ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(21), МАРТ 2005

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – к.т.н. ТУХВАТУЛИН Ш.Т.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.т.н. АРЗУМАНОВ А.А., БЕЛЯШОВА Н.Н.,
к.т.н. ГИЛЬМАНОВ Д.Г., д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – **заместитель главного редактора**,
д.г.-м.н. ЕРГАЛИЕВ Г.Х., д.ф.-м.н. КАДЫРЖАНОВ К.К., КОНОВАЛОВ В.Е., к.ф.-м.н. МУКУШЕВА М.К.,
д.б.н. ПАНИН М.С., ПИВОВАРОВ О.С., ПТИЦКАЯ Л.Д., д.б.н. СЕЙСЕБАЕВ А.Т., к.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.,
д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Ж.С. – **заместитель главного редактора**, д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Н.Ж.

ҚР ҰЯО Хабаршы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(21) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2005 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 1(21), MARCH 2005

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА 4
Птицкая Л.Д., Стукин Е.Д., Горбунова Э.М., Коновалов В.Е., Квасникова Е.В.

РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ПЛОЩАДКАХ БАЛАПАН И ДЕГЕЛЕН СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА 10
Стрильчук Ю.Г., Птицкая Л.Д., Осинцев А.Ю., Ларин В.Н., Митяев А.В.

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ 13
Осинцев А.Ю., Лехто Ю.Л.

КОРРОЗИННАЯ СТОЙКОСТЬ В ВОДЕ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 19
Бакланов В.В., Дерявко И.И., Малышева Е.В.

СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ КАНАЛА ВОТК №4 ПОСЛЕ 14-ЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М 24
Бакланов В.В., Дерявко И.И., Жданов В.С., Колбаенков А.Н., Кукушкин И.М., Стороженко А.Н., Таинов Д.З.

ОТРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ КОРРОЗИИ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ В ВОДЕ 29
Бакланов В.В., Дерявко И.И., Коянбаев Е.Т., Малышева Е.В., Окапбаев Р.А., Сафронов А.Д., Стороженко А.Н.

ТЕРМОДЕСОРБЦИОННАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ 34
Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И., Понкратов Ю.В.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУСПЕНЗИИ ДИОКСИДА УРАНА 38
Такибаев Ж.С., Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

ДЕФОРМАЦИОННАЯ МАРКЕРНАЯ ЭКСТЕНЗОМЕТРИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ 46
Максимкин О.П., Гусев М.Н., Осипов И.С.

О ПРИМЕНЕНИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ АММИАЧНО-СЕЛИТЕРННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ 53
Ковалев В.В., Масягин Д.Г., Пустовалов И.А.

СОЛЯНОЙ КУПОЛ ЗАПАДНЫЙ АЗГИР – КАК ВМЕЩАЮЩИЙ МАССИВ ДЛЯ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ 57
Гильманов Д.Г., Ахметов Е.З., Березин С.А., Адымов Ж.И., Ерматов А.С., Ziegenhagen J.

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ РАСТВОРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ 63
Зверев В.В., Супрунов В.И.

ЗАДАЧА ШТУРМА – ЛИУВИЛЛЯ 75
Едгебаев А.М.

УДК 504.4.054:614.876

ПРОБЛЕМА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

[1)]Птицкая Л.Д., [2)]Стукин Е.Д., [3)]Горбунова Э.М., [4)]Коновалов В.Е., [3)]Квасникова Е.В.

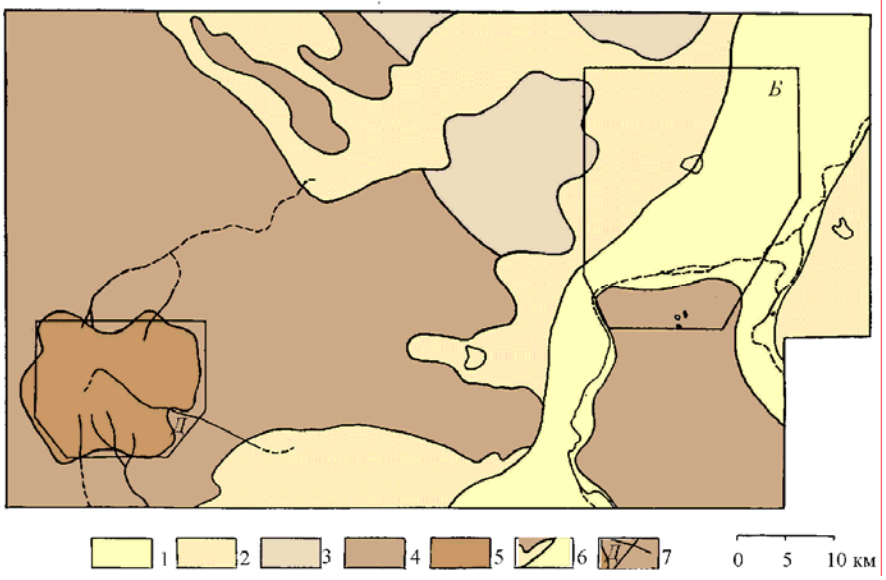
[1)]Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2)]Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Москва, Россия
[3)]Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия
[4)]Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Для получения объективной и достоверной информации о степени радиоактивного загрязнения подземных вод Семипалатинского испытательного полигона следует предусмотреть постановку и проведение комплексных исследований, направленных на изучение радиационной обстановки в пределах сформированных зон механического действия подземного ядерного взрыва. При оценке и прогнозе экологического состояния недр необходима полная информация о возможных процессах миграции радионуклидов с подземными водами. В настоящее время на двух объектах СИП в рамках проекта К-810, поддержанного Международным научно-техническим центром, проводятся работы по изучению радиоактивного загрязнения подземных вод.

В век ядерных технологий на первый план выходит проблема рекультивации территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Выполненный объем научно-исследовательских работ по радиационному мониторингу территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) за прошедшее десятилетие позволил выделить и оконтурить следы и пятна радиоактивного загрязнения природных сред. На основании полученных карт и схем установлены основные закономерности формирования радиационной обстановки.

В пределах СИП протяженные следы радиоактивного загрязнения местности связаны с проведением низких воздушных и наземных взрывов. Локальные радиоактивные пятна обусловлены ядерными взрывами с экскавацией грунта и внештатными ситуациями [10]. Проследить динамику радиационной обстановки СИП в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия данных по радиационному контролю за окружающей средой при проведении ядерных испытаний.

При анализе современного состояния и прогнозе устойчивости зон радионуклидного загрязнения следует учитывать особенности ландшафта и инженерно-геологических условия. Большая часть территории СИП занята мелкосопочником. Пониженные части рельефа представлены древними ложбинами стока, долинами рек, озерными котловинами. Абсолютные отметки поверхности рельефа увеличиваются с северо-востока на юго-запад от 250 - 300 м до 1000 м (Рисунок 1).



(1-5 – геоморфологические элементы с преобладающими абсолютными отметками, м: 1 –долина реки (<250), 2 – равнина (250-400), 3 – низкий мелкосопочник (400-650), 4 – высокий мелкосопочник (650-1000), 5 – низкогорье (>1000); 6 – граница геоморфологических элементов; 7 –контуры площадок)

Рисунок 1. Геоморфологическая схема

К выделенным в пределах территории геоморфологическим элементам - высокому мелкосопочнику и низкогорью приурочена область питания подземных вод. Низкий мелкосопочник, аллювиально-пролювиальные равнины и долина реки представляют собой область транзита подземного потока. Разгрузка водоносных горизонтов осуществляется в русла рек и ручьев, на участках эрозионных врезов. На полигоне преимущественное распространение получают светло-каштановые почвы, солончаки и солонцы, преобладает степная и полупустынная растительность.

Специфика распределения радионуклидов в природных ландшафтах определяет условия локального загрязнения грунтовых вод. В районе максимальной концентрации радиоактивного следа, прослеженной в пределах области питания подземных вод, необходимо предусмотреть вертикальное зондирование зоны аэрации. Радиоактивное загрязнение открытых водоисточников возможно не только за счет выпадения аэрозолей из облака ядерного взрыва, но и в результате последующего смыва радиоактивных частиц с поверхности почвы.

Наряду с поступлением радионуклидов “сверху” не исключена и опасность радиоактивного загрязнения “снизу” в случае установления устойчивых гидравлических связей между водоносным горизонтом и зонами наведенной трещиноватости. Так как до сих пор неясна ситуация со степенью загрязненности геологической среды на уровне проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ).

Только 50% испытаний на территории СИП могут быть отнесены к взрывам полного камуфлета. Около 46% - это взрывы неполного камуфлета, характеризующиеся выходом в атмосферу инертных радиоактивных газов в эпицентральной зоне взрыва в вентиляционном режиме истечения. 4% испытаний связаны с напорным истечением радиоактивных продуктов взрыва на поверхность. При этом нештатные радиационные ситуации были зафиксированы при 13 ПЯВ, из них 6 случаев в штольне и 7 - в скважинах [7].

Момент обрушения полости во многом определял характер радиоактивного загрязнения всех зон наведенной трещиноватости. Ряд радионуклидов (летучие, имеющие газообразных предшественников и тритий), не в полной мере зафиксированные в расплаве, выходили за пределы полости и распределялись в пределах зон наведенной трещиноватости [4]. Например, на испытательных площадках – "Дегелен", "Балапан" и "7" после обрушения полости, происходившем в отдельных случаях через часы, десятки часов после взрыва, отмечался выход сохранившихся подвижных радиоактивных продуктов [1, 7]. В апреле 1992 г. через 15 лет после ПЯВ в скважине "Глубокая" произошло обрушение эпицентральной зоны, которое сопровождалось взрывом, мощным газовым выбросом и двухчасовым пожаром. Спустя 2 года диаметр воронки достиг 115 м, глубина – 30м [10] (Рисунок 2).

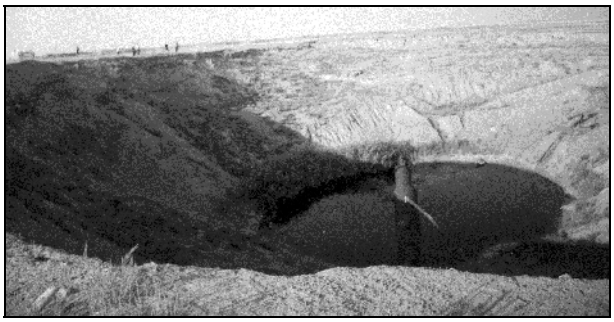


Рисунок 2. Общий вид воронки проседания скважины "Глубокая" (сентябрь 2002 г.)

Неоднородность геологического строения среды обусловила проявление эффекта дальнодействия взрыва, выраженного в формировании дополнительной зоны локальных необратимых проявлений на расстоянии около 1 км для ПЯВ мощностью 1 кт [2]. Твердые радиоактивные продукты распада летучих газов (^{90}Sr, ^{137}Cs и др.) сорбировались на стенках трещин. Десорбция вторичных радионуклидов происходила при контакте с водой [8].

Выбор глубины заложения заряда полностью исключал выход продуктов взрыва в зону свободного водообмена. Однако при аварийном поступлении радиоактивных продуктов в атмосферу существовала реальная угроза радиоактивного загрязнения подземных вод. Особую опасность представляли участки фонтанирования скважин при ПЯВ, так как в первые секунды и часы с прорывом избыточного давления, соответственно, возможно было и поступление подвижных радиоактивных продуктов в водоносный пласт.

Результаты гидрогеологических исследований центральной зоны подземного ядерного взрыва (ЦЗ ПЯВ) позволили оценить проницаемость каждой из сформированных зон деформаций. Согласно проведенному анализу фильтрационных свойств зон деформации в пределах ЦЗ ПЯВ были выделены зоны хорошо проницаемых, проницаемых и слабопроницаемых пород. Первые две зоны, характеризующиеся значениями коэффициента фильтрации более 1м/сут, развиты преимущественно в пределах полости взрыва, столба обрушения и зоны сдвижения пород. Последняя зона слабопроницаемых пород с коэффициентом фильтрации менее 1 м/сут приурочена к периферийной части деформируемого массива. Разброс значений фильтрационных параметров в пределах каждой из зон деформации обусловлен местоположением рассматриваемого интервала по отношению к центру взрыва. В соответствии с расчетами максимальное значение пустотности в зонах деструкции горных пород, сформированных под воздействием ПЯВ, достигает 15 % [5].

Для участков проведения ПЯВ установлено существование локальных зон с техногенно-нарушенным режимом подземных вод, связанных с общим изменением состояния геологической среды. Необратимые изменения уровня подземных вод

свидетельствовали о наличии гидравлической связи между водоносными горизонтами и зонами наведенной трещиноватости [3]. Вода, заполнявшая ЦЗ ПЯВ, становилась жидким слабоактивным, реже - среднеактивным отходом долгоживущих осколков деления и трития [8]. Формирование ореола радиоактивного загрязнения подземных вод связано с постепенным разубоживанием очага, содержащим долгоживущие радионуклиды. Существование связи между полостью ПЯВ и водоносным горизонтом косвенно подтверждено повышенным значением концентрации трития (более 1000 кБк/л) в скважине 1419, расположенной на площадке Балапан [10].

Загрязненность геологической среды может быть прослежена как в пределах сформированных техногенных зон, так и на участках подновления естественной трещиноватости. В пределах площадки Дегелен отмечены вторичные эффекты радиационного загрязнения территории, связанные с транзитом радионуклидов за счет инфильтрации атмосферных осадков и талых вод через зоны наведенной трещиноватости и разгрузки временных водотоков в долины ручьев [6]. Даже после проведенных работ по ликвидации порталов штолен с водопроявлениями радиационная обстановка горного массива не достигла равновесного состояния [10]. Например, устойчивость проявления локального радиоактивного пятна, сохранившегося на приустьевой площадке штольни 504 после ее закрытия на более низкой гипсометрической отметке (Рисунок 3) [11], обусловлена региональным загрязнением приконтактной зоны интрузивных образований, прорывающих вмещающие эффузивно-осадочные отложения (Рисунок 3).

При радиоэкологической оценке состояния СИП необходимо предусмотреть составление земельного кадастра территории с разработкой критериев уязвимости подземных вод по следующим градациям: незащищенные, слабо защищенные и условно защищенные. Под защищенностью подземных вод от радиоактивного загрязнения "сверху" понимается перекрытие водоносного горизонта слабопроницаемыми (водоупорными) отложениями, препятствующими проникновению радионуклидов с поверхности в подземные воды. Надежность консервации радионуклидов "снизу" гарантирует отсутствие гидравлической связи между водоносным горизонтом и зонами наведенной трещиноватости.

Для построения карт естественной защищенности территории СИП необходимо оконтурить зоны механического воздействия ПЯВ. В выделенных областях особое внимание должно быть уделено участкам повышенной трещиноватости пород, сопровождающим литологические и геологические границы, тектонические нарушения, представляющим благоприятные условия для миграции радионуклидов.

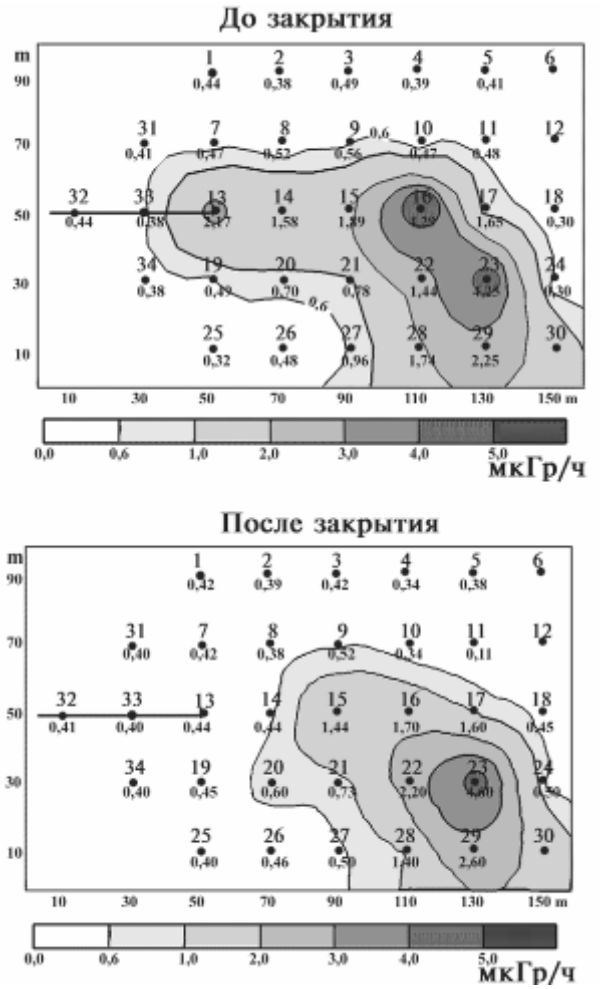
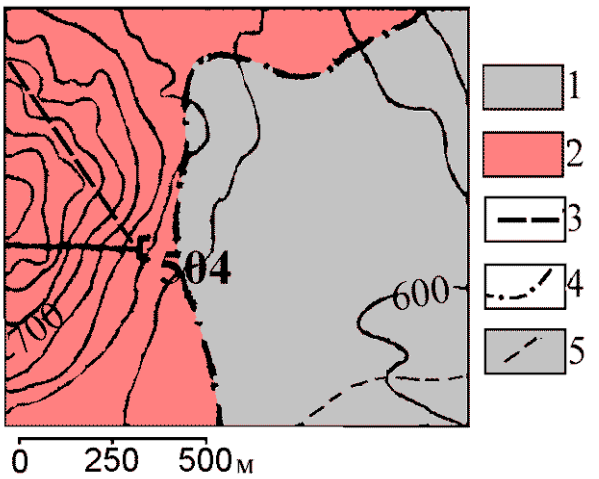


Рисунок 3. Схема распределения плотности загрязнения приустьевой площадки штольни 504 до и после закрытия [11]



(1 – эффузивно-осадочные отложения нижнего карбона; 2 – интрузивные образования верхнего палеозоя; 3 - разрывное нарушение; 4 – стратиграфическая граница; 5 – русло ручья)

Рисунок 4. Схема геологического строения участка расположения штольни 504 (горизонтали проведены через 20 м)

Для получения предварительной информации по оценке радиоактивного загрязнения подземных вод авторами статьи был предложен проект по теме: "Исследование миграции радионуклидов с подземными водами на территории Семипалатинского полигона с целью прогноза возможных последствий радиоактивного загрязнения питьевой воды и геологической среды", поддержанный Международным научно-техническим центром под номером К-810. Головной организацией является Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК. Институты-участники проекта К-810: Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Институт динамики геосфер РАН.

Реализация проекта К-810 предусматривает выполнение следующих задач:

- обобщение и систематизацию архивных данных для выделения перспективных участков, характеризующиеся высокой степенью изученности гидрогеодинамической обстановки;
- разработку математической модели миграции радионуклидов с подземными водами;
- подготовку методики проведения полевых и лабораторных работ по отбору и радионуклидному анализу представительных проб подземных вод;
- проведение экспедиционных работ по выделению природно-техногенных факторов, ответственных за перенос радионуклидов Семипалатинского полигона;
- анализ полученной информации с целью прогноза возможных последствий радиоактивного загрязнения подземных вод.

Ранее специальные площадные и скважинные инженерно-геологические, гидрогеологические и геофизические исследования по изучению воздействия ПЯВ на массив горных пород выполнялись эпизодически на отдельных объектах в два этапа – до и после эксперимента. В настоящее время в рамках проекта К-810 проводятся работы на двух объектах СИП: 1003 – на площадке "7" и 1388 – на площадке "Балапан". Предварительное обобщение и систематизация архивной информации о реакции геологической среды на взрывное воздействие на выбранных объектах свидетельствует о наличии гидравлической связи между полостью ПЯВ и подземными водами.

На объектах 1003 и 1388 в радиусе 1,5-2 км от эпицентра ПЯВ выполнено рекогносцировочное обследование с целью выяснения современного состояния скважин и выделения скважин, информативных для организации постановочных работ по оценке загрязненности подземных вод. Проведена чистка наблюдательных скважин от постороннего мусора и восстановлена их глубина. На объекте 1003 из 15 наблюдательных скважин к исследованиям удалось подготовить 13, на объекте 1388 – из 14 скважин 11.

В наблюдательных скважинах выполнены геофизические исследования – кавернометрия, гамма-каротаж и электрический каротаж. Проводится интерпретация полученных каротажных диаграмм. Начато проведение опытно-фильтрационных работ в скважинах на объекте 1388. Организованы стационарные наблюдения за уровенным режимом подземных вод и отбор представительных проб на сокращенный химический и радионуклидный анализы.

Для создания математической модели миграции радионуклидов с подземными водами проводится схематизация основных стадий изменения гидрогеологической, гидрогеохимической ситуации при ПЯВ и типизация условий распространения радионуклидов с подземными водами. Обобщенная модель предполагает выделение и учет наиболее общих для всех объектов закономерностей. При схематизации изменений гидрогеологической ситуации при ПЯВ, определяющей механизм радиоактивного загрязнения подземных вод, выделены 3 этапа.

К первому этапу отнесена фаза дренирования водоносного горизонта, способствующая накоплению радионуклидов в пределах сформированных в массиве техногенно-нарушенных зон. На втором этапе восстановления гидрогеологической ситуации гидрогеохимические процессы получают преимущественное развитие в рамках наведенной воронки депрессии. К третьему этапу приурочено распространение фронта радиоактивного загрязнения в соответствии с общим планом подземного потока.

Установлено, что формирование источника повышенной концентрации радионуклидов связано с зональной структурой области необратимого деформирования массива горных пород при ПЯВ. С точки зрения миграции радиоактивных продуктов взрыва основной интерес представляет материал, находящийся в жидкой и твердой фазе. В качестве первого приближения рассматривается миграция трития. В этом случае ореол распространения радиоактивности от ПЯВ совпадает с схемой движения подземных вод, профильтровавшихся через источник первоначального радиоактивного загрязнения горных пород.

В ходе постановочных работ на объектах 1003 и 1388 планируется определить ореолы радиоактивного загрязнения подземных вод по заданным "маркирующим" компонентам (изотопам ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}Pu$ и ^{241}Am). По результатам скважинных геофизических и опытно-фильтрационных работ предполагается выделение интервалов, перспективных для миграции радионуклидов с подземными водами.

Поисковый характер полевых работ определяет последовательное уточнение прогнозных оценок загрязненности геологической среды. Для получения корректных результатов проводится сравнительная оценка определяемых параметров с фоновыми значениями, зарегистрированными в слабонарушенных (близких к естественным) условиях. Полученные данные в ходе скважинных исследований и экспериментальных работ на участке привлечены для уточнения схем движений подземных вод на объектах 1003 и 1388 (Рисунок 5, 6).

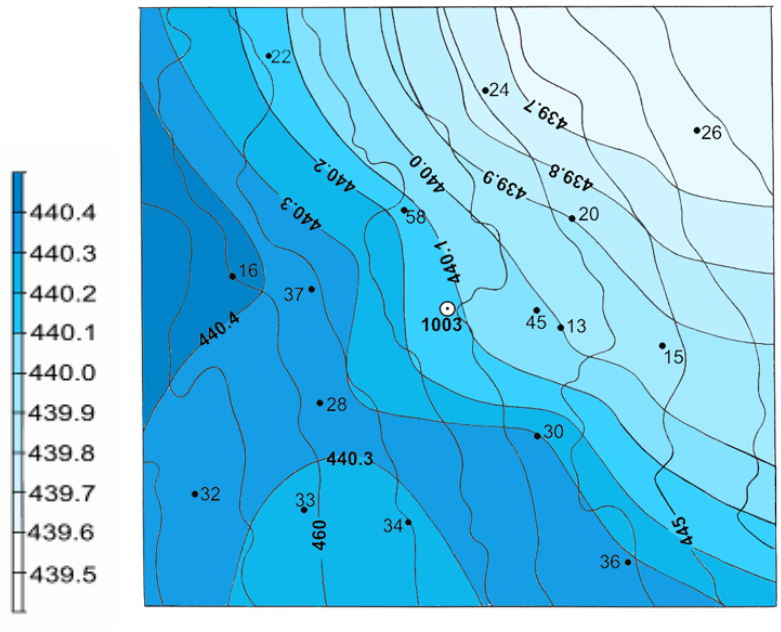


Рисунок 5. Пьезометрический уровень на объекте 1003 (по состоянию на май 2003 г.)

