивой модификации гранулиата Э – гранулиата ЭМ, что обусловлено необходимостью повышения эффективности используемых на горнодобывающих предприятиях Казахстана простейших аммиачно-селитренных взрывчатых веществ и расширения области их применения. Главным отличием разработанной водоустойчивой модификации гранулиата Э от его предшественника является усовершенствованная водомасляная эмульсия, позволяющая применять гранулиат ЭМ в обводнённых скважинах без предварительного их осушения. Состав и характеристики эмульсии приведены в таблице 1.

Эмульсия для гранулиата Э и ЭМ не является взрывчатым веществом или взрывоопасным его компонентом в отличие от эмульсии порэммита. После изготовления эмульсия направляется на производство гранулиата или в накопительную емкость, откуда в транспортно зарядную машину.

Таблица 1. Составы и характеристик ВМЭ

Наименование показателей	Наименование эмульсия для		
	Гранулит Э	Гранулит ЭМ	Порэммит
Массовая доля компонентов:			
Аммиачная селитра	28-32	56-64	62
Натриевая селитра	-	-	18
Нефтепродукт	36-38	14-20	5
Вода	28-32	20-24	15
Эмульгатор	2-4	0,5-2,5	2
ГГД	-	-	-
Нитрат натрия			7,5
Вода			92,5
Внешний вид	Подвижная однородная масса, не прозрачная от белого до коричневого цвета.	Малотекучая, вязкая однородная масса, непрозрачная от белого до кремово-коричневого цвета.	Пластичная масса от светло-бежевого до коричневого цвета
Плотность, кг/м ³	950-1050	1180-1230	1000-1200
Водоустойчивость	не растворима в воде	не растворима в воде	не растворима в воде
Ориентировочная цена, \$	200-300	300-450	700-1000

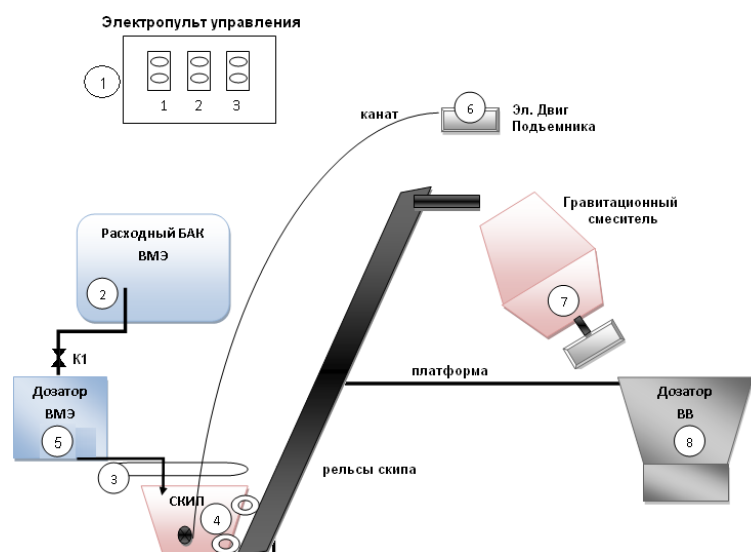
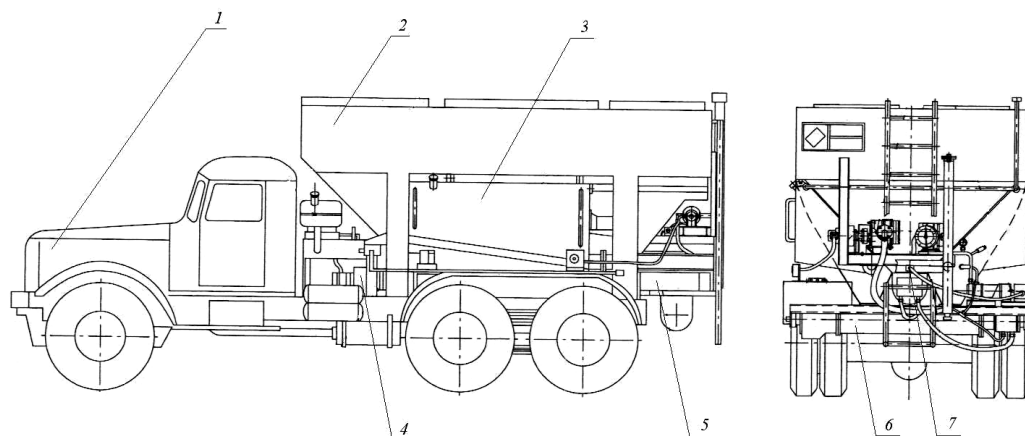


Рисунок 4. Изготовление Гранулита Э на стационарном пункте

Изготовление Гранулита Э и ЭМ возможно непосредственно на пункте с применением гравитационного смесителя, непосредственно на блоке возможно ручное изготовление или в процессе транспортирования в транспортно зарядной машине типа МЗ-3Б и МЗ-4А. применение транспортно зарядной машины позволяет снизить количество перевозки ВВ так как из двух невзрывчатых компонентов ВМЭ и АС мы получаем в ВВ непосредственно над скважинной на блоке. Аммиачная селитра из бункера по продольному питателю поступает на выдвижной пи-

татель где из форсунки разбрызгивается ВМЭ и происходит смешение в процессе транспортировки шнеком и последующая зарядка скважины. Транспортные машины МЗ-3Б прошли модернизацию некоторых узлов и агрегатов, что позволило использовать существующий парк транспортно зарядных машин под приготовление гранулита Э и ЭМ, что ускорило внедрение Гранулита Э на горнодобывающие предприятия. Транспортно- зарядная машина МЗ-3Б приведена на рисунке 5.



1- Шасси автомобиля, 2- Бункер для сухого компонента, 3- Баки для жидких компонентов, 4- Раздаточная коробка, 5- Продольный питатель, 6- Выдвижной питатель, 7- Форсунка

Рисунок 5. Транспортно-зарядная машина МЗ-3Б

С 1993 по 2008г. было разработано более 13 составов высокоэффективных гранулированных и водоэмульсионных ВВ. Разработаны различные технологии и оборудование (механизмы) для изготовления и применения простейших гранулированных, в том числе и эмульсионных ВВ на местах потребления: на стационарных комплексах и переносных установках, с применением транспортно-зарядных машин и в процессе пневматического заряжения шпуров и скважин.

По требованию предприятия разработаны и прошли комплекс испытаний эмульсионные граммониты и проведена работа по разработке и производству промышленных шашек детонаторов в том числе и с использованием продуктов утилизации.

Для применения Гранулита Э и ЭМ в обводненных скважинах в весьма крепких породах иногда необходимо произвести сенсбилизацию ВВ. Решения

данной проблемы является включение в состав гранулитов чешуированного (гранулированного) тротила от 5 до 21 %.

Эмульсионные граммониты при снижении стоимости (1 т ВВ в среднем на 120-140 долларов США), обеспечивают сохранение энергетических характеристик по отношению к штатному граммониту 79/21 и значительно расширяют возможности применения простейших ВВ изготавливаемых на предприятиях.

Новые взрывчатые вещества, техника и технологии их изготовления защищены 30-ю патентами Республики Казахстан и Российской Федерации и нашли широкое применение при производстве взрывных работ. Количество производства ВВ по разработкам КГЦВР за 2009 год по сравнению с другими взрывчатыми веществами на рынке Казахстана приведена на рисунке 6.

Таблица 2. Физико-химические и взрывчатые показатели Гранулита ЭМ

№	Наименование показателей	Значение показателей		
		ЭМ-30	ЭМ-40	ЭМ-50
1	Теплота взрыва (кДж/кг)	3750	3790	3690
2	Кислородный баланс, %	1,4	минус 2,5	минус 11,1
3	Объем газов, л/кг	975		
4	Бризантность в стальном кольце от тротиловой шашки номинальной массой 5 г, мм	Не менее 15		
5	Скорость детонации в стальной трубе диаметром 77 мм, км/с	3,5		
6	Критический диаметр в бумажных патронах, мм	100	120	120
7	Чувствительность к удару по ГОС 4545-88 нижний предел, мм частота взрывов, %	500 0		
8	Чувствительность к трению, МПа	Более 300		
9	Чувствительность к КД и ДШ	недостаточная		
1	Содержание ядовитых газов в пересчете на СО, л/кг	66,1		
1	Температура воспламенения при постоянной температуре с задержкой 1 мин, °С	250		
1	Физическая стабильность (потери жидкой фазы в течение 6 суток), %	0		

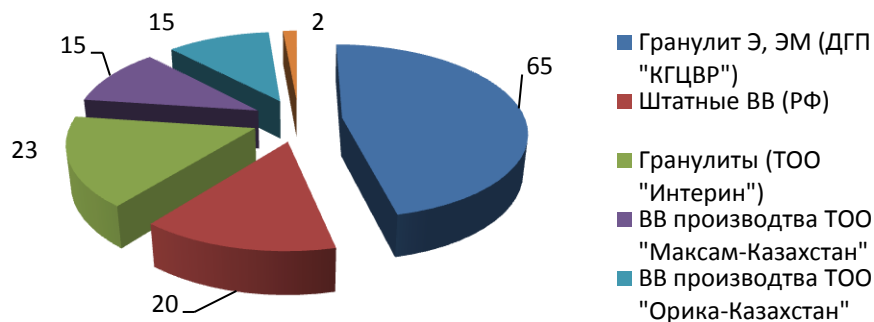


Рисунок 6. Потребление взрывчатых веществ в Республике Казахстан (тыс. тон)

Надежность детонации зарядов малочувствительных гранулированных и водонаполненных взрывчатых веществ зависит от правильного выбора типа детонатора и качества выполнения технологии инициирования.

При подборе промежуточного детонатора исходят из необходимости создать импульс ударной волны с давлением, равным или несколько большим давления стационарной ударной волны, которое возникает в инициирующем заряде. Шашки из прессованного тротила являются самыми дешевыми из промежуточных детонаторов. Однако, они пористы и при погружении в воду постепенно намокают. При намокании с поверхности их канала, они снижают чувствительность к детонирующему шнуру, особенно если его нити неплотно прилегают к стенкам канала шашки или неравномерно детонируют.

Литые шашки из тротила (Т-500Л-К, Т-500Л-КГ) не получили широкого распространения, так как при положительном факторе – повышение водостойкости по отношению к прессованным, значительно снижается восприимчивость к детонации от детонирующего шнура и капсюля детонатора.

В 2003 году КГЦВР для удовлетворения потребности рынка были начаты работы по разработке промышленных шашек детонаторов. Результатами работ стала разработка линейки шашек детонаторов семейства ТПУ (ТПУ-220, ТПУ-500, ТПУ-720 и Т.ПУ-1000), которые в период 2008 и 2009 году прошли полный комплекс испытаний и получили допуск к постоянному применению на горнодобывающих предприятиях. Шашки ТПУ представляют собой гибрид прессованного и литого тротила и обладают свойствами превосходящими характеристики просто прессованных или литых шашек. В основе лежит сенсibilизатор выполненный из прессованного тротила (гексогена, тэна) окруженный по периметру менее чувствительным литым тротилом. Применение данной компоновки позволяет повысить безопасность и получить шашку с лучшими характеристиками.

По аналогии с ТПУ разработаны гексогенсодержащие шашки для проведения взрывных работ и сейсморазведки под наименованием ТГУ-1000. В качестве сенсibilизатора используются продукты утилизации боеприпасов шашечного снаряжения.



Рисунок 7. Шашки детонаторы семейства ТПУ

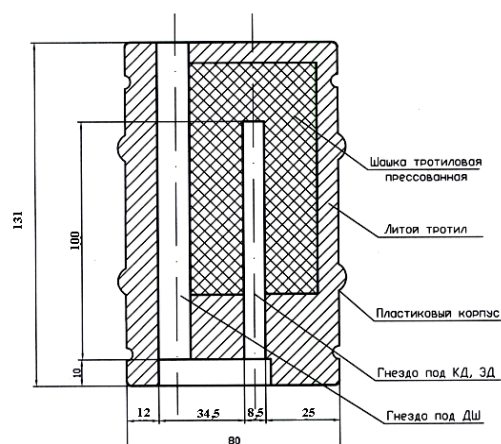


Рисунок 8. Схема шапки детонатора ТПУ-100

Проделанная работа коллектива и разработанные взрывчатые материалы и технологии их изготовления позволили обеспечить горнодобывающие предприятия отечественными взрывчатыми материалами, снизить зависимость от импортных поставок и способствовать независимости страны и повышению ее компетенции в сфере производства взрывчатых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масыгин Д.Г. Пустовалов И.А. «О технико-экономической эффективности эмульсионных взрывчатых веществ» Материалы II Международной НПК «Современное состояние и перспективы развития горнодобывающих отраслей промышленности / Алматы, РГП «НЦКПМС РК», 2004 г.
2. Масыгин Д.Г. Пустовалов И.А. «Перспективы применения взрывчатых материалов на основе утилизированных из боеприпасов ВВ на горнодобывающих предприятиях Казахстана» Алматы, бюллетень НИБ «Взрывное дело», №1-2, 2006 г.
3. Масыгин Д.Г. Ерофеев И.Е. Патент РК №14451 от 15.08.2006 «Шашка детонатор».

В настоящее время КГЦВР является ведущей экспертной организацией Казахстана по проведению исследований, разработки и испытаний новых промышленных взрывчатых материалов, по разработке нормативно-технической документации и проектированию производств, связанных с приготовлением и применением взрывчатых веществ.

ТАУ КЕН КІСПОРЫНДАРЫНДА ЖАРЫЛҒЫШ МАТЕРИАЛДАРДЫ ДАЙЫНДАУ ЖҢНЕ ЕНГІЗУ

Масыгин Д.Г. Пустовалов И.А.

ҚР ҰҰО-ның Қазақ мемлекеттік ғылыми-өндірістік жарылыс жұмыстарының орталығы, Курчатов, Қазақстан

"ҚМЖЖО" ЕМК-нда қарапайым эмульсиялық гранулиттерден бастап өнеркәсіптік детонаторлардың шашкілеріне дейін әртүрлі жарылғыш материалдар жасалған, олар ҚР-ның алдыңғы қатарлы таукен өндірісі кәсіпорындарында кең көлемде қолданылады және енгізілген.

DEVELOPMENT AND INTRODUCTION OF EXPLOSIVE MATERIAL FOR MINING INDUSTRY

D.G. Massyagin, I.A. Pustovalov

Kazakhstani State Research-and-Production Center of Blasting Operations NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

ASE "KSCEO" developed different explosive materials from elemental emulsion granulites to detonator blocks, which are widely used in leading mining enterprises of the Republic Kazakhstan

УДК 669.15' 24'26-194

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Цай К.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н., Щербинина Н.В., Мережко М.С., Рубан С.В.

Институт Ядерной Физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

С помощью метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследованы деформационные изменения микроструктуры стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами до различных флюенсов (1.4×10^{19} , 1.3×10^{20} н/см², ВВР-К). Показано, что основным механизмом пластической деформации является двойникование, а развитие скольжения завершается образованием сетчато-ячеистой дислокационной структуры. Совместный анализ кривых накопления мартенситной α' -фазы и данных ПЭМ показал, что морфология мартенситных скоплений в деформированной стали и создание критических условий разрушения при больших ε связаны, прежде всего, с разной кинетикой образования α' -мартенсита.

ВВЕДЕНИЕ

Облучение нержавеющей сталей высокоэнергетическими частицами влияет на структурно-фазовое строение материала, приводит к существенному изменению его физико-механических свойств и вносит коррективы в характер эволюции дефектной структуры в ходе пост-радиационной деформации. Дополнительное упрочнение, связанное с образованием радиационных дефектов в матрице, способствует интенсивному развитию в пластически деформируемой метастабильной аустенитной стали таких аккомодационных механизмов как дислокационное каналирование, двойникование и мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение. В настоящее время исследования в области влияния повреждающей дозы (флюенса) облучения нейтронами или заряженными частицами на характеристики прочности, пластичности и механизмы изменения микроструктуры при деформации облученных металлических материалов активно развиваются [1-3]. При этом наибольшее внимание уделяется малым деформациям ($\varepsilon = 0.05-0.10$), тогда как более высокие пластические деформации, связанные с сосредоточенным, локализованным течением облученного материала (например, [4]), рассмотрены недостаточно полно. В то же время логично предположить, что степень предварительного облучения должна заметно влиять на характер процессов локализации деформации в образцах стали при высоких ε . С целью изучения такого эффекта в данной работе проводилось сравнительное исследование изменения физико-механических свойств и определение структурных особенностей при малых и больших (вплоть до разрушения) деформациях образцов аустенитной стали 12Х18Н10Т, облученных нейтронами до различных флюенсов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовали аустенитную хромоникелевую сталь 12Х18Н10Т, которая широко используется в атомной энергетике, в частности, для изготовления шестигранных чехлов тепловыделяющих сборок быстрых атомных реакторов. Химический состав стали

в состоянии поставки (в вес.%): С-0.12; Cr-17.00; Ni – 10.66; Ti-0.50; Si-0.34; Mn – 1.67; P – 0.032; S – 0.032; Fe-основа. Образцы для механических испытаний в форме двойной лопатки с размерами рабочей части $10 \times 3.5 \times 0.3$ мм маркировали, аустенизировали при 1050°C (30 минут) и облучали в центральном канале исследовательского реактора ВВР-К при температуре не выше 60°C до флюенсов 1.4×10^{19} и 1.3×10^{20} н/см². Реактор ВВР-К после реконструкции активной зоны работал на мощности 6 МВт, обеспечивая плотность потока нейтронов на уровне 3×10^{14} н/(см²с). Средний размер зерна стали после аустенизации ~ 60 мкм. Испытание образцов по схеме одноосного растяжения проводили на разрывной машине «Инстрон-1195» со скоростью деформации 8.4×10^{-4} с⁻¹ при температуре 20°C.