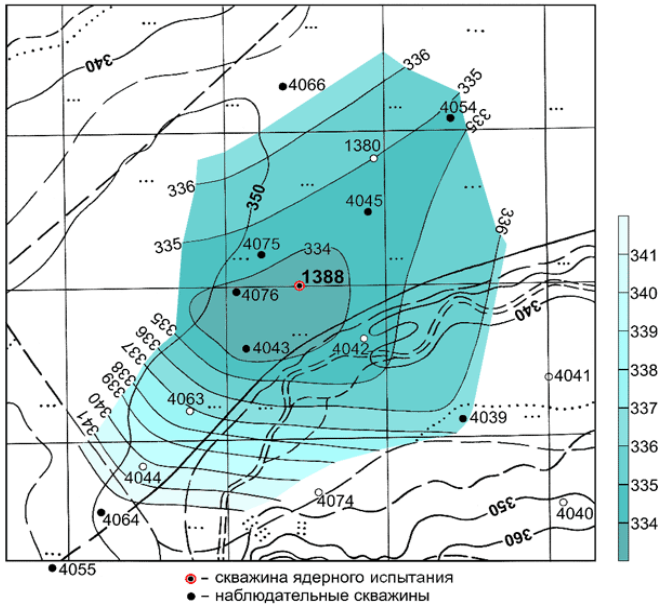


Рисунок 6. Пьезометрический уровень на объекте 1388 (по состоянию на май 2003 г.)

По результатам полевых исследований планируется сделать заключение о степени загрязненности подземных вод радионуклидами на объектах 1003 и 1388. Материалы экспедиционных и камеральных исследований будут использованы для создания адекватного вида математической модели распространения радионуклидов с подземными водами.

На международной научной конференции, проходившей в Москве в апреле 2000 г. и посвященной радиоактивности при ядерных взрывах и авариях, академик Лаверов отмечал: "Проблема обеспечения экологической и радиационной безопасности… является многогранной и сложной". В рамках целевой программы анализа радиационной ситуации СИП следует предусмотреть постановку и проведение комплексных исследований, направленных на изучение радиоактивного загрязнения геологической среды, вмещающей эпицентры ПЯВ. Для оценки и прогноза геоэкологической обстановки необходима полная информация о возможных процессах миграции радионуклидов в пределах наведенных зон механического воздействия ПЯВ.

Литература

1. Адушкин В.В. Влияние геологических факторов на распространение радиоактивных продуктов при подземных ядерных взрывах //Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Труды международной конференции. Москва 24-26 апреля 2000г. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 2000. - Т.1. - С.585-593.
2. Адушкин В.В., Спивак А.А., Чернышев А.К. Физическая картина подземного ядерного взрыва //На благо России. К 75-летию академика РАН Ю.А.Трутнева. Саранск: "Красный Октябрь", 2002. - С.170-193.
3. Горбунова Э.М. Особенности формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод //Третья всероссийская научная конференция "Физические проблемы экологии" (Экологическая физика). Тезисы докладов. М.: МГУ, 2001. - С.126-127.
4. Израэль Ю.А., Стукин Е.Д. Феноменология загрязнения подземных вод после подземного ядерного взрыва //Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Труды международной конференции. Москва 24-26 апреля 2000г. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 2000. - Т.1. - С.616-623.
5. Мурзадилов Т.Д., Беляшов Д.Н., Глущенко В.Н., Логвинов О.В., Моренко В.С., Стромов В.М., Глущенко Г.М. Теоретическая оценка деструкции горных пород под воздействием серии подземных ядерных взрывов на участке Балапан //Геофизика и проблемы нераспространения. Вестник НЯЦ РК. Вып.2. Курчатов: НЯЦ РК, 2000. - С.123-126.
6. Птицкая Л.Д., Артемьев О.И., Беловолов Н.Н. К вопросу о вторичном загрязнении техногенными радионуклидами территории СИП //Мониторинг ядерных испытаний и их последствий. 12-16 августа 2002 г. Боровое. Казахстан: Тезисы докладов. Международная конференция. Курчатов: НЯЦ РК, 2002. - С.32-33.
7. Ядерные испытания СССР. Begell-Atom, LLC-publishing, 1997. - Т.2. - 302с.
8. Ядерные испытания СССР: Мирные ядерные взрывы. М.: ИздАт, 2001. - 518с.
9. Ядерные испытания СССР: Семипалатинский полигон. М.: ФУ "Медбиоэкстрем", 1997. - 319с.
10. Ядерные испытания СССР: Современное радиоэкологическое состояние полигонов. М.: ИздАт, 2002. - 652с.
11. ShkolnikV.S. A monograph, 2002 (DE-AC04-94AL85000).

СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНЫҢ ЖЕР АСТЫ СУЛАРЫНЫҢ РАДИОАКТИВТІ ЛАСТАНУ МӘСЕЛЕСІ

[1)]Птицкая Л.Д., [2)]Стукин Е.Д., [3)]Горбунова Э.М., [4)]Коновалов В.Е., [3)]Квасникова Е.В.

[1)]ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан
[2)]Ресей ғылым академиясы және Ресгидрометтің Глобалдық климат және экология институты, Мәскеу, Ресей
[3)]Ресей ғылым академиясының Геосфера динамикасы институты, Мәскеу, Ресей
[4)]ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер нституты, Курчатов, Қазақстан

Семей сынақ полигонындағы жер асты суларының радиоактивті ластану дәрежесі туралы нақты және жан-жақты ақпарат алу үшін ядролық жер асты жарылысының қалыптастылылған зоналардың аумағында механикалық әсерлі радиациялық жағдайды зерттеуге бағытталған комплексті зерттеулердің өткізілуін және қойылуын қарастыру керек. Жер қойнауының экологиялық жағдайын бағалауға және болжау жасауға радиоуклидтердің жер асты суларымен көшу-қону процестерінің мүмкіншілігі туралы толық ақпарат керек. Қазіргі кезде халықаралық ғылыми - техникалық орталық қолдау жасаған ССП екі объектісінде К-810 жобасы шеңберінде жер асты суларының радиоактивті ластануын зерттеу бойынша жұмыстары жүргізілуде.

PROBLEM OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF GROUNDWATER OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

[1)]L.D. Ptitskaya, [2)]E.D. Stukin, [3)]E.M. Gorbunova, [4)]V.E. Konovalov, [3)]E.V. Kvasnikova

[1)]ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан
[2)]Institute of Global Climate and Ecology Roshydromet and RAS, Moscow, Russia
[3)]Institute of Geosphere Dynamic RAS, Moscow, Russia
[4)]Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

It is necessary to provide statement and realization of the complex researches directed on studying of radiating conditions within the limits of generated zones of mechanical action of underground nuclear explosion for reception objective and reliable information about a degree of radioactive contamination of groundwater at the Semipalatinsk Test Site. The full information on possible processes of radionuclide migration with groundwater is necessary for the estimation and forecast of an ecological condition of bowels. Now at two objects of the STS within the framework of the K-810 project, supported by the International Scientific and Technical Center, works on studying radioactive pollution of groundwater are carried out.

УДК 504.53.062.2: 574.4

РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ПЛОЩАДКАХ БАЛАПАН И ДЕГЕЛЕН СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Стрильчук Ю.Г., Птицкая Л.Д., Осинцев А.Ю., Ларин В.Н., Митяев А.В.

Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Выполнена оценка радиоактивного загрязнения ряда приустьевых (на участке Балапан) и припортальных (на участке Дегелен) площадок в радиусе 100 м от мест проведения подземных ядерных взрывов. Установлена неодинаковая степень загрязнения площадок техногенными радионуклидами и отдельные локальные аномалии.

После подписания в Москве 5 августа 1963 г. Договора о запрещении ядерных испытаний в трех средах - в атмосфере, в космическом пространстве и под водой, - все ядерные испытания в СССР стали проводить под землей. На Семипалатинском испытательном полигоне подземные ядерные испытания проводились в скважинах и штольнях на испытательных площадках Сары-Узень (Муржик), Балапан, Телькем и Дегелен.

Испытательная площадка Дегелен использовалась для проведения ядерных взрывов в горизонтальных горных выработках – штольнях. Именно на этой площадке были осуществлены и первый (11.10.1961 г.), и последний (19.10.1989 г.) подземные ядерные взрывы. Всего за период с 1961 г. по 1989 г. в горном массиве были пройдены 181 штольня, в которых проведены испытания с подрывом ядерных устройств относительно небольшой мощности (в основном до 20 кт). На площадках Сары-Узень (Муржик), Балапан, Телькем ядерные испытания проведены в вертикальных горных выработках – скважинах. Площадка Балапан была предназначена, в первую очередь, для осуществления испытаний ядерных устройств максимальной пороговой мощности до 150 килотонн.

Запрещение ядерных испытаний в трех средах позволило снизить загрязнение окружающей среды радиоактивными продуктами. Однако продолжение испытаний под землей не исключало попадание радионуклидов в атмосферу. При проведении некоторых испытаний происходили выбросы в атмосферу и на дневную поверхность продуктов ядерного распада, образовавших зоны локального радиоактивного загрязнения, которые в большинстве случаев ограничивались приустьевыми зонами.

Для оценки радиационной обстановки проведены работы по изучению радиоактивного загрязнения приустьевых (на участке Балапан) и припортальных (на участке Дегелен) площадок в местах проведения подземных ядерных взрывов.

На испытательном участке Балапан исследованы приустьевые площадки 106 так называемых «боевых» скважин, на участке Дегелен – припортальные площадки 181 штольни. Обследование мест проведения подземных ядерных испытаний на участке Балапан ограничено территорией, непосредственно прилегающей к оголовкам скважин в радиусе 100 м. Исследовались площадки размером примерно 0,02 км^2 в 13 точках, расположенных в узлах сетки с шагом 50 м, с центром у оголовка скважины. На участке Дегелен исследовались припортальные площадки штолен размером 80х100 м в 34 точках, расположенных в узлах сетки с шагом 20 м. В каждой точке проводились измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД), плотности поверхностного загрязнения α-, β-излучателями. При выявлении радиоактивного загрязнения, выходящего за пределы обследуемого участка, радиационное обследование продолжалось по сетке с шагом 50 м, до выхода значений МЭД на уровень 0,3 мкЗв/ч. Отбор проб грунта для проведения лабораторных анализов на радионуклидный состав проводился у оголовка скважины, а также в точках с максимальным значением радиационных параметров, а вблизи штолен - в 5 точках, характеризующихся максимальными значениями радиационных параметров.

В результате исследований получен большой массив радиационных параметров, характеризующих современную радиационную обстановку - распределение радиационных параметров на приустьевых площадках скважин и штолен (рисунки 1, 2). Установлено, что степень загрязнения приустьевых площадок на разных скважинах не одинакова: на одних - концентрация техногенных радионуклидов не превышает среднего уровня глобальных выпадений, на других - превышение над фоном достигает шести порядков. Основная доля радиоактивных продуктов остается "захороненной" под толстым слоем породы.

Исследования приустьевых площадок скважин со штатной радиационной ситуацией показали, что практически на всей территории в обследованном районе плотность потока поверхностного α-, β–излучения находится на фоновом уровне, а МЭД не превышает нормативов. Имеются только локальные участки с превышением значений радиационных параметров. Максимальные концентрации радионуклидов наблюдаются у оголовков скважин.

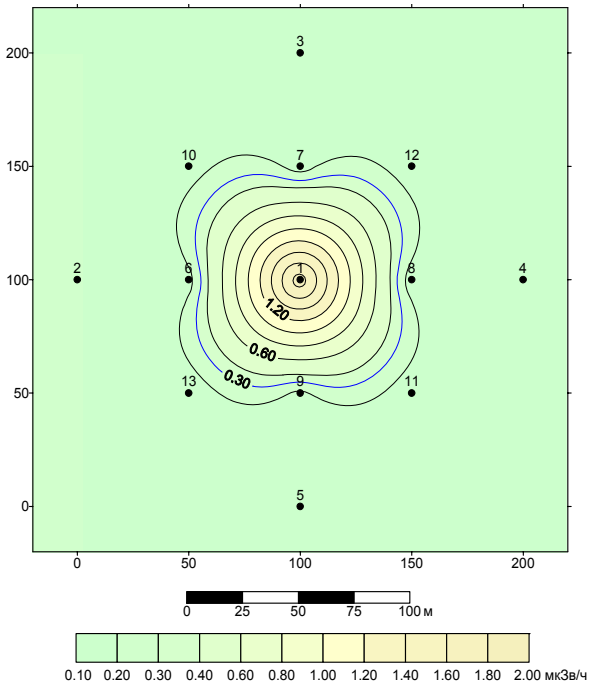


Рисунок 1. Распределение МЭД на приустьевой площадке скважины 1077 участка Балапан

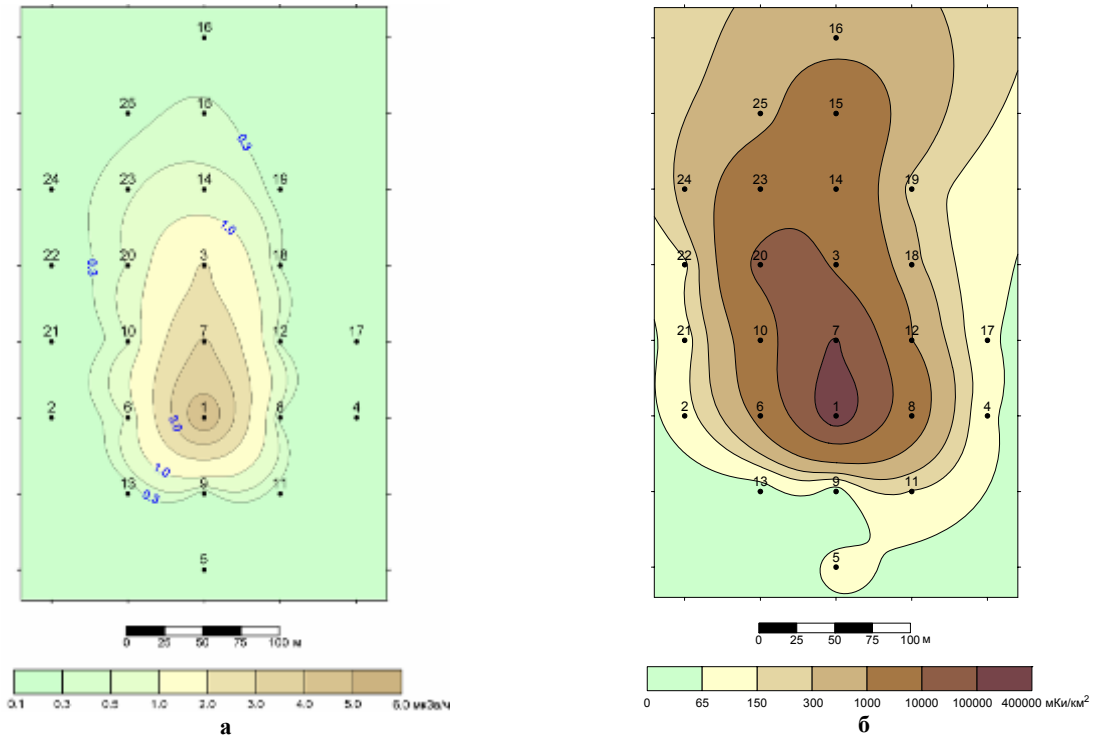


Рисунок 2. Распределение мощности эквивалентной дозы (а) и плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs (б) в районе скважины №1069

В районе приустьевых площадок скважин с нештатной радиационной ситуацией имеются участки радиоактивного загрязнения, располагающиеся, в основном, вокруг оголовка скважины, а следы радиоактивных выпадений распространяются на расстояние до 2 км.

На большинстве штолен радиоактивное загрязнение носит локальный характер и сконцентрировано на припортальных участках (Рисунок 2). На некоторых штольнях обнаружено радиоактивное загрязнение, имеющее форму вытянутых следов, выходящих за пределы территории обследования. В 1996-1999 гг. проведены работы по ликвидации

штолен на горном массиве Дегелен. После ликвидации штолен рельеф порталов доводился до естественного ландшафта путем засыпки грунтом прилегающей территории. При этом практически проводилась рекультивация территории припортальных участков. В результате концентрация радионуклидов в почве значительно уменьшалась.

Тем не менее, радиоактивное загрязнение на припортальных площадках остается достаточно высоким.

Удельная концентрация радиоактивных продуктов деления и активации на преобладающем большинстве штолен многократно превышает уровень глобального загрязнения. Особую опасность представляют штольни, из которых продолжается выход подземных вод, выносящих радиоактивные продукты ядерных испытаний на дневную поверхность. Загрязнение вдоль русел этих водотоков находится на уровне радиоактивных отходов. В последние годы отмечено заметное изменение радиационной обстановки в худшую сторону, что может быть связано с несанкционированного извлечения радиационно-загрязненного кабеля.

Таким образом, даже проведение рекультивации не всегда может в полной мере исключить остаточное радиационное загрязнение, обусловленное проведением ядерных испытаний. Данные, полученные в процессе исследовательских работ могут быть полезны при планировании и выполнении различных работ, в том числе в рамках Инспекции на местах.

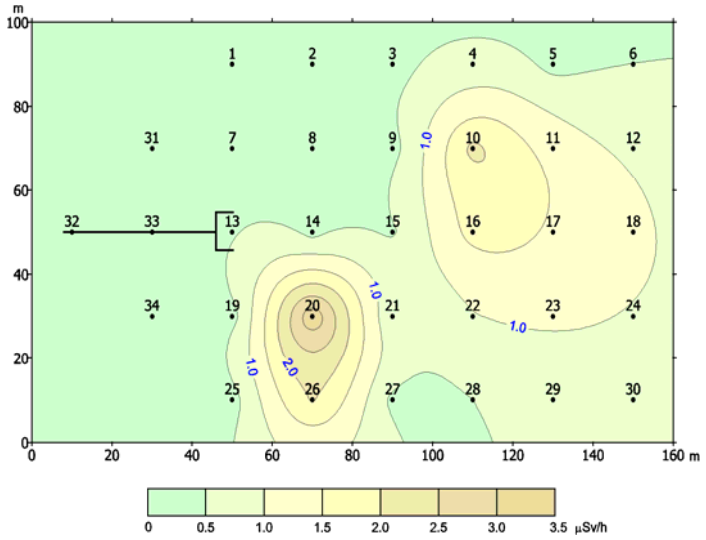


Рисунок 3. Распределение МЭД на припортальной площадке штольни Ж-1 участка Дегелен

СЕМЕЙ СЫНАУ ПОЛИГОНЫНЫҢ БАЛАПАН ЖӘНЕ ДЕГЕЛЕН АЛАҢДАРЫНДА ЖЕРАСТЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР ӨТКІЗІЛЕН ЖЕРЛЕДЕГІ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙ

Стрильчук Ю.Г., Птицкая Л.Д., Осинцев А.Ю., Ларин В.Н., Митяев А.В.

ҚР ҰЯО Ррадиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан

Ядролық жарылыстар өткізілген жерлерден 100 м. радиусында сағасы жанындағы (Балапан телімінде) және портал жанындағы (Дегелен телімі) радиоактивтік ластануының бағалауы орындалған. Бөлек оқшауланған аномалиялар болуында, алаңдардың техногендік радионуклидтермен бірдей емес ластану дәрежесі анықталған.

RADIATION SITUATION IN UNDERGROUND NUCLEAR TESTING AREAS AT BALAPAN AND DEGELEN FIELDS OF SEMIPALTINSK TEST SITE

Yu.G. Strilchuk, L.D. Ptitskaya, A.Yu. Ossintsev, V.N. Larin, A.V. Mityaev

Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Radioactive contamination determination of wellhead (at Balapan site) and near tunnel (at Degelen site) areas within 100m radius from the places of underground nuclear explosions was carried out. Unequal sites contamination degree due to man-caused radionuclides and the availability of local anomalies was detected.

УДК 504.3.064.3

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

[1)]Осинцев А.Ю., [2)]Лехто Ю.Л.

[1)]Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2)]Лаборатория радиохимии, университет Хельсинки, Финляндия

В Казахстане проведены совместные Казахстанско–Финские исследования, цель которых состояла в развитии методов отбора проб воздуха применительно к широкой области исследования окружающей среды для определения незаявленной ядерной активности. Исследования проведены в поддержку мер предосторожности и действий по нераспространению МАГАТЭ. В течение 2000 г. в г. Курчатове проведен еженедельный отбор проб воздуха объемом 20 000–25 000 м^3, в течение трёх месяцев 2001 г. образцы отбирались в г. Астане, расположенного в 500 км западнее Курчатова. Выполнено сравнение результатов, полученных на территориях с разной степенью радиоактивного загрязнения.

Основным источником поступления «техногенных» радионуклидов в объекты окружающей среды Семипалатинского испытательного полигона явились ядерные испытания. Радиоактивное загрязнение после их проведения вызвано радионуклидами-осколками деления ядерного горючего, не прореагировавшим ядерным горючим, а также радионуклидами-продуктами нейтронной активации. Существующие испытательные площадки имеют очень высокие уровни радиоактивного загрязнения. Некоторые радиоактивные следы выпадений, обусловленные проведением ядерных испытаний, протянулись на расстоянии свыше 300 км, и до настоящего времени имеют высокий уровень радиоактивного загрязнения. Кроме атмосферных испытаний свой вклад в уровень радиоактивного загрязнения полигона и прилегающих территории внесли подземные испытания. Из них в большей степени негативное влияние на радиационный фон оказали экскавационные ядерные испытания. Также на территории СИП проводились гидроядерные эксперименты по диспергированию плутония и испытание боевых радиоактивных веществ.

Сорок лет прошло после прекращения атмосферных ядерных испытаний на полигоне, более десяти лет на нём не проводятся подземные ядерные взрывы, однако, радиационная обстановка на полигоне остаётся сложной. Это связано с процессами вторичного загрязнения территории СИП техногенными радионуклидами и, в первую очередь, представляющими наибольшую опасность для человека и окружающей среды радионуклидами $^{239/240}$Pu, ^{90}Sr, ^{137}Cs. Выпав, в какой либо форме на поверхность земли, радионуклиды могут перераспределяться и мигрировать в результате ветрового переноса (пыльные бури, степные пожары). Очевидно, что возможность миграции радионуклидов, их проникновение в биологические цепочки и, в конечном счёте, в организм человека зависят от многих факторов.

В связи с большой давностью проведения атмосферных ядерных испытаний доза от внешнего излучения на большей части полигона не превышает фоновые значения. В то же время вклад дозы от внутреннего облучения в общую дозу неизвестен (в особенности от α- излучающих радионуклидов). Основным путями поступления радионуклидов в организм человека являются пероральный (с пищей) и ингаляционный (с вдыхаемым воздухом). Нахождение плутония в воздухе приземной атмосферы является потенциальной угрозой здоровью населения населенных пунктов, расположенных в непосредственной близости от СИП. Известно, что плутоний накапливается в организме человека в основном вследствие вдыхания несущих плутоний аэрозолей, которые образуются при ветровой эрозии почвы.

В 2000-2001 гг. в Казахстане были проведены совместные Казахстано–Финские исследования, целью которых было развитие методов отбора проб воздуха в широкой области исследования окружающей среды для определения незаявленной ядерной активности. Эта работа была проделана для поддержки мер предосторожности и действий по нераспространению МАГАТЭ. В рамках исследования в течение одного года в г.Курчатов проводился еженедельный отбор проб воздуха. Курчатов был отобран в качестве места изучения, потому что ожидалось, что в воздухе данного региона находится значительная активность плутония. В течение последующих трёх месяцев в 2001 году образцы отбирались в г. Астане, расположенного в 500 км западнее Курчатова. Это позволило сравнить результаты, полученные с территорий разной радиоактивной загрязнённостью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Отбор проб воздуха

Отбор проб осуществлялся двумя пробоотборниками (Рисунок 1), которые работали на скорости потока ~150 м^3/ч [1]. Еженедельные образцы, таким образом, содержали пыль от общего количества 20000-25000 м^3 воздуха. Один из пробоотборников имел блок предварительной фильтрации, цель которого состояла в том, чтобы удалить крупные частицы, которые содержат, главным образом, безынтересный природный уран, содержащийся в почве. Фильтры были изготовлены из поливинилхлорида, размером был 42x24 см. Эффективность регистрации частицы для аэрозолей 0,2 микрометров была выше 80%. Высота для отбора проб в Курчатове была около 5 м, а в Астане 1 м.



Рисунок 1. Пробоотборники воздуха в городах Курчатове и Астана (правый пробоотборник K2P с блоком предварительной фильтрации)

Радионуклидный анализ

Для проведения лабораторных анализов, воздушные фильтры были перевезены в Финляндию. Гамма-спектрометрический анализ был проведен в Финском управлении по радиационной и ядерной безопасности. Радиохимическое выделение радионуклидов проводилось в лаборатории радиохимии университета Хельсинки [2]. Фильтры были озолены в печи при 400°C, а потом выщелачивались в концентрированной азотной кислоте. Разделение урана и плутония было проведено с использованием хромотографической смолы.

Активность изотопов плутония измерялась на альфа-спектрометре с использованием полупроводникового детектора. Часть урана была перевезена в Финский технический исследовательский центр для анализа концентрации урана и изотопного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация радионуклидов в воздухе Курчатова и Астаны

В отобранных фильтрах определялась концентрация ^{137}Cs, Pu и U. Активность Pu в Курчатове широко варьируется (Таблица 1, рисунки 2, 3): активность ^{239,240}Pu в среднем составляла 370 нБк/м^3 (от 14 до 2500) и активность ^{238}Pu в среднем составляла 78 нБк/м^3 (от 7 до 960) [2, 3]. Соответствующие значения для Астаны были намного ниже: 44 и 12 нБк/м^3, а в половине фильтров активность ^{238}Pu была ниже предела обнаружения. Было выявлено, что концентрация плутония коррелирует с количеством пыли, удержанной на фильтрах, только при самом высоком содержании пыли в воздухе. Не наблюдалась четкая сезонная концентрация Pu в воздухе, хотя с февраля по апрель было найдено некоторое повышение уровней. Не наблюдалось никакой связи между концентрацией Pu и ^{137}Cs. В большинстве фильтров концентрация цезия была ниже предела обнаружения в тех фильтрах, где концентрация Pu была выше, она осталась практически постоянной на уровне 3,9±1,6 μБк/м^3 что примерно в 40 раз выше средней концентрации ^{239,240}Pu, область распространения от 1,4 до 6,2 μБк/м^3. Соотношение ^{137}Cs/^{239,240}Pu варьировалось между 3 и 52.

Таблица 1. Средняя активность ^{238}Pu и ^{239,240}Pu (нБк/м^3) и области их распространения по результатам еженедельного отбора проб в Курчатове, 2000-2001 гг.

Параметры	Активность ^{238}Pu (нБк/м^3)		Активность ^{239,240}Pu (нБк/м^3)	
	K1	K2P	K1	K2P
Среднее значение	55	93	310	430
Максимальное значение	290	960	2500	1700
Минимальное значение	7	11	20	14
Среднее значение всех фильтров	78		370	

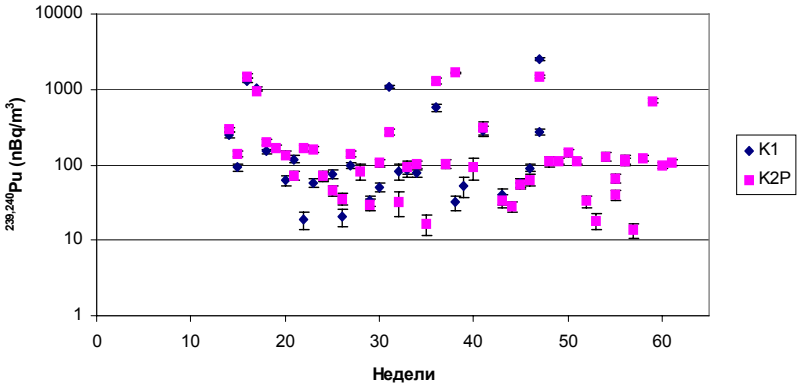


Рисунок 2. Концентрация активности ^{239,240}Pu в воздухе Курчатова

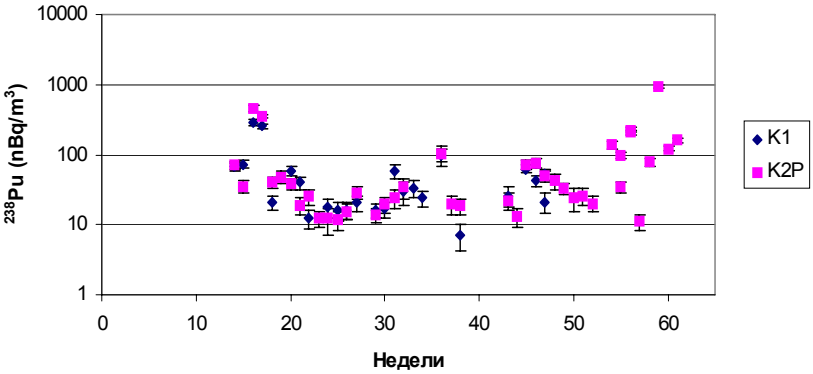


Рисунок 3. Концентрация активности ^{238}Pu в воздухе Курчатова

Ранее [4] Российские специалисты определяли концентрацию ^{239,240}Pu в воздухе Курчатова и некоторых деревень, граничащих с СИП. Для Курчатова они определили приблизительное значение 370 нБк/м^3, что полностью совпадает с результатами, которые были получены в процессе данного исследования (среднее из всех фильтров). Они обнаружили более высокие концентрации ^{239,240}Pu в некоторых деревнях, например, от 7 400 до 37 000 нБк/м^3 в деревне Долонь (Таблица 2).

В Астане активность Pu в воздухе была значительно ниже. Концентрация ^{239,240}Pu в среднем была 44 нБк/м^3 (среднее значение одиннадцати измерений, область распространения 5-131 нБк/м^3). В половине образцов ^{238}Pu был ниже уровня обнаружения, и по расчетам оставшейся половины его концентрация в воздухе была 12 нБк/м^3 (среднее значение 6 измерений, область распространения 5-18 нБк/м^3). Эти значения, даже если они намного ниже, чем в Курчатове, значительно выше, чем в большинстве мест мира. Например, в Германии, возле г.Мюнхен, в 1987-1991 гг. значения были между 2 и 6 нБк/м^3 для ^{239,240}Pu [5].

Таблица 2. Сравнение концентрации техногенных радионуклидов в воздухе разных регионов.

Элемент	Место отбора	Среднее или единственное значение (nBq/m^3)	Диапазон (nBq/m^3)	Год проведения исследований
^{239,249}Pu	Курчатов	100	14-2 500	2000-2001
^{239,249}Pu	Астана	29	5-131	2001
^{239,249}Pu	Мюнхен [5]		2-6	1987-1991
^{239,249}Pu	Долонь [4]		7 400-37 000	1991-1992
^{241}Am	Вблизи "Опытного поля"*	1 400 000		2001
^{137}Cs	Курчатов	4 000	1 400-6 200	2000-2001
^{137}Cs	Вблизи "Опытного поля"*	800 000		2001
^{137}Cs	Алматы [7]	200		1995

Примечание* ИРБЭ НЯЦ РК (2003)

Прошло много лет со дня прекращения атмосферных испытаний ядерного оружия, стратосферное отложение радионуклидов, включая плутоний, больше не является доминантным фактором для концентрации плутония в воздухе. Катастрофа в Чернобыле не принесла существенного количества плутония в воздух. Загрязнение территории г.Астаны и прилегающих территории не может быть вызвано этими факторами и свидетельствует о влиянии радиоактивного загрязнения территории СИП даже на столь большие расстояния. Таким образом, в настоящее время только ветровой подъем является тем механизмом, который отвечает за наличие плутония в воздухе и его трансграничный перенос [5, 6].

Концентрация плутония в воздухе Курчатова значительно выше, чем в Астане и большинстве точек мира. Но, как уже было упомянуто, существуют также другие участки, такие как поселок Долонь, где концентрация плутония в воздухе намного выше. В 2001 году ИРБЭ НЯЦ РК провел отбор проб воздуха на участке СИП вблизи площадки "Опытного поля". Концентрация радионуклидов в воздухе данного региона была очень высокой: ^{241}Am – 1 400 000 нБк/м³; ^{137}Cs – 800 000 нБк/м³. Если принять, что типичный коэффициент ^{239,240}Pu и ^{241}Am в почве на СИП около 10, можно предположить, что концентрация плутония на данном участке может быть в 10 раз выше, чем у америция.

Данные уровни так высоки, что они значительно повышают риск для здоровья населения, проживающего и ведущего хозяйственную деятельность на территории полигона и прилегающих к нему регионах.

Соотношение изотопов плутония в воздухе

Отношение ^{238}Pu, к ^{239,240}Pu также широко варьируется. Только в нескольких образцах отношение было близко к значению фона глобального выпадения радиоактивных осадков, например в Финляндии, 0.02-0.03 до 1966 г. [8] Освобождение ^{238}Pu в результате аварии на спутнике SNAP-9A в 1996 году увеличил это отношение в 2-3 раза. Кроме того, в проанализированных фильтрах не наблюдались значения, характерные для оружейного плутония, около (0.01). Наиболее характерные значения были около 0.25, и даже были найдены значения намного выше – до 2.4. Существует ряд возможных причин для столь большого колебания в соотношении ^{238}Pu к ^{239,240}Pu:

1. Различные методы растворения также могут иметь влияния на соотношение изотопов.
2. Разные условия проведения атмосферных ядерных испытаний, они различались мощностью, конструкцией и, как следствие, различным соотношением изотопов плутония.
3. Проведение на полигоне гидроядерных экспериментов по диспергированию плутония и испытаний боевых радиоактивных веществ одним из компонентов которых мог быть плутоний.

Перечисленные факторы, а также ветровой подъем и перенос аэрозольных частиц, вызвали перераспределение плутония и в значительной мере повлиял на соотношение изотопов плутония в воздухе.

Среднее отношение ^{238}Pu к ^{239,240} Pu в Астане было 0.32±0.21 (среднее от 5-ти значений), оно близко к характерному значению, которое наблюдалось в Курчатове. Это, также как и повышенная концентрация плутония в воздухе, указывает, на его природу происхождения в Астане, которая связана с испытаниями на СИП.

Концентрации активности плутония и урана в пыли

Количество урана имеет наиболее четкую зависимость от массы пыли, которая остается на фильтре (Рисунок 4). Причина такой зависимости обусловлена естественным происхождением урана, который в больших количествах содержится в почве. Пыль, осажденная на фильтре, в своем большинстве представляет частички почвы, поднятые ветром.

Ситуация с плутонием отличается от урана (рисунки 5 и 6). При низком содержании пыли в воздухе (меньше 1000 мг на фильтре) не наблюдается связи между активностью плутония и количеством пыли. За исключением нескольких максимальных точек, активность которых составляет, 10-50 мБк, активность плутония составляет 3 мБк и ниже, независимо от количества пыли. Аналогичная ситуация наблюдается и с ^{238}Pu. Возможно, что более или менее устойчивая концентрация плутония в воздухе находится в виде очень мелких аэрозольных частиц, которые могут переноситься на значительные расстояния и в течении длительного времени находится в приземных слоях атмосферы. И только в самых высоких значениях содержания пыли (свыше 1000 мг на фильтре) обнаружено четкое увеличение в активности плутония. Вероятно, только сильные ветры могут поднять и переместить на большое расстояние крупные частицы с радиоактивно-загрязненной земли, содержащие в себе высокую концентрацию техногенных радионуклидов.

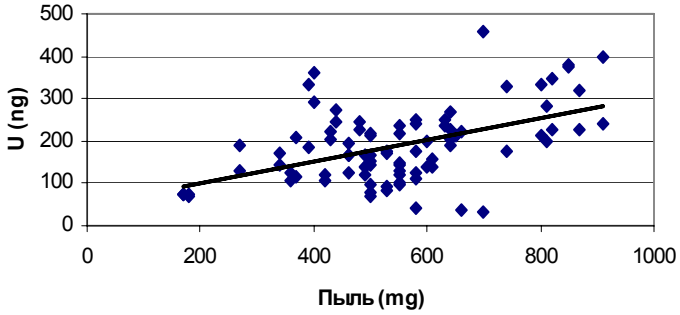


Рисунок 4. Зависимость количества урана на фильтре от общего количества пыли

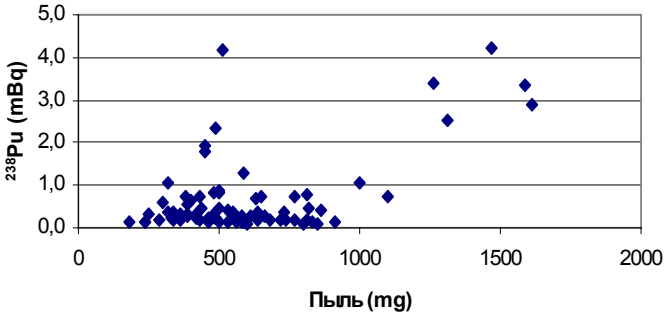


Рисунок 5. Зависимость активности ^{238}Pu на фильтре от общего количества пыли

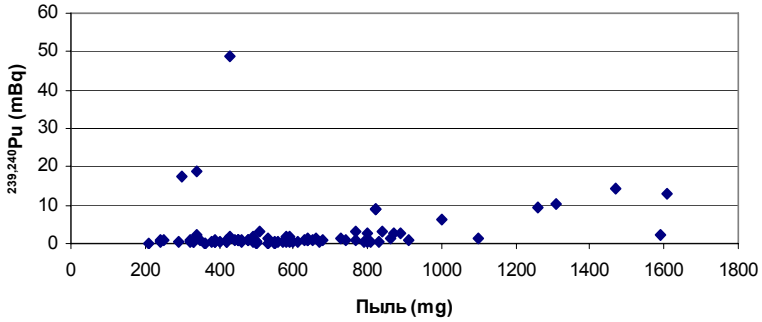


Рисунок 6. Зависимость активности $^{239,240}Pu$ на фильтре от общего количества пыли

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что в результате сильного загрязнения плутонием территории СИП и его окрестностей, воздух в г.Курчатове показывает наличие загрязнения плутонием. Концентрация плутония в воздухе варьирует в широком диапазоне от 14 до 2500 нБк/м^3. В Астане, расположенной в 500 км западнее Курчатова, зарегистрированная концентрация плутония почти в 10 раз ниже. Тем не менее, эти значения значительно выше, чем в большинстве мест мира. Например, в Германии, возле г.Мюнхен, в 1987-1991 гг. значения были между 2 и 6 нБк/м^3 для $^{239,240}Pu$.

В связи с тем, что прошло много лет со дня прекращения испытания атмосферного ядерного оружия, стратосферное отложение радионуклидов, включая плутоний, больше не является доминантным фактором для концентрации плутония в воздухе [9]. Катастрофа в Чернобыле также не принесла существенного количества Pu в воздух. Загрязнение территории г.Астаны и прилегающих территории не может быть вызвано этими факторами и свидетельствует о влиянии радиоактивного загрязнения территории СИП даже на столь большие расстояния.

В отличие от урана, количество которого прямо соотносится к количеству пыли в воздухе, плутоний нечетко соотносится с содержанием пыли в воздухе. Исследования показали, что концентрация плутония в воздухе обычно имеет более или менее постоянное значение независимо от количества содержания пыли, повторно перенесенной с земли, и только при самом высоком содержании пыли в воздухе, т.е. при сильных пыльных бурях и ураганах наблюдается четкое увеличение активности плутония. Вероятно, сильные ветры перемещают твердые вещества с земли, так что увеличивается возможность повторного переноса больших плутониевых частиц на большие расстояния.

Литература

1. T.Valmari, M.Tarvainen, J.Lehtinen, R.Rosenberg, T.Honkamaa, A.Ossintsev, M.Lehtimäki, A.Taipale, S.Ylätalo, R.Zilliacus Aerosol sampling methods for wide area environmental sampling (WAES)//Finnish support to IAEA/ Report STUK-YTO-TR 183, Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland, 2002.
2. I.Riekkinen, T.Jaakkola, S.Pulli, S.Salminen, S.Ristonmaa, R.Rosenberg, R.Zilliacus Analytical methods for wide area environmental sampling (WAES) for air filters//Finnish support to IAEA/Report STUK-YTO-TR 184, Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland, - 2002.
3. S.Salminen, I.Outola, T.Jaakkola, S.Pulli, R.Zilliacus, J.Lehto J. (submitted) Method for analyzing plutonium from air filters for detecting of nuclear activities//Radiochimica Acta.
4. Yu.V. Dubasov, A.S. Krivohatskij, K.V. Kharitonov, V.V. Gorin Radioactive contamination of the Semipalatinsk province ground and adjacent territories of the region after atmospheric nuclear test in 1949-1962//Remediation and Restoration of Radioactively-Contaminated Sites in Europe, Document XI-5027/94, 1994 – European Commission, Brussels.
5. G.Rosner, H.Hötzl, R.Winkler Long-tern behavior of plutonium in air and deposition and the role of resuspension in a semi-rural environment in Germany//The Science of the Total Environment, 1997 - 196, 255.
6. K.Hirose, Y.Igarashi, M.Aoyma Long-term trends on plutonium fallout observed in Japan//Plutonium in the Environment, 2001. - Elsevier. - p. 251.
7. T.K.Kudekov, M.Zh. Burlibaev, E.Zh. Murtazi Developing and status of radiation monitoring system of national hydrometeorological service//The Collection of Articles of International Conference, 2003.
8. J.Paatero, J.Hatakka Observations of long-lived airborbe and deposited radioactivity in Finland 1995.1997// Publication on Air Quality, 2002. – Helsinki: Finnish Meteorological Institute. - No. 30.
9. M.Yamamoto, M.Hoshi, J.Takada, T.Tsukatani, S.Oikawa, I.Yoshikawa, T.Takatsuji, A.Kh..Sekerbaev, B.I.Gusev, Some aspects of plutonium in and around the former Soviet Union's Semipalatinsk nuclear test site//Plutonium in the environment, 2001. – Elsevier. - p. 375.

АУА ОРТАСЫ НЫҢ РАДИОНУКЛИДТІК ЛАСТАНУЫН ЗЕРДЕЛЕУ

[1)]Осинцев А.Ю., [2)]Лехто Ю. Л.

[1)]ҚР ҰЯО Радияциялық қауіаісіздігі және экология институты, Курчатов, Қазақстан
[2)]Радиохимия лабораториясы, Хельсинки университеті, Финляндия

Мәлімделмеген ядролық активтігін анықтау үшін қоршаған ортасын зерттеу кең саласында ауа сынамасын алу әдістерін дамыту мақсатымен Қазақстанда бірлескен Қазақстан-Финнляндия зерттеулері өткізілген. Бұл жұмыс Атом энергетикасы жөніндегі халықаралық агенттігінің таратпау бойынша әрекеттерін және сақтық шараларын қолдау үшін өткізілген. Зерттеулер шегінде бір жыл ағымында апта сайын 20 000 – 21 000 м^3 көлемінде ауа сынамалары алынған. Келесі үш ай ағымында 2001 жылы сынамалары, Курчатов қ. батыс жағында 500 км. жерде орналасқан Астана қ. алынған. Бұл, әр дәрежеде радиоактивтік ластанған аумақтардан алынған нәтижелерін салыстыруға мүмкіндік Берген.

STUDYOF RADIONUCLIDE CONTAMINATION IN AIR

[1)]A.Yu. Ossintsev, [2)]J.L. Lehto

[1)]Institute of Radiation Safety and Ecology, NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2)]Laboratory of Radiochemistry, University of Helsinki, Finland

Kazak-Finnish joint research was carried out in Kazakhstan. The initial purpose of the testing was to develop air sampling methods for wide area environmental sampling (WAES) to detect undeclared nuclear activities. This work was done to support the safeguards and nonproliferation activities of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Weekly air samples of 25.000 m^3 volume were taken with two air samplers in a period of one year. Another three months period in 2001 the samplers were run in town Astana, about 500 km west from Kurchatov. It allowed comparing the results received from territories with different radioactive contamination.

УДК 539.21:621.039.

КОРРОЗИННАЯ СТОЙКОСТЬ В ВОДЕ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Малышева Е.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Исследовано состояние образцов из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и алюминиево-магниевого сплава марки АМг6М, постоянно находящихся с 1990 года в дистиллированной воде первого контура реактора ИВГ.1М. Определены качественные и количественные показатели коррозионной стойкости этих образцов конструкционных материалов технологических каналов реактора.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1,2], активная зона модернизированного реактора ИВГ.1М укомплектована проточными водоохлаждаемыми технологическими каналами (ВОТК). В качестве основных конструкционных материалов в каналах ВОТК используются сталь 12Х18Н10Т и алюминиево-магниевые сплавы АМг5М и АМг6М. В частности, стальными деталями в канале ВОТК являются головка, хвостовик, упорные втулки пружины, втулка центрального стержня ТВС, втулка и пробка блока биозащиты, а алюминиево-магниевыми – корпус канала, пенал головки, переходник головки, втулка ТВС, верхняя и нижняя опорные решетки ТВС, опорная втулка блока биозащиты.

Известно также, что указанные алюминиево-магниевые сплавы высокопрочны и коррозионностойки в обычных условиях [2-4], однако в условиях ядерных установок эти сплавы по своим антикоррозионным свойствам уступают менее легированным алюминиевым сплавам [2]. Кроме того, в конструкции канала ВОТК имеет место контакт стали с алюминиево-магниевыми сплавами, что может привести (под влиянием контактной и щелевой коррозии) к снижению коррозионной стойкости алюминиево-магниевых поверхностей, непосредственно контактирующих со стальными [2,3].

Использование в каналах ВОТК алюминиево-магниевых сплавов и наличие контакта их со сталью потребовало создания в реакторе ИВГ.1М системы контроля за коррозионным состоянием деталей из этих материалов в процессе эксплуатации в реакторе. В связи с этим к первому контуру реактора подключен канал КВК-300 со 155 образцами-свидетелями из сплава АМг6М и 50 образцами-свидетелями из стали 12Х18Н10Т. Образцы-свидетели представляют собой фрагменты трубы ∅76×2 мм из сплава АМг6М или трубы ∅72×2 мм из стали 12Х18Н10Т. Форма образцов-свидетелей – изогнутые прямоугольные пластины (размерами ~2×20×50 мм) с центральным отверстием под стержни крепления в кассете канала КВК-300. Часть образцов-свидетелей из сплава АМг6М в количестве 113 штук перед установкой в канал КВК-300 прошла антикоррозионную пассивирующую обработку в растворе щавелевой кислоты, остальные 42 образца-свидетеля установлены на испытания без обработки. Характер поблочного размещения алюминиево-магниевых и стальных образцов-свидетелей в канале КВК-300 показан на рисунке 1.

№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5	5 + 5
8	8	8	8	8	13	13	13	13	13
№11	№12	№13	№14	№15	№16	№17	№18	№19	№20

Примечание: Направление потока воды в канале – слева направо; плоскости образцов-свидетелей совпадает с плоскостью рисунка; толстыми линиями условно обозначены контуры канала и металлического каркаса кассеты, тонкими – капроновые прокладки между блоками (12 высоких прокладок и 4 низких); черными точками обозначены блоки с алюминиево-магниевыми образцами-свидетелями, не прошедшими пассивирующую обработку.

Рисунок 1. Схема размещения образцов-свидетелей в кассете канала КВК-300 реактора ИВГ.1М

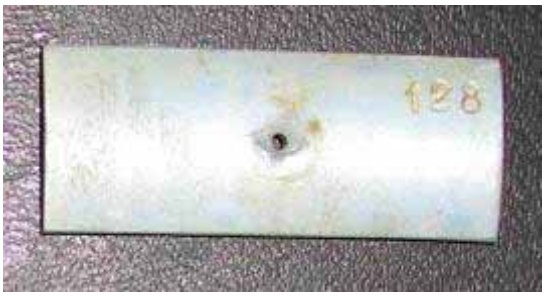
В кассете канала КВК-300 находятся 20 разборных блоков, содержащих по 8, по 10 или по 13 образцов. В блоках №11, … , №20 размещаются по 8 или по 13 АМг6М-образцов, дистанционированных друг от друга внутри блока короткими капроновыми втулками на стержнях крепления, а в блоках №1, …, №10 – по 5 пар АМг6М- и 12Х18Н10Т-образцов (каждая пара плотно контактирующих друг с другом разнородных по материальному составу образцов дистанционирована от соседней пары внутри блока короткими капроновыми втулками на стержнях крепления).

Образцы канала КВК-300, отслеживающие состояние алюминиево-магниевых и стальных деталей каналов ВОТК с мая 1990 года (с момента ввода в эксплуатацию модернизированного реактора), проходят периодическое освидетельствование в ходе каждой из очередных проверок технического состояния реактора ИВГ.1М. В процессе каждого освидетельствования определяются изменения качественных и количественных показателей коррозионной стойкости материала образцов после длительного нахождения в неподвижной дистиллированной воде при комнатной температуре (в межпусковые периоды) и периодического кратковременного нахождения в протоке дистиллированной воды при температуре от 30 до 70 °С (в пусковые периоды).

Всего проведено три таких освидетельствования – в ноябре 1994 года, в ноябре 2001 года и в сентябре 2004 года. В настоящей работе представлены результаты исследования коррозионного состояния АМг6М- и 12Х18Н10Т-образцов канала КВК-300 после 14,3-летних испытаний в дистиллированной воде, полученные в ходе последнего их освидетельствования.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОРРОЗИИ

При визуальном осмотре образцов (после их промывки в спирте и просушки) было установлено, что состояние поверхностей как у 12Х18Н10Т-, так и у пассивированных АМг6М-образцов после 14,3 лет испытаний можно квалифицировать как вполне удовлетворительное.