С целью изучения особенностей деформационно-пластического поведения облученной стали применяли методику бесконтактной оптической экстензометрии [4]. Использование данной методики, основанной на цифровой фото- или видеосъемке образца в ходе эксперимента, позволило выявить характер локализованной деформации и рассчитать зависимости «истинные напряжения - истинные деформации» для миниатюрного, непрерывно деформируемого облученного образца.

Магнитометрические исследования (с помощью феррозонда Feritoscope MD-30 Fischer) облученных стальных образцов до деформирования свидетельствовали об отсутствии в них ферромагнитной фазы. В то же время измерения, выполненные после растяжения, показали наличие в образцах ферромагнитной составляющей, распределение которой по длине образца коррелировало с величиной локальных деформаций. При этом полагали, что изменение магнитного сигнала связано с количественным содержанием в образце α' -мартенсита деформации. Вкладом других фаз, способных дать магнитный сигнал, пренебрегали. Для определения влияния облучения и деформации на упрочнение стальных образцов по длине рабочей части измерялась величина микро-

твердости по Виккерсу на микротвердомере ПМТ-3 с алмазным наконечником индентора в форме пирамидки при нагрузке на индентор 50г.

Микроструктурные исследования деформированных образцов облученной и необлученной стали проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе JEM 100-СХ при ускоряющем напряжении 100кВ. Для приготовления ПЭМ-объектов из рабочей части деформированных стальных образцов с различной локальной деформацией выбивали диски диаметром 3мм. Диски подвергали механической шлифовке с целью устранения поверхностного рельефа и возможных микротрещин (в области шейки) и электро-

полировке в электролите следующего состава: 20%НClO₄ + 80%С₂Н₅ОН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1а приведены инженерные диаграммы растяжения в координатах «напряжение σ - относительная деформация δ » для необлученных и облученных плоских миниатюрных образцов стали 12Х18Н10Т. Здесь по оси абсцисс отложено относительное удлинение $\delta = (\ell - \ell_0) / \ell_0$ (ℓ_0 и ℓ - длина образца до и после деформации). Рассчитанные из диаграмм значения характеристик прочности и пластичности исследованных стальных образцов представлены в таблице 1.

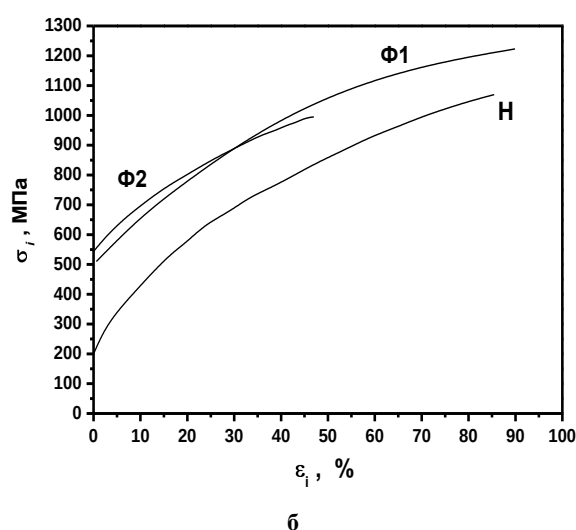
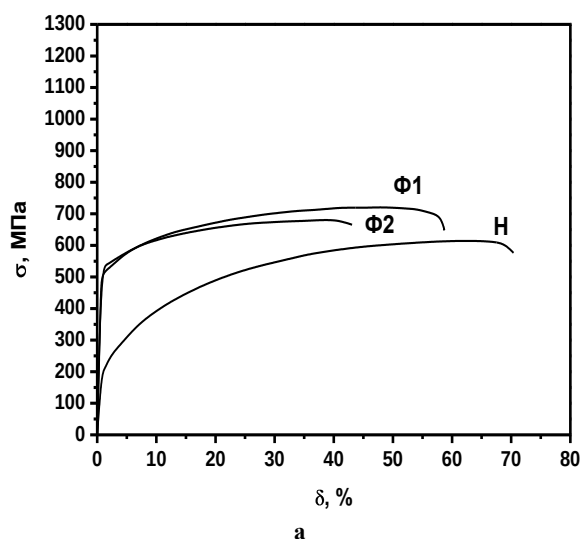


Рисунок 1. Инженерные диаграммы растяжения в координатах « σ - δ »(а) и кривые «истинные напряжения - истинные деформации» (б) для аустенитной стали 12Х18Н10Т, необлученной (Н) и облученной нейтронами до флюенсов 1.4×10^{19} и 1.3×10^{20} н/см² (Φ1 и Φ2, соответственно)

Из данных, приведенных в таблице 1 и на рисунке 1а видно, что по сравнению с исходной сталью в результате облучения предел текучести увеличился, а пластичность ($\delta_{\text{равн}}$, $\delta_{\text{полн}}$) уменьшилась. Различия на инженерных диаграммах между облученными образцами Φ1 и Φ2 не столь значительны. В частности, при росте флюенса почти на порядок значение σ_{02} увеличилось только на 8%, а пластичность упала на 25%. Микротвердость образцов (измеренная после облучения) возрастает с увеличением флюенса.

На рисунке 1б приведены кривые в координатах «локальные истинные напряжения-«локальные истинные деформации», найденные по методике [5] для необлученных и облученных стальных образцов. При этом по оси абсцисс отложены т.н. «истинные» локальные деформации $\varepsilon_i = (L_0 - L_i) / L_0$ (L_0 ,

L_i - расстояние между маркерами на выбранном участке образца до и после i-го шага деформации). Истинные напряжения находятся согласно формуле $\sigma_i = F_i / S_0 L_0 / L_i$ (F_i - сила, действующая на образец в i-й момент времени, S_0 - площадь поперечного сечения исходного образца). Из рисунка 1б видно, что для облученной стали максимальные локальные деформации ε_i , достигаемые на образце Φ2, сравнимы с инженерной величиной $\delta_{\text{полн}}$, тогда как в случае образца Φ1 - максимальная ε_i возрастает почти в 2 раза и мало отличается от случая необлученного образца. Далее локальные параметры σ_i , ε_i будем обозначать как σ , ε .

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ В ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т**

Таблица 1. Характеристики прочности и пластичности стали 12Х18Н10Т необлученной и облученной нейтронами до различных флюенсов

Маркировка	Режим обработки	$\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	σ_{Bi} , кг/мм ²	$\sigma_i^{разр.}$, кг/мм ²	$\delta_{равн}$, %	$\delta_{полн}$, %	H_{μ} , * кг/мм ²
Н	Ауст.-я 1050°С /1 час	20.0	61.0	95.0	107.0	63	70	160
Ф1	Ауст.-я + облучение 1.4×10^{19} н/см ²	50.0	72.0	105.0	120.0	49	58	296
Ф2	Ауст.-я + облучение 1.3×10^{20} н/см ²	54.0	68.0	93.0	99.4	36	43	329

* - измерение микротвердости проводилось для недеформированных стальных образцов

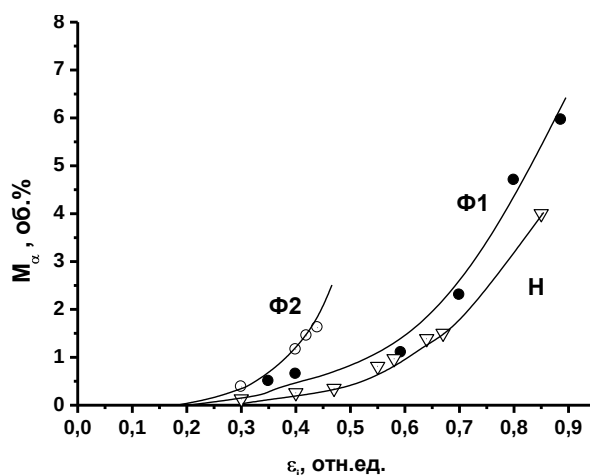


Рисунок 2. Кривые изменения содержания мартенситной фазы M_{α} в зависимости от локальной деформации для образцов стали 12Х18Н10Т необлученной (Н) и облученной нейтронами до флюенсов 1.4×10^{19} н/см² (Ф1) и 1.3×10^{20} н/см² (Ф2)

Кривые изменения содержания мартенситной α' -фазы в зависимости от локальной деформации представлены на рисунке 2. Приблизительно можно оценить области истинных деформаций - истинных напряжений начала выделения мартенситной фазы в образцах: $\epsilon \approx 0.28$ для необлученной стали при $\sigma \approx 670$ МПа и $\epsilon \sim 0.18-0.22$ при σ_i , лежащих в диапазоне значений 750-820 МПа, для случая облученных образцов. При этом ход кривых накопления магнитной фазы в образцах, облученных разными флюенсами, почти не отличается друг от друга в интервале деформаций $\epsilon \sim 0.20-0.35$. При $\epsilon > 0.35$ содержание мартенситной фазы в образце Ф2 резко возрастает, тогда как для образца Ф1 (с меньшим флюенсом) содержания мартенсита с дальнейшим ростом ϵ увеличивается равномерно примерно до $\epsilon \sim 0.6$. При этом скорость образования и накопления мартенсита в образце облученной стали с высокой пластичностью (Ф1) близка к случаю необлученной стали, тогда как в облученном образце с низкой пластичностью (Ф2) скорость образования мартенсита наибольшая. Интересно отметить, что в момент, предшествующий разрыву образца Ф2 значение феррофазы в месте локализации деформации ($\epsilon \sim 0.47$) оказалось необыкновенно большим ($\sim 7\%$).

Согласно рисунку 2 наиболее корректно воспроизводятся средние части экспериментальных кривых изменения содержания мартенситной α' -фазы.

Описание средней части кривых $M_{\alpha} \epsilon$ (за исключением точек с большими ϵ) уравнением Людвиговского и Бергера [6]

$$M_{\alpha} / (1 - M_f)_a = A \epsilon^B, \quad (1)$$

где А - коэффициент, характеризующий склонность стали к мартенситному $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращению, В - показатель, учитывающий автокаталитическую природу превращения, дает удовлетворительное согласие с экспериментом при следующих значениях коэффициентов А и В (таблицу 2). Наилучшее соответствие магнитометрических данных и зависимости (1) получено при условном разбиении экспериментальных точек на два участка: средних и больших (когда активизируются процессы локализации) деформаций, и описании каждого участка своими коэффициентами А, В. Точка «сшивки» двух расчетных кривых (1) с разными А и В для каждой разновидности образцов следующие: $\epsilon = 0.6$ (Ф1), $\epsilon = 0.44$ (Ф2), $\epsilon = 0.7$ (Н).

Таблица 2. Значения кинетических параметров $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения при деформации для образцов необлученной и облученной нейтронами стали 12Х18Н10Т

Маркировка	A_1	B_1	A_2	B_2
Н	0.06	3.3	0.07	3.6
Ф1	0.04	2.0	0.1	3.8
Ф2	0.53	4.1		

Как следует из таблицы 2, рост флюенса облучения, сопровождающийся уменьшением пластичности (Ф2), характеризуется также существенным увеличением коэффициента А, что, в свою очередь, свидетельствует о повышении склонности материала к образованию мартенсита деформации. В случае, когда пластичность после облучения сохраняется (Ф1), коэффициент А изменяется слабо. Характеристика автокатолитичности превращения В наибольшая у облученной стали-Ф2 и уменьшается для образцов Ф1, Н. Последнее, по-видимому, может свидетельствовать в пользу образования более крупных по размерам мартенситных включений в сильно облученных образцах-Ф2 по сравнению с другими рассмотренными образцами.

Особенности формирования микроструктуры при деформации. Как следует из вида «истинных» диаграмм растяжения (рисунок 1б) и кривых накопления магнитной фазы (рисунок 2), развитие процессов пластического течения и локализации деформации в стальных образцах, облученных разными флюенсами нейтронов, существенно отличаются как от необлученной стали, так и между собой. Если образец Ф1 демонстрирует высокую локальную пластичность, сравнимую с необлученным образцом, то локальная пластичность образца Ф2 (до начала инженерного разупрочнения) меньше почти в два раза. Наблюдаемое различие макросвойств должно отражаться на характере трансформации микроструктуры стали в процессе деформирования. Для выявления структурных различий пластической деформации облученных до разных флюенсов стальных образцов проводился анализ микроструктуры методом ПЭМ на участках с разной степенью локальной деформации ϵ .

Бездефектные каналы и двойники. Согласно [2,3,7] нейтронное облучение аустенитных сталей

при температурах 80-100°C приводит к образованию в матрице радиационных дефектов в виде кластеров «black dots» и мелких дислокационных петель, которые при деформации могут служить препятствиями на пути скольжения дислокаций. По достижению некоторой критической плотности дефектов имеет место взаимодействие дислокаций с мелкими барьерами, в результате которого последние «перерезаются» либо «выметаются» дислокациями, движущимися по плотно упакованным плоскостям $\{111\}\langle 110\rangle$ в ГЦК-решетке. При этом в микроструктуре по плоскостям $\{111\}$ появляются бездефектные дислокационные каналы (например, [1-3]).

В образцах Ф-2 бездефектные каналы наблюдались при малых локальных деформациях $\epsilon = 0.05-0.10$. Ширина каналов (рисунок 3а-б) изменялась от 8 до 30 нм (средняя ширина ~20 нм). Одновременно в микроструктуре присутствовали множественные дислокации в полосах скольжения вдоль направлений близких к $[\bar{1}11]$, дислокационные узлы при пересечении каналов, а также наблюдалось начало формирования микродвойников в областях, непосредственно прилегающих к каналам или в самих каналах (рисунок 3б-в). Заметим, что при малых степенях деформации плотность каналов и микродвойников, как правило, одного порядка. В микроструктуре образца-Ф2 на участке, характеризующемся более высокой средней локальной деформацией $\epsilon = 0.14-0.25$ (рисунок 3в), наблюдались лишь отдельные фрагменты бездефектных каналов, которые маскируются дислокационной структурой. Все зерна разделены на узкие объемные сегменты параллельными «стержнями» и «стенками», образованными переплетением дислокаций и микродвойниками. Тип дислокационной структуры внутри сегментов сетчатый.

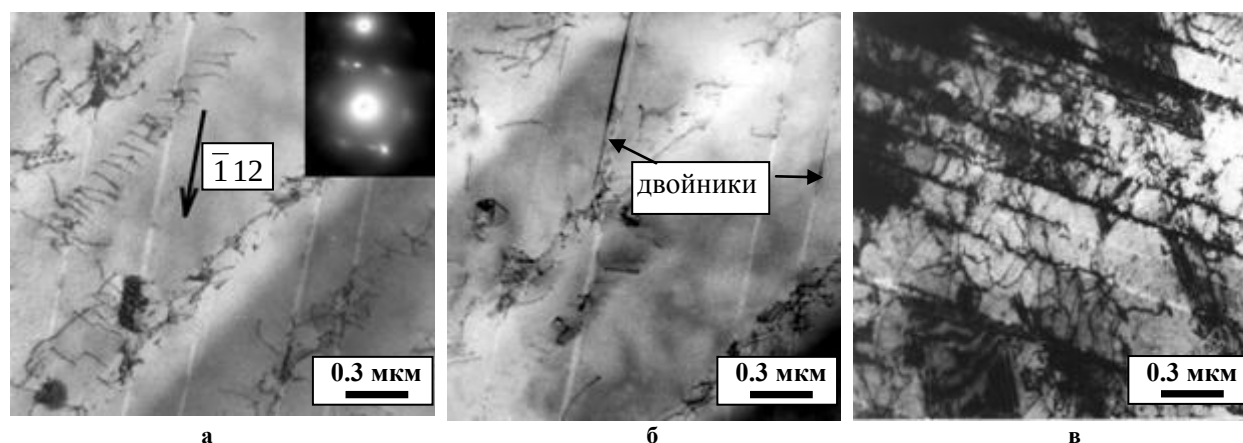


Рисунок 3. Бездефектные каналы, дислокационные скопления и двойники в образцах стали 12Х18Н10Т, облученной (1.3×10^{20} н/см²) и деформированной до $\epsilon = 0.1$ (а-б) (ось зоны электронограммы $\mathbf{n}_{\text{матрицы}} \approx [110]$) и $\epsilon = 0.25$ (в).

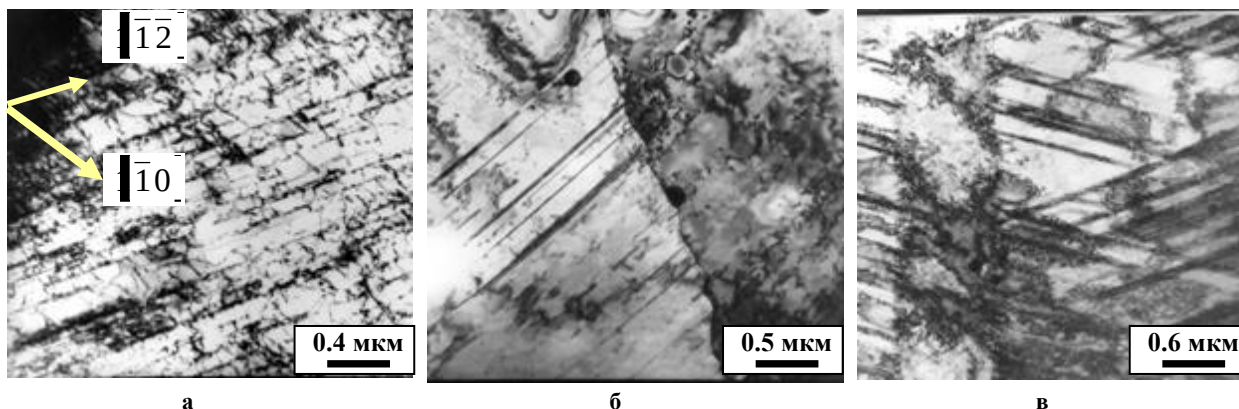


Рисунок 4. Дислокационные скопления и микродвойники в стали 12Х18Н10Т, облученной до 1.4×10^{19} н/см² при $\varepsilon = 0.12$ (а), 0.14-0.15 (б-в)

В стали, облученной меньшим флюенсом нейтронов (образцы-Ф1), при относительно малых локальных деформациях $\varepsilon = 0.03-0.13$ бездефектные каналы не наблюдались. При данных ε в микроструктуре сформировалась сетка дислокаций (рисунок 4а), основным компонентом которой являются длинные дислокации, вытянутые вдоль направлений типа $[11\bar{2}]$. При $\varepsilon = 0.15-0.18$ (рис.4б-в) в микроструктуре все еще преобладает сетчатая дислокационная структура и начинается формирование дислокационных ячеек, а также интенсивное механическое двойникование по одной или нескольким системам.