а) - выпуклая сторона



б) - вогнутая сторона

Рисунок 2. Типичное состояние поверхностей пассивированных АМг6М-образцов после 14,3 лет испытаний в дистиллированной воде

Практически все образцы содержали в основном только неяркие следы местной (несплошной) коррозии в виде крупных пятен двух цветовых оттенков – от желто-коричневого до серого матового у пассивированных алюминиево-магниевых образцов и от слабого светло-желтого до слабого светло-серого у стальных. На рисунках 2 и 3 приведены фотографии двух образцов, где внешний вид АМг6М-образца №8 из блока №12 наиболее близко характеризуют состояние поверхностей у большинства пассивированных алюминиево-магниевых образцов, а внешний вид 12Х18Н10Т-образца №1 из блока №9 – состояние поверхностей у большинства образцов из нержавеющей стали.



а) - выпуклая сторона



б) - вогнутая сторона

Рисунок 3. Типичное состояние поверхностей 12Х18Н10Т-образцов после 14,3 лет испытаний в дистиллированной воде

У отдельных пассивированных АМг6М-образцов фиксировались более крупные, чем на рисунке 2, размеры желто-коричневых пятен и более яркая их окраска, а у отдельных 12Х18Н10Т-образцов – крупные пятна налета белого цвета (отсутствующие на рисунке 3). В целом степень коррозионного повреждения поверхностей (количество и размер пятен, а также интенсивность окраски пятен) у пассивированных АМг6М-образцов визуально воспринималась как более высокая, чем у 12Х18Н10Т-образцов.

У пассивированных АМг6М-образцов, находящихся в плотном контакте с 12Х18Н10Т-образцами в блоках №№1-10, визуально не обнаруживалось влияния контактной и щелевой коррозии: внешний вид поверхностей на вогнутых сторонах АМг6М-образцов практически не отличался от такового у пассивированных АМг6М-образцов, испытываемых без контакта с 12Х18Н10Т-образцами в блоках №№11-13 и №№17-19.

Степень коррозионного повреждения поверхностей у всех непассивированных АМг6М-образцов была заметно выше, чем у пассивированных, причем, как видно на рисунке 4 (представлен характерный внешний вид этих образцов на примере

АМг6М-образца №8 из блока №16), у непассивированных образцов тип повреждения поверхностей приближается к общей (сплошной) коррозии.



а) - выпуклая сторона



б) - вогнутая сторона

Рисунок 4. Типичное состояние поверхностей непассивированных АМг6М-образцов после 14,3 лет испытаний в дистиллированной воде

Следует отметить, что полученные результаты визуального осмотра образцов практически полностью совпадали с результатом аналогичных осмотров, выполненных в двух предыдущих освидетельствованиях. Это косвенным образом указывает на то, что основные процессы коррозионного повреждения как АМг6М-, так и 12Х18Н10Т-образцов прошли еще до первого освидетельствования, т.е. в первые один-два года испытаний.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОРРОЗИИ

Количественные показатели коррозионной стойкости образцов определялись по характеру и величине изменения их масс с увеличением длительности испытаний. Измерения индивидуальных значений масс M_i образцов проводились на аналитических весах ВЛА-20. Исходные значения $(M_i)_o$ для определения индивидуальных значений изменений масс $\Delta M_i/M_i$ были взяты из формуляра Р918ФО к каналу КВК-300.

Результаты определения изменений масс $\Delta M_i/M_i$ у всех 205 образцов приведены в таблице 1 в виде средних значений относительных привесов образцов в каждом из 20 блоков канала КВК-300 (в таблицу включены также аналогичные данные, полученные в предыдущих освидетельствованиях образцов в 1994 и 2001 годах).

Таблица 1. Средние в блоках относительные привесы образцов ΔM/M (в процентах) после первых 4,5, первых 11,5 и первых 14,3 лет испытаний в канале КВК-300

Номер блока		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
12Х18Н10Т	1994 г.	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,03	0,01	0,01	0,05	0,10
	2001 г.	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,05	0,11
	2004 г.	0.06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,05	0,11
АМг6М (пассивир.)	1994 г.	0,29	0,19	0,23	0,17	0,18	0,19	0,17	0,10	0,12	0,30
	2001 г.	0,31	0,20	0,26	0,18	0,20	0,23	0,19	0,10	0,12	0,37
	2004 г.	0,33	0,22	0,28	0,20	0,21	0,26	0,20	0,11	0,14	0,39
Номер блока		№11	№12	№13	№14	№15	№16	№17	№18	№19	№20
АМг6М (пассивир.)	1994 г.	0,32	0,15	0,24	–	–	–	0,16	0,19	0,19	–
	2001 г.	0,32	0,13	0,22	–	–	–	0,16	0,19	0,19	–
	2004 г.	0,32	0,15	0,24	–	–	–	0,17	0,20	0,21	–
АМг6М (без пасс.)	1994 г.	–	–	–	0,81	0,83	0,70	–	–	–	0,78
	2001 г.	–	–	–	0,78	0,81	0,68	–	–	–	0,76
	2004 г.	–	–	–	0,78	0,82	0,66	–	–	–	0,76

Как видно из этой таблицы, степень коррозионного повреждения образцов, определенная по привесам образцов, хорошо соответствует степени повреждения поверхностей образцов, оцененной при их визуальном осмотре. Действительно, относительные привесы у 12Х18Н10Т-образцов значительно ниже, чем у АМг6М-образцов, а у непассивированных АМг6М-образцов они заметно выше, чем у пассивированных. Видно также, что за последние 2,8 года испытаний эти привесы у 12Х18Н10Т-образцов не изменились, а у пассивированных АМг6М-образцов они изменились (увеличились) весьма незначительно (у непассивированных АМг6М-образцов наблюдается как отсутствие изменений привесов, так и их незначительные изменения в любую сторону).

В более общем виде результаты определения изменений масс образцов представлены в таблице 2, где приведены усредненные значения масс одного стального или одного алюминиево-магниевого образца.

Таблица 2. Результаты коррозионных испытаний 12Х18Н10Т- и АМг6М-образцов в воде

Материал; номер блока; количество образцов	Усредненные данные по массам М и привесам ΔМ одного образца в разные годы		
	годы	М, г	ΔМ, мг
12Х18Н10Т; №№1-10; 50 шт	1990 г. 1994 г. 2001 г. 2004 г.	14,5420 14,5483 14,5487 14,5489	– 6,3 6,7 6,9
АМг6М; №№1-10; 50 шт (пассивир.)	1990 г. 1994 г. 2001 г. 2004 г.	4,9328 4,9422 4,9436 4,9441	– 9,4 10,8 11,3
АМг6М; №№11-13, №№17-19; 63 шт (пассивир.)	1990 г. 1994 г. 2001 г. 2004 г.	4,9356 4,9455 4,9455 4,9460	– 9,9 9,9 10,4
АМг6М; №№14-16 и №20; 42 шт (без пасс.)	1990 г. 1994 г. 2001 г. 2004 г.	4,9581 4,9951 4,9941 4,9946	– 37,0 36,0 36,5

Хорошо видно отсутствие существенных коррозионных изменений у 12Х18Н10Т- и АМг6М-образцов как за последние 2,8 года, так и за последние 9,8 лет испытаний в дистиллированной воде. Полученные данные (Таблица 2) позволяют представить результаты коррозионных испытаний образцов в окончательном виде, то есть в виде кинетических кривых коррозионного повреждения образцов (Рисунок 5).

На этом рисунке показано изменение во времени удельных (отнесенных к площади поверхности) привесов ΔМ/S у всех трех типов образцов. Поскольку у пассивированных алюминиево-магниевых образцов, находящихся как в контакте, так и вне контакта со стальными образцами, значения привесов ΔМ в разные годы практически совпадали (Таблица 2), то для них на рисунке 5 представлена общая кривая скорости изменения удельных привесов. Начальные участки всех кривых из-за отсутствия экспериментальных данных в первые 4,5 года испытаний изображены весьма ориентировочно. При их построении использовались следующие известные обстоятельства: скорость коррозии в воде у алюминиевых сплавов выше, чем у нержавеющих сталей [2,4,5], ожидаемая скорость коррозии у непассивированных АМг6М-образцов в условиях реактора ИВГ.1М составит около 10 мг/(см^2·год) [2, 5], предполагаемый удельный привес у 12Х18Н10Т-образцов после одного года испытаний составит приблизительно 0,08 мг/см^2.

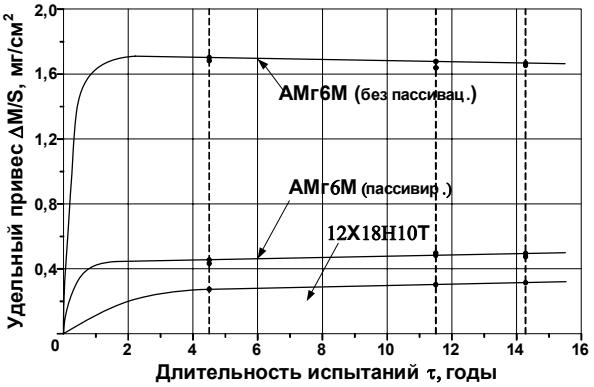


Рисунок 5. Скорости коррозии 12Х18Н10Т- и АМг6М-образцов в дистиллированной воде

Полученные кинетические кривые (Рисунок 5) указали на то, что основные процессы коррозионного повреждения поверхностей образцов всех типов действительно прошли в первые один-два года испытаний, как и предполагалось по этому поводу в конце предыдущего раздела. Более того, у непассивированных АМг6М-образцов превалирующими становятся уже процессы смыва продуктов коррозии водой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Периодическим освидетельствованием состояния образцов-свидетелей конструкционных материалов технологических каналов реактора ИВГ.1М, постоянно находящихся с 1990 года в дистиллированной воде в канале КВК-300, установлена достаточно высокая коррозионная стойкость материала как стальных, так и алюминиево-магниевых образцов. Предполагавшееся негативное влияние контакта стали с алюминиево-магниевым сплавом не обнаружено: скорости коррозионного повреждения АМг6М-образцов, находящихся как в контакте, так и вне контакта с 12Х18Н10Т-образцами, оказались одинаковыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реактор ИВГ.1М. Техническое описание. АК.65000.00.195.ТО. – НИИ НПО “Луч”, инв. №К539, 1989, 142 с.
2. Водоохлаждаемый технологический канал (ВОТК). Пояснительная записка к техническому проекту. Р 837 ПЗ, – НИИ НПО “Луч”, инв. №1612, 1987, 124 с.
3. Коррозия. Спр. изд. под ред. Л.Л. Шрайера. Пер. с англ. – М., Металлургия, 1981, 632 с.
4. Бескоровайный Н.М., Беломытцев Ю.С., Абрамович Д.М. Конструкционные материалы ядерных реакторов. Часть I. – М., Атомиздат, 1972, 240 с.
5. Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.И. Реакторное материаловедение. – М., Атомиздат, 1979. – 344 с.

АЛЮМИНИЙ БАЛҚЫМАСЫ МЕН ТОТТАНБАЙТЫН БОЛАТ ҮЛГІЛЕРІНІҢ СУДАҒЫ КОРРОЗИЯЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Малышева Е.В.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

1990 жылдан бері үнемі ИВГ.1М реакторының бірінші контурының дистилляцияланған суында жатқан 12Х18Н10Т маркалы тоттанбайтын болат пен АМг6М маркалы алюминий-магнийлі балқыма үлгілерінің жағдайы зерттелді. Реактордың технологиялық арналарының құрылымдық материалдарының бұл үлгілерінің коррозиялық тұрақтылығының сапалық және санды көрсеткіштері анықталды.

WET CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOY AND STAINLESS STEEL

V.V. Baklanov, I.I. Deryavko, E.V. Malysheva

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The samples of stainless steel 12H18H10T and aluminum-magnesium alloy AMg6M, residing since 1990 year in the distilled water of IVG.1M reactor primary circuit, are investigated. The quantity and quality factors of corrosion resistance for samples of reactor process channels design materials are defined.

УДК 539.21: 621.039

СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ КАНАЛА ВОТК №4 ПОСЛЕ 14-ЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Жданов В.С., Колбаенков А.Н., Кукушкин И.М., Стороженко А.Н., Таинов Д.З.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Представлены результаты разделки и поэлементного обследования водоохлаждаемого технологического канала ВОТК №4 после длительной эксплуатации в реакторе ИВГ.1М. Определена степень коррозионного повреждения всех деталей канала, а также степень радиационного повреждения его твэлов и алюминий-магниевых деталей.

ВВЕДЕНИЕ

С момента ввода в эксплуатацию модернизированного реактора ИВГ.1М в 1990 году о состоянии внешних и внутренних деталей его технологических каналов ВОТК можно было судить только по результатам осмотра поверхностей доступных участков каналов, а также по результатам обследования стальных, алюминий-магниевых, и циркоций-ниобиевых образцов-свидетелей, находящихся в ячейках межканального вытеснителя реактора и в его специальном канале водяного контура КВК-300. Ясно, что в отношении большинства внутренних деталей каналов получаются лишь опосредствованные результаты обследования их состояния. Поэтому при проверке технического состояния реактора ИВГ.1М в 2001 году комиссией было рекомендовано к следующей проверке в 2004 году выгрузить из реактора и разделать один из 30 каналов ВОТК для получения непосредственных результатов обследования состояния каждой из деталей канала после 14-летней эксплуатации в реакторе.

Из сказанного следует, что целью настоящей работы является установление уровня деградации исходных характеристик у деталей и элементов канала ВОТК и выработка рекомендации по возможности дальнейшей эксплуатации активной зоны реактора.

Для достижения этой цели необходимо было обследованием деталей разделываемого канала определить степень коррозионного повреждения деталей и элементов из Ni, алюминий-магниевых сплавов АМг5М и АМг6М, цирконий-ниобиевого сплава Э110, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и пружинной высокоуглеродистой стали 60С2Н2А, защищенной кадмиевым покрытием, а также установить степень радиационного повреждения (U,Zr)-твэлов и деталей из алюминий-магниевых сплавов.

СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ КАНАЛА

При осмотре внешних поверхностей канала ВОТК №4 в горячей камере было зафиксировано отсутствие формоизменений, локальных разрушений и иных крупных дефектов у головки, корпуса и хвостовика канала. Коррозионных повреждений поверхностей стальных деталей не замечено, на поверхности АМг5М-корпуса канала, прошедшего пассивирующую обработку, ниже окон для входа воды и на участке его сочленения с хвостовиком замечено присутствие отдельных крупных серых пятен.

В начале разделки (в соответствии с особенностями конструкции канала ВОТК [1]) корпус канала был разрезан в поперечном сечении ниже проемов для входа винтов, фиксирующих упорную втулку пружины, прижимающей ТВС к втулке биологической защиты. После отделения от канала головки (вместе с фрагментом корпуса канала и упорной втулкой пружины) и выгрузки пружины было выполнено определение усилия, необходимого для вертикальной выгрузки ТВС из корпуса канала. С использованием динамометра установлено, что это усилие превышает 1,5 кН (в то время как усилие установки ТВС при горизонтальной сборке канала, по данным формуляра канала [2], составляло не более 0,2 кН). Поэтому заклинившаяся в корпусе ТВС (вместе с соответствующим фрагментом корпуса канала) была отрезана от канала. В дальнейшем были проведены вырезки деталей и фрагментов деталей канала, выгрузки этих деталей и фрагментов из канала, их визуальные обследования и фотографирования вне горячей камеры. Полученные результаты представлены ниже в последовательности, повторяющей по возможности последовательность расположения деталей в канале в направлении от головки к хвостовику, т.е. в направлении движения воды внутри канала [3].

При осмотре деталей головки канала было установлено вполне удовлетворительное состояние поверхностей всех деталей из нержавеющей стали, графита 3ОПГ и сплавов АМг5М и АМг6М. На АМг6М-конусе пенала головки и на АМг5М-переходнике головки присутствовали следы неопасного коррозионного взаимодействия с водой в виде желто-коричневого налета (Рисунок 1), а на внутренней поверхности АМг6М-пенала – следы взаимодействия с графитом торцового отражателя в виде светло-серого или белого налета.

Состояние сварных швов №1 и №2 головки канала за время эксплуатации канала в реакторе не ухудшилось: рентгеновская просвечивающая дефектоскопия швов не выявила наличия в них опасных дефектов ни до, ни после эксплуатации.



Рисунок 1. Фрагмент (переходник) головки канала на участке сочленения с корпусом канала

У корпуса канала и деталей, размещенных внутри верхнего участка корпуса канала, состояния были существенно различными. Внешняя поверхность АМг5М-корпуса канала на этом участке не содержала опасных дефектов, упорная 12Х18Н10Т-втулка пружины была частично покрыта налетом оранжевого цвета (налет легко снимался при протирке втулки влажной бязью) и содержала следы легкого ржавления (Рисунок 2) У 60С2Н2А-пружины отсутствовало защитное кадмиевое покрытие, а поверхность была покрыта слоем ржавчины. На внутренней поверхности корпуса канала в месте расположения пружины имелись темные следы на участках механического контакта с пружиной, присутствовал также яркий желто-коричневый налет, который почти полностью снимался при протирке. На внешней поверхности верхней опорной 12Х18Н10Т-втулки пружины оранжевый налет присутствовал только на участке контакта с пружиной (Рисунок 3), при снятии этого налета путем протирки обнаруживались следы незначительного ржавления втулки.



Рисунок 2. Фрагмент корпуса канала в месте сочленения с головкой канала и упорная втулка пружины

Таким образом, значительное коррозионное повреждение визуально фиксировалось только у пружины. Для выяснения степени опасности этого повреждения была проведена оценка толщины коррозионного слоя на пружине и определение изменения жесткости пружины при осевом сжатии. При удалении коррозионного слоя с двух участков пружины установлено, что толщина коррозионного слоя небольшая – менее 50 мкм. При определении изменения жесткости пружины были измерены коэффициенты жесткости $К_ж$ у пружины из канала и у трех исходных пружин. Результаты измерений (Рисунок 4) показали, что жесткость пружины снизилась с 6,27 до 5,29 Н/мм, то есть только на 16 %.



Рисунок 3. Верхняя опорная втулка пружины ТВС и фрагмент этой пружины

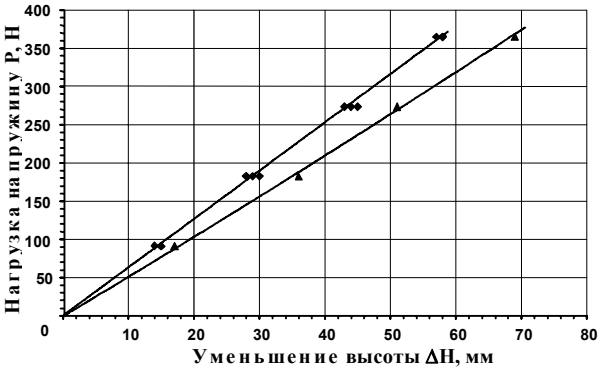
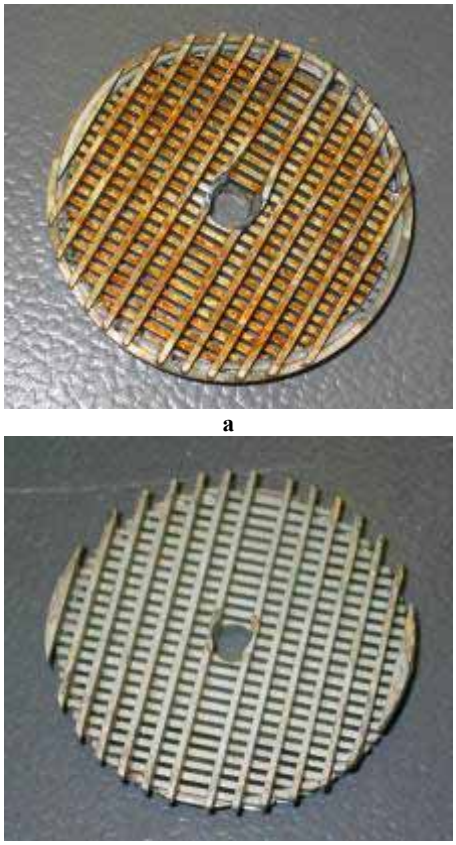


Рисунок 4. Жесткость исходных пружин (◆) и пружины канала ВОТК №4 (▲)

У деталей и фрагментов деталей канала в месте расположения ТВС состояние также было существенно различным. На внешней поверхности корпуса канала опасные дефекты отсутствовали, на внутренней поверхности гильзы ТВС отмечалось в основном наличие на желто-коричневом фоне продольных темных строчек в местах контакта с витыми стержневыми твэлами. На внутренней поверхности АМг5М-корпуса канала и внешней поверхности АМг6М-гильзы ТВС остались следы их плотного коррозионного сцепления, не позволившего провести вертикальную выгрузку ТВС из канала. Все поверхности обеих проницаемых АМг6М-решеток ТВС содержали следы взаимодействия с водой в виде желто-коричневого налета, а на входной поверхности верхней решетки присутствовал, кроме того, легко снимаемый тонкий слой мелкодисперсного порошка ржавчины, смытой с пружины (Рисунок 5). На (Zr,Nb)-поверхностях твэлов, как и на поверхностях периферийных (Zr,Nb)-заполнителей ТВС, центрального (Zr,Nb)-стержня ТВС и его 12Х18Н10Т-трубки, видимых следов коррозионных повреждений не обнаружено. Однако на поверхности опорной (Zr,Nb)-гайки центрального стержня присутствовал частично снимаемый налет с различными цветовыми оттенками.



а

б

Рисунок 5. Входная (а) поверхность верхней решетки и выходная (б) поверхность нижней

Состояние деталей канала в области расположения блока биологической защиты было вполне удовлетворительным. У корпуса канала опасных механических и коррозионных повреждений не замечено. Поверхности у 12Х18Н10Т-втулки биологической защиты, у 12Х18Н10Т-пробки биологической защиты и у опорной АМг6М-втулки блока биологической защиты оказались практически без следов коррозионных повреждений. Состояние сварного шва №1 на корпуса канала внешне не отличалось от такового у корпуса необлученного канала. Для выяснения степени изменения механических свойств материала сварного шва из корпуса канала ВОТК №4 и корпуса исходного канала были вырезаны образцы для рентгеновской дефектоскопии швов, а затем и образцы для испытаний на прочность при растяжении. Рентгеновская просвечивающая дефектоскопия швов не выявила наличия в них опасных дефектов ни до, ни после эксплуатации. Прочность материала шва при растяжении (все образцы разрушались именно по шву) после эксплуатации в реакторе не изменилась: средние значения предела прочности $\sigma_в$ до и после облучения составили соответственно 203 и 201 МПа. Пластичность этого материала также не изменилась: средние значения относительного удлинения δ до и после облучения оказались равными 1,7 %.

Состояние деталей в нижней части канала визуально было также оценено как вполне удовлетворительным, если не считать того, что на участке сочленения корпуса канала с хвостовиком присутствовали отдельные крупные коррозионные пятна темно-серого цвета (Рисунок 6). В связи с этим хвостовик был отстыкован от корпуса канала, а темные пятна на поверхности АМг5М-корпуса подвергнуты шлифовке абразивной шкуркой. После легкой шлифовки выяснилось, что глубина коррозионного повреждения поверхности корпуса в области пятен пренебрежимо мала.



Рисунок 6. Нижняя часть корпуса канала на участке сочленения с хвостовиком

СТЕПЕНЬ РАДИАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ

Радиационные повреждения материалов представляют наибольшую опасность для таких деталей канала, как твэлы и детали из алюминий-магниевых сплавов, поскольку у твэлов эти повреждения могут приводить к радиационное распуханию (что опасно с точки зрения увеличения гидравлического сопротивления тракта охлаждения ТВС), а у АМг-деталей, являющихся в большинстве своем несущими элементами, – к снижению пластичности (что опасно с точки зрения хрупкого разрушения). Поэтому было проведено сопоставление состояний образцов до и после облучения, вырезанных из твэлов (твэлы канала ВОТК имеют длину 600 мм) и из АМг5М-корпуса канала.

Что касается исследования АМг5М-образцов (вырезанных из корпусов каналов в месте расположения нижней опорной втулки пружины), то рентгенографически были измерены такие чувствительные к наличию радиационных дефектов характеристики материала [4, 5], как период решетки a_o, высота фоны $H_ф$, интегральная интенсивность линии I_{hkl} и ее интегральная полуширина B_{hkl}. Оказалось, что облучение АМг5М-деталей до флюенса быстрых нейтронов порядка 10^{19} $см^{-2}$ при температуре до ~90°С не приводит к заметному накоплению в них радиационных дефектов (Таблица 1). В частности, радиационное увеличение a_o на 0,002 % означает, что распухание таких деталей составляет всего лишь 0,006 %. Невысокие изменения рентгенографически измеренных характеристик образцов хорошо коррелировали с отсутствием изменений их микротвердости HV, предела прочности при растяжении $\sigma_в$ и

относительного удлинения δ (а также с указанным выше отсутствием изменений прочности и пластичности материала в сварном шве №1 корпуса канала).