Исследование микроструктуры облученной стали при более высоких значениях локальной деформации ($\varepsilon > 0.2$) показывает, что преимущественным механизмом деформации является механическое двойникование. Дислокационная структура сегментов матрицы практически повсеместно, достигнув стадии образования сетчатой (местами сетчато-ячеистой) с мало меняющейся плотностью дислокаций, далее практически не развивается. Причиной этого является интенсивное образование и рост микродвойников и, соответственно, сокращения областей сегментов матрицы, где могли бы развиваться дислокационные скопления. При этом в микроструктуре деформированной стали, характеризующейся разными флюенсами облучения, на стадии разупрочнения на инженерных диаграммах выявлен ряд отличий.

Подробно рассмотрим особенности деформационной микроструктуры в образцах Ф2 и Ф1-типа при больших ε (т.е. после достижения предела прочности - перед разрушением). Определение локальных деформационных параметров для образца Ф2 на участках, отстоящих друг от друга на 3мм, дает близкие по величине значения $\varepsilon = 0.42-0.47$, при локальных напряжениях 960-1000 МПа. В условиях

кажущегося разупрочнения на инженерной диаграмме развитой «шейки» в образце не наблюдается, что может свидетельствовать о неоднородном и достаточно резко развитом развитии процессов локализации в отдельных группах зерен по длине рабочей части образца (область равномерной деформации) при относительно невысоких средних локальных ε . Данное предположение подтверждается ПЭМ-анализом микроструктуры близко расположенных участков деформированного образца Ф2-типа (рисунок 5а-в). Как видно из снимков, на исследованных участках весь аустенит оказался двойникованным, т.е. имеющим в случае (а, б) один пакет микродвойников и в случае (в) – два пакета (практически не пересекающихся). Отличие микроструктуры на указанных участках заключается в величине плотности двойниковых пластин: $0.4 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ для участка на рисунке 5а и $\geq 1.2 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ для участков на рисунке 5б-в, что позволяет охарактеризовать их как участки «свободного» и аккомодационного (стесненного) двойникования, соответственно. На стыке и пересечении различных формирующихся пакетов двойников имеет место существенное повышение уровня упругих напряжений [8], в результате чего на этих участках в процессе деформирования могут реализовываться напряжения, заметно превышающие средние локальные σ . Можно также предположить, что локализованные области стесненного аккомодационного двойникования практически лишены возможности дальнейшей пластической деформации без угрозы нарушения целостности материала. Заметим, что чаще всего такие области расположены по границам зерен и двойников отжига. По-видимому, можно считать, что наиболее вероятными местами зарождения микротрещин и последующего разрушения облученной деформируемой стали являются приграничные участки кристаллитов и двойников отжига.

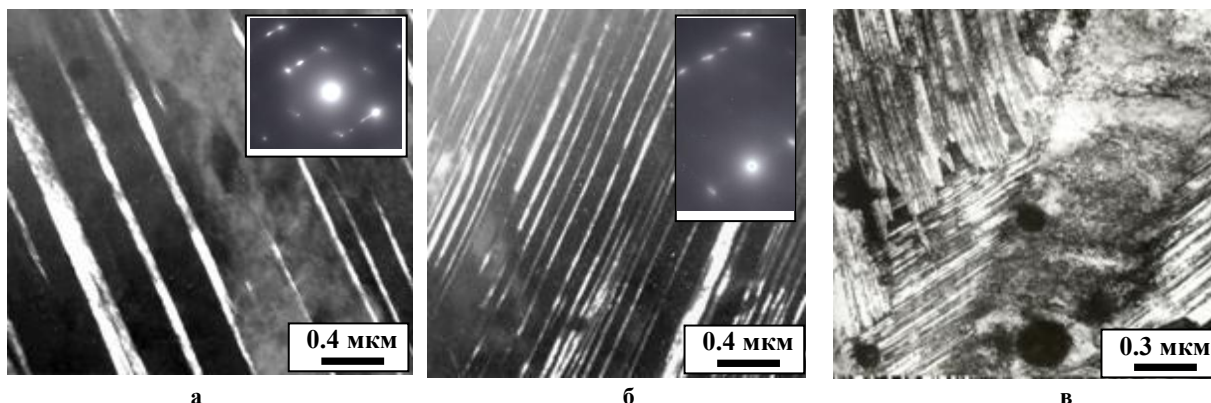


Рисунок 5. Деформационные микродвойники в стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами ($1.3 \times 10^{20} \text{ н/см}^2$, $\varepsilon = 0.42-0.47$):
темное поле (ТП) в рефлексе двойника $(\bar{1}11)_\alpha$ ($\mathbf{n}_{\text{матрицы}} = [110]$) (а)
и в рефлексе $\bar{3}31_\alpha$ ($\mathbf{n}_{\text{матрицы}} = [123]$) (б); в – снимок в светлом поле (СП)

Для образцов типа Ф1, характеризующихся более широким разбросом значений локальных характеристик: $\varepsilon=0.3-0.9$, $\sigma=910-1200$ МПа, начиная с $\varepsilon \geq 0.3$, преимущественно наблюдалась микроструктура, близкая к изображенной на рисунке 5б и представляющая собой однородно двойникованные зерна или субзеренные области. При этом плотность микродвойников изменялась в интервале значений $0.8-1.7 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ и, в среднем, монотонно возрастала с увеличением локальной деформации. На участках с высокими локальными $\varepsilon \sim 0.8-0.9$ были выявлены области микроструктуры, характеризующиеся изгибом механических двойников, что может свидетельствовать о наличии мод кручения (рисунок 6а-б). В образце-Ф2 с меньшей пластичностью такие моды проявляются слабо (рисунок 6в).

Мартенсит деформации. ПЭМ-исследования показали, что для стали 12Х18Н10Т, как необлученной, так и после облучения, характерно неоднородное распределение по образцу индуцированной деформацией мартенситной α' -фазы. Даже на участках

с максимальной локальной деформацией мартенсит образуется достаточно фрагментарно. Как следует из кривой накопления α' -мартенсита для необлученной стали (рисунок 2) максимальное его содержание в образцах, деформированных до разрушения при комнатной температуре, не превышает 5%. Установлено, что содержание мартенсита в деформированных облученных образцах при одинаковых значениях локальных деформаций выше для облученной стали по сравнению с необлученной. В то же время интегральное количество мартенситной фазы в облученных образцах также относительно невелико.

Многие исследования деформированной растяжением необлученной стали 12Х18Н10Т (например, [9,10]) свидетельствуют о том, что при комнатной температуре α' -мартенсит является единственной мартенситной фазой – продуктом реакции по схеме $\gamma \rightarrow \alpha'$, тогда как образование ε -мартенсита с ГПУ-решеткой, а следовательно, и протекание превращений по схеме $\gamma \rightarrow \varepsilon$, $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ затруднено.

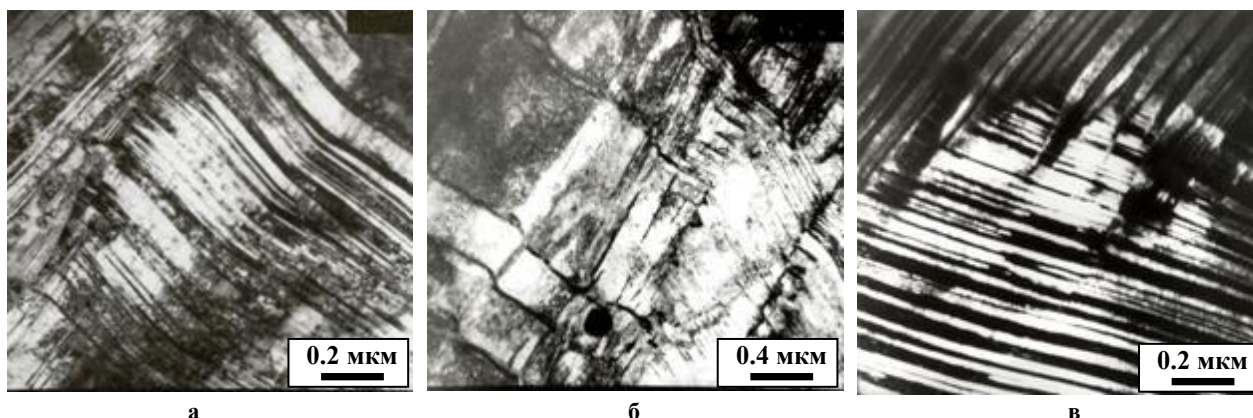


Рисунок 6. Изгиб механических двойников при деформации стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами:
а, б) $1.4 \times 10^{19} \text{ н/см}^2$, $\varepsilon = 0.8-0.9$ и в) $1.3 \times 10^{20} \text{ н/см}^2$, $\varepsilon = 0.42$.

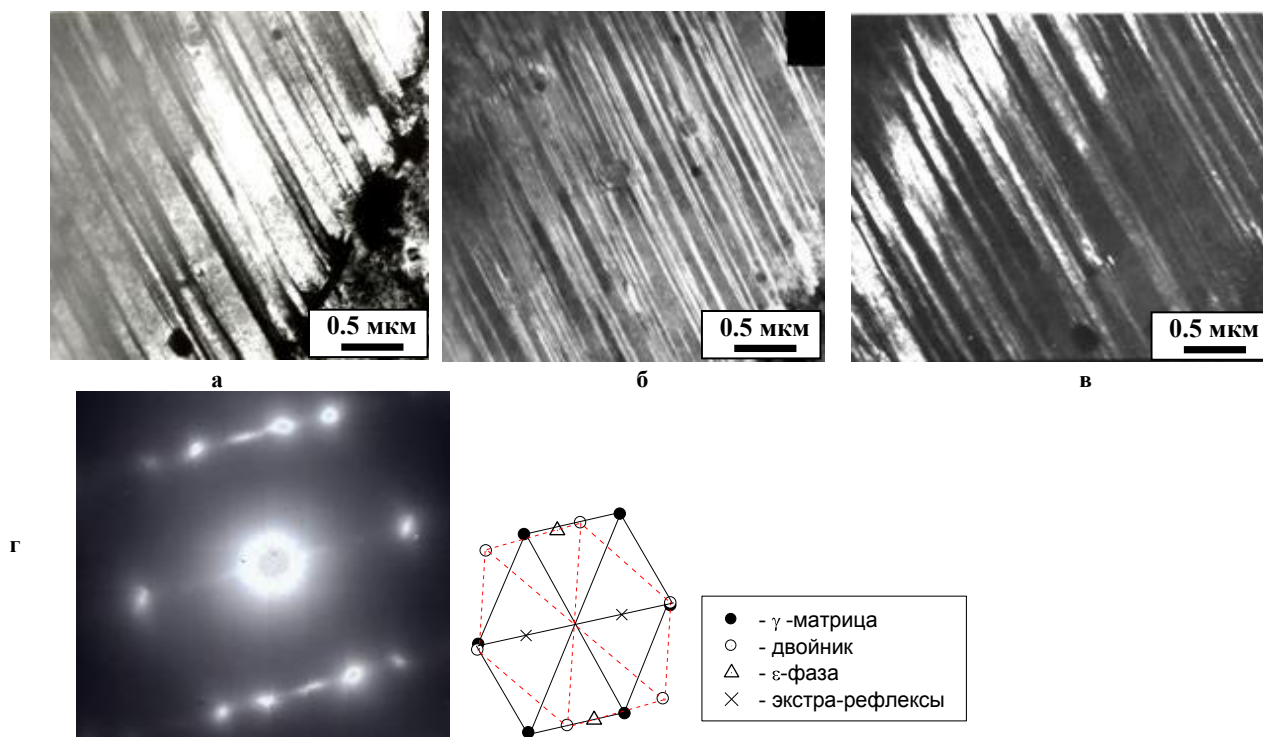


Рисунок 7. Двойники и ϵ -мартенсит в стали 12Х18Н10Т, облученной до $1.4 \times 10^{19} \text{ н/см}^2$, $\epsilon \geq$:

а) в матричном рефлексе; б) в рефлексе ϵ -фазы; в) в рефлексе двойника γ -фазы; г) электронограмма, $[1\bar{1}0]_\gamma \parallel [1\bar{2}10]_\epsilon$

В настоящей работе для деформируемой облученной стали «следы» ϵ -фазы (ГПУ) наблюдались в форме тонких плоско-параллельных пластин на когерентных границах аустенитных двойников и матрицы при обоих флюенсах (1.4×10^{19} , $1.3 \times 10^{20} \text{ н/см}^2$) (рисунок 7). Это свидетельствует о возможности превращения по схеме $\gamma \rightarrow \epsilon$ при холодном растяжении стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами. Для этого, по-видимому, необходимо достичь оп-

ределенного уровня локальных напряжений и деформаций, близких к условиям аккомодационного двойникового. Несмотря на то, что в матрице, содержащей следы ϵ -фазы, выделений α' -мартенсита обнаружено не было, структурный переход типа $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$, скорее всего, возможен в местах «стыков» разных пакетов микродвойников, при условии, что в каждом из пакетов присутствуют микропластины ϵ -фазы.

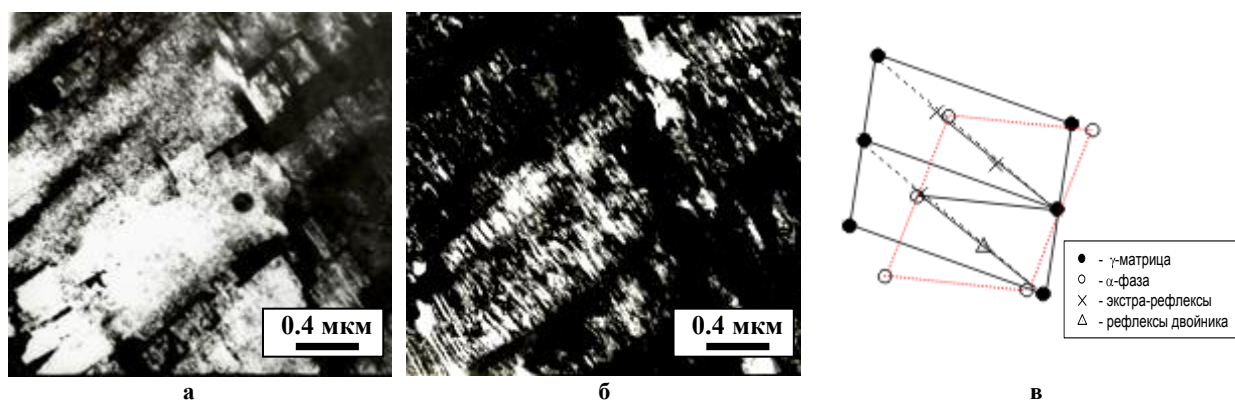


Рисунок 8. α' -мартенсит деформации в стали 12Х18Н10Т, облученной до $1.4 \times 10^{19} \text{ н/см}^2$, $\epsilon = 0.6$. а) аустенит в рефлексе $[11\bar{1}]$; б) α' -мартенсит в рефлексе $[\bar{1}10]$; в) расшифровка электронограммы: $[123]_\gamma$, $[113]_\alpha$.

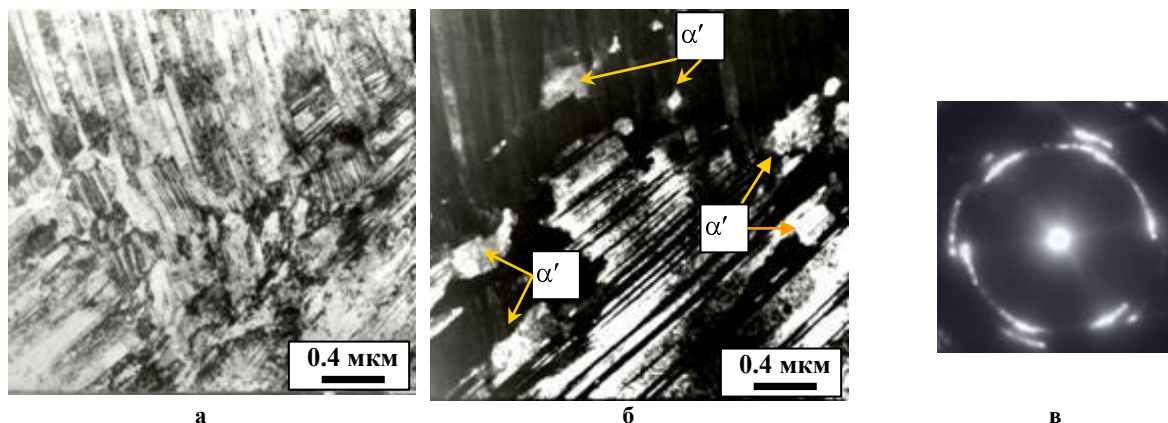


Рисунок 9. α' -мартенсит деформации на участках аккомодационного двойникового в стали 12Х18Н10Т, облученной до 1.3×10^{20} н/см², $\varepsilon=0.42-0.45$. а- СП; б-ТП; в – электронограмма

Ожидалось, что различное предварительное облучение, создающее разный уровень радиационного упрочнения, вызовет не только изменение кинетики образования и накопления ферромагнитной α' -фазы (о чем свидетельствуют диаграммы на рисунке 2), но и морфологические отличия в ее формировании. Предполагалось, что независимо от средних деформационных характеристик участка обнаружения мартенситных включений их морфология будет в значительной степени присуща всему объему образца, где могут быть созданы критические условия мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ перехода.

ПЭМ-анализ показал, что в образце-Ф1 при $\varepsilon \sim 0.6-0.7$ α' -фаза имеет вид скоплений мелких пластинчатых выделений и единичных более крупных «блочных» микрокристаллитов (рисунок 8). По-видимому, такой мелкодисперсный мартенсит соответствует наиболее «мягкому» квазиоднородному упрочнению аустенитной матрицы, не приводящему к значительному градиенту внутренних напряжений в областях, окружающих выделения α' -фазы, и, соответственно, к сильной деформации матрицы. Последний вывод подтверждается тем, что микроструктура вблизи мартенситных выделений не носит следов сверхплотного аккомодационного двойникового.

В образце-Ф2 при $\varepsilon \sim 0.43-0.47$, когда имело место резкое увеличение содержания α' -мартенсита, локализованное образование скоплений микропластин α' -мартенсита различной ориентации наблюдалось, преимущественно, на участках аккомодационного двойникового (рисунок 9). Растянutosть дифракционных узлов α и γ -фаз на электронограммах указывает на разворот на угол до 30° фрагментов аустенитной матрицы с осью зоны [110], сопряженных с ними механических двойников и выделений α' -мартенсита, связанных с γ -фазой через ориентационное соотношение Курдюмова-Закса. Заметим, что образование довольно крупных скоплений α' -фазы в прилегающих областях матрицы, где практически исчерпан ресурс пластического течения, по-видимому, порождает значительные внутренние напряжения. Последнее может

являться одной из причин намного более раннего разрушения стальных образцов Ф2-типа по сравнению с образцами Ф1. С другой стороны, если бы такой ресурс еще сохранялся, то напряжения, возникающие вблизи кристаллов α' -фазы, способствовали бы ускорению процессов двойникового прилегающей матрицы. Последнее, в свою очередь, привело бы снова к некоторому росту α' -мартенситных кристаллов и, в конечном счете, к хрупкому разрушению.

Сопоставление данных по расчетным коэффициентам $\{A_i, B_i\}$ ($i=1,2$) в полуэмпирическом выражении (1) с особенностями морфологии α' -фазы, наблюдаемой в образцах с разным флюенсом облучения, показывает, что высокие значения коэффициентов соответствуют склонности стали к образованию крупных объемных скоплений кристаллитов α' -мартенсита, причем размеры самих кристаллитов могут составлять сотни нанометров (например, образец типа-Ф2). Сравнительно небольшие значения коэффициентов A_1 , близкие по величине для образца-Ф1 и необлученной стали, свидетельствуют о невысокой склонности стали при малом флюенсе облучения к образованию мартенсита деформации. При этом случаю облученной стали отвечает более низкое значение коэффициента B_1 (первый участок аппроксимируемой кривой), что хорошо согласуется с мелкими размерами кристаллитов α' -фазы (по сравнению с необлученной сталью), скопления которых создают «мягкое» деформационное упрочнение мартенсито-содержащих областей материала. (Заметим, что на втором участке значения A_2, B_2 для стали-Ф1 становятся больше, чем для необлученной стали. Это свидетельствует о более интенсивном выделении α' -мартенсита в облученном образце-Ф1 при больших ε .) Таким образом, способность стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами до флюенса 1.4×10^{19} н/см², к образованию мелких кристаллитов α' -мартенсита, медленно и относительно равномерно накапливающихся в деформируемом образце (что обусловлено невысокой склонностью к образованию мартенсита и низкой автокаталитичностью), объясняет сохранение высокой пластичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сравнительного анализа «истинных» диаграмм растяжения, кривых накопления мартенситной α' -фазы и ПЭМ-исследований стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами до разных флюенсов 1.4×10^{19} , 1.3×10^{20} н/см² (реактор ВВР-К) и деформированной при 20°C, показано, что разным локальным деформациям ε отвечает определенная деформационная микроструктура. Последовательность стадий эволюции деформационной микроструктуры в облученной стали с увеличением ε следующая: образование бездефектных дислокационных каналов, развитие сетчатой и сетчато-ячеистой дислокационной структуры, двойникование и выделение мартенситной α' -фазы.

Показано, что для формирования бездефектных каналов в микроструктуре стали 12Х18Н10Т при малых деформациях необходим определенный уровень радиационного повреждения. В частности, каналы наблюдаются при $\varepsilon \leq 0.1$ в стали, облученной до 1.3×10^{20} н/см², тогда как в стали с меньшим флюенсом 1.4×10^{19} н/см² каналов не обнаружено.

Показано, что основным механизмом реализации пластической деформации в облученной нейтронами стали является механическое двойникование, начинающееся при малых $\varepsilon \sim 0.05-0.1$ и продолжающееся до момента разупрочнения образцов. Движение дислокаций при малых ε происходит первично по дислокационным каналам (если они есть). Разви-

тие дислокационной структуры останавливается на стадии сетчатой, сетчато-ячеистой и за счет интенсивной фрагментации матрицы двойниками при более высоких ε плотность дислокаций существенно не меняется.

Замечено, что для участков с максимально достижимой локальной деформацией (т.е. при $\varepsilon \sim 0.8-0.9$ для флюенса 1.4×10^{19} н/см² и $\varepsilon \sim 0.44-0.47$ для флюенса 1.3×10^{20} н/см²) характерно сверхплотное, так называемое «аккомодационное» двойникование. Отличительной чертой аккомодационного двойникования является в несколько раз более высокая плотность тонких механических микродвойников. Сделано предположение, что такие участки, в первую очередь, могут служить местами разрушения материала при больших ε .

Экспериментально показана возможность образования ε -мартенсита в холодно-деформируемой (при 20°C) стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами до флюенсов 1.4×10^{19} и 1.3×10^{20} н/см².

Обнаружено различие в морфологии α' -мартенсита, образующегося при деформации в стальных образцах, облученных разными флюенсами нейтронов: крупные скопления на стыках зон аккомодационного двойникования в стали с флюенсом 1.3×10^{20} н/см² и мелкие микрокристаллиты α' -фазы в стали с флюенсом 1.4×10^{19} н/см² (не обязательно соседствующие с зонами аккомодационного двойникования).

ЛИТЕРАТУРА

1. Buyn, T.S. Strain localization in irradiated materials / T.S.Buyn, N.Hashimoto // Nuclear Engineering and technology.- 2006.- V.38.-N7.-P.619.
2. Hashimoto, N. Deformation mechanisms in 316 stainless steel irradiated at 60°C and 330°C / N.Hashimoto, S.J.Zinkle, A.F.Rowcliffe et.al. // J.Nucl.Mater. –2000.-V.283-287.-P.528-534.
3. Hashimoto, N. Microstructural analysis of deformation in neutron-irradiated fcc materials / N.Hashimoto, T.S.Byun, K.Farrel // J. Nucl.Mater. – 2006.-V.351.-P.295-302.
4. Тиванова, О.В. Процессы локализации деформации, сопровождаемые структурно-фазовыми изменениями в металлах (Ni, Mo) и сплавах (12Х18Н10Т, 08Х16Н1М3, 03Х20Н45М4БРЦ), облученных нейтронами и альфа-частицами : автореф. дис... канд. физ.-мат.наук: 01.04.07/ Тиванова Оксана Викторовна. –Алматы, 2008. – 16 с.
5. Gusev, M.N. Application of digital marker extensometry to determine the true stress-strain behavior of irradiated metals and alloys / M.N.Gusev, O.P.Maksimkin, I.S.Osipov, F.A.Garner // J. ASTM Int.- 2008.- V.5.- N.4. –P.1-10.
6. Ludwigson, D.C. Plastic Behaviour of Metastable Austenitic Stainless steels / D.C.Ludwigson, J.D.Berger // J. Iron and Steel Inst. –1969. –Vol. 207, N.1. –P. 63.
7. Максимкин, О.П. Особенности пластической деформации армо-железа, облученного нейтронами / О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, К.В.Цай, Д.А.Токтогулова // Вестник НЯЦ. –2006.-Вып.1.-С.39-46.
8. Эволюция структуры и свойства металлических материалов / Под ред. А.И.Потекаева. - Томск. Изд-во НТЛ.- 2007.-444с.
9. Ибрагимов, Ш.Ш. Мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение и механические свойства стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами / Ш.Ш.Ибрагимов, О.П.Максимкин, Д.Х. Садвакасов // ФММ.- 1990.- Вып.7.- С.199-201.
10. Филиппов, М.А. Стали с метастабильным аустенитом /М.А.Филиппов, В.С.Литвинов, Ю.Р.Немировский.- М.: Металлургия.- 1988. -256с.

**НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН ТОТ БАСПАЙТЫН 12Х18Н10Т БОЛАТТАҒЫ ПЛАСТИКАЛЫҚ
ДЕФОРМАЦИЯЛАУ КЕЗІНДЕГІ МИКРОҚҰРЫЛЫМНЫҢ ТУЗІЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

Цай К.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н., Щербинина Н.В., Мережко М.С., Рубан С.В.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Әртүрлі флюенстерге шейін (1.4×10^{19} , 1.3×10^{20} н/см², ВВР-К) нейтрондармен сәулелендірген, 12Х18Н10Т болаттың микроқұрылымдық деформациялық өзгерісі жарық өткізгішті электрондық микроскопия әдісі арқылы зерттелді. Пластикалық деформацияның басты механизмі егізделген болып табылатындығы, ал сырғанау механизмінің дамуы, торланған-ұяшықты дислокациялы құрылымның түрленуімен аяқталатындығы көрсетілді. Деформирленген болаттағы мартенситті тапшылап жиналудың әртүрлі морфологиясы жоғарғы деформацияда байланысқандығын көрсетті, мартенситті α' - фазаның тамшылап жиналу қисығының бірігей анализі және жарық өткізгішті электрондық микроскопия нәтижелері көрсетті, ең маңыздысы α' -мартенситі әртүрлі кинетикада түрленуі.

**PECULIARITIES OF MICROSTRUCTURE FORMATION AT PLASTIC STRAIN
IN 12CR18NI10TI STAINLESS STEEL IRRADIATED BY NEUTRONS**

K.V. Tsay, O.P. Maksimkin, M.N. Gusev, N.V. Sherbinina, M.S. Merezko, S.V. Ruban

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

Using the transmission electron microscopy (TEM) the deformation changes in microstructure of 12Cr18Ni10Ti steel irradiated by neutrons up to various fluences (1.4×10^{19} , 1.3×10^{20} n/sm², WWR-K) were investigated. It was shown that the basic mechanism of plastic strain is twinning whereas slip development is confined by formation of network-cell type of dislocation structure. The mutual analysis of diagrams of martensitic α' -phase accumulation and TEM-data showed that the morphology of martensite aggregates in deformed steel and creation of critical conditions at large strains connected primarily with different kinetics of α' -martensite formation.

УДК: 539.21:539.12.04

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРНОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Алиев Б.А., Козтаева У.П.

Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби, Алматы

Исследованы процессы структурной и механической релаксации стеклотекстолитов марок СТ-II и СТФ-2, облученных различными дозами высокоэнергетических электронов. Определены температуры структурных переходов из стеклообразного в высокоэластическое состояние в полимерной матрице и межфазной области композитов. Обнаружено, что характер ионизирующего воздействия существенно различается в материалах с металлической фольгой и без нее.

Композитные материалы на основе полимеров представляют собой системы, состоящие из двух или более фаз с четкой межфазной границей. В таких материалах усиливающие элементы (волокна, пластины) погружены в полимерную матрицу. Механические и в целом физические свойства таких материалов зависят от структуры и свойств межфазной границы. Под действием ионизирующих излучений в таких материалах протекают конкурирующие процессы структурирования и деструкции [1, 2]. Эти процессы в значительной мере определяются перераспределением энергии излучения между различными структурными составляющими композита. Особый интерес представляет изучение влияния ионизирующих излучений и других внешних факторов на свойства межфазной границы композитного материала.

Исследование процессов структурной и механической релаксации в композитных материалах методом внутреннего трения позволяет получить информацию о характере радиационных воздействий. Температурные зависимости внутреннего трения и модулей упругости в стеклотекстолитах марок СТ-II и СТФ-2 измерены на установке крутильного маятника при частоте ~ 1 Гц, в интервале температур 20 - 200°C. Стеклотекстолиты были облучены различными дозами электронов (0,1-50,0 МГр) с энергией 2 МэВ.

На рисунке 1 приведены кривые зависимости внутреннего трения и модуля сдвига от температуры для необлученных и облученных образцов стеклотекстолита марки СТ-II. Этот композит представляет собой прессованный материал, полученный пропиткой стеклоткани фенольной смолой. На спектре внутреннего трения для необлученного материала отчетливо выделяется релаксационный максимум, обозначенный как α -пик. Известно, что появление этого пика на температурной зависимости внутреннего трения, обусловлено структурным переходом полимерной матрицы композита из стеклообразного в высокоэластическое состояние, которое характеризуется размораживанием сегментальной подвижности. Максимум на кривой внутреннего трения соответствует спад значений модуля сдвига с увеличением температуры (рисунок 1б). Такое изменение модуля сдвига свидетельствует об увеличении вязкости материала.

Для облученных образцов наблюдается рост высоты и заметное смещение α -пика в область низких температур. Изменение высоты α -пика при облучении материала является количественной мерой степени радиационной деструкции или структурирования молекул полимера. Увеличение высоты пика обусловлено увеличением числа подвижных сегментов, которые возникают в результате разрывов связей в полимерной матрице, и свидетельствует о радиационной деструкции материала. Следует отметить, что под действием ионизирующего облучения снижается температура структурного перехода, обусловленного размягчением полимерной матрицы.

Кроме того, на спектрах внутреннего трения образцов, облученных до поглощенных доз $D=1$ МГр и $D=10$ МГр проявляется дополнительный пик, обозначенный как α' -пик. Этот пик характеризует релаксационный процесс в области межфазной границы композита, в которой полимер находится в связанном состоянии. Появление этого пика обусловлено воздействием облучения на связанный полимер, находящийся в области межфазной границы композита. В результате радиационной деструкции связанного полимера происходит размораживание сегментальной подвижности в области межфазной границы. Температура α' -пика меньше температуры основного α -пика, что свидетельствует о большей деструкции связанного полимера по сравнению со свободной полимерной матрицей.

В таких полимерах как эпоксидная и фенольная смолы элементами, рассеивающими энергию механических колебаний в процессах α - и α' -релаксации, являются объемные сегменты макромолекул, способные совершать термически активированные перемещения в поле внешних напряжений. В густосшитых сетчатых полимерах, таких как фенольные и эпоксидные смолы, кинетической единицей α -процесса релаксации является некоторый микрообъем v_α , который представляет собой аналог сегмента в линейных полимерах. Поэтому под размораживанием сегментальной подвижности в таких полимерах понимается размораживание подвижности молекулярного движения микрообъема v_α как целого.

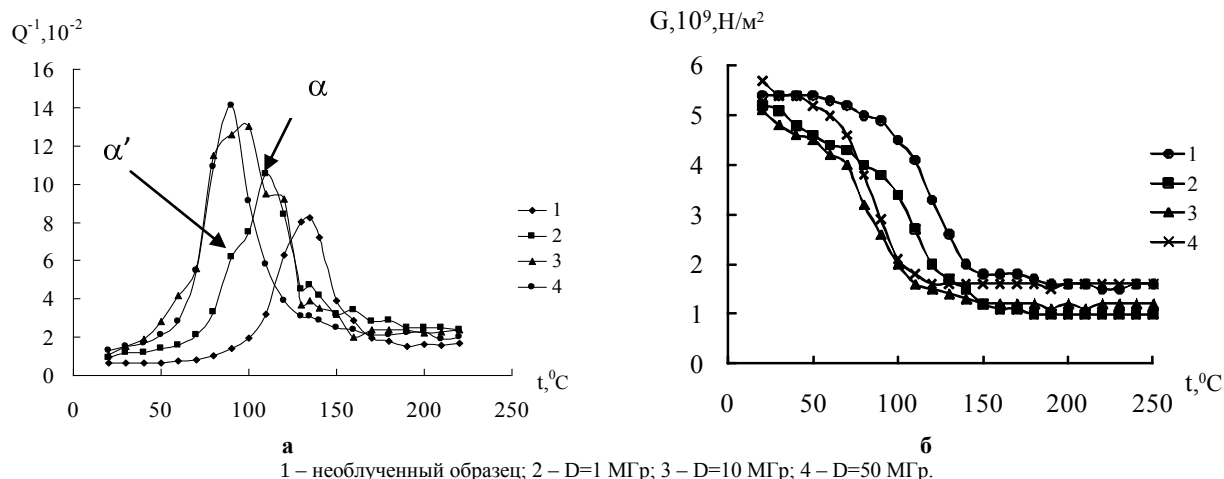


Рисунок 1. Температурные зависимости внутреннего трения (а) и модуля сдвига (б) для образцов стеклотекстолита СТ-II

На рисунке 2 приведены температурные зависимости внутреннего трения и модуля сдвига в фольгированном стеклотекстолите марки СТФ-2. Этот материал представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный из стеклоткани, пропитанной связующим на основе эпоксидной смолы и отвердителей, облицованный с двух сторон медной гальваностойкой электролитической фольгой [3]. Толщина материала составляет 0,5 мм, толщина фольги 35 мкм. Этот материал также имеет сложную гетерогенную структуру, состоящую из полимерного связующего, наполнителя и межфазной границы.

Из рисунка 2 видно, что для необлученного образца и облученных разными дозами образцов наблюдаются α -максимумы. Рисунок 2а показывает, что высота пика ВТ в фольгированном стеклотекстолите СТФ-2 возрастает с увеличением дозы облучения. Рост высоты α -пика связан с увеличением количества подвижных сегментов в полимерной матрице в результате разрыва поперечных связей под действием облучения. Модуль сдвига фольгированного композита СТФ-2 (рисунок 2б) уменьшается с температурой. Температурная область, в которой происходит падение модуля сдвига, совпадает с диа-

пазоном температур, в котором на температурной зависимости ВТ наблюдается процесс α -релаксации.