Таблица 1. Радиационные изменения характеристик образцов из сплава АМг5М

Характеристика X	Исх. сост.	Обл. сост.	ΔX/X, %
a_o, нм	0,40724	0,40725	0,002
I_{hkl}, отн. ед.	6077	5631	–7,5
B_{hkl}, град.	1,86	2,03	9,1
$H_ф$, отн. ед.	49,0	50,2	2,0
HV, ГПа	0,9	0,9	0
$σ_в$, МПа	290	290	0
δ, %	7	8	~0

Для исследования состояния твэлов были использованы шесть облученных и шесть исходных твэлов, относящихся к центральным концентрационным зонам облученной и исходной ТВС. От всех твэлов были отрезаны короткие торцовые фрагменты (для изучения состояния никелевых защитных покрытий в виде Ni-колпачка на торце топливного стержня) и короткие серединные образцы (для изучения микроструктуры и определения микротвердости), а оставшиеся части твэлов были разрезаны на фрагменты длиной 60…65 мм (для измерения плотности и электросопротивления). Относительно внешнего вида твэлов следует отметить, что и визуально, и на фотоснимках (Zr,Nb)-поверхности облученных и исходных твэлов выглядели (Рисунок 7) практически одинаковыми.



Рисунок 7. Твэлы до (вверху) и после (внизу) облучения

В ходе металлографических исследований установлено, что исходная (заданная технологией изготовления) сплошность механического и диффузионного сцепления (Zr,Nb)-оболочки с топливным (Zr,Nb,U)-сердечником у облученных твэлов сохраняется полностью, исходная сплошность диффузионного сцепления никелевого защитного покрытия с торцом топливного сердечника (и с торцом оболочки) у них также сохраняется полностью (Рисунок 8).

Сказать что-либо определенное о степени сохранения толщины Ni-защиты сердечника в процессе длительной эксплуатации в реакторе не представлялось возможным. Толщина нанесенного никеля изменяется от твэла к твэлу произвольным образом и у всех измеренных облученных и исходных образцов находилась в диапазоне 71…103 мкм (в соответствии с техническими условиям [1, 3] она должна находиться в пределах 60…100 мкм).

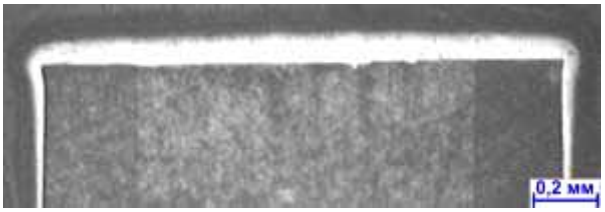


Рисунок 8. Сечение торца одного из облученных твэлов

При измерении плотности γ и удельного электросопротивления ρ у образцов твэлов установлено, что облучение до флюенса тепловых нейтронов ~$2{,}3\cdot10^{19}$ $см^{-2}$ при температуре до ~90 °С приводит к их очень слабому радиационному повреждению: плотность материала твэлов сохраняется на исходном уровне, а самая чувствительная к дефектам структуры характеристика материала – электросопротивление – увеличивается только на 1,3 %, значения микротвердости материала оболочки $(HV)_{обол}$ и сердечника $(HV)_{серд}$ остаются на исходном уровне (Таблица 2).

Таблица 2. Радиационные изменения характеристик твэлов из центральной зоны ТВС

Характеристика X	Исх. сост.	Обл. сост.	ΔX/X, %
γ, $г/см^3$	6,61	6,61	0
ρ, мкОм·см	52,7	53,4	1,3
$(HV)_{обол}$, ГПа	1,6	1,5	~0
$(HV)_{серд}$, ГПа	1,8	1,8	0

Отсутствие изменений плотности твэлов означает отсутствие их радиационного распухания (удлинения и утолщения), что является положительным моментом: твэлы не вносят свой вклад в повышение гидравлического сопротивления канала. Следовательно, это повышение связано только с некоторым уменьшением проходного сечения в верхней проницаемой решетке ТВС и с исчезновением проходного сечения в зазоре между гильзой ТВС и корпусом канала (последнее уменьшит проходное сечение канала не более чем на 2,6 %). Первопричиной же уменьшения проходного сечения внутреннего тракта охлаждения канала является потеря пружиной кадмиевого покрытия, последующее ее ржавление, смыв частиц ржавчины потоком воды и их унос на решетку и в зазор.

Заключение

Впервые проведена разделка водоохлаждаемого технологического канала реактора ИВГ.1 и обследование деталей этого канала, эксплуатировавшихся в течение 14 лет в неподвижной (в межпусковые периоды) и движущейся (в пусковые периоды) дистиллированной воде.

Установлено, что состояние всех деталей и элементов канала из Ni, алюминий-магниевых сплавов АМг5М и АМг6М, цирконий-ниобиевого сплава Э110 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т является вполне удовлетворительным. Состояние пружины из

высокоуглеродистой стали 60С2Н2А, защищенной кадмиевым покрытием, оказалось неудовлетворительным: отсутствовало защитное покрытие, на поверхности находился слой ржавчины. Дополнительные исследования состояния пружины показали, что толщина слоя ржавчины составляет около 50 мкм, а жесткость пружины уменьшилась только на 16 %.

Материаловедческими исследованиями твэлов и деталей из алюминий-магниевого сплава установлено, что степень их радиационного повреждения весьма незначительна: прочность и пластичность облученных АМг-деталей сохранились на уровне исходных, а радиационное распухание у твэлов практически отсутствует. Последнее означает, что твэлы не вносят свой вклад в повышение гидравлического сопротивления канала. Это повышение, составляющее всего лишь около 3 %, полностью связано с уменьшением проходного сечения в верхней проницаемой решетке ТВС и в зазоре между гильзой ТВС и корпусом канала.

С учетом того, что повышение гидравлического сопротивления канала ВОТК №4 находилось в допустимых пределах, указанных разработчиком каналов ВОТК, следует считать возможным дальнейшую эксплуатацию каналов ВОТК в активной зоне исследовательского реактора ИВГ.1М.

Литература

1. ВОТК. Р837. Чертежи. – НИИ НПО "Луч", инв. №12417, 1989, 71 с.
2. Формуляр Р837ФО канала ВОТК №4. – НИИ НПО "Луч", инв. №1818, 1989, 27 с.
3. Водоохлаждаемый технологический канал (ВОТК). Пояснительная записка к техническому проекту Р837 ПЗ. – НИИ НПО "Луч", инв. №1612, 1987, 53 с.
4. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М., Металлургия, 1977, 480 с.
5. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники. – М., Энергоиздат, 1982, 288 с.

ВОТК №4 АРНАСЫ ТЕТІКТЕРІНІҢ ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДА 14 ЖЫЛҒЫ ҚОЛДАНУДАН КЕЙІНГІ ЖАҒДАЙЫ

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Жданов В.С., Колбаенков А.Н., Кукушкин И.М., Стороженко А.Н., Таинов Д.З.

Қазақстан, ҚР ҰЯО атом энергиясы институты

ВОТК №4 сумен суыйтын технологиялық арнасының ИВГ.1М реакторында ұзақ уақыт бойында қолданылғаннан кейінгі бөлшектеу мен элементтеп зерттеудің нәтижелері ұсынылып отыр. Арнаның барлық тетіктерінің коррозиялық зақымдануының деңгейі, сонымен қатар оның твэлдері мен алюминий-магний тетіктерінің радиациялық зақымдануы анықталды.

WCPC # 4 PARTS CONDITION AFTER 14 YEARS OF OPERATION AT IVG.1M REACTOR

V.V. Baklanov, I.I. Deryavko, V.S. Zhdanov, A.N. Kolbayenkov, I.M. Kukushkin, A.N. Storozhenko, D.Z. Tannov

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Results of cutting and part by part examination of water-cooled process channel WCPC #4 after long-time operation at IVG.1M reactor are represented. A degree of ablative damage of all channel parts and a degree of radiation damage to its fuel elements and aluminum-magnesium part is determined.

УДК 620.193: 621.039

ОТРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ КОРРОЗИИ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ В ВОДЕ

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Коянбаев Е.Т., Малышева Е.В., Окапбаев Р.А., Сафронов А.Д., Стороженко А.Н.

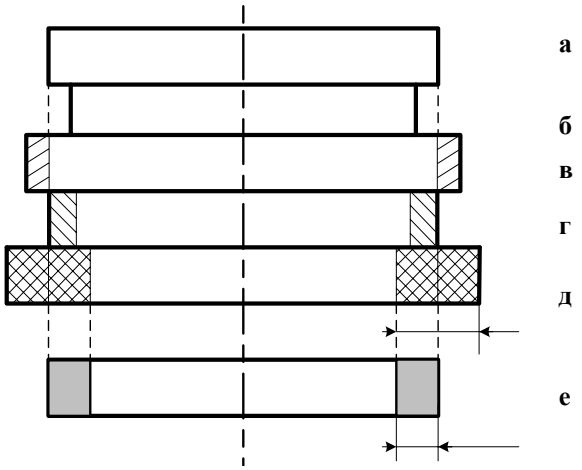
Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Отработан один из вариантов методики определения скоростей коррозии $К_М$ алюминий-магниевых образцов в холодной и горячей воде на начальной стадии испытаний. Отработана также методика определения скоростей коррозии $К_П$ алюминий-магниевых образцов после 14-летних испытаний в холодной воде.

Введение

В 1990 году реактор ИВГ.1 был модифицирован в реактор ИВГ.1М с активной зоной, содержащей 30 ТВС водоохлаждаемых технологических каналов типа ВОТК. Большинство деталей каналов ВОТК изготовлены из алюминий-магниевых сплавов АМг5М и АМг6М: алюминий-магниевыми деталями в каждом канале являются корпус, пенал головки, конус пенала, переходник головки, верхняя и нижняя проницаемые решетки, гильза ТВС и опорная втулка блока биологической защиты [1-3]. Корпуса всех каналов ВОТК в целях повышения коррозионной стойкости прошли (перед сборкой каналов и их загрузкой в реактор) пассивирующую обработку путем выдержки в кипящей дистиллированной воде в течение 72 часов. Остальные алюминий-магниевые детали каналов не пассивировались. Таким образом, непассивированные детали канала ВОТК защищены только тонкой (~0,01 мкм) естественной пленкой из аморфного оксида Al_2O_3 (пленка плотна изнутри и проницаема снаружи), а его пассивированный корпус защищен более толстой трехслойной пленкой из аморфного Al_2O_3, орторомбического бемита $Al_2O_3 \cdot H_2O$ и моноклинного байерита $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ [4-6].

Очевидно, что работоспособность канала ВОТК во многом зависит от коррозионной стойкости его алюминий-магниевых деталей. Действительно [4-8], в процессе электрохимического взаимодействия АМг-деталей (как и остальных металлических деталей) с водой, являющейся электролитической средой, в материале поверхностей деталей протекают разнообразные и связанные между собой коррозионные и объемные изменения. В частности, при переходе гидратированных ионов металла с поверхности детали в водный электролит имеет место растворение материала поверхностей в воде, опасное утонением тонкостенных деталей. Образование на поверхности детали продуктов коррозии увеличивает ее объем, что опасно с точки зрения уменьшения проходного сечения внутреннего тракта охлаждения канала. Распространение процесса коррозии внутрь тонкостенной детали уменьшается ее "живое" сечение, что (как и растворение материала поверхности) опасно с точки зрения снижения прочности и несущей способности детали. Сказанное в отношении коррозионного повреждения в воде АМг-деталей (и остальных металлических деталей) схематически пояснено на рисунке 1.



а - исходное состояние стенки; б - поверхностное растворение стенки; в – образование коррозионного покрытия; г – образование коррозионного слоя; д – образование коррозионной зоны; е – глубина П проникновения коррозии в стенку.

Рисунок 1. Схема коррозионного повреждения стенки металлической детали в воде

Следует при этом иметь в виду, что каждый из случаев *б*, *в* и *г* в самостоятельном виде не реализуется; практически всегда на поверхности детали образуется (см. случай *д*) некоторая коррозионная зона толщиной h, изменяющаяся качественно и количественно с увеличением длительности испытаний, но сочетающая в себе элементы всех трех случае *б*, *в* и *г* и состоящая поэтому из условного коррозионного слоя и условного коррозионного покрытия. Внутри коррозионной зоны можно указать на глубину П проникновения коррозии в материал, т.е. на величину уменьшения "живого" сечения стенки детали. И величина коррозионной потери материала П, и величина коррозионного изменения массы материала ΔМ (характеризующая толщину коррозионной зоны h) являются основными показателями коррозионной стойкости материала детали, причем экспериментальные измерения этих величин позволяют определить соответствующие скорости коррозии $К_П$ и $К_М$ этого материала [8, 9].

Что касается скоростей коррозии $К_П$ и $К_М$ алюминий-магниевых деталей каналов ВОТК, то необ-

ходимо отметить, что в ходе периодических проверок технического состояния реактора ИВГ.1М проводились также и освидетельствования состояний 42 непассивированных и 113 пассивированных алюминий-магниевых образцов-свидетелей, находящихся в подключенном к водяному контуру реактора специальном канале КВК-300 и отслеживающих состояние деталей каналов ВОТК. Имеющиеся на настоящий момент результаты освидетельствований этих образцов-свидетелей (визуальным обследованием и измерением их масс) указывают в целом на их достаточно высокую коррозионную стойкость в воде. Так, удельные (отнесенные к полной площади поверхности образца S) коррозионные изменения масс $\Delta M/S$ и у пассивированных, и у непассивированных АМг6М-образцов после 14,3-летних испытаний, как видно из рисунка 2, незначительны – менее 17 г/м^2, причем у непассивированных образцов-свидетелей в последние годы наблюдается уже смыв в воду части продуктов коррозии. Однако по данным рисунка 2 можно определить только скорости их коррозии $K_M = \Delta M/(S\tau)$ и только после длительностей испытаний τ выше четырех с половиной лет. О скоростях их коррозии K_M при меньших τ и в особенности на самой начальной стадии испытаний можно судить лишь весьма приблизительно: поскольку первые экспериментальные точки на кинетических кривых отделяют от нулевых четыре с половиной года испытаний, кривые на этом начальном участке проведены условно. Кроме того, до сих пор отсутствуют данные о самой важной характеристике коррозионного повреждения материала – о скорости коррозии внутрь образцов $K_П = П/\tau$.

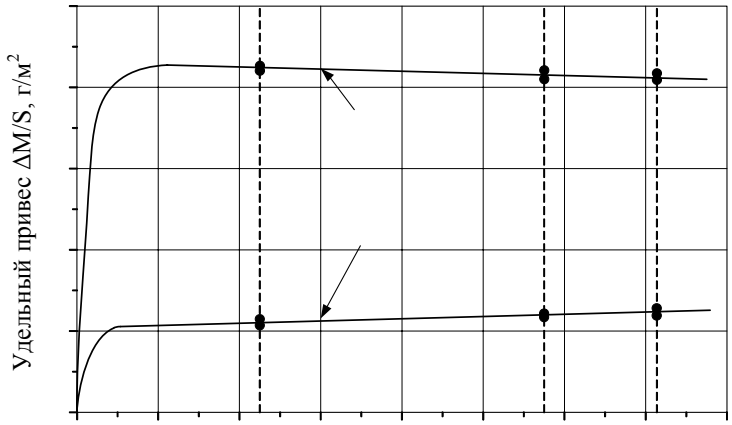


Рисунок 2. Кинетика коррозии алюминий-магниевых образцов-свидетелей в воде канала КВК-300

Относительно перечисленных недостатков необходимо отметить, что и комиссией, проводившей проверку реактора ИВГ.1М в 2004 году, тоже было обращено внимание на необходимость определения скоростей коррозии $K_П$ у пассивированных и непассивированных алюминий-магниевых образцов-свидетелей после 14,3-летних испытаний в канале КВК-300, как и на необходимость определения скоростей коррозии K_M и $K_П$ у этих образцов на начальной стадии испытаний длительностью примерно четыре с половиной года. В связи с этим в ИАЭ НЯЦ РК начаты и в ближайшие пять лет будут завершены указанные работы. Кроме того, в ближайшие два года будет создана установка для коррозионных испытаний АМг-образцов длительностями до нескольких сот часов в движущейся горячей (с температурой до 95 °С) воде и определены скорости коррозии K_M алюминий-магниевых образцов в этих условиях. В настоящей же работе представлены результаты, полученные на первом этапе выполнения намеченных работ, где отрабатывалась методика определения скоростей коррозии K_M у пассивированных АМг-образцов в неподвижной горячей и неподвижной холодной воде и методика определения скоростей коррозии $K_П$ у пассивированных и непассивированных алюминий-магниевых образцов-свидетелей после 14,3-летних испытаний в канале КВК-300.

Отработка методики определения скоростей коррозии $K_м$

Условия эксплуатации в воде АМг-деталей каналов ВОТК и условия испытаний в воде АМг-образцов канала КВК-300 следующие: длительное нахождение в неподвижной дистиллированной воде при температуре около 18 °С (в межпусковые периоды) и периодические кратковременные нахождения в движущейся дистиллированной горячей воде при температуре вплоть до 95 °С (в пусковые периоды). Несмотря на кажущуюся незначительность времени нахождения в потоке горячей воды (235 часов составляют менее 0,2 % от суммарной длительности нахождения в воде), влиянием этого фактора на коррозию деталей и образцов-свидетелей пренебречь нельзя, поскольку известно, что повышение температуры воды заметно ускоряет корро-

зионные процессы: например, повышение температуры от комнатной до 80 °С увеличивает средние за первые 700 часов испытаний скорости коррозии непассивированных образцов алюминия и алюминиевых сплавов примерно в 15 раз [4]. Поэтому при отработке методики определения скоростей коррозии $К_М$ у АМг-образцов в неподвижной горячей и холодной воде основное внимание уделялось испытаниям именно в горячей воде. При проведении коррозионных испытаний использовались методические указания, имеющиеся в [9].

Для испытаний АМг-образцов, вырезанных из исходного (необлученного) корпуса канала ВОТК в форме втулок диаметром 76 мм, высотой 105 мм и толщиной стенки 3 мм, использовалась дистиллированная вода, взятая непосредственно из водяного контура реактора. Качество этой химически обессоленной воды соответствовало нормам, указанным в [10]: показатель pH при 25 °С – в пределах 5,0…6,5, удельная электропроводность при 25 °С – не более 3 мкСм/см, содержание алюминия, железа, меди и хлорид-иона – не более 0,05, 0,05, 0,01 и 0,02 мг/л соответственно.

Испытания пяти пассивированных АМг5М-образцов в холодной (~16 °С) воде выполнялись в открытом стеклянном сосуде объемом около 15 л. Для испытаний трех таких же образцов в горячей (~60 °С) воде использовалось устройство в виде 30-литрового бака с водой, установленного на электропечь и термостатированного сверху крышкой. Заданная температура внутри бака поддерживалась терморегулятором. В воду нагревного бака были почти полностью погружены на подставках три прикрытых стеклянными крышками однолитровых керамических стакана с дистиллированной водой и образцом. Поскольку из-за большого отношения поверхности образца к объему воды в стакане содержание алюминия в этой воде в процессе испытаний должно непрерывно увеличиваться и снижать скорость коррозии [4], то, с целью хотя бы частичного приближения условий его испытаний к условиям эксплуатации АМг-деталей в движущейся горячей воде каналов ВОТК, вода в стаканах периодически – с частотой четыре раза в неделю – заменялась свежей.

Длительности выполненных испытаний (около 850 ч) оказались вполне достаточными для отработки методики определения скоростей коррозии $К_М$ пассивированных АМг5М-образцов. Во-первых, было получено (см. рисунок 5) убедительное подтверждение влияния температуры воды на скорость коррозии на начальной стадии испытаний: например, средняя за первые 700 часов испытаний, скорость $К_М$ в воде при 60 °С (1,28 мг/(м^2·ч)) оказалась примерно в 20 раз выше, чем в воде при 16 °С (0,06 мг/(м^2·ч)).

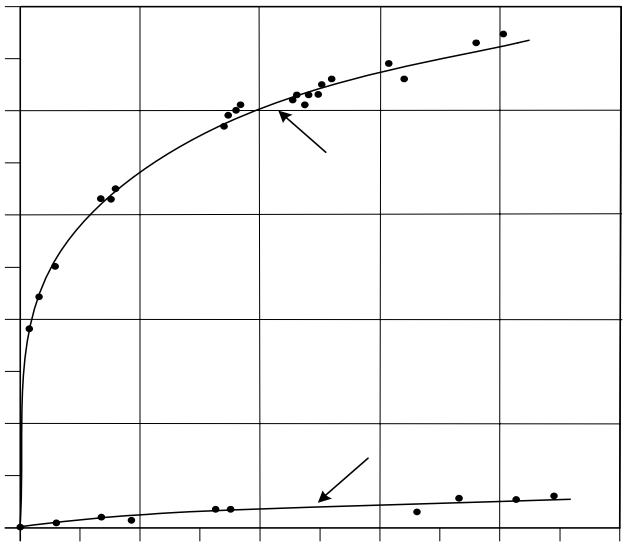


Рисунок 3. Кинетика коррозии пассивированных АМг5М-образцов в дистиллированной воде

Во-вторых, было установлено, что кинетика коррозионных привесов у образцов и в горячей, и в холодной воде описывается степенными зависимостями вида $\Delta M/S = a\tau^{e}$, аналитические выражения которых в спрямляющих (логарифмических) координатах оказались следующими:

$$\lg(\Delta M/S) = -0{,}73 + 0{,}24 \lg\tau \qquad (1)$$

для условий испытаний в горячей воде в керамических стаканах устройства и

$$\lg(\Delta M/S) = -3{,}1 + 0{,}6 \lg\tau \qquad (2)$$

для условий испытаний в холодной воде в стеклянной емкости (в формулах (1) и (2) величины $\Delta M/S$ и τ имеют размерности соответственно г/(м^2·ч) и ч).

В-третьих, выяснено, что коррозия пассивированных АМг5М-образцов в горячей воде на стадии испытаний длительностью до ~800 ч является общей (сплошной), т.е. затрагивающей всю поверхность образца (на рисунке 4 можно видеть, что цвет всей поверхности образца приобрел неяркий серый матовый оттенок). Именно такой тип коррозии не накладывает ограничений на использование геометрически известной площади поверхности образ-ца S при расчете его удельного привеса $\Delta M/S$ [9].



а **б**

Рисунок 4. Типичный внешний вид образцов до (а) и после (б) 807-часовых испытаний в горячей воде

Отработка методики определения скоростей коррозии $К_П$

Известно [6, 8, 9], что скорость коррозии внутрь образца $К_П$ рассчитывается по формуле

$$К_П = П/\tau = \Delta m/(\gamma S\tau), \qquad (3)$$

где Δm – разность масс образца до коррозионных испытаний и после полного удаления продуктов коррозии с его поверхности (см. коррозионную зону толщиной h на рисунке 1), а γ – плотность материала образца.

Известно также, что наиболее простым и надежным способом удаления продуктов коррозии (ПК) является способ химического стравливания, тем более что составы травителей для алюминиевых сплавов известны [6, 8, 11, 12]. В связи с этим из имеющихся шести травителей экспериментальным путем были выбраны два лучших. Таковыми оказались медленный травитель (5 % HNO_3), удаляющий ПК при 10…15 °С в течение нескольких часов, и быстрый травитель (50…60 г/дм^3 NaOH), удаляющий эти продукты при 60…70 °С в течение нескольких десятков секунд.

Поскольку при удалении ПК с поверхности образца процесс травления должен заканчиваться строго в момент окончания полной замены желто-коричневого цвета материала ПК на характерный белый цвет АМг-материала, то процедура стравливания ПК осуществлялась дискретно и с постоянным сравнением цвета обрабатываемого образца с эталонным цветом АМг-материала. Поэтому при отработке методики определения скоростей $К_П$ на 11 пассивированных и 12 непассивированных АМг6М-образцах канала КВК-300 один из образцов был превращен в эталонный путем такого глубокого травления, при котором толщина удаленного материала заведомо превысила толщину коррозионной зоны h. После этого каждый из 22 образцов обрабатывался сначала короткими выдержками в быстром травителе, а затем длительными выдержками в медленном травителе до указанного выше момента окончания смены цвета его поверхности. На рисунке 5 в качестве примера показан непассивированный образец до и после обработки (цвет образца на правом снимке соответствует цвету эталонного образца).