Отличительной особенностью данного материала является то, что в нем не проявляется α' максимум. Предположительно пик внутреннего трения, наблюдаемый на рисунке 2а, является суперпозицией α и α' пиков, в соответствии с которой процесс размораживания сегментальной подвижности в полимерной матрице и межфазной области происходит при одинаковых температурах. Незначительное увеличение высоты пика свидетельствует о большей радиационной стойкости фольгированного композита [4].

Сравнение температурных зависимостей внутреннего трения и модулей упругости в стеклотекстолите без металлической фольги с аналогичными зависимостями в фольгированном стеклотекстолите, показывает, что механизмы структурных превращений под воздействием облучения различны в этих двух типах композитов. Взаимодействие молекул полимерного связующего с металлом в фольгированных композитах изменяет соотношение скоростей реакции деструкции и сшивания молекул полимеров в различных фазах композита.

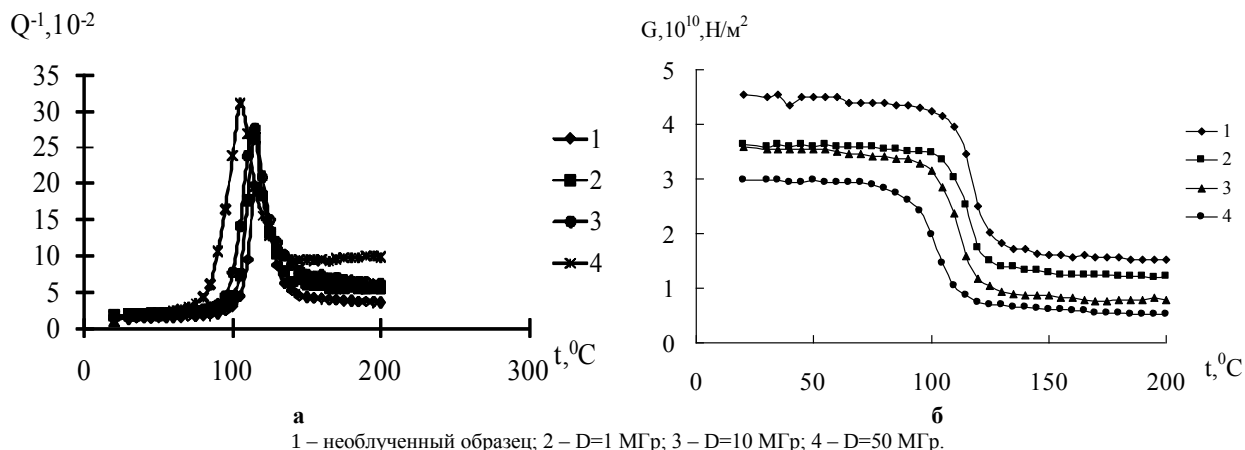


Рисунок 2. Температурные зависимости внутреннего трения (а) и модуля сдвига (б) для образцов СТФ-2

Таким образом, металлические покрытия композитов могут служить не только для улучшения механических свойств, но и для повышения их радиационной стойкости.

Известно, что для релаксационных явлений, связанных с атомной и молекулярной перестройкой, время релаксации зависит от температуры экспоненциально, т.е.

$$\tau = \tau_0 \exp (H/RT),$$

где H – энергия активации рассматриваемого процесса; τ_0 – некоторый временной параметр [4].

Из температурных зависимостей внутреннего трения для образцов стеклотекстолитов определены основные количественные характеристики процессов α -, α' -релаксации, такие как температура перехода (размягчения), энергия активации и временной параметр τ_0 (таблица 1, 2).

Таблица 1. Релаксационные переходы и релаксационные константы стеклотекстолита марки СТ-II

Релаксационный переход	D, МГр	T, °C при 1 Гц	H, кДж/моль (±10%)	τ_0 , с (± 10%)
α - процесс	0	135	100,3	$1,88 \times 10^{-14}$
	1	105	92,6	$2,02 \times 10^{-14}$
	10	95	90,2	$2,08 \times 10^{-14}$
	50	90	89,6	$2,1 \times 10^{-14}$
α' - процесс	0	135	100,3	$1,88 \times 10^{-14}$
	1	90	88,8	$2,11 \times 10^{-14}$
	10	85	8,76	$2,14 \times 10^{-14}$
	50	90	89,6	$2,1 \times 10^{-14}$

Таблица 2. Релаксационные переходы и релаксационные константы стеклотекстолита СТФ-2

Релаксационный переход	D, МГр	T, °C при 1 Гц	H, кДж/моль (±10%)	τ_0 , с (± 10%)
α - процесс	0	115	95,02	$1,97 \times 10^{-14}$
	1	115	95,03	$1,97 \times 10^{-14}$
	10	115	95,16	$1,97 \times 10^{-14}$
	50	105	92,61	$2,02 \times 10^{-14}$

Получены количественные характеристики радиационных структурных изменений и термических переходов в различных структурных составляющих композитов. Наблюдаемые релаксационные процессы идентифицированы и связаны со структурными изменениями в полимерной матрице и пограничной межфазной области композитов.

Так как основной причиной ограничения сегментальной подвижности в стеклообразном состоянии

полимера является наличие поперечных связей между макромолекулами, изменение высоты пика внутреннего трения, связанного со структурным переходом в полимере, является наиболее точной количественной характеристикой инициированных ионизирующим излучением процессов деструкции-структурирования макромолекул.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожамкулов, Б.А. Радиационные эффекты изменения механических свойств полимеров и композитов/ Б.А. Кожамкулов. – Алматы, 1997.-С. 144.
2. Зайкин, Ю.А. Температурные зависимости внутреннего трения и модуля сдвига в стеклотекстолитах, облученных электронами/ Ю.А. Зайкин, Б.А. Кожамкулов, У.П. Козтаева // Механика композитных материалов. - 1997.-Т.33, № 4. - С.548-553.
3. ТУ – 16-503. Стеклотекстолит теплоустойчивый фольгированный.
4. Zaykin, Yu.A. Radiation-Induced Processes and Internal Friction in Polymer-Based Materials/ Yu.A. Zaykin, U.P. Koztaeva // Radiat. Phys. and Chem. – 2000. - V. 58, issue 4. - P. 387-395.

КОМПОЗИТТІК МАТЕРИАЛДАРДАҒЫ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ РЕЛАКСАЦИЯ ПРОЦЕСТЕРІНЕ ИОНДАУШЫ СӘУЛЕШЫҒАРУДЫҢ ӘСЕРІ

Алиев Б.А., Козтаева У.П.

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы

Бұл жұмыста жоғарғыэнергетикалық электрондармен әртүрлі дозамен сулелендірілген СТ-II и СТФ-2 маркадағы шынытекстолистердің механикалық және құрылымдық релаксация процесі қарастырылған. Полимерлік матрица және композиттердің фаза аралық аумақтарында шынытекстес күйден жоғарысызылымды

күйге құрылымдық ауысудың температурасы анықталған. Иондаушы әсерлердің сипаттамасы материалдарда металды фольгамен және фольгасыз күйінде әртүрлі болатыны байқалды.

**THE IONIZING RADIATION IMPACT ON THE PROCESSES
OF STRUCTURAL AND MECHANICAL RELAXATION IN COMPOSITE MATERIALS**

B.A. Aliyev, U.P. Koztayeve

Al-Farabi Kazakhstan National University, Almaty

The paper presents the results of research of the processes of structural and mechanical relaxation of the glass-cloth-base laminates ST-II and STF-2 irradiated with various doses of high-energy electrons. The temperatures of structural transitions from vitreous to highly elastic state of the polymer matrix and the interfacial area of composites have been determined. It is found out that the nature of the ionizing effects varies in the materials with metal foil and without it.

УДК: 539.21:539.12.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ВЕЛИЧИН ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ НАКАПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Алиев Б.А.

Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби, Алматы

В работе представлена возможность оценки порядка параметров при решении системы дифференциальных уравнений, которая описывает кинетику накопления точечных радиационных дефектов в металлических средах. В частности, при рассмотрении нашей эмпирической модели это позволило учитывать термическую концентрацию точечных дефектов.

Во многих практически важных случаях эволюция дефектной структуры [1] в металлических средах при облучении электронами или гамма-квантами может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_i}{dt} = (K - K_i C_i - j m C_i C_v) (1 - m C_v) \\ \frac{dC_v}{dt} = (K - K_v C_v - j m C_i C_v) (1 - m C_i) \end{cases}, \quad (1)$$

где C_i , C_v – атомные концентрации межузельных атомов и вакансий, соответственно; K – скорость генерации дефектов; m – эффективное число узлов в зоне рекомбинации дефекта; j – эффективная частота скачков межузельных атомов; K_i , K_v – скорости аннигиляции дефектов на постоянных стоках для межузельных атомов и вакансий, соответственно.

Система уравнений (1) описывает процесс генерации точечных дефектов, их аннигиляцию на линейных стоках и взаимную рекомбинацию. Первый множитель в правых частях уравнений многократно описывались многими авторами [1-3], но второй множитель ранее рассматривался только в наших работах и описывает влияние атермической рекомбинации на процесс накопления точечных дефектов. Учет атермической рекомбинации вносит ощутимый вклад при больших концентрациях точечных дефектов и влияет на скорость всех процессов, но самое важное то, что она позволяет более корректно определять концентрацию точечных дефектов при больших скоростях введения дефектов. При оценке параметров системы уравнений мы предполагали, что облучение проводится при комнатных температурах.

Получение аналитического решения данной системы уравнений является довольно сложной задачей, и часто решения находят в асимптотическом виде. Наш интерес к задаче заключается не только в поиске решений системы уравнений, но и качественном анализе [4] ее «поведения» при изменении параметров системы (1).

Максимально возможные значения атомной концентрации точечных дефектов ограничены спонтан-

ной рекомбинацией и могут изменяться в пределах от 0 до 1/ m . Дальнейшее увеличение концентрации приведет к разрушению материала, и рассматриваемая система уравнений теряет смысл.

После проведения линейных преобразований систему уравнений можно привести к безразмерному виду [2,3]:

$$\begin{cases} I' = \theta - \sigma I - IV & 1 - V \\ V' = \theta - \sigma^2 V - IV & 1 - I \end{cases}, \quad (2)$$

с нулевыми начальными условиями, где θ – управляющий параметр, который определен в интервале значений от нуля до m/j ; $\theta = Km/j$; σ – малый параметр, равный Kv/j . Значения I , V меняются от нуля до единицы, и эти области значений параметров определяются, исходя из физически разумных значений концентраций C_i , C_v ; время t определено как безразмерное «замедленное» время $\tau = \sigma t$.

Качественный анализ системы позволил определить характер и эволюцию положения точек равновесия на фазовой плоскости I, V (рисунок 1).

Предварительный расчет показал, что положения равновесия RBC, RBD, RAD являются седлами, а точка RAC является узлом. При достижении управляющего параметра $\theta = \sigma + \sigma^2$, положения равновесия RBD и RAC объединяются и образуют сложное состояние равновесия седло-узел. Дальнейшее увеличение параметра θ выходит за рамки физически разумных значений мощности дозы.

Определение характера положений равновесия сопровождалось расчетом сложных и громоздких выражений, которые необходимо было упрощать и при этом учитывать «физическую разумность» этих преобразований. Чаще всего в этих случаях определяется малый параметр данной системы уравнений, и по нему проводят разложение тех или иных выражений. Определение малого параметра сводится к задаче определения порядка величин параметров системы. Один из таких методов представлен в данной работе.

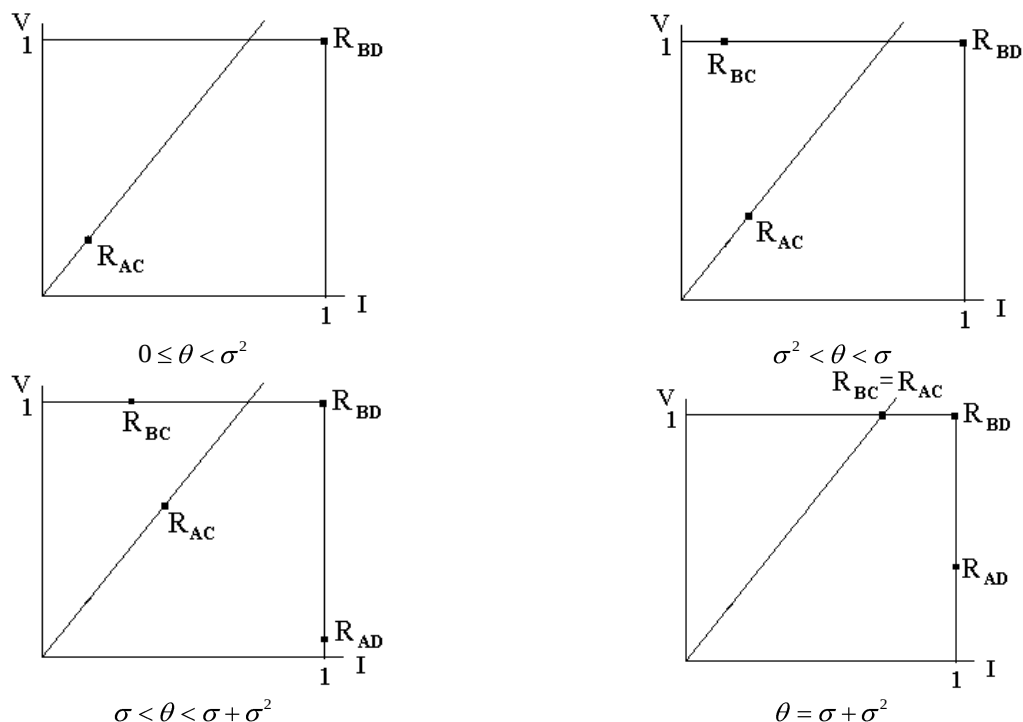


Рисунок 1. Точки равновесия системы (1) на фазовой плоскости

Часто возникает вопрос: что означает «число a имеет порядок 10^{-3} или $a \sim 10^5$ »? Определим число Π_a ε, χ - порядок числа $\chi > 0$ относительно масштаба $a > 0$ с показателем ε следующим образом:

$$\Pi_a(\varepsilon, \chi) = \left\lfloor \frac{1}{2\varepsilon} \log \frac{\chi}{a} + \frac{1}{2} \right\rfloor, \quad (3)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ - целая часть числа.

Расшифруем определение (1.1.3). Пусть $\Pi_a(\varepsilon, \chi) = \kappa \in \mathbb{Z}$, тогда

$$\kappa \leq \frac{1}{2\varepsilon} \log \frac{\chi}{a} + \frac{1}{2} < \kappa + 1. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что $a \cdot 10^{(2\kappa-1)\varepsilon} \leq \chi < a \cdot 10^{(2\kappa+1)\varepsilon}$.

Прообразом числа κ , таким образом, служат полуинтервалы $[a \cdot 10^{(2\kappa-1)\varepsilon}, a \cdot 10^{(2\kappa+1)\varepsilon})$ - эти числа, по нашему определению, имеют один и тот же порядок κ .

В частности, для любого ε число a имеет нулевой порядок, и все числа полуинтервала $[a \cdot 10^{-\varepsilon}, a \cdot 10^{\varepsilon})$ тоже имеют нулевой порядок.

График функции $\Pi_a(\varepsilon, \chi)$ представлен на рисунке 2.

Из приведенного определения порядка, в частности, следует, что

$$\Pi_1(1/2; \chi) = 0 \Rightarrow \left\lfloor \log \chi + \frac{1}{2} \right\rfloor = 0 \Rightarrow$$

$$0 \leq \log \chi + \frac{1}{2} < 1 \Rightarrow \chi \in \left[\frac{1}{\sqrt{10}}; \sqrt{10} \right)$$

Чем меньше показатель ε , тем уже полуинтервалы чисел, сравнимых по порядку. Число a служит величиной, относительно которой производятся сравнения.

Выражение типа «число σ » имеет порядок 10^{-5} с точностью $1/2$, для нас будет иметь следующий смысл:

$$\begin{aligned} \Pi_1(1/2; \sigma) &= \Pi_1(1/2; 10^{-5}) = \\ &= \left\lfloor \log 10^{-5} + 1/2 \right\rfloor = -4,5 = -5; \end{aligned}$$

начит $\varepsilon \in -5 \leq \log \sigma + 1/2 < -4$, откуда

$$\sigma \in \left[10^{-5,5}, 10^{-4,5} \right) = \left[\frac{1}{\sqrt{10}} 10^{-5}, \sqrt{10} \cdot 10^{-5} \right).$$

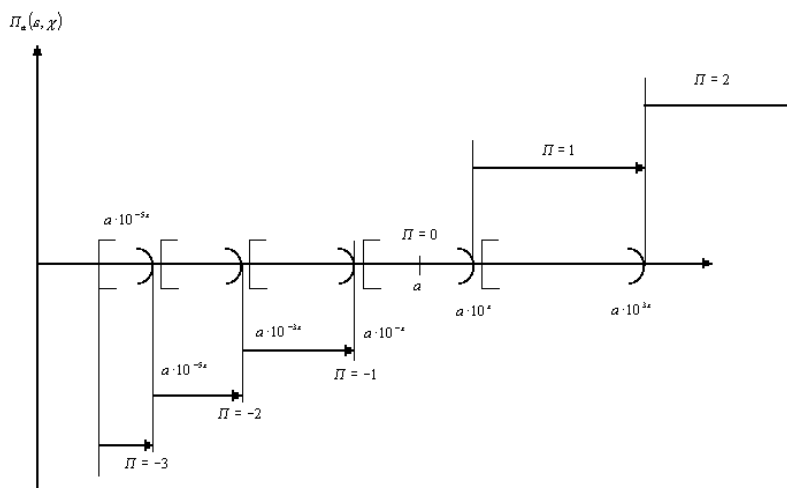


Рисунок 2. График функции $\Pi_a(\varepsilon, \chi)$

Если подобные рассуждения применить к нашей задаче, то χ - является некоторым параметром, а – это некоторое число (например, ноль), в окрестности которого определяются порядки величин; ε - число, значение которого определяет степень малости при определении порядка величины.

Изначально, при определении начальных условий мы считали термическую концентрацию дефектов пренебрежимо малой и равной нулю. Данное определение порядка параметров позволяет нам считать, что значение термической концентрации точечных дефектов может определять значение и смысл величины ε . Т.е. величина термической концентрации точечных дефектов определяет «разре-

шающую способность» нашего математического аппарата и вводит смысл в понимании малых концентраций точечных дефектов и малых значений мощности дозы облучения.

Необходимо отметить, что параметр a характеризует состояния системы и определяется отношением логарифмов управляющего параметра и малого параметра. Таким образом, a фактически учитывает соотношения внешнего фактора к структурным характеристикам облучаемого образца. Тем самым, определяя по значению a принадлежность к той или иной области на фазовой плоскости I,V в диаграмме (рисунок 2), можно качественно оценить эволюцию дефектной структуры облучаемых частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалаев, А.М. Радиационно-стимулированные процессы в металлах/ А.М. Шалаев. -М.: Энергоатомиздат, 1988. - 343 с.
2. Зайкин, Ю.А. О насыщении приповерхностных слоев кристаллов радиационными дефектами при больших дозах электронного и гамма-облучения/ Ю.А. Зайкин, Ш.Ш. Сарсембинов, А.С. Потанин, Б.А. Алиев// Радиационная физика твердого тела: матер. IX Межнац. совещ., Севастополь, Россия, июнь 1999. – М., 1999. - С.45-49.
3. Зайкин, Ю.А. Особенности радиационно-стимулированной диффузии и кинетики развития микропор в металлах/ Ю.А. Зайкин, А.С. Потанин, Б.А. Алиев// Радиационная физика твердого тела: матер. IX Межнац. совещ., Севастополь, Россия, июнь 2000. – М., 2000. - С.645-651.
4. Андронов, А.А. Качественная теория динамических систем второго порядка/ А.А. Андронов. - М.: Наука, 1966, -568с.

МЕТАЛДЫҚ ОРТАЛАРДА РАДИАЦИЯЛЫҚ НҮКТЕЛІК АҚАУЛАРДЫҢ ЖИНАЛУ КИНЕТИКАСЫН СИПАТТАУ КЕЗІНДЕГІ ПАРАМЕТРЛЕРДІҢ ШАМАСЫН АНЫҚТАУ

Алиев Б.А.

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы

Бұл жұмыста металдық орталардағы радиациялық нүктелік ақаулардың жиналу кинетикасын сипаттайтын дифференциалдық теңдеулер жүйесін шешу кезінде параметрлердің шамасын бағалау мүмкіндігі көрсетілген. Дербес жағдайда бұл біздің эмпирикалық моделді қарастыру кезінде нүктелік ақаулардың термиялық концентрациясын есепке алуды көрсетті.

**DETERMINATION OF THE ORDER OF THE VALUES PARAMETERS AT DESCRIPTION OF THE
KINETICS OF THE ACCUMULATING RADIATION POINT DEFECTS IN METALLIC ENVIRONMENT**

Aliev B. A.

Al-Farabi Kazakhstan National University, Almaty

In work presented possibility of the estimation of the order parameters at decision of the system of the differential equations, which describes the kinetics of the accumulation point radiation defects in metallic ambience. In particular, when considering our empirical model this has allowed taking into account the thermal concentration point defects.

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ТОЧЕЧНЫХ СВЯЗЕЙ

Берикханова Г.Е.

Семипалатинский государственный педагогический институт, Семей, Казахстан

В работе предложена математическая модель о вынужденных колебаниях сложных механических конструкции с точечными упругими связями. Показана непротиворечивость предлагаемой математической модели. Предложен алгоритм расчета полученной математической модели.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе изучается упругая задача о вынужденных колебаниях сложных механических конструкции – пакет прямоугольных пластин. Подобная задача о собственных колебаниях изучалась в монографии [1, стр 42], где предлагалась вариационная постановка и учитывались упругие точечные опоры и сосредоточенные массы.

Рассмотрим пакет однородных упругих изотропных прямоугольных пластин, соединенных внутренними жесткими и упругими стойками (пружинами) и нагруженных сосредоточенными массами. Пластины имеют постоянную толщину h и внутренние точечные жесткие и упругие опоры шарнирного типа, которые могут, имеет защемления. Расположение точечных связей и присоединенных масс произвольно. Массы стоек можно рассматривать как сосредоточенные. Граничные условия каждой стороне пластин одним из следующих: шарнирное опирание, защемление или свободный край. Требуется определить собственные частоты и формы поперечных колебаний пакета пластин. В качественном отношении математическая постановка этой задачи мало отличается от постановки задачи для одиночной пластины. [2]

При определении частот колебаний будем считать пластину *тонкой* (толщина мала по сравнению с остальными размерами).

Предполагая справедливость гипотез Кирхгофа – Лява, запишем известные из теории упругости зависимости между перемещениями и деформациями: [3]

$$\varepsilon_{x_i} = -z_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_{y_i} = -z_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2}, \quad \varepsilon_{x_i y_i} = -2z_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y}; \quad (1)$$

здесь z_i - координата точки в направлении, перпендикулярном к срединной поверхности, $\varepsilon_{x_i}, \varepsilon_{y_i}, \varepsilon_{x_i y_i}$ - компоненты тензора деформаций пакета пластин.

Компоненты напряжений соответственно равны

$$G_{x_i} = -\frac{E z_i}{1-\nu_i^2} \left[\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \nu_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right], \quad G_{y_i} = -\frac{E z_i}{1-\nu_i^2} \left[\frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} + \nu_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right], \quad G_{x_i y_i} = G_{y_i x_i} = -\frac{E z_i}{1+\nu_i} \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y}, \quad (2)$$

где E - модуль Юнга, а ν_i - коэффициент Пуассона для i -й пластины. Нормальная компонента G_{z_i} при поперечном изгибе мала по сравнению с G_{x_i} и G_{y_i} , поэтому полагаем $G_{z_i} = 0$.

Потенциальная энергия, накапливаемая пластиной при упругой деформации, согласно указанным выше допущениям имеет вид:

$$G = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \iiint_{V_i} G_{x_i} \varepsilon_{x_i} + G_{y_i} \varepsilon_{y_i} + G_{x_i y_i} \varepsilon_{x_i y_i} \, dx dy dz, \quad (3)$$

где V_i - объем i -й пластины. Подставляя в (3) значения компонент деформации и напряжений (1), (2) и учитывая потенциальную энергию упругих опор, получим

$$G = \frac{D_i}{2} \int_0^a \int_0^b \left[\left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right] dx dy + \frac{1}{2} C_i' W_i^2 x_i', y_i' + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L C_i^l W_i x_i', y_i' - W_{i+1} x_i', y_i'^2; \quad (5)$$

здесь $D_i = E h_i^3 [12(1-\nu_i^2)]^{-1}$ - цилиндрическая жесткость пластины, а C_i', x_i', y_i' - жесткость и координаты упругой опоры. Двойные интегралы в (5) берутся по поверхности нейтрального слоя i -й пластины.

Кинетическая энергия всей пластины с учетом присоединенных масс задается равенством

$$T = \frac{\rho h_i}{2} \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial W_i}{\partial t} \right)^2 dx dy + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q M_i^q \left(\frac{\partial W_i}{\partial t} x_i^q, y_i^q, t \right)^2, \quad (6)$$

где ρ - плотность материала пластины, x_i^q, y_i^q - координаты q -й присоединенной массы.

Рассмотрим функционал Остроградского – Гамильтона

$$L = \int_{t_H}^{t_B} T - G dt$$

на совокупности главных колебаний. Они должны удовлетворять условиям шарнирного закрепления жестких опор пластины в S точках:

$$W_i x_i^s, y_i^s, t = 0 \quad s=1, \dots, S, \quad (7)$$

где x_i^s, y_i^s - координаты s -й внутренней опоры. Если, кроме того некоторые жесткие опоры защемлены в направлениях α_s относительно оси OX , то к (7) добавляется условия

$$\frac{\partial W_i}{\partial \alpha_s} x_i^s, y_i^s, t = 0 \quad \left(s=1, 2, \dots, s_\alpha; \quad 0 \leq \alpha_s \leq \frac{\pi}{2} \right), \quad (8)$$

причем число защемлений S_α не обязательно равно числу опор S . Таким образом, данная модель включает различные сочетания опор и защемлений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Теорема 1. Колебание однородной упругой изотропной пакета плоских пластин с постоянной толщиной h , ограниченная прямоугольным контуром с размерами a, b , к которой точечно присоединены массы M_q в Q внутренних точках и в l' внутренних точках она упруго оперта, а также в внутренних точках x^s, y^s жестко оперта или упруго закреплена, описывается дифференциальным уравнением

$$\rho h_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} - D \Delta^2 W = 0, \quad (9)$$

$$0 < x_i < a, \quad 0 < y_i < b, \quad t_H < t < t_B, \quad q=1, \dots, Q$$

которое выполняется во всех точках пластины, где нет точечных связей, а в точечных связях справедливы многоточечные краевые условия:

$$\left[M_{iq} \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} \Big|_{x_i^q, y_i^q} - 2D_i (1-\nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q+0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q-0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q+0} \right) \right] = 0 \quad (10)$$

$$\left[C_i^{l'} W_i x_i^{l'}, y_i^{l'}, t - 2D_i (1-\nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}-0, y_i^{l'}-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}-0, y_i^{l'}+0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}+0, y_i^{l'}-0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}+0, y_i^{l'}+0} \right) \right] = 0 \quad (11)$$

Для единственности решения к указанным в теореме 1 многоточечным условиям надо добавить граничные условия

$$W_i \Big|_{\Omega_i} = 0, \quad \frac{\partial W_i}{\partial n_i} \Big|_{\partial \Omega_i} = 0, \quad (12)$$

$$W_i \Big|_{t_H} = W_1 x_i, y_i, \quad W_i \Big|_{t_B} = W_2 x_i, y_i. \quad (13)$$

В результате получаем краевую задачу для уравнения (9) в многосвязной области $\Omega_i = \bigcup_{q=1}^Q x_i^q, y_i^q \bigcup_{l'=1}^{l'} x_i^{l'}, y_i^{l'} \bigcup_{s=1}^S x_i^s, y_i^s$. Здесь x_i^q, y_i^q - внутренние точки к которым прикреплен точечная

масса M_{iq} , $x_i^{l'}, y_i^{l'}$ - внутренние точки, где наложены упругие точечные связи, x_i^s, y_i^s - внутренние точки, где пластина жестко опирается или упруго закреплена.

В каждой точке x_i^q, y_i^q , к которым прикреплена точечная масса M_{iq} , добавляется условие

$$\left[M_{iq} \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} \Big|_{x_i^q, y_i^q} - 2D_i (1-\nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q+0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q-0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q+0} \right) \right] = 0$$

В каждой точке $x_i^{l'}, y_i^{l'}$, где наложена точечная упругая связь, добавляется условие

$$\left[C_i^{l'} W_i(x_i^{l'}, y_i^{l'}, t) - 2D_i (1-\nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}-0, y_i^{l'}-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}-0, y_i^{l'}+0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}+0, y_i^{l'}-0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'}+0, y_i^{l'}+0} \right) \right] = 0$$

В точках x_i^s, y_i^s , где пластина жестко опирается ставится условие

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s-0, y_i^s-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s-0, y_i^s+0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s+0, y_i^s-0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s+0, y_i^s+0} = 0 \\ W_i(x_i^s, y_i^s) = 0 \end{cases} \quad s=1, \dots, S$$

Соотношения (7)-(8) представляют собой задачу на условный экстремум. Учитывая связи (7) и (8), с помощью множителей Лагранжа получим окончательное вариационное уравнение

$$\delta \left[\sum_{s=1}^S \int_{t_H}^{t_B} \lambda_s W_i(x_i^s, y_i^s, t) dt + \sum_{s=1}^S \int_{t_H}^{t_B} \lambda_s^\alpha \frac{\partial W_i(x_i^s, y_i^s, t)}{\partial \alpha_s} dt + \int_{t_H}^{t_B} G - T dt \right] = 0, \quad (14)$$

в котором $\lambda_s, \lambda_s^\alpha$ - множители Лагранжа, δ - вариация по перемещениям. Соотношение (14) представляет собой в некотором смысле аналог уравнения Рауса.

Выпишем соответствующую систему дифференциальных уравнений Эйлера-Лагранжа. Для удобства представим кинетическую T и потенциальную энергию G в виде сумм

$$G = G_1 + G_2 + G_3, \quad T = T_4 + T_5$$

где

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{D_i}{2} \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) dx dy \\ G_2 &= \frac{1}{2} \sum_{l'=1}^{l'} C_i^{l'} W_i^2(x_i^{l'}, y_i^{l'}) \quad G_3 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L C_i^l W_i(x_i^l, y_i^l) - W_{i+1}(x_i^l, y_i^l)^2 \\ T_4 &= \frac{\rho h_i}{2} \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial W_i}{\partial t} \right)^2 dx dy \quad T_5 = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q M_i^q \left(\frac{\partial W_i(x_i^q, y_i^q, t)}{\partial t} \right)^2 \end{aligned}$$

Тогда функционал Остроградского-Гамильтона разлагается следующим образом:

$$L = \int_{t_H}^{t_B} T - G dt = \int_{t_H}^{t_B} T_4 dt + \int_{t_H}^{t_B} T_5 dt - \int_{t_H}^{t_B} G_1 dt - \int_{t_H}^{t_B} G_2 dt - \int_{t_H}^{t_B} G_3 dt$$

Нам удобно ввести функционалы по формулам

$$I_1 = \int_{t_H}^{t_B} G_1 dt, \quad I_2 = \int_{t_H}^{t_B} G_2 dt, \quad I_3 = \int_{t_H}^{t_B} G_3 dt, \quad I_4 = \int_{t_H}^{t_B} T_4 dt, \quad I_5 = \int_{t_H}^{t_B} T_5 dt$$

и выписать отдельно для каждого функционала соответствующие уравнения Эйлера – Лагранжа.

Выпишем уравнение Эйлера – Лагранжа соответствующее функционалу I_1 . Рассмотрим “точку” W из области определения функционала I и пусть U_i произвольный элемент i -й области определения функционала I , подчиненный условию

$$U_i|_{\partial\Omega_i} = 0, \quad \frac{\partial U_i}{\partial n_i}|_{\partial\Omega_i} = 0$$

где Ω_i - обозначает i -ю прямоугольную пластину, а $\partial\Omega_i$ - ее границы. Здесь $\frac{\partial}{\partial n_i}$ означает производную по нормали в граничной точке.

Такие функции $U_i(x_i, y_i, t)$ будем называть возмущениями. Сместимся из W_i в точку $W_i + \varepsilon U_i$, где ε - малый параметр. Здесь функция U_i задает “направление смещения” из точки W_i . Теперь находим выражение $\frac{1}{\varepsilon} (I(W_i + \varepsilon U_i) - I(W_i))$ и переходя к пределу при $\varepsilon \rightarrow 0$, получим функцию

$$\left. \frac{dI(W_i + \varepsilon U_i)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon} (I(W_i + \varepsilon U_i) - I(W_i)) = \int_{t_H}^{t_B} \int_{\Omega_i} \frac{\delta I}{\delta W_i} \cdot \delta W_i dt dx dy$$

которую называют производной функционала I в точке W_i по направлению U_i [4, стр 340].

Перейдем к аналитическому вычислению производной $\frac{\delta I_j}{\delta W_i}$ при $j = 1, 2, 3, 4, 5$. Вычислим её при $j = 1$.

$$\begin{aligned} I_1(W_i + 2U_i) - I_1(W_i) &= D_i \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \int_0^b \left[\left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 1 - \nu_i \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x \partial y} \right) \right] dx dy \right\} dt + o(\varepsilon) \end{aligned} \quad (15)$$

где $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{o(\varepsilon)}{\varepsilon} = 0$.

Наша цель – избавиться от производных возмущения $U_i(x_i, y_i, t)$. Для этого нам придется неоднократно применять формулу интегрирования по частям. Отметим, что функция $W_i(x_i, y_i, t)$ по переменным x_i, y_i при наложении точечных связей и масс может в этих точках терять гладкость. Поэтому при интегрировании по частям необходимо учесть то, что функция $W_i(x_i, y_i, t)$ или ее частные производные могут иметь разрывы первого рода в точках, где наложены точечные связи или массы. Допустим, что к внутренней точке x_i^q, y_i^q присоединена точечная масса M_{q_i} или она либо упруго, либо жестко оперта. Покажем как можно применять формулу интегрирования по частям, если функция $W_i(x_i, y_i, t)$ или ее частные производные теряют гладкость в этой точке x_i^q, y_i^q . Для наглядности рассмотрим один из интегралов, присутствующих в правой части соотношения (15).