Рисунок 5. Непассивированный АМг6М-образец до и после удаления продуктов коррозии

По результатам отработки методики на первых 22 образцах было получено, что средние за 14,3 лет испытаний в канале КВК-300 скорости коррозии $К_П$ у непассивированных и пассивированных образцов-свидетелей составляют соответственно 0,0018 и 0,0008 мм/год. Это означает, что глубины П коррозионного разрушения поверхностей у алюминий-магниевых образцов-свидетелей за 125300 часов нахождения в холодной неподвижной воде (и 235

часов нахождения в горячей движущейся воде) незначительны: 0,026 мм у непассивированных образцов и 0,011 мм у пассивированных.

Заключение

Отработана методика определения скоростей коррозии $К_М$ у алюминий-магниевых образцов при испытаниях в варианте неподвижной воды (при температурах 60 и 16 °С). Получены первые результаты по кинетике и скоростям коррозии образцов в горячей и холодной воде на начальной стадии испытаний. Показано, в частности, что в первые ~900 часов испытаний кинетика коррозионных привесов пассивированных алюминий-магниевых образцов в горячей и холодной воде подчиняется степенному закону.

Отработана также методика определения скоростей коррозии $К_П$ у алюминий-магниевых образцов-свидетелей канала КВК-300 реактора ИВГ.1М. Полученные предварительные результаты по скоростям $К_П$ указали на высокую коррозионную стойкость алюминий-магниевых сплавов, являющихся основными конструкционными материалами деталей водоохлаждаемых технологических каналов реактора ИВГ.1М.

Литература

1. Реактор ИВГ.1М. Техническое описание. АК.65000.00.195.ТО. – НИИ НПО "Луч", инв. №К-539, 1989, 204 с.
2. Водоохлаждаемый технологический канал (ВОТК). Пояснительная записка к техническому проекту Р837. ПЗ. – НИИ НПО "Луч", инв. №1612, 1987, 53 с.
3. ВОТК. Изделие Р837. Чертежи. – НИИ НПО "Луч", инв. №12417, 1989, 71 с.
4. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники. – М., Энергоиздат, 1982, 288 с.
5. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение). Справочник. Пер. с нем. М., Металлургия, 1979, 679 с.
6. Коррозия. Справочник. Под ред. Л.Л. Шрайера. – М., Металлургия, 1981, 632 с.
7. Бескоровайный Н.М., Беломытцев Ю.С., Абрамович Д.М. и др. Конструкционные материалы ядерных реакторов. Часть I. Ядерные и теплофизические свойства, основы коррозии и жаропрочности. – М., Атомиздат, 1972, 240 с.
8. Коррозионная стойкость реакторных материалов. Справочник. Под ред. В.В. Герасимова. – М., Атомиздат, 1976, 512 с.
9. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М., Металлургия, 1976, 472 с.
10. Реактор ИВГ.1М. Пояснительная записка. – НИКИЭТ, инв. №12523, 1990, 80 с.
11. Фокин М.Н. Методы коррозионных испытаний. – М., Металлургия, 1986, 342 с.
12. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. – Л., Машиностроение, 1977, 113 с.

АЛЮМИНИЙ–МАГНИЙ ҮЛГІЛЕРІНІҢ СУДАҒЫ КОРРОЗИЯ ЖЫЛДАМДЫҒЫН АНЫҚТАУ ӘДІСТЕМЕСІН ЖАСАП ШЫҒАРУ

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Коянбаев Е.Т., Малышева Е.В., Окапбаев Р.А., Сафронов А.Д., Стороженко А.Н.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

$К_м$ алюминий-магний үлгілерінің ыстық және суық судағы коррозиясы жылдамдығын сынаулардың бастапқы сатысында анықтау әдістемесі нұсқаларының бірі жасалды. Сондай-ақ $К_п$ алюминий-магний үлгілердің суық суда 14 жылғы сынаулардан кейінгі коррозиясының жылдамдығын анықтау әдістемесі жасалды.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINATION OF CORROSION RATES FOR ALUMINUM-MAGNESIUM SAMPLES IN WATER

V.V. Baklanov, I.I. Deryavko, E.T. Koyanbayev, E.V. Malysheva, R.A. Okapbayev, A.D. Safronov, A.N. Storozhenko

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

We developed one of options for determination of corrosion rates for $К_М$ aluminum-magnesium samples in cold and hot water at the initial test stage. We developed the methods for determination of corrosion rates for $К_П$ aluminum-magnesium samples after 14-year tests in cold water as well.

УДК 546.291

ТЕРМОДЕСОРБЦИОННАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И., Понкратов Ю.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Создана экспериментальная установка с условным названием ВИКА для проведения исследований газовыделения из сталей и сплавов. Разработана методика проведения экспериментов на данной установке.

Введение

Процессы выделения газов из металлов представляют большой интерес, связанный с задачей создания первой стенки проектируемого термоядерного реактора. Этот интерес обусловлен связью кинетики газовыделения с конкретной дефектной структурой металла.

Одним из основных методических вариантов десорбции является тепловая десорбция. Частицы, адсорбированные на поверхности, обладают определенной энергией связи с поверхностью, и скорость их десорбции определяется фактором Больцмана. Нагрев поверхности приводит к увеличению скорости десорбции, а десорбированные частицы могут быть обнаружены в газовой фазе при помощи обычных масс-спектрометров. Изучение температурной зависимости скорости десорбции может дать информацию об энергии связи адсорбата (или, более точно, об энергии десорбции), а также получить информацию о концентрации и характере распределения отдельных атомов в структуре исследуемого материала.

В основу экспериментов по исследованию газовыделения из сталей и сплавов положен метод температурно-программируемой десорбции. Подъем температуры осуществляется достаточно медленно и в этих условиях газ, быстро выделяемый при определенной температуре, удаляется откачкой по мере дальнейшего нагрева.

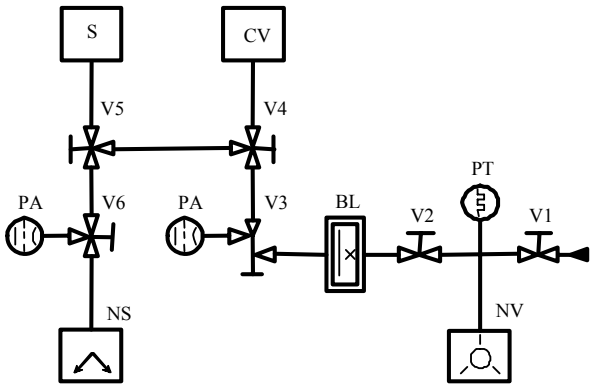
Экспериментальная установка

Экспериментальная установка газовыделения с условным наименованием ВИКА (вакуумная измерительная камера) изображенная на рисунке 1 предназначена для исследования природы радиационных дефектов в сталях методом температурно-программируемой десорбции в интервале температур от 20°С до 1500°С с масс-спектрометрической регистрацией выделившегося газа. Она позволяет получать спектры газовыделения из исследуемых материалов, содержащие информацию о дефектной структуре кристаллической решетки.

Блок-схема вакуумной системы установки приведена на рисунке 2 и состоит из рабочей камеры, системы откачки, системы контроля за давлением.



Рисунок 1. Экспериментальная установка ВИКА



NV – насос НВР – 5 ДМ, NS – насос НОРД – 100, BL – азотная ловушка, PT – вакуумметр термопарный, PA – вакуумметр ионизационный, CV – рабочая камера, V – вакуумный вентиль, S – омегатронный датчик РМО-13 масс-спектрометра ИПДО-2

Рисунок 2. Блок схема вакуумной системы установки:

Откачка вакуумной системы осуществляется двумя насосами: НВР-5ДМ и НОРД-100. Насос НВР-5ДМ служит для предварительной откачки газов из рабочей камеры после загрузки образца, насос НОРД-100 служит для создания высокого вакуума в камере и измерительной части системы экспериментальной установки.

Рабочая камера изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, и охлаждается водой (Рисунок 3).

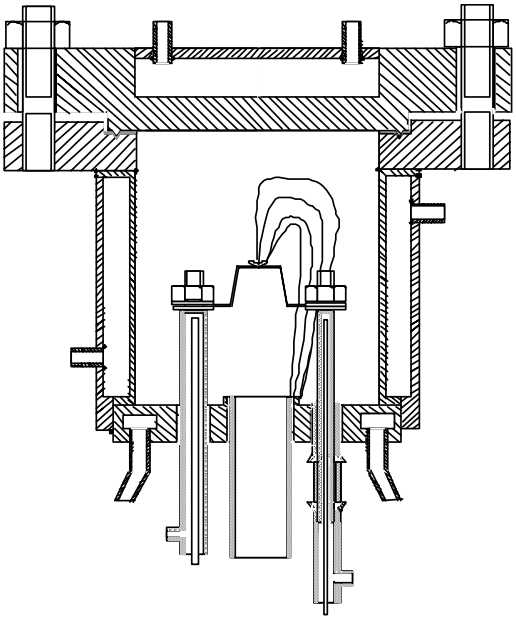


Рисунок 3. Вакуумная рабочая камера установки ВИКА

Внутри камеры смонтирована печь сопротивления, представляющая собой танталовую пластину, на которую устанавливается танталовый тигель. В этот тигель загружается образец (Рисунок 4). Температура образца измеряется косвенно, путем измерения температуры тигля двумя термопарами ВР-5/20, заведенные через герморазъем.

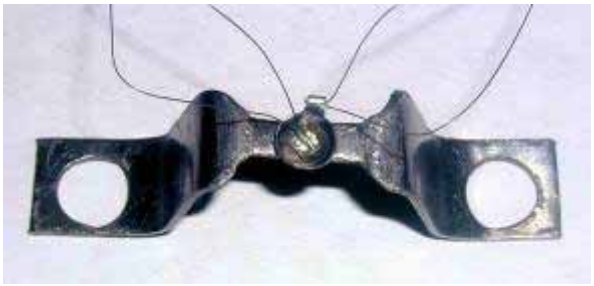
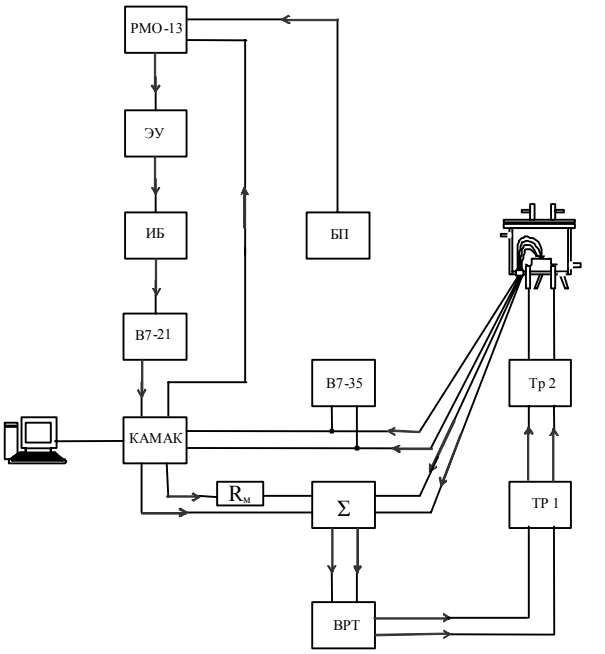


Рисунок 4. Танталовый нагреватель с тиглем.

Установка автоматизирована (Рисунок 5). Аналоговые сигналы масс-спектрометра после аналого-цифрового преобразования вольтметра В7-21 поступают в виде цифрового кода в ПК IBM-PC, где обрабатываются и записываются в файл в виде таблицы. Управление скоростью нагрева образца также осуществляется персональным компьютером, который через определенные промежутки времени изменяет выходное напряжение цифроаналогового преобразователя. Это напряжение поступает на делитель блока сравнения высокоточного регулятора температуры и сравнивается с показаниями термопары. Полученный таким образом разностный сигнал через тиристорный блок управляет током в цепи нагревателя и, следовательно, температурой образца.

Технические характеристики установки

Интервал рабочих температур, °С	20 … 1500
Давление в рабочем объеме камеры при 1500 °С, Па	10^{-5}
Точность автоматического поддержания температуры отно-сительно заданной, °С	± 0,5
Диапазон скоростей линейного подъема температуры, °С/мин	5 – 15



Тр 1, Тр 2 – трансформатор, ВРТ – высокоточный регулятор температур, Σ – блок сравнения, $R_м$ – магазин сопротивлений, КАМАК – интерфейс, БП – блок питания В7-35 – вольтметр, РМО-13 – датчик (омегатрон), ЭУ – электрометрический усилитель, ИБ – измерительный блок.

Рисунок 5. Схема системы автоматизации, контроля и регистрации установки:

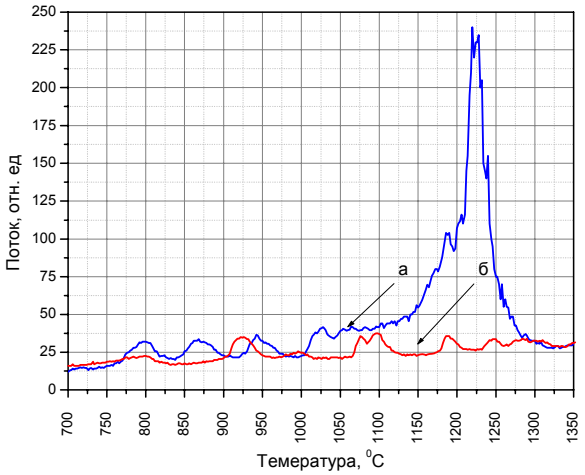
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Для исследования газовыделения из сталей образец загружается в тигель. После загрузки образца следует проверка вакуумной камеры на герметичность. Далее проводится дегазация высоковакуумной части установки с рабочей камерой в течение суток при температуре Т ~ 150 – 200°С насосом НОРД-100. На конечной стадии отжига, давление в высоковакуумной части и рабочей камере установки – не выше 10^{-5} Па.

В начале эксперимента образец нагревается до температуры 200°С. При этой температуре, регистрируется спектр остаточных газов (Ar, CO, H_2O, He и H_2). После чего “запускаем” программу линейного нагрева образца до полного его расплавления с масс-спектрометрическим контролем кинетики газовыделения гелия. Программа построена таким образом, что опрос значений ионных токов (парциальных давлений) производится один раз через 2 градуса. При окончании измерений (достижении

заданной температуры или при прерывании оператором) задатчик температуры продолжает выдавать достигнутое значение. В конце эксперимента, когда образец расплавлен, на достигнутой температуре регистрируется спектры остаточных газов.

На рисунке 5 представлены примеры кривых газовыделения гелия из пустого тигля и облученного образца нержавеющей стали 08Х16Н11М3 вырезанного из чехла ТВС реактора БН-350 полученные в результате проведенных экспериментов на установке ВИКА.



а – из пустого тигля, б – из тигля с облученным образцом взятого из ТВС реактора БН-350

Рисунок 5. Кривые газовыделения гелия

Заключение

Дальнейшее развитие ядерной энергетики будет связано с созданием и интенсивным применением атомных реакторов нового поколения и термоядерных установок. На пути решения проблем по созданию новых реакторов необходимо будет преодолеть ряд трудностей, в первую очередь связанных с разработкой новых конструкционных материалов. Большую и положительную роль при этом может сыграть создание и анализ базы данных по радиационной стойкости материалов, эксплуатировавшихся в жестких условиях облучения. Созданная экспериментальная установка с условным названием ВИКА позволяет проводить эксперименты по исследованию газовыделения водорода и гелия из облученных конструкционных материалов, которые получили различные флюенсы по нейтронам при разных температурах. Кроме того, полученные результаты по исследованию облученных материалов, будут способствовать дальнейшему углублению представлений о поведении водорода и гелия в конструкционных материалах узлов ядерно-энергетических и термоядерных установок, что во многом определяет их эффективность и безопасность.

Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника.– М., Высш. шк. 1990.-320 с.: ил.
2. Фролов Е.С.,. Минайчев В.Е. Вакуумная техника: Справочник. – М., Машиностроение, 1985.
3. Карасев В.С., Ковыршин В.Г. Термодесорбция имплантированного гелия из аустенитных сталей. – Атомная энергия. Москва, 1983.
4. Карасев В.С., Кислик В.С., Швед Г.Ф., Гребеннико Р.В в. Термокинетический анализ выделения гелия из облученных материалов. – Атомная энергия. Москва, 1983.
5. Королев С.Г., Правила устройства электроустановок. – М., Энергоатомиздат, 1985.

ТЕРМОДЕСОРБЦИЯЛАУЫШ ҚОНДЫРҒЫ ЖӘНЕ БОЛАТТАР МЕН БАЛҚЫМАЛАРДЫҢ ГАЗ ШЫҒАРУЫН ЗЕРТТЕУ БОЙЫНША ТӘЖІРИБЕЛЕР ӘДІСТЕМЕСІ

Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И., Понкратов Ю.В.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Болаттар мен балқымалардан газ бөлінуін зерттеуге арналған ВИКА шартты атауы бар тәжірибелік қондырғы жасалды. Аталмыш қондырғыда тәжірибелер жүргізу әдістемесі әзірлемеленді.

THERMAL DESORPTION FACILITY AND TECHNIQUE FOR EXPERIMENTS ON INVESTIGATION OF GAS RELEASE FROM STEELS AND ALLOYS

Yu.N. Gordienko, N.I. Barsoukov, Yu.V. Pankratov

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

An experimental facility conditionally named VIKA was assembled to investigate gas release from steels and alloys. A technique for test conduction at this facility is developed.

УДК 621.039

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУСПЕНЗИИ ДИОКСИДА УРАНА

Такибаев Ж.С., Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Алматы

В настоящей работе получены модельные оценки для температурной зависимости термодинамических теплофизических характеристик: плотности, теплопроводности, удельной теплоемкости, вязкости суспензии сферических монодисперсных частиц диоксида урана (дисперсная фаза, весовое содержание) в жидком свинцово-висмутовом сплаве 0,555Bi+0,445Pb (дисперсионная среда).

Для реакторов на быстрых нейтронах, где удельные тепловые потоки в активной зоне достигают чрезвычайно высоких значений, жидкие металлы служат наиболее пригодным к использованию ядерным топливом. Положительные теплофизические свойства жидких металлов по сравнению с другим жидким топливом, возможности их использования в жидком состоянии при высоких температурах и незначительных давлениях, а также высокая термическая стойкость в сочетании с приемлемой совместимостью с конструкционными материалами представляют определенные преимущества для применения жидкометаллических рабочих тел в высокотемпературных ядерных энергетических установках. Кроме того, жидкометаллическое топливо более удобно в отношении транспортировки и химической переработки.

Основным недостатком жидкого горючего считается трудность подбора жидкого носителя с низкой точкой плавления и по возможности низким давлением пара при высоких температурах в сочетании с коррозионной устойчивостью материала контейнера и аппаратуры для регенерации при высокой температуре. Активные исследования в этом направлении проведены именно в последние десятилетия и связаны с резко возросшим интересом к использованию жидких металлов в высокотемпературных процессах технической физики и энергетических установок. Основным источником данных о различных свойствах жидких металлов являются экспериментальные исследования. Высокий температурный уровень и ряд технологических трудностей проведения экспериментальных исследований с жидкометаллическими теплоносителями существенно влияют на точность проведения эксперимента, чем и объясняется в некоторых случаях расхождение получаемых различными авторами результатов. Это расхождение усугубляется возрастанием активности как исследуемых веществ, так и контактируемых с ними материалов с увеличением температуры. В связи со сложностями проведения экспериментальных исследований с жидкометаллическими теплоносителями большое значение приобрели расчетные методы определения термодинамических и теплофизических свойств.

1. Оценки плотности монодисперсной суспензии

В работе [1] рассмотрены оценки для температурной зависимости плотности жидкого свинцово-висмутового сплава на основе аппроксимирующего соотношения

$$\rho_{спл}(t) = A - Bt,$$

где $A = \sum_i g_i A_i$; $B = \sum_i g_i B_i$, g_i весовая доля i-го компонента сплава.

Коэффициенты A и B для соответствующих компонентов сплава получены в работе [1] . В таблице 1 приведены значения этих коэффициентов для компонентов легкоплавких сплавов тяжелых металлов.

Таблица 1. Параметры для расчета плотности компонентов сплава

Компонент	A	B
Свинец	11097,98	1,2887
Висмут	10411,1	1,259
Олово	7108,7	0,668

В настоящей работе получены оценки для температурной зависимости плотности суспензии диоксида урана (дисперсная фаза) в жидком сплаве 0,555Bi+0,445Pb (дисперсионная среда).

При расчете плотности диоксида урана учитывалось его тепловое расширение. В таблице 2 приведены значения температурного коэффициента линейного расширения α_U диоксида урана в различных температурных интервалах по данным работы [2].

Таблица 2. Температурный коэффициент линейного расширения диоксида урана

Температура, К	$\alpha_U 10^4$
300 – 673	9
293 – 993	11,5
300 – 1173	9,2
673 – 1073	11
1073 – 1533	12,9

Учитывая небольшие величины температурного коэффициента и его слабую зависимость от температуры, в расчетах принималось постоянное значение: α_U = 1,15·10^{-5}, 1/K. Для плотности диоксида урана при температуре 293K принималось значение

$\rho 0_U$ =10950 кг/м^3. Температурная зависимость плотности диоксида урана выразится соотношением:

$$\rho_U(t) = \frac{\rho 0_U}{1 + 3\alpha_U t}.$$

Далее ρ_1 и ρ_2 обозначены плотность дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно. При заданной весовой доле дисперсной фазы C плотность суспензии ρ рассчитывается по формуле

$$\rho(t) = \frac{\rho_1(t)\rho_2(t)}{\rho_2(t) - C[\rho_2(t) - \rho_1(t)]}.$$

Результаты расчета приведены на рисунке 1.

В расчетах теплопроводности и вязкости суспензий содержание дисперсной фазы обычно задается ее объемной долей [3,4]. При различных температурных коэффициентах расширения компонентов суспензии объемная доля дисперсной фазы v изменяется с изменением температуры:

$$v = C\frac{\rho(t)}{\rho_2(t)}.$$

На рисунке 2 приведены отношения объемной доли дисперсной фазы к весовой доле.

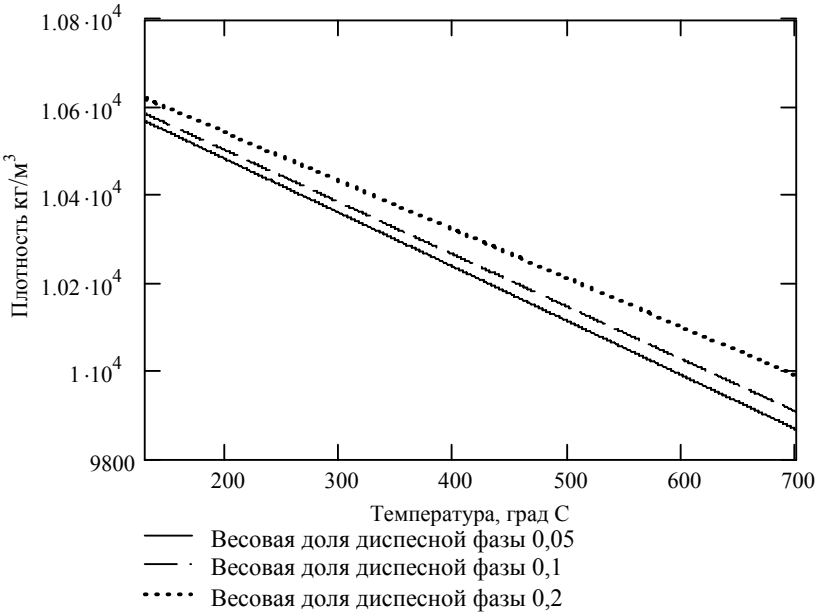


Рисунок 1. Плотность суспензии диоксида урана в жидкометаллическом сплаве 0,555Bi+0,445Pb

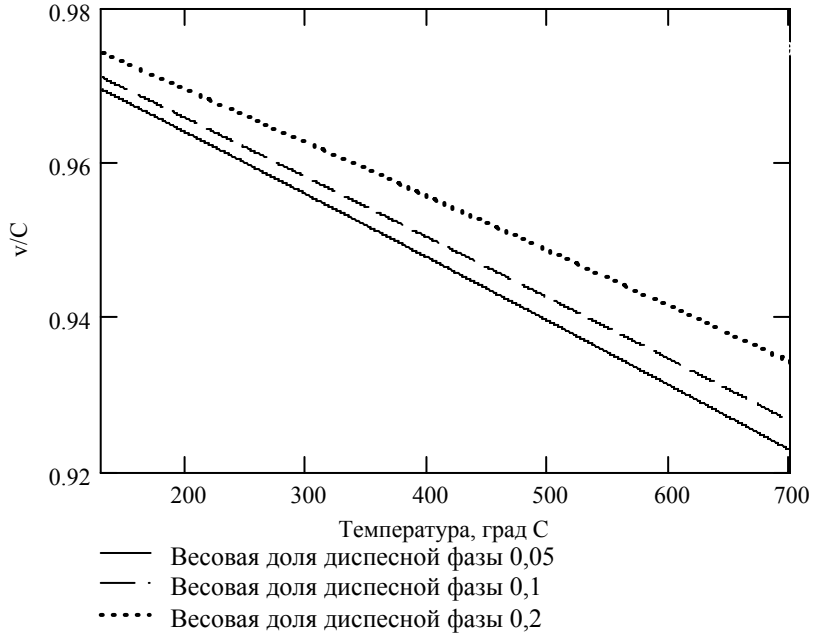


Рисунок 2. Отношение объемной доли дисперсной фазы к весовой доле для суспензии диоксида урана в жидкометаллическом сплаве 0,555Bi+0,445Pb

Как видно из рисунка, изменение значений объемной доли дисперсной фазы в достаточно широких температурных интервалах не превышает нескольких процентов.

2. ОЦЕНКИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОНОДИСПЕРСНОЙ СУСПЕНЗИИ

В работе [5] обсуждались предложенные различными авторами способы расчета теплопроводности жидких легкоплавких сплавов тяжелых металлов. В работе [1] рекомендуется расчет зависимости теплопроводности сплавов от температуры по эмпирическим формулам в линейном приближении:

$$\lambda_{\tilde{n}\ddot{e}}(t) = A(1 + Ct)\,, \qquad (1)$$

где – температура сплава, °С. Для свинцово-висмутового сплава значения эмпирических коэффициентов по данным работы [1]: A = 9,77; C = 0,001011, и расхождение с экспериментальными данными не превышает 1%.

В настоящей работе получены оценки для температурной зависимости теплопроводности суспензии диоксида урана (дисперсная фаза) в жидком свинцово-висмутовом сплаве 0,555Bi+0,445Pb.

Для температурной зависимости диоксида урана предложены различные соотношения и аппроксимации. Теоретическая зависимость по данным работы [6]:

$$\lambda_U(T) = 10^2(3,77 + 0,0258T)^{-1} + \\ +1,1\cdot10^{-4}T + 1,01\cdot10^{-11}T^3 txp(7,2\cdot10^{-2}T)\,. \qquad (2)$$

Экспериментальная зависимость по данным той же работы (с погрешностью 20%):

$$\lambda_U(T) = 11,5 - 1,14\cdot10^{-2}T + 4,4\cdot10^{-6}T^2 - 5\cdot10^{-10}T^3 \qquad (3)$$

где T, K; λ_U, Вт/(м K).

В работе [7] приводится формула для расчета зависимости теплопроводности от температуры для различной плотности диоксида урана:

$$\lambda_U(T) = 40\frac{\gamma}{\gamma_0}\frac{1}{130+T} + 0,34\cdot10^{-15}T^4\,, \qquad (4)$$

где T, K; λ_U, Вт/(см K), γ/γ_0 – относительная плотность диоксида урана, $\gamma_0 = 10950$ кг/м^3.

Значения теплопроводности, рассчитанные по формулам (2), (3) и (4) при $\gamma = \gamma_0$ приведены на рисунке 3.

В настоящей работе для расчета теплопроводности диоксида урана используется соотношение (2). На рисунке 4 приведены температурные зависимости для теплопроводности компонентов суспензии.

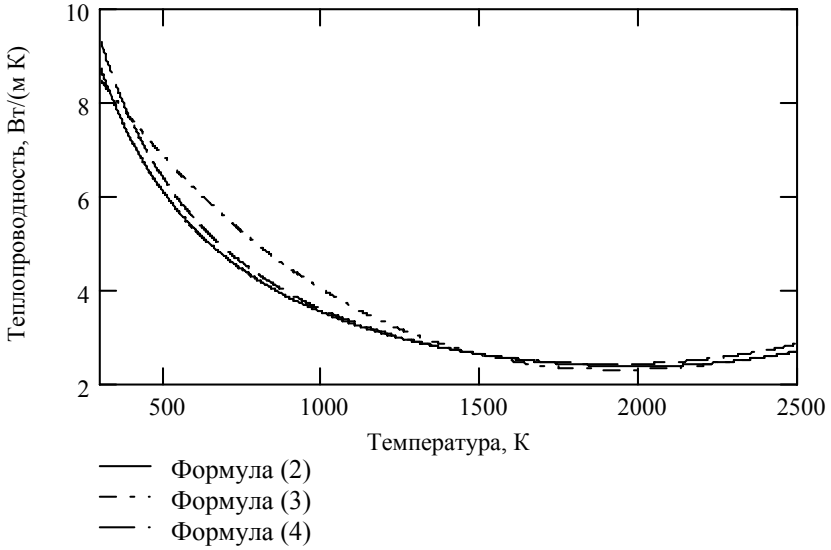


Рисунок 3. Температурная зависимость теплопроводности диоксида урана

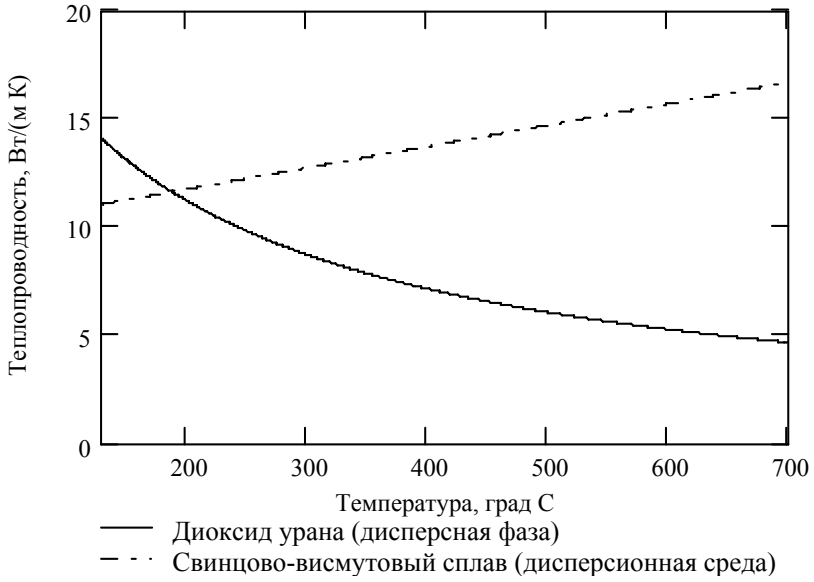


Рисунок 4. Теплопроводность компонентов суспензии

В работе [8] для расчета теплопроводности твердых взвесей в жидкостях, в которых отдельные частицы не касаются друг друга, предлагается использовать формулу Максвелла. В работе [9] отмечается, что эта формула применима при объемной доле дисперсной фазы, не превышающей 0,1. При больших содержаниях дисперсной фазы с частицами, форма которых не очень сильно отличается от сферической (невытянутые частицы), в работе [3] рекомендуется формула Одолевского. Обозначим $\lambda_1(t)$ и $\lambda_2(t)$ - теплопроводности дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно. В этих обозначениях и с учетом температурного расширения компонентов дисперсной системы формула Одолевского запишется в виде:

$$\lambda(t) = \lambda_1(t)\left[1 - \frac{v(C,t)}{\frac{1}{1-\frac{\lambda_2(t)}{\lambda_1(t)}} - \frac{1-v(C,t)}{3}}\right], \quad (5)$$

где $v(C,t) = C\dfrac{\rho(t)}{\rho_2(t)}$ – температурная зависимость объемной доли дисперсной фазы, С – ее весовое содержание.

Температурные зависимости теплопроводности суспензии диоксида урана в жидком сплаве 0,555Bi+0,445Pb для различных весовых содержаний дисперсной фазы, рассчитанные с использованием соотношения (5), приведены на рисунке 5.

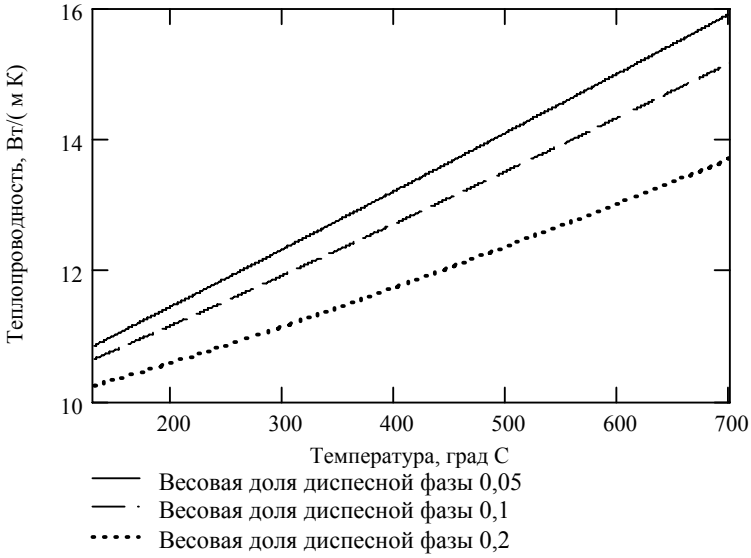


Рисунок 5. Теплопроводность суспензии диоксида урана в жидкометаллическом сплаве 0,555Bi+0,445Pb

3. Оценки теплоемкости монодисперсной суспензии

В работе [5] обсуждались вопросы расчета теплоемкости легкоплавких сплавов тяжелых металлов. Отмечалось, что, в соответствии с данными работы [1] изобарная теплоемкость таких сплавов в жидком состоянии слабо зависит от температуры в достаточно широких температурных интервалах и удельная теплоемкость с хорошей точностью может быть рассчитана, как взвешенная сумма теплоемкостей компонентов сплава

$$c_{\tilde{n}\tilde{i}\ddot{e}} = \sum_i g_i \tilde{n}_i \,, \qquad (6)$$

где g_i и c_i– массовые доли и удельные изобарные теплоемкости компонентов сплава соответственно.

В настоящей работе получены оценки для температурной зависимости удельной теплоемкости суспензии *c(t)* диоксида урана (дисперсная фаза, удельная теплоемкость c_2, весовое содержание C) в свинцово-висмутовом сплаве (дисперсионная среда, удельная теплоемкость c_1).

$$c(t) = C \cdot c_2(t) + (1-C) \cdot c_1 \qquad (7)$$

Для свинцово-висмутового сплава значение c_1 = было получено в работе [5]. Значения удельной теплоемкости диоксида урана в зависимости от температуры, по данным работы [2], приведены в таблице 3.

На рисунке 6 приведены результаты расчета удельной изобарной теплоемкости суспензии в соответствии с соотношением (7).

Таблица 3. Удельная изобарная теплоемкость диоксида урана в зависимости от температуры

Температура, К	c_1, Дж/(К кг)	Температура, К	C_1, Дж/(К кг)
300	245	1000	326
400	264	1200	335
500	281	1400	338
600	292	1600	343
800	318	1800	349

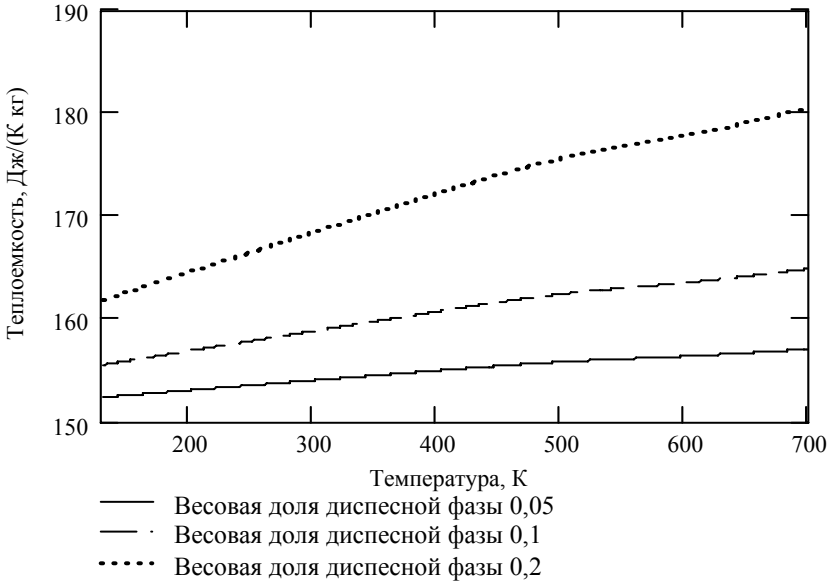


Рисунок 6. Удельная изобарная теплоемкость суспензии диоксида урана в жидкометаллическом сплаве 0,555Bi+0,445Pb

4. Оценки вязкости нонодисперсной топливной суспензии

В работе [5] рассмотрены оценки для температурной зависимости динамической вязкости свинцово-висмутового сплава по методике, предложенной в работе [1] для легкоплавких сплавов тяжелых металлов, в соответствии с которой вязкость сплава μ вычисляется на основе вязкостей μ_i компонентов сплава и весовых содержаний x_i компонентов, исходя из соотношения

$$\frac{1}{\mu} = \sum_i \frac{x_i}{\mu_i}, \qquad (8)$$

где для μ_i в [1] предложена аппроксимация:

$$\mu_i = 9{,}81 \cdot 10^{-5} ((a_1)_i - (b_1)_i T) \exp((a_2)_i / T + (b_2)_i) \,, \qquad (9)$$

где T температура, К; коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2 для свинца и висмута приведены в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициенты формулы (9) для свинца и висмута [1]

Металл	A_1	b_1	A_2	b_2	Интервал температур, °С
Свинец	7,118	0,00221	514	0,613	400 - 800
Висмут	6,39	0,0031	416,7	0,59	280 -700

В настоящей работе получены оценки для температурной зависимости вязкости суспензии сферических монодисперсных частиц диоксида урана в свинцово-висмутовом сплаве 0,555Bi + 0,445Pb. Далее через μ и μ_l обозначены динамическая вязкость суспензии и свинцово-висмутового сплава (дисперсионная среда) соответственно, C и v - соответственно весовая доля и объемная доля дисперсной фазы (диоксид урана).

Выражение для динамической вязкости сильно разбавленных суспензий сферических частиц получено Эйнштейном:

$$\mu./\mu_l = 1+2{,}5\ v.$$

С точностью до квадрата объемной доли дисперсной фазы выражение для отношения вязкости суспензии и дисперсионной среды получено в работе [10].

$$\mu./\mu_l = 1+2{,}5\ v+7{,}6\ v^2\ .$$

Обзор модельных оценок для вязкости суспензий при средних и высоких содержаниях дисперсной фазы приведен в работе [4]. Сравнительно простое соотношение, полученное с учетом гидродинамического взаимодействия частиц суспензии дает результаты, близкие к экспериментальным данным при $v < 0{,}5$[4]:

$$\mu./\mu_l = 1+5{,}5\ \Psi(\beta)\ v, \qquad (10)$$

где $\beta = v^{1/3}$; $\Psi(\beta) = [4\ \beta^7 +10 - (84/11)\ \beta^2] / [10(1-\beta^{10})- -25\ \beta^3(1-\beta^4)]$.

На рисунках 7 и 8 приведены значения $\mu./\mu_l$ в зависимости от весового содержания и от температуры суспензии. Из рисунков видно, что вязкость суспензии существенно увеличивается по сравнению с вязкостью свинцово-висмутового сплава с ростом содержания дисперсной фазы. Температурная зависимость вязкости суспензии обусловлена вязкостью сплава. Небольшие расхождения значений вязкости при различных температурах обусловлены различием температурных коэффициентов расширения свинцово-висмутового сплава и диоксида урана, что приводит к снижению объемной доли дисперсной фазы в суспензии с ростом ее температуры.

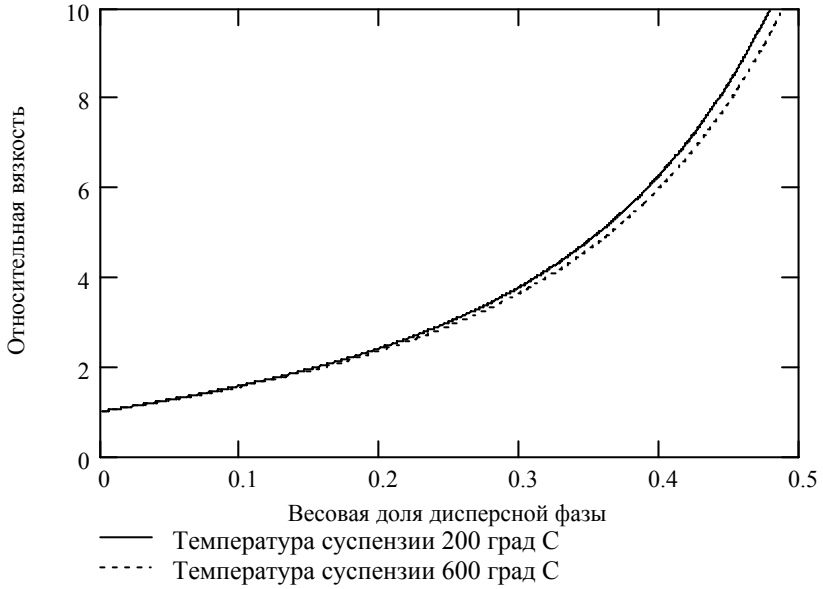


Рисунок 7. Отношение $\mu./\mu_l$ в зависимости от весовой концентрации дисперсной фазы для суспензии диоксида урана в свинцово-висмутовом сплаве

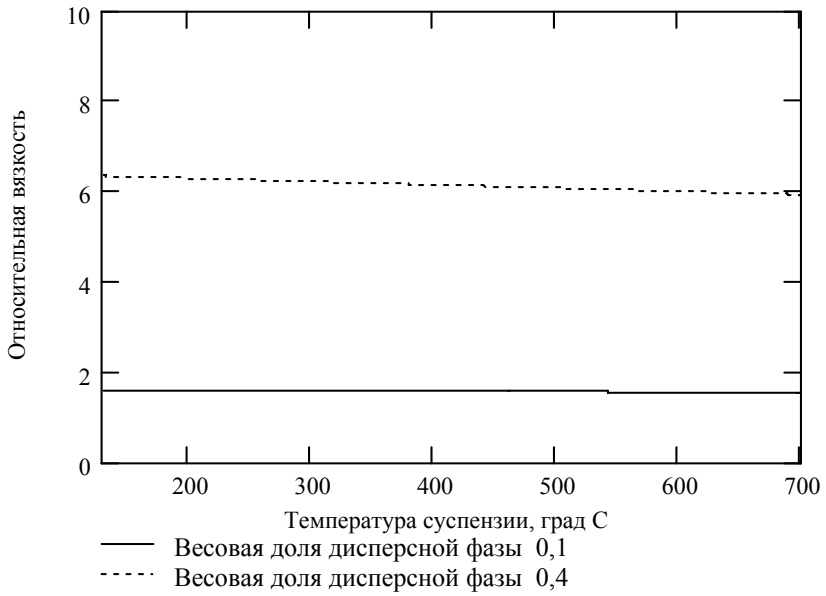


Рисунок 8. Отношение μ/μ_l в зависимости от температуры суспензии диоксида урана в свинцово-висмутовом сплаве

ЛИТЕРАТУРА

1. Чечеткин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.: Энергия, 1971. 415 с.
2. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
3. ДульневГ.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. 264 с.
4. Мошев В.В., Иванов В.А. Реологическое поведение концентрированных неньютоновских суспензий. – М.: Наука, 1990. 88 с.
5. Отчет о НИР по заданию НТП «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» 02.01.02 Разработка ядерных реакторов с эффективным топливным циклом. Этап 02.01.02 Поиск наиболее эффективных композитов ядерного горючего для нового поколения гомогенных реакторов. 2004 г.
6. Кириллов П.А., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомидат, 1990. – 360с.
7. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988. - 359 с.
8. Вопросы теплопередачи в ядерной технике. /Под ред. Ч. Бонилла. – М.: Госатомиздат, 1961. – 314 с.
9. Страхов Э.Б., Воробьев В.Н., Смирнов О.А. Реологические и теплофизические параметры суспензии. - Атомная энергия, Т. 97, вып. 3, с. 225-227.
10. Бэтчелор Дж., Грин Дж. Определение среднего напряжения в суспензии сферических частиц с точностью до членов порядка 2. – В кн.: Гидродинамическое взаимодействие частиц в суспензиях // под ред. Ю.А. Буевича. М. Мир, 1980, с. 46-83.

ДИОКСИД УРАН СУСПЕНЗИЯСЫНЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫНЫҢ СИПАТТАМАСЫ

Тәкибаев Ж.С., Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Алматы

Бұл жұмыста: сұйық қорғасын–висмут ертіндісіндегі 0,555Bi+0,445Pb (дисперсиялақ орта) сфера түріндегі диоксит уранның монодисперсиялық бөлігінің (дисперсиялық фаза, салмақтық бөлігі) тығыздығының, жылу өткізгіштігінің, сыбағалы жылу сыйымдылығының, тұтқырлығының термодинамикалық жылу физика сипатамасының температураға байланыстылығы сарапталынған.

THERMODYNAMIC HEAT-PHYSICAL OF THE CHARACTERISTIC SUSPENSION DIOXIDE OF URANIUM

Zh.S. Takibayev, G.K. Potrebenikov, N.N. Pavlova, A.B. Lotov

National Nuclear Centre of the Republic of Kazakstan, Almaty

In the present work the modelling estimations for temperature dependence thermodynamic heat-physical of the characteristics are received: density, heat conductivity, specific thermal heat capacity, viscosity suspension spherical monodispersion of particles dioxide of uranium (dispersion a phase, weight contents) in liquid an alloy 0,555Bi+0,445Pb (dispersion environment).

УДК 621.039.531:546.291:669.017.3

ДЕФОРМАЦИОННАЯ МАРКЕРНАЯ ЭКСТЕНЗОМЕТРИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Максимкин О.П., Гусев М.Н., Осипов И.С.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Рассмотрены особенности протекания пластической деформации высокооблученных образцов модельных металлов (Fe, Ni, Cu) и нержавеющих сталей (12Х18Н10Т, 04Х16Н11М3Т). Показано, что во многих случаях деформация в облученном материале является локализованной и развивается путем формирования макроскопической шейки, при этом равномерная деформация мала или отсутствует.

Проанализированы известные из литературы экспериментальные методы изучения негомогенности деформации, рассмотрены их преимущества и недостатки применительно к механическим испытаниям миниатюрных высокооблученных образцов.

Для изучения макроскопической локализации деформации предложен и применен метод «оптической маркерной экстензометрии». Метод заключается в фоторегистрации формоизменения и взаимного перемещения маркеров, нанесенных на поверхность деформируемого металлического образца.

Преимущества метода показаны на примере эксперимента с облученным образцом армко-железа – типичного модельного материала. Так, в частности, выявлен характер взаимосвязи между истинными деформациями и истинными напряжениями для облученного и деформируемого облученного образца, изучены особенности локализации деформации в облученном материале.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными исследованиями особенностей пластической деформации металлических материалов показано, что данный процесс склонен к локализации на всем протяжении от начала пластической деформации до разрушения. Локализация проявляется как неравномерность протекания пластической деформации на микро- и макроуровне по рабочей длине образца. Формы проявления локализации весьма разнообразны – это «волны пластической деформации», мигрирующие деформационные очаги [1], либо – на завершающих стадиях деформации – стабильная шейка [2].

В ряде случаев, например, для облучённых материалов, локализация в виде стабильной макроскопической шейки развивается непосредственно после предела текучести, а равномерная деформация либо очень мала, либо отсутствует. Для таких материалов запись только инженерной кривой в традиционной форме «нагрузка-удлинение» не позволяет получить полной физической картины протекающих процессов для этапа равномерной деформации и крайне слабо отражает явления, сопровождающие макроскопическую локализацию деформации [2,3].

Практически важным является то обстоятельство, что значения действующих напряжений и достигнутых деформаций для локальных областей образца могут отличаться от усреднённых значений, определяемых из инженерной кривой растяжения [3,4]. Для материалов, имеющих на зависимости «нагрузка-удлинение» значительный по протяженности участок «равномерной деформации», фактором негомогенности, как правило, пренебрегают, обосновывая это незначительностью ошибки и сравнительно высокой методологической сложностью соответствующих измерений. Однако для образцов, имеющих высокую прочность и низкую пластичность, расчетов, выполняемых на основании инженерной кривой, недостаточно для изучения кинетики пластической деформации.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ ЭКСТЕНЗОМЕТРИИ

Существует ряд подходов, позволяющих организовать изучение деформации на непрерывно деформируемом образце одновременно во многих точках. Это такие методы, как оптическая экстензометрия [5], лазерная и спекл-интерферометрия [3,6]. Однако работы, использующие указанные методики, сравнительно редки и выполнены, как правило, на модельных материалах [16] с помощью метода сеток [7,8].