К примеру, возьмем интеграл

$$\begin{aligned} &\int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \int_0^b \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x \partial y} dx dy \right\} dt = \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\int_0^b \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x \partial y} dy \right] dx \right\} dt = \\ &= \left(\int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\int_0^{y_i^q-0} \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x \partial y} dy \right] dx \right\} dt + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\int_{y_i^q+0}^b \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x \partial y} dy \right] dx \right\} dt \right) = \\ &= \left(\int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial U_i}{\partial x} \right]_{y_i^q-0}^{y_i^q-0} - \int_0^{y_i^q-0} \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \frac{\partial U_i}{\partial x} dy \right] dx \right\} dt + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial U_i}{\partial x} \right]_{y_i^q+0}^b - \int_{y_i^q+0}^b \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \frac{\partial U_i}{\partial x} dy \right] dx \right\} dt \right). \end{aligned}$$

Согласно выбору возмущения $U_i(x_i, y_i, t)$ удовлетворяет граничным условиям $\frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y=0}$ и $\frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y=b}$ равны нулю. В силу произвольности возмущения $U_i(x_i, y_i, t)$ можно считать достаточно гладким, то есть

$$\frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y_i^q-0} = \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y_i^q+0}$$

В результате

$$\begin{aligned} & \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \int_0^b \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \frac{\partial U_i}{\partial x} dy \right\} dx \Big|_{y_i^q} dt = \\ & = \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^{x_i^q-0} \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_{x_i^q+0}^a \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt - \\ & - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \int_0^{x_i^q-0} \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \frac{\partial U_i}{\partial x} dx \right\} dy \Big|_{y_i^q} dt - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \int_{x_i^q+0}^a \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \frac{\partial U_i}{\partial x} dx \right\} dy \Big|_{y_i^q} dt = \\ & = \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \left[\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q+0} U_i \Big|_{y_i^q} \right]_{x_i^q-0}^{x_i^q+0} \right\} dt - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^{x_i^q-0} \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) U_i \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt + \\ & + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \left[\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{y_i^q+0} U_i \Big|_{y_i^q} \right]_{x_i^q+0}^a \right\} dt - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_{x_i^q+0}^a \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) U_i \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt - \\ & - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} U_i \right]_{x_i^q-0}^{x_i^q+0} dy \right\} dt + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \int_0^{x_i^q-0} \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} U_i dx \right\} dy \Big|_{y_i^q} dt - \\ & - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} U_i \right]_{x_i^q+0}^a dy \right\} dt + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_{x_i^q+0}^a \int_0^b \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} U_i dx \right\} dy \Big|_{y_i^q} dt. \end{aligned}$$

Учитывая нулевые граничные значения возмущения и ее производных, получаем окончательное соотношение

$$\begin{aligned} A = & \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \left[\left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q+0} \right) - \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q+0} \right) \right] U_i \Big|_{x_i^q, y_i^q} \right\} dt - \\ & - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^q+0} \right) U_i \Big|_{x_i^q} dy \right\} dt - \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) U_i \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt + \\ & + \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \int_0^b \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} U_i dy \right\} dx \Big|_{y_i^q} dt. \end{aligned}$$

Точно также с помощью формулы интегрирования по частям преобразуем оставшиеся в (15) интегралы.

Учитывая полученные значения интегралов, вычислим $\frac{\delta I_j}{\delta W_i}$ при $j = 1, 2, 3, 4, 5$. Тогда

$$\begin{aligned}
 I_1 \quad W_i + \varepsilon U_i - I_1 \quad W_i &= D_i \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\int_0^b \Delta^2 W_i U_i dy \right] dx \right\} dt + \\
 &+ \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\Delta W_i \Big|_{x_i^q-0} - \Delta W_i \Big|_{x_i^q+0} \quad D_i \varepsilon - D_i \varepsilon \quad 1 - \nu_i \quad \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \Big|_{x_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \Big|_{x_i^q+0} \right) \right] \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q} dy \right\} dt + \\
 &+ \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\Delta W_i \Big|_{y_i^q-0} - \Delta W_i \Big|_{y_i^q+0} \quad D_i \varepsilon - D_i \varepsilon \quad 1 - \nu_i \quad \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \Big|_{y_i^q+0} \right) \right] \frac{\partial U_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q} dx \right\} dt + \\
 &+ \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q-0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q+0} \right) \left(D_i \varepsilon \right) D_i \varepsilon \left(-\nu_i \right) \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^q+0} \right) U_i \Big|_{x_i^q} \right] dy \right\} dt + \\
 &+ \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q+0} \right) \left(D_i \varepsilon \right) D_i \varepsilon \left(-\nu_i \right) \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y_i^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y_i^q+0} \right) U_i \Big|_{y_i^q} \right] dx \right\} dt + \\
 &+ 2 D_i \varepsilon \left(-\nu_i \right) \int_{t_H}^{t_B} \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q-0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q-0, y_i^q+0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q-0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q+0, y_i^q+0} \right) U_i \Big|_{x_i^q, y_i^q} dt \\
 I_2 \quad W_i + \varepsilon U_i - I_2 \quad W_i &= \frac{1}{2} \sum_{l'=1}^{l'} C_i^{l'} \int_{t_H}^{t_B} 2 \varepsilon W_i \quad x_i^{l'}, y_i^{l'}, t \quad U_i \quad x_i^{l'}, y_i^{l'}, t \quad dt \\
 I_3 \quad W_i + \varepsilon U_i - I_3 \quad W_i &= \varepsilon \sum_{l=1}^L C_i^l \int_{t_H}^{t_B} W_i \quad x_i^l, y_i^l - W_{i+1} \quad x_i^l, y_i^l \quad U_i \quad x_i^l, y_i^l - U_{i+1} \quad x_i^l, y_i^l \quad dt \\
 I_4 \quad W_i + \varepsilon U_i - I_4 \quad W_i &= -\rho h_i \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\int_0^b \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} U_i dy \right] dx \right\} dt. \\
 I_5 \quad W + \varepsilon U - I_5 \quad W &= \varepsilon \sum_1^Q M_i^q \left[\underbrace{\left(\frac{\partial W_i}{\partial t} \Big|_{x^q, y^q} U_i \Big|_{x^q, y^q} \right)}_{=0} \Big|_{t_H}^{t_B} - \int_{t_H}^{t_B} \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} \Big|_{x^q, y^q} U_i \Big|_{x^q, y^q} dt \right]
 \end{aligned}$$

Учитывая найденные выражения производных функционалов I_1, I_2, I_3, I_4 , определим производную функционала Остроградского-Гамильтона.

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta L}{\delta W} \quad W &= \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\int_0^b \left(-\rho h_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} - D_i \Delta^2 W_i \right) U_i dy \right] dx \right\} dt - \\
 &- \sum_{q=1}^Q \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon \quad 1 - \nu_i \quad \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W_i \Big|_{x^q-0} - \left(\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon \quad 1 - \nu_i \quad \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W_i \Big|_{x^q+0} \right) \right] \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{x^q} dy \right\} dt - \\
 &- \sum_{q=1}^Q \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon \quad 1 - \nu_i \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) W_i \Big|_{y^q-0} - \left(\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon \left(-\nu_i \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) W_i \Big|_{y^q+0} \right) \right] \frac{\partial U_i}{\partial y} \Big|_{y^q} dx \right\} dt - \\
 &- \sum_{q=1}^Q \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x^q-0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x^q+0} \right) \left(D_i \varepsilon \right) D_i \varepsilon \left(-\nu_i \right) \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x^q+0} \right) U_i \Big|_{x^q} \right] dy \right\} dt - \\
 &- \sum_{q=1}^Q \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y^q-0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y^q+0} \right) \left(D_i \varepsilon \right) D_i \varepsilon \left(-\nu_i \right) \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y^q-0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y^q+0} \right) U_i \Big|_{y^q} \right] dx \right\} dt -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{q=1}^Q \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ M_{iq} \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} \Big|_{x_i^q, y_i^q} - 2D_i (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q - 0, y_i^q - 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q - 0, y_i^q + 0} - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q + 0, y_i^q - 0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q + 0, y_i^q + 0} \right) \right\} U_i \Big|_{(x_i^q, y_i^q)} dt - \\
 & - \sum_{l'=1}^{l'} \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon (1 - \nu_i) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W_i \Big|_{x_i^{l'} - 0} - \left(\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon (1 - \nu_i) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W_i \Big|_{x_i^{l'} + 0} \right) \right] \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{x_i^{l'}} dy \right\} dt - \\
 & - \sum_{l'=1}^{l'} \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon (1 - \nu_i) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) W_i \Big|_{y_i^{l'} - 0} - \left(\left(D_i \varepsilon \Delta - D_i \varepsilon (1 - \nu_i) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) W_i \Big|_{y_i^{l'} + 0} \right) \right] \frac{\partial U_i}{\partial x} \Big|_{y_i^{l'}} dx \right\} dt - \\
 & - \sum_{l'=1}^{l'} \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^b \left[\left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^{l'} - 0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^{l'} + 0} \right) (D_i \varepsilon) D_i \varepsilon (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^{l'} - 0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^{l'} + 0} \right) U_i \Big|_{x_i^{l'}} \right] dy \right\} dt - \\
 & - \sum_{l'=1}^{l'} \int_{t_H}^{t_B} \left\{ \int_0^a \left[\left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^{l'} - 0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^{l'} + 0} \right) (D_i \varepsilon) D_i \varepsilon (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y_i^{l'} - 0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y_i^{l'} + 0} \right) U_i \Big|_{y_i^{l'}} \right] dx \right\} dt + \\
 & + \sum_{l'=1}^{l'} \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ C_i^{l'} W_i \Big|_{x_i^{l'}, y_i^{l'}, t} - 2D_i (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} - 0, y_i^{l'} - 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} - 0, y_i^{l'} + 0} - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} + 0, y_i^{l'} - 0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} + 0, y_i^{l'} + 0} \right) \right\} U_i \Big|_{(x_i^{l'}, y_i^{l'})} dt \Bigg\} + \\
 & + \sum_{s=1}^S \varepsilon \int_{t_H}^{t_B} \left\{ W_i \Big|_{x_i^s, y_i^s} - 2D_i (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s - 0, y_i^s - 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s - 0, y_i^s + 0} - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s + 0, y_i^s - 0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^s + 0, y_i^s + 0} \right) \right\} U_i \Big|_{(x_i^s, y_i^s)} dt \Bigg\}.
 \end{aligned}$$

В силу произвольности возмущения $U_i(x_i, y_i, t)$ и значения $U_i(x_i^q, y_i, t)$, $U_i(x_i, y_i^q, t)$, $\frac{\partial}{\partial x} U_i(x_i^q, y_i, t)$, $\frac{\partial}{\partial y} U_i(x_i, y_i^q, t)$, $U_i(x_i^q, y_i^q, t)$ по основной лемме вариационного исчисления [5, стр 295], запишем систему уравнений Эйлера-Лагранжа.

$$\rho h_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} - D_i \Delta^2 W_i = 0 \quad 0 < x < a, \quad 0 < y < b, \quad t_H < t < t_B, \quad q = 1, \dots, Q, \quad (9)$$

с многоточечными краевыми условиями

$$M_{iq} \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} \Big|_{x_i^q, y_i^q} - 2D_i (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q - 0, y_i^q - 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q - 0, y_i^q + 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q + 0, y_i^q - 0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^q + 0, y_i^q + 0} \right) = 0 \quad (10)$$

$$C_i^{l'} W_i \Big|_{x_i^{l'}, y_i^{l'}, t} - 2D_i (1 - \nu_i) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} - 0, y_i^{l'} - 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} - 0, y_i^{l'} + 0} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} + 0, y_i^{l'} - 0} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \Big|_{x_i^{l'} + 0, y_i^{l'} + 0} \right) = 0 \quad (11)$$

и условиями вдоль отрезков

$$\begin{cases} \left(D_i \Delta - D_i \cdot 1 - \nu_i \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W_i \Big|_{x_i^q - 0} - \left(\left(D_i \Delta - D_i \cdot 1 - \nu_i \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W_i \Big|_{x_i^q + 0} \right) = 0 \\ \left(D_i \Delta - D_i \cdot 1 - \nu_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) W_i \Big|_{y_i^q - 0} - \left(\left(D_i \Delta - D_i \cdot 1 - \nu_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) W_i \Big|_{y_i^q + 0} \right) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q - 0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q + 0} \right) - D_i - D_i \cdot 1 - \nu_i \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^q - 0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \Big|_{x_i^q + 0} \right) = 0 \\ \left(\frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q - 0} - \frac{\partial \Delta W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q + 0} \right) - D_i - D_i \cdot 1 - \nu_i \left(\frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y_i^q - 0} - \frac{\partial^3 W_i}{\partial y \partial x^2} \Big|_{y_i^q + 0} \right) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

к которым надо добавить граничные условия

$$W_i \Big|_{\Omega_i} = 0, \quad \frac{\partial W_i}{\partial n_i} \Big|_{\partial \Omega_i} = 0 \quad (12)$$

а также

$$W_i \Big|_{t_H} = W_1(x_i, y_i), \quad W_i \Big|_{t_B} = W_2(x_i, y_i) \quad (13)$$

итак, справедливо утверждение.

Утверждения. Колебание однородной упругой изотропной пакета плоских пластин с постоянной толщиной h , ограниченная прямоугольным контуром с размерами a, b к которой точечно присоединены массы M_{iq} в Q внутренних точках и в l' внутренних точках она упруго оперта, описывается дифференциальным уравнением (9) с многоточечные краевые условия (10) и (11) и граничными условиями (12) и (13).

Заметим, что функция $W_i(x_i, y_i, t)$ в точках, где прикреплена точечная масса или пластина жестко или упруго оперта, либо упруго защемлена, теряет гладкость согласно условиям (9).

Обсуждение утверждения.

Каждой внутренней точке x_i^q, y_i^q , где присоединена точечная масса M_{iq} или она либо упруго, либо жестко оперта или защемлена в направлении α_q , соответствует горизонтальный отрезок $y = y^q$ и вертикальный отрезок $x = x^q$. Вне, этих отрезков пластины для функции $W_i(x_i, y_i, t)$ справедливо дифференциальное соотношение (9), а на указанных отрезках должны выполняться условия “сшивания” (16) и (17). Покажем, что из условия (16) и (17) следует выполнение дифференциального соотношения (9) и на указанных отрезках, кроме точки x_i^q, y_i^q .

Лемма. Пусть $W(x, y, t)$ удовлетворяет условиям

$$\begin{cases} W_i(x_i^q - 0, y_i, t) - W_i(x_i^q + 0, y_i, t) = 0, & \text{допустимых } \forall y_i, t \\ W_i(x_i, y_i^q - 0, t) - W_i(x_i, y_i^q + 0, t) = 0, & \text{допустимых } \forall x_i, t \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q - 0} - \frac{\partial W_i}{\partial x} \Big|_{x_i^q + 0} \right) = 0, & \text{допустимых } \forall y_i, t \\ \left(\frac{\partial W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q - 0} - \frac{\partial W_i}{\partial y} \Big|_{y_i^q + 0} \right) = 0, & \text{допустимых } \forall x_i, t \end{cases} \quad (19)$$

а также выполняется соотношения (16) и (17). Тогда на указанных отрезках справедливы равенства

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right|_{x_i^q-0} - \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right|_{x_i^q+0} = 0, & \forall y_i, t \\ \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right|_{y_i^q-0} - \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right|_{y_i^q+0} = 0, & \forall x_i, t \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^3} \right|_{x_i^q-0} - \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^3} \right|_{x_i^q+0} = 0, & \forall y_i, t \\ \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial y^3} \right|_{y_i^q-0} - \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial y^3} \right|_{y_i^q+0} = 0, & \forall x_i, t \end{cases} \quad (21)$$

Доказательство леммы. Пусть $x = x^q$. Покажем, что из равенства (18) и (19) при выполнении (16) и (17) следует соотношения (20) и (21). Дважды продифференцируем равенство (18) по y .

$$\left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right|_{x_i^q-0} - \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right|_{x_i^q+0} = 0 \quad \forall y_i, t$$

и подставим полученное соотношение в левую часть равенства (16). В результате имеем

$$\left(D_i \Delta W_i - D_i (1 - \nu_i) \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right) \Big|_{x_i^q-0} - \left(D_i \Delta W_i - D_i (1 - \nu_i) \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right) \Big|_{x_i^q+0} = D_i \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right|_{x_i^q-0} - D_i \left. \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right|_{x_i^q+0} = 0$$

Поскольку $D_i \neq 0$, откуда следует равенство (20).

Чтобы получить равенство (21) дважды продифференцируем (19) по y .

$$\left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \right|_{x_i^q-0} - \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \right|_{x_i^q+0} = 0, \quad \forall y_i, t$$

и подставим полученное соотношение в левую часть равенства (17). Результат можно записать в виде

$$\left(-D_i \frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} - D_i (1 - \nu_i) \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \right) \Big|_{x_i^q-0} - \left(-D_i \frac{\partial \Delta W_i}{\partial x} - D_i (1 - \nu_i) \frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} \right) \Big|_{x_i^q+0} = -D_i \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^3} \right|_{x_i^q-0} + D_i \left. \frac{\partial^3 W_i}{\partial x^3} \right|_{x_i^q+0} = 0$$

Тем самым равенство (21) полностью доказано.

Аналогичным образом доказываются требуемые соотношения на отрезке $y = y^q$.

В лемме 1 показана непрерывность $W_i(x_i, y_i, t)$ и её нормальных производных вдоль линии $x_i = x_i^q$ и $y_i = y_i^q$. Из теории уравнений с частными производными [6, стр 249] вытекает выполнение дифференциального соотношения (9) вдоль указанных линии $x_i = x_i^q$ и $y_i = y_i^q$, кроме точки x_i^q, y_i^q .

ЛИТЕРАТУРА

1. Базаров, М.Б. Численное моделирование колебаний диссипативно однородных и неоднородных механических систем / М. Б. Базаров, И. И. Сафаров, Ю. И. Шокин. – Новосибирск. : Изд. СО РАН, 1996. – 189 с.
2. Берикханова, Г.Е. Применение потенциалов нулевого радиуса / Г. Е. Берикханова // Поиск. – 2009. – №4. – С. 167-178.
3. Треффц, Е. Математическая теория упругости / Е. Треффц. – Ленинград - Москва. : Гос тех. Издат, 1934. – 172 с.
4. Дубровин, Б.А. Современная геометрия / Б. А. Дубровин, С. П. Новиков, А. Т. Фомин. – М. : Наука, 1979. – 760 с.
5. Эльсгольц, Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – М. : Наука, 1969. – 424 с.
6. Мизохата, С. Теория уравнений с частными производными / С. Мизохата. – М. : Мир, 1977. – 504 с.

**НҮКТЕЛІК БАЙЛАНЫСТАРЫ ЕСКЕРІЛГЕН КҮРДЕЛІ
МЕХАНИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМНЫҢ ТЕРБЕЛІСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛДЕУ**

Берікханова Г.Е.

Семей мемлекеттік педагогикалық институты, Семей Қазақстан

Бұл жұмыста күрделі механикалық құрылымның еріксіз тербелісінің математикалық моделі ұсынылады. Осы математикалық модельдің қарама-қайшылықсыздығы және оны есептеу алгоритмі көрсетілген. Жұмыстың зерттеу нәтижесінде тербелістің математикалық моделін анықтайтын теорема дәлелденді.

**MATHEMATICAL MODEL OF FLUCTUATIONS DIFFICULT
MECHANICAL DESIGNS TAKING INTO ACCOUNT DOT COMMUNICATIONS**

G.E. Berikkhanova

Semipalatinsk State Pedagogical Institute, Semey, Kazakhstan

In work the mathematical modeling about the compelled fluctuations difficult mechanical designs with dot elastic communications is offered. Consistency of offered mathematical model is shown. The algorithm of calculation of the received mathematical model is offered. In this work proof basic theorem.

АКАДЕМИК Ш.Ш. СӘРСЕМБИНОВТЫҢ ЕСІМІН АРДАҚТАУ ТУРАЛЫ



Физика – математика ғылымдарының докторы, ҚР ҰҒА-ның академигі, профессор Шәмші Шәріпұлы Сәрсембинов 1944 жылы маусым айының аяғында Алматы облысының Түрген ауылында дүние есігін ашып, балалық және жастық шағын Талдықорған қаласының маңындағы Елтай және қазіргі Балпық би ауылдарында өткізеді. Сол жерде орта мектепті үздік тамамдап, 1962 жылы С.М. Киров атындағы (қазіргі әл-Фараби атындағы) Қазақ мемлекеттік университетінің физика факультетіне қабылданады. Келесі жылдың күзінде сол кездегі тәртіп бойынша ол көптеген жастармен бірге Кенес Әскерінің қатарына шақырылады. Әскери міндетін жас Шәмші Солтүстік және Балтық теңіздерінде Әскери-теңіз флотының кемелерінде абыроймен өтеп, екі жылдан кейін сүйікті университетіне қайта оралып, жаңадан ашылған қатты денелер физикасы кафедрасының құрамында білімін жалғастырады. Сол кездегі оның ғылыми жетекшісі осы кафедраның тұңғыш меңгерушісі, кезінде Германияда әлемге әйгілі К.Рентгеннің ғылыми мектебінен тәлім алған, академик А.Ф.Иоффемен бірге істеген академик М.И.Корсунский болып еді. Шәмшінің үлкен физикалық ғылымға араласуы да сол кезден басталды. 1969 ж. университетті үздік бітірген Шәмші Шәріпұлы физика факультетінің деканы профессор С. Исатаевтың араласуымен және тікелей қолдауымен Ленинград қаласына, сол А.Ф. Иоффе атындағы әйгілі Физика-техникалық институттың аспирантурасына жолдама алады. ҚСРО Мемлекеттік сыйлығының екі дүркін лауреаты профессор Б.Т.Коломийцтің жетекшілігімен жүргізген зерттеу жұмыстары Шәмші Шәріпұлына 1973ж. осы Институтта физика-математика ғылымдарының кандидаты ғылыми дәрежесін қорғауға мүмкіндік туғызады. Содан бері ол өзі бітірген университетте ассистент, аға оқытушы, доцент болып қызмет істейді. 1974ж. Шәмші Шәріпұлы кезінде өзі тамамдаған қатты денелер физикасы кафедрасының меңгерушісі болып тағайындалады. Материалдық базасы Қазақ ССР Ғылым академиясының Ядролық физика институтының бір зертханасы деңгейінде құрылған кафедраны факультетке көшіру, кафедрадағы оқу

үрдісін жаңадан ұйымдастыру, оның оқу-ғылыми базасын техникалық жаңа үлгілермен жабдықтау, ғылыми зерттеулер мен ізденістер жүргізу, әлемдік деңгейдегі ғылыми конференцияларға қатынасып, қызықты баяндамалар жасау, осының бәрі Шәмшінің есімін баршаға паш етуге және 1983ж. оған Ленинградтың М.И.Калинин атындағы Политехникалық институтының диссертациялық кеңесінің отырысында физика-математика ғылымдарының докторы ғылыми дәрежесін алуға арналған диссертация қорғауға негіз болды. Келесі жылы оған профессор лауазымы беріледі және ол физика факультетінің деканы болып сайланады. 1991-94 жылдар арасында осы университеттің проректоры, 1995ж. ҚР ҰҒА-ның мүше-корреспонденті, 2000 ж. – академигі болып сайланады.

Сол аралықтар Ш.Ш. Сәрсембинов үшін айрықша қымбат кезеңдер еді. Ғылымдағы адамның ауруы да, емі де-өзі таңдап алған ғылымы. Бүкіл саналы ғұмырын ғылымға арнаған Шәкең ту басынан жақсы ортаға, жаны жайсаң жандарға кез болды, өнегесінен үйренді, шапағатына бөленді, небір қыйын кезеңдерде қолдау тауып, іс-әрекетіне демеу тапты. Кең парасатты, кемел ойлы азаматтардың ғылымға деген адалдық қасиеттерін бойына терең сіңіре білді. Заман азып, заң өзгеріп, құбылмалы өмір жыл сайын аумалы-төкпелі кезеңді өткеріп жатқан кездері де ол өзіне тән абзалдық пен дархандықтан бір сүйем ауытқымай, асып тасымады, жылағанды жұбатып, күйзелгенді демеумен болды. Мансапқорлық, дөрекілік, оспадарлық, менмендік секілді оғаш қылықтардың барлығы Шәкең үшін мүлдем жат дүние еді. Ол ешқашанда қолында бар жалғыз бағалы дүние-ғылымды саудаға салуды, бастыққа жағымпаздандуды білмеді, тіпті іздемеді де. Шәкең үшін ең қымбат нәрсе-тәңірдің сыйға берген жасампаздық талантын одан әрмен дамыту және оны жарқырата отырып, шапағатын басқа жұртқа да жеткізу, өзі шыққан биікке өзгелерді шығару. Бар байлық пен бақыт сонда деп санаған Шәмші Шәріпұлын дүниенің таршылығы мен тапшылығы, тұрмыстың қиындығы қоғамның, сүйікті ғылымның қажетіне жарау мақсатынан ешқашанда жаңылта алмады, кісіліктің төрінен, білімнің биігінен, ғылымның шыңынан көріне білді, нәтижесінде еңбегі елеулі, атағы атулы болып, өзі физика ғылымының ар-ожданына айналды. Оның жетекшілігімен кафедраның базасы нығайып, ғылыми-зерттеу жұмыстары жан-жақты қолдау тауып, халықаралық қатынастары кеңейіп, әлемге танымал болды және университет құрамындағы ең мықты, алдыңғы қатардағы кафедраға айналды. Кафедраға алыс шет елдерден (АҚШ, Жапония,

Германия) көптеген танымал ғалымдарының келіп студенттерге дәріс оқуы, кафедраның мамандарының өзі де алыс-жақын шет елдерге сол мақсатпен қатынасуы жиі-жиі орын ала бастады. Шәмші Шәріпұлының өзі де бірнеше рет АҚШ, Германия, Франция, Жапония, Корея секілді өркениетті елдің студенттері мен ғалымдарының алдында талай дәріс берді. Шәкеңнің жетекшілігімен көптеген ғылым кандидаттары мен докторлары дайындалып, өзі үздіксіз жетекшілік еткен 34 жыл ішінде 700-ден астам студенттер кафедраның бағыты бойынша білікті маман болып шықты. Олардың арасынан шыққан ғылым кандидаттары мен докторларының өздері бір төбе. Қазақстан жоғарғы оқу орындары оқыту жүйесінің жаңа бағытына көшкен кезде, алғашқылардың бірі болып магистрлер мен PhD-докторларды дайындап, өмірге жолдама берген де Шәкең еді.

Әрине, Шәмші Шәріпұлының ғылыми бағыттарын естелік ретінде дайындалған қысқа мақалада саралап өтіп, жан-жақты терең баға беру мүмкін емес. Академик Ш.Ш. Сәрсембиновтың 1994 ж. ҚР ҰҒА жариялаған суперидеялар конкурсына қатынасып, лауреат атанғанын, ғылымды дамытуда қосқан айрықша үлесі үшін ғалымдарға берілетін Мемлекеттік стипендияның иегері болуын, Еуропалық халықаралық «INTAS» ғылыми қорының штаттағы сарапшысы (эксперт) болғанын, ҚР Жоғары аттестациялау Комиссиясы физика және энергетика саласы бойынша құрған Ғылыми кеңестің төрағасы болып істегенін, ҚР Білім және Ғылым министрлігі іргелі ғылымдар саласы бойынша жарияланған конкурста «Конденсірлі орталарда орын алатын құрылымдық-фазалық түрлендірулер мен қалыпты емес процесстер», «Қасиеттері алдын-ала тағайындалған материалдарды өндіру әдістері», «Жартылай өткізгіштердегі радиациялық ақаулардың туындау физикасы және құрылымдық-фазалық өзгерістер» және т.б. көптеген ғылыми жобалардың орындалып, физика ғылымының өркендеуіне айрықша үлес қосуын, 300-ге жуық ғылыми еңбектерінің, көптеген ірі-ірі монографиялар мен оқулықтардың жарық көруін, 4 ғылым докторының, 13 ғылым кандидаттарының дайындалуын айтса да жеткілікті. Артында қалған біз бүгіндері Шәкеңнің жетекшілігімен орындалған аталмыш жұмыстардың орындалуында аздаған болса да үлесіміздің бар екенін мақтан етеміз.

Менің пайымдауымша, ғылымға келген жастар Шәкеңнің жәй білгіш адам емес, үнемі ізденіп, оқып, оқығанын бойына сіңіріп, мұқият жинақтап, жинақтағаннан міндетті түрде бір нәтижеге қол жеткізетін білімпаз, дана, ірі маман-ғалым ретінде танытын. Табиғат сыйлаған оның аса сезімталдығы, нәзік түсінгіштігі, алуан сырлы таланты, жан сұлулығы, иман жүзділігі, осының барлығы – алыптың қайратын сыйғызған Шәкеңнің тұла

бойыннан қандай жағдайда болмасын, үнемі байқалып тұратын айрықша үйлесімділіктің белгілері еді. Шәкеңнің сырт келбетінің өз-тұнып тұрған және әркімде кездесе бермейтін ғажайып этика мен эстетика болатын. Оларды сипаттап берудің өзі талай уақытты қажет етеді. Өмірінің соңғы күндері ол өзара қарама-қайшы екі сезімнің құшағында жүретін: біреуі үміт пен күдік, екіншісі – ақиқат пен жалған. Солай бола тұра, ол ешқашанда өзінің мүддесі үшін шындықты аттап қиянатқа бармаушы еді. Түбінде үміттің ақталып, ақиқаттың әйтеуір бір жеңетіне сенімді болатын. Кейде *«Ақиқат жеңсе де, өмірден түңіліп барып жеңеді, бірақ түбінде бір жеңеді»*- деп отыратын. Оның себебін Шәкеңмен бірге жүрген ізбасар серіктері ғана жақсы түсінетін. Бүгін сол аяулы Азаматтың бұл жалған дүниеден озғанына бір жыл толуына байланысты арманда кеткен мақсатын айтпасақ болмас деп ойлаймын. Үкімет тарапынан ғылым және техника саласы бойынша Мемлекеттік сыйлықтың лауреаты атағын алу үшін 2007ж. жарияланған конкурсқа қатысу мақсатымен қызу жұмысты бастап кеткен Шәкеңнің үміті зор еді. Оған жан-жақтан келген, алыс және жақын шет елдерден әлемге танымал ғалымдардың жіберген қолдау пікірлері айғақ болатын. Бірақ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің сол кездегі басшысы Т.А. Қожамқұлов-мырза, алдын-ала берген өзінің екі бірдей уәдесіне опасыздық жасап, Шәкеңнен дайындап отырған жобасын ұсынбауды талап етті. Бұның себебін сол конкурсқа өзінің қатынасатындығымен және оның жобасы әркімнің қолы жете бермейтін пәрменді бір тұлғадан қолдау тауып отырғанымен түсіндірді. «Топқағың мықты болса, киіз қазық жерге кіреді»-демекші, «мықты» қазақтың тегеурініне қарсылық көрсетуді өзіне ар санаған Ш.Ш. Сәрсембинов, іштей қанша қиналса да, кейін шегінуге мәжбүр болды. Ал «мықты топқақтың» сол жолғы әрекетінен ештеңе шықпағанынан құлағы түрік ғылыми жұртшылық толық хабардар болса керек. Осындайда бір данышпанның *«Жоғалтуға болмайтын, жоғалтсаң қайтып оралмайтын ұят деген айрықша бір құндылық бар және жер басып жүру үшін де, тіпті көрде тыныш жату үшін де ұят қажет»* - деген өсиет сөздері амалсыз ойға оралады.

Өкінішке орай, үмітінің ақталып, күдігінің сейіліп, ақиқаттың түбінде бір жеңетініне көзі жете алмай, сондай асыл Азамат небәрі жарты жылдан кейін, 64 жасында бұл опасыз дүниемен хош айтысты. Әрине, өлмеу қолдан келмейді, ол-Жаратушының ісі, бірақ артында өлмейтін дүние қалдыру-біреу болмаса біреудің қолынан келеді. Өйткені ұлы адамда бір ғана мақсат бар, ол-өлгеннен кейін де өмір сүру. Шәмші Шәріпұлы да сондайлардың қатарына жатады. Бүгіндері сол үмітін, сол күдігін Шәкең артындағы сіздер мен біздерге аманат етіп қалдырған секілді болады да

тұрады. Сондықтан Шәкеңнің есімі әл-Фараби атындағы университеттің, әсіресе, осы университеттің физика факультетінің тарихында алтын әріптермен жазылуы тиіс. Соның белгісі ретінде мен Университет басшылығының және ғылым сүйер қауымның назарына төмендегі шараларды жүзеге асыруды ұсынғым келеді:

1. Республикалық тұңғыш нанотехнология зертханасының ашылуына айрықша еңбек сіңірген, оған өмірінің соңғы күндеріне дейін жетекшілік жасап келген Шәкеңнің есімі осы лабораторияға берілсе;
2. Физика факультеті ғимаратының және тұрған үйінің сыртына, көрнекі жерге Шәкеңнің суреті, аты-жөні жазылған тақта орнатылса;
3. Қаршадайынан, яғни мектептен кейінгі саналы өмірінің барлығы байланысты болған Физика факультетінің бір аудиториясы арнайы жөндеу-жабдықтау жұмыстарынан өткізіліп, оған да Шәкеңнің есімі берілсе;
4. Қазақтың ең ірі білім және ғылым ордасы болып саналатын әл-Фараби атындағы университетке өзінің құрметті Азаматы үшін арнайы 3 (үш) стипендия тағайындау оның бюджетіне айтарлықтай нұсқан келтіре қоймас деп ойлаймын. Сол стипендияның біреуі Шәкең 34 жыл бойы үздіксіз басқарып келген кафедраның

соңғы курстағы үздік студентіне, екіншісі – магистрантына, үшіншісі – докторантына жыл сайын жаңадан өткізілетін конкурстың жеңімпазы ретінде салтантты түрде тапсырылатын болса;

5. Шәкеңнің есімін еске алу мақсатымен факультет ұжымы жыл сайын мектеп оқушылары мен студенттер арасында «Жас физиктер мектебі» және екі жылда бір рет «Сарсембинов оқулары» тақырыбындағы ғылыми конференцияларды өткізуді дәстүрге айналдырса және білім мен ғылымды дамытуда маңызы зор осы шараға Сіздер мен біздер ешбір қалтқысыз қатынасатын болсақ – нұр үстіне нұр, ал Шәкеңнің аруағы әсте разы болар еді. Егер түсіне білсек, мұның өзі білім мен ғылымды ардақтаушы жастар үшін үлкен бір ғанибет, тағлымдық маңызы зор мәселеге ауысары сөзсіз.

Осы ұсыныстар туралы әл-Фараби атындағы университеттің қазіргі басшылығы хабардар болғанына біраз уақыт өткенімен, атқарылып жатқан жұмыстар көңіл толықтырарлықтай емес. Әзірге өзі тәрбиелеген кафедра мүшелерінің және факультет ұжымының күшімен Шәкең арналған тұңғыш халықаралық ғылыми конференция ғана ұйымдастырылды.

*Абай атындағы ҚазҰПУ-нің тұңғыш құрметті
кафедра меңгерушісі, физика-математика
ғылымдарының докторы, профессор*

Қ.М. Мұқашев

СПИСОК АВТОРОВ

Алиев Б.А., 87, 91
Амангелды Н., 15
Берикханова Г.Е., 95
Бугыбаев Е., 15
Буртебаев Н., 15
Васильев Ю.С., 26
Вурим А.Д., 26
Горлачев И., 15
Гусев М.Н., 77
Жданов В.С., 26
Зуев В.А., 26

Кадыржанов К.К., 55
Кенжин Е.А., 26
Кислицын С., 15
Козтаева У.П., 87
Колобердин М., 15
Колодешников А.А., 26
Лысухин С., 15
Максимкин О.П., 77
Масягин Д.Г., 70
Мережко М.С., 77
Накипов Д.А., 8

Нестерова А., 15
Пахниц А.В., 26
Пеньков Ф., 15
Платов А., 15
Пустовалов И.А., 70
Рубан С.В., 77
Тулеушев А.Ж., 8
Цай К.В., 77
Чакров П.В., 8
Шериф Хамада, 15
Щербинина Н.В., 77

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в виде электронной (на гибком диске или по электронной почте присоединенным (attachment) файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисовочных подписей.

Текст печатается через одинарный междустрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия, города и страны местонахождения организации, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТу 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.psx, *.dxf с разрешениями 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- на отдельном листе автор сообщает сведения о себе: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, кафедра и указывает служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, адрес электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

Ответственный секретарь д.т.н. М.К. Мукушева
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, 6.
<http://www.nnc.kz/vestnik>

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2001.

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, 6.