Сравнительный анализ указанных выше методик и некоторых других методик изучения негомогенности пластической деформации приведен в таблице 1. Отметим, что ранее для оценки развития деформаций в необлученных образцах широко применялись методы нанесения на поверхность образца специальных сеток фотографическим способом, напылением, накаткой, царапанием или кернением, травлением, а также при помощи алмазной пирамиды [7,8]. Эти методы нами не рассматриваются как трудоемкие и не вполне приемлемые для облученных миниатюрных проб, время работы с которыми ограниченно. Отметим также, что в случае тонкого образца нанесение маркеров с помощью механических приспособлений [4] неприемлемо, поскольку ведет к его повреждению, кроме того, данный способ требует многократного прерывания эксперимента и длительных ручных измерений с помощью инструментального микроскопа.

Специальные методики экстензометрии, например, такие как спекл-интерферометрия [3], либо не обеспечивают работы с миниатюрными образцами, либо являются ресурсоемкими и весьма дорогостоящими. Разнообразные контактные экстензометры и методы измерения в «проходящем свете» [5] оказываются непригодны для малогабаритных плоских образцов, в частности, вследствие развития деформационного рельефа [9]. Использованный нами ранее метод испытаний «Shear-Punch» [10], несмотря на его определенные достоинства при работе с миниатюрными образцами, не может быть применен для изучения кинетики локализации деформации.

Таблица 1. Сравнительный анализ некоторых методов экстензометрии применительно к миниатюрным высокорадиоактивным образцам

Метод	Достоинства	Недостатки
2-х точечный экстензометр [11]	Простота аппаратной части, входит в комплект большинства испытательных машин. Хорошая точность.	Установка на малый образец ведет к повреждению поверхности. Невозможно измерять локализованную деформацию.
Оптический экстензометр [5]	Бесконтактность измерений. Простота обработки данных. Не требует длительной подготовки пробы.	Чувствителен к развитию деформационного рельефа. Погрешность существенно возрастает с ростом степени деформации. Ограничения на форму образца (только цилиндрический).
Метод делительных сеток [7,8]	Хорошая точность для малых (< 10-15 %) деформаций.	Ведет к повреждению поверхности. Плохо подходит для измерения больших деформаций (> 15%). Не позволяет изучать кинетику деформации.
Лазерная спекл-интерферометрия. [3,6]	Бесконтактность измерений. Использование в качестве опорных точек произвольных участков поверхности.	Сложность вычислительной обработки данных. Сложность аппаратной реализации. Требует проб больших размеров (20-40мм и более).
Маркерная экстензометрия. [Предлагаемый метод]	Бесконтактность измерений. Относительная простота расчетов и аппаратной реализации. Хорошая точность измерений на базе 1 мм.	Плохо подходит для измерения малых деформаций (1-2%). Требует подготовки поверхности достаточно высокого качества.

Особенности пластической деформации образцов высокооблученных материалов

Как известно, при облучении высокоэнергетическими частицами в общем случае прочность материала возрастает, а его пластичность снижается. При достижении некоторого критического флюенса величина равномерной деформации, получаемая в результате механических испытаний облученной пробы, становится достаточно малой и начинает доминировать локализованная деформация – развитие макроскопической шейки [12,13]. Нередко значительная часть пробы оказывается вообще недеформированной, тогда как локальные деформации могут быть очень велики.

В этом случае обычно регистрируемая кривая «нагрузка-удлинение» не пригодна для изучения кинетики деформационных процессов и, в частности, для определения характера взаимосвязи между величинами напряжений и деформаций. Для получения физической картины протекающих событий требуется применение специальных экспериментальных методов, в том числе деформационной экстензометрии. Такие методы не могут, как правило, использоваться при экспериментах в «горячих камерах», поэтому ситуация осложняется тем, что облученный материал для снижения радиационной опасности персонала поступает на исследование в виде миниатюрных проб с размерами рабочей части от 10×3.5×0.3мм [14] до 5×1×0.25мм [15]. В ряде случаев применяются образцы еще меньших размеров.

При этом размеры области локализации оказываются весьма малы – до 2-3 мм^2 для плоского образца, что накладывает существенные ограничения на выбор конкретной методики экстензометрии (Таблица 1.). Практически применимыми остаются только лазерная спекл-интерферометрия и маркерная экстензометрия.

Маркерная экстензометрия

Данный метод заключается в нанесении на поверхность образца маркеров и последующем отслеживании их формоизменения и взаимного перемещения с помощью фото- или телекамеры, обеспечивающей получение изображения с достаточным разрешением.

В качестве маркеров в ряде публикаций рекомендуют применять пластиковые метки, имеющие клеевой нижний слой. Они имеют правильную геометрическую форму, что облегчает обработку изображений на компьютере, но не могут деформироваться совместно с поверхностью, на которую нанесены, что ограничивает возможности метода.

В нашем случае – для миниатюрных образцов – удобно использовать синтетические красящие вещества, наносимые в виде точек диаметром 0.2-0.7мм. При хорошей адгезии к поверхности будет также получена информация об изменении формы маркера, что полезно при расчетах локальной деформации.

Освещение, способ фоторегистрации и цвет маркеров следует подбирать, добиваясь контрастного изображения с максимальной резкостью. При компьютерной обработке цифровых изображений удобны маркеры красного, синего или зеленого цвета, как контрастные в RGB-спектре. В ряде случаев хороших результатов можно добиться, устанавливая

светофильтры, либо используя черно-белые изображения (256 «градаций серого»). Для образцов с полированной поверхностью иногда наилучшими оказываются маркеры черного цвета.

В результате использования метода маркерной экстензометрии образец оказывается покрытым измерительной сетью с шагом 1-1,5 мм так, что для произвольного участка образца, исходя из последовательности фотоснимков, могут быть рассчитаны значения локальной деформации и действующего напряжения с погрешностью не более 0.05-0,1 мм. При этом исходная плотность маркеров может быть избыточной, что дает определенную свободу в построении расчетной сети.

В процессе деформации образца периодически регистрируют взаимное перемещение маркеров с помощью цифровой фотокамеры высокого разрешения (нами применена цифровая фотокамера с разрешением 2048×1536 пикселов, имеющая микрообъектив и позволяющая получать разрешение на изображении до 10 микрон/пиксель).

Для обработки полученных изображений была разработана программа, реализующая ряд специально адаптированных алгоритмов. Программа позволяет осуществлять:

- поиск на изображении «шумовых объектов» (царапин, дефектов поверхности) и их нейтрализацию;
- поиск маркера на изображении, определение множества пикселов, входящих в состав маркера как группового объекта (выполняется специальным клеточным автоматом);
- расчет «центра тяжести» маркера и определение его координат на изображении;
- построение измерительной сети;
- определение взаимного перемещения и формоизменения маркеров на основании анализа последовательности фотоснимков.

Предусмотрены режимы полуавтоматической и полностью ручной обработки изображений, полезные, например, для сильно зашумленных либо недостаточно контрастных изображений.

Метод и вычислительные алгоритмы позволяют определять локальные деформации (как изменение расстояния между маркерами, либо как изменение формы маркера), а также рассчитывать действующие (истинные) напряжения, исходя из гипотезы о неизменности объема металла при пластической деформации.

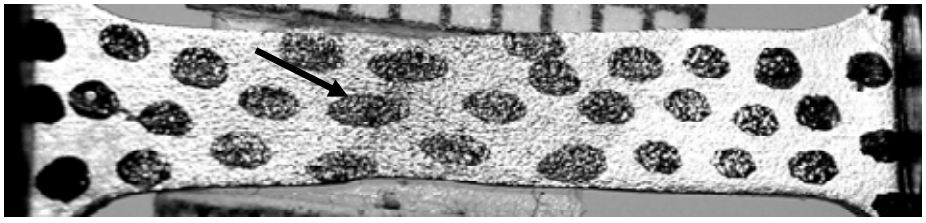
Определенным недостатком метода является сложность и сравнительно высокая погрешность определения локальных деформаций, в том случае, когда ширина фронта локализации существенно меньше расстояния между маркерами, а также, если деформационная полоса проходит через маркер лишь частично.

Экспериментальные результаты

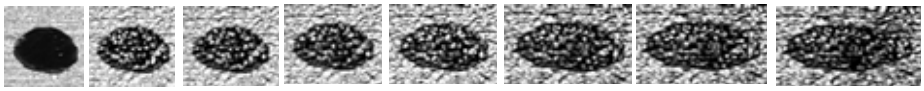
На рисунке 1 показан необлучённый деформированный образец армко-железа на стадии предразрушения. Видно, что в центральной части образца форма маркеров изменилась – они сильно вытянулись вдоль направления деформации.

Располагая последовательностью фотоснимков, полученных при его растяжении, можно восстановить кинетику пластической деформации (Рисунок 1б), рассчитав значения действующих напряжений и деформаций и их распределение по образцу (Рисунок 2). В основе проводимых расчётов лежит критерий «сохранения объёма» при пластическом формоизменении материала.

Как видно из рисунка 2, для необлучённого материала распределение напряжения и величины деформации носит достаточно неравномерный характер. Уже на ранних этапах деформации выделяется область, где $\sigma_{ист}$ и $\varepsilon_{ист}$ выше по сравнению с соседними участками. Для облучённого рабочая часть образца в целом остаётся недеформированной, но существуют две области, где развивается деформация. Это макроскопические шейки (в данном случае – две), в одной из которых в дальнейшем происходит разрушение.



а)



ε = 0% 10% 24% 38% 48% 54% 71% 80%

б)

Рисунок 1. а) Фотография необлучённого образца армко-железа перед разрушением;
б) Эволюция формы одного и того же маркера (отмечен стрелкой) в процессе деформации (по разным снимкам).
Указаны величины локальной деформации участка образца, на которой нанесён маркер.

Анализ полученных результатов показал, что применение метода маркерной экстензометрии при изучении пластической деформации облучённых образцов может быть весьма эффективным. Так, переход от условных напряжений к «истинным» качественно изменяет вид кривых течения (Рисунок 3). Из рисунка видно, что развитие локальных деформаций в шейке сопровождается существенным деформационным упрочнением материала и ростом действующих напряжений вплоть до момента разрушения, несмотря на кажущееся разупрочнение, регистрируемое на инженерной кривой.

Наиболее значимым с научной точки зрения является тот факт, что метод маркерной экстензометрии позволяет для выбранного участка облучённого миниатюрного образца определить величины истинных напряжений $\sigma_{ист}$ и деформаций $\varepsilon_{ист}$ и изучить их взаимосвязь $\sigma_{ист}(\varepsilon_{ист})$ (Рисунок 4). Согласно [17,18] это представляется важным при исследовании стадийности пластической деформации.

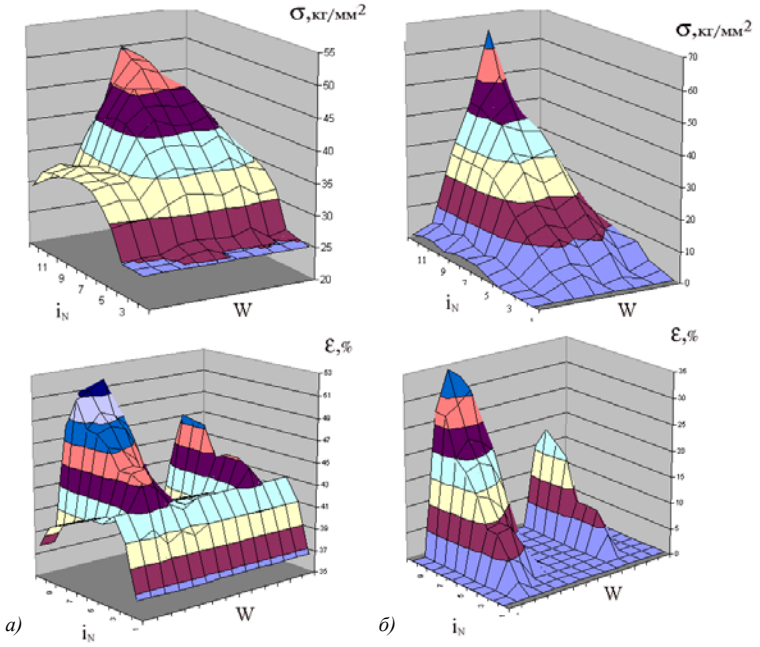


Рисунок 2. Распределение локальных напряжений (а) и деформаций (б) по рабочей длине W для необлучённого (сверху) и облучённого (снизу) образцов армко-железа (Ф = 1,4·10[19] н/см^2, $T_{обл}$ ~ 80 °С), рассчитанные по изменению формы маркеров. Моменты получения изображений i_N отмечены стрелками на инженерной диаграмме (Рисунок 3). Для расчётов были отобраны 10-12 маркеров, расположенных вдоль оси образца (Рисунок 1).

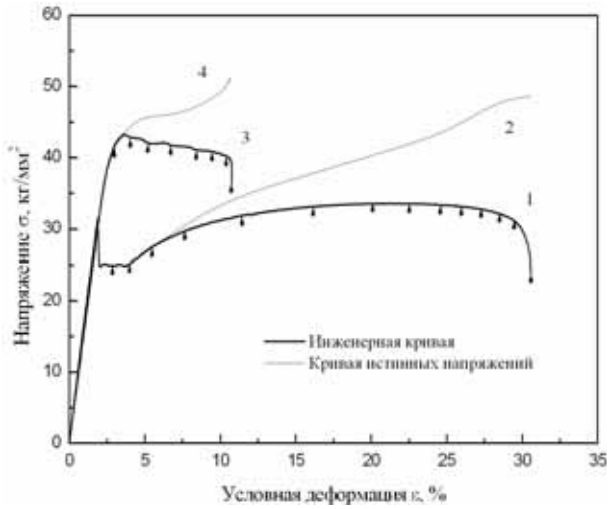


Рисунок 3. Кривые пластического течения армко-железа в координатах «напряжение – условная деформация» (1,3) и «истинное напряжение в шейке – условная деформация» (2,4): 1,2 – необлучённый образец, 3,4 – облучённый образец (Ф =1,4·10[19] н/см^2, $T_{обл}$ ~ 80 °С). Стрелками показаны моменты фотосъёмки образцов в процессе деформации. Отметим, что истинные деформации в шейке достигают существенно больших значений (Рисунок 2), чем величины, определяемые из инженерной кривой.

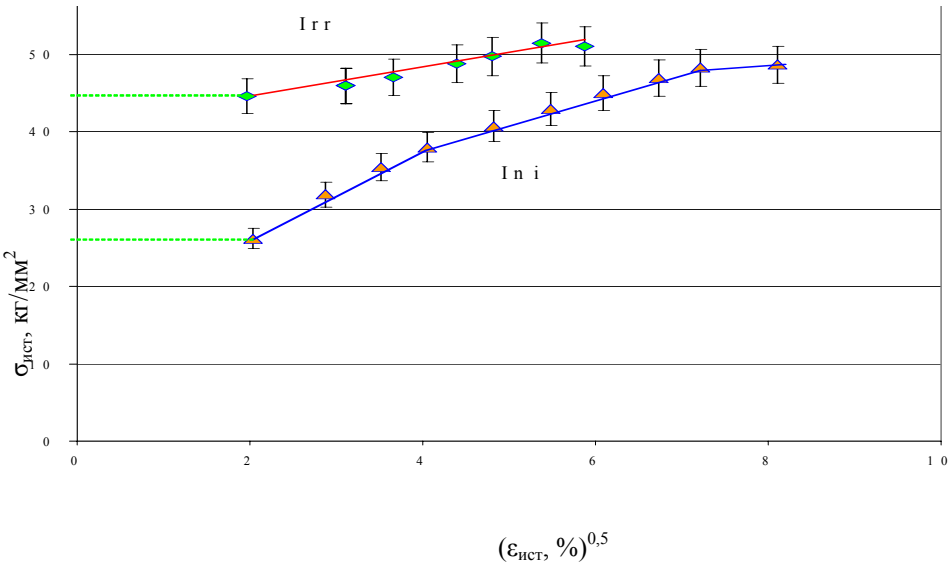


Рисунок 4. Взаимосвязь истинных напряжений ($\sigma_{ист}$) и локальных деформаций ($\varepsilon_{ист}$) для образцов армко-железа (irr – облученный нейтронами образец, $Ф = 1{,}4 \cdot 10^{19}$ н/см^2; ini – необлученный образец)

Так, анализ полученной зависимости $\sigma_{ист}(\varepsilon_{ист})$ показал (Рисунок 4), что экспериментальные кривые, перестроенные в координатах «истинное напряжение — истинная деформация», могут быть описаны уравнением вида:

$$\sigma_{ист} = \sigma_0 + k \cdot \varepsilon_{ист}^{0,5} \qquad (1)$$

где значение коэффициента $k \sim 17{,}1$ кг/мм^2, а величины $\sigma_0 \sim 41{,}5$ кг/мм^2 для облученного нейтронами армко-железа.

Подобный характер взаимосвязи между величинами напряжений и деформаций ранее был показан для чистых необлученных металлов и ряда ОЦК–сплавов [17,18]. В то же время для облученного армко-железа экспериментально это установлено впервые. Согласно [18] области на кривой $\sigma_{ист}(\varepsilon_{ист})$, в пределах которой характеристики деформационного упрочнения неизменны, соответствуют стадиям пластической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты настоящей работы показывают, что характеристики пластичности, вычисляемые из инженерных диаграмм в случае испытания высокооблученных материалов, чувствительны к условиям проведения эксперимента и без применения специальных методов исследования лишь приближенно отражают картину протекающих в образце процессов.

Использование развитой нами методики «маркерной экстензометрии» позволяет изучать локализованное пластическое течение и определять его параметры, имеющие определенное практическое значение.

Так, например, используя соотношение (1) и экспериментально полученные численные коэффициенты с помощью методов вычислительного моделирования можно выполнять расчеты напряженно-деформационного состояния облученных узлов произвольной геометрии.

Метод может также быть использован при изучении стадийности пластической деформации необлучённых и облучённых металлических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полетика Т.М. и др. «Локализация макродеформации в сплавах на основе Zr» // Материаловедение, №10, 1999, с.32-36.
2. Пресняков А.А. «Локализация пластической деформации» Алма-Ата, 1973, 47с.
3. Горбатенко В.В., Поляков С.Н., Зуев Л.Б. «Визуализация зон локальной деформации вычислительной декорреляцией видеоизображений со спекл-структурой (на примере полос Чернова-Людерса)» // «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» Т.67, №7, 2001, с. 29-31.
4. Мигачев Б.А., Волков В.П. «Повышение точности измерения деформационного состояния при использовании координатных сеток» // Заводская лаборатория, 1988, Т.54, №5, С.77-79.
5. Бабушкин А.А., Максимкин О.П., Челноков С.Ю. «Оптико-электронный экстензометр» // Известия АН КазССР, сер.физ.мат., 1986, №2.
6. Панин В.Е. и др. «Структурные уровни пластической деформации разрушения» // М., Наука, 1990, 256с.
7. Перстнев П.П., Бережкова Г.В. «Применение метода сеток, нанесённых вакуумным напылением, к определению локальных деформаций» // «Заводская лаборатория. К 50-летию металлургии лёгких сплавов» Т.49, №11, 1983, с. 73-74.
8. Кошелёв П.Ф., Сандеров В.Л., Царев В.Н., Грот В.В. «Исследование деформации методом сеток» // «Заводская лаборатория. Методы химического анализа» Т.42, №6, 1976, с. 727-729.

9. Кульков С.Н., Миронов Ю.П. «Фрактальная размерность поверхности при деформационном мартенситном превращении в никелиде титана» // ЖТФ, 2004, Т.74., Вып.4, с.129-132.
10. Гусев М.Н., Максимкин О.П., Матесов Д.С., Чакров П.В. «Shear-Punch — новый прибор и метод определения механических свойств высокорадиоактивных материалов» // Вестник НЯЦ, сер. «Ядерная физика и радиационное материаловедение», 2001, Вып. 4, с.43-46.
11. Золоторевский В.С. «Механические свойства металлов», М., «Металлургия», 1983, с.161-162.
12. F.A.Garner, Chapter 6: “Irradiation Performance of Cladding and Structural Steels in Liquid Metal Reactors”, V.10A of Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, VCH Publishers, 1994, PP. 419-543.
13. Горынин И.В., Винокуров В.Ф. и др. «Сравнительная оценка служебных характеристик сталей аустенитного класса применительно к условиям работы разрядной камеры ИТЭР» // Сборник трудов «Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов», С–Пб. – 21-24 сентября 1992.–С.90-109.
14. Hamilton M.L. and other «Neutron-Induced Evolution of Mechanical Properties of 20 % Cold-Worked 316 Stainless Steel as Observed in both Miniature Tensile and TEM Shear Punch Specimens» // Effects of Radiation on Materials, 19th International Symposium, STP 1366, pp. 1003-1017.
15. Максимкин О.П., Гусев М.Н. «Влияние гелия на механические свойства, аккумуляцию и диссипацию энергии при деформации армко-железа» // ВАНТ (Харьков, ХФТИ), сер. рад. поврежд. и рад. матер., 2000, вып. 4(78), с.139-142.
16. Xiao Pan, Xianglin Wu and other «Modeling tensile response and flow localization effects in selected copper alloys» // Journal of Nuclear materials, 329-333, 2004, pp. 1088-1092.
17. Трефилов В.И. Моисеев В.Ф. «Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов» Киев, 1989, 256с.
18. Трефилов В.И. и др. «Определение границ структурных состояний по кривым нагружения» // ДАН Укр.ССР, сер.А, 1980, №5, с.83-86.

МЕТАЛДАР МЕН ҚҰЙМАЛАРДЫҢ ӨТЕ РАДИОАКТИВТІ НҰСҚАЛАРЫНЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ТӘЖІРБИЕЛЕРІНДЕГІ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ МАРКЕРЛІ ЭКСТЕНЗОМЕТРИЯСЫ

Максимкин О.П., Гусев М.Н., Осипов И.С.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Металдар мен құймалардың қатты сәулеленген нұсқаларының (Fe, Ni, Cu) модель металдары мен тат баспйтын пластикалық деформацияның жүру ерекшеліктері қаралды. Көп жағдайларда сәулеленген материалдағы деформация локальді екені және макроскопты мойынды қалыптастыру арқылы дамыйтыны көрсетілді, сонымен қатар бірқалыпты деформация аз немесе жоқ.

Деформацияның гомогенсіздігін зерттейтін эксперименталды әдістері анализделді, миниатюралық қатты сәулеленген нұскалардың механикалық тәнжірбиесіне қатысты олардық артықшылықтары мен кемшіліктері қаралды.

Деформацияның макроскопты локализациясын зерттеуге арналған «оптикалық маркерлі экстензометрия» әдісі ұсынылып қолданылды. Әдіс деформацияланған металл нұсқалардың бетіндегі маркерлердің өзара ауыстыру мен форма өзгеруінің фототіркеуіне негізделген.

Әдістің артықшылықтары типті модель материалы – сәулеленген армко-темір нұсқасы мысалында көрсетілді. Осылай, сәулеленген және деформацияланған сәулеленген нұскалардың нақты деформациясы мен нақты кернеуі арасындағы өзара байланыс характері анықталып, сәулеленген материалдағы деформацияның локализациясының ерекшеліктері зерттелді.

DEFORMATION MARKER EXTENSOMETRY IN MECHANICAL TRIALS OF HIGH-ACTIVITY SAMPLES OF METALS AND ALLOYS

Maksimkin O.P., Gusev M.N., Osipov I.S.

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

Plastic deformation behavior of highly irradiated samples of modeling metals (Fe, Ni, Cu) and stainless steels (12X18H10T, 04X16H11M3T) is considered. In an irradiated material deformation in many cases is shown to be of local occurrence; it is developed via formation of a macroscopic neck, and uniform deformation is small or negligible.

The published experimental techniques for studying the deformation heterogeneity are analyzed against its advantages and shortages with respect to mechanical trials of miniature high-activity samples.

To study macroscopic localization of the deformation, the “optical marker extensometry” technique is proposed and applied. The technique essence is in deformation photo recording and mutual displacement of the markers drawn on a surface of the deformed metallic samples.

The technique advantages are demonstrated by the experiment with irradiated samples of armco-iron, a typical modeling material. In particular, the character of interrelation between the true deformations and the true strains in an irradiated and deformed samples is found; изучены peculiarities of localization of the deformation in an irradiated material are studied.

УДК 622.235.213

О ПРИМЕНЕНИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ АММИАЧНО-СЕЛИТЕРННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ

Ковалев В.В., Масягин Д.Г., Пустовалов И.А.

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

Разработаны составы эмульсионных гранулированных взрывчатых веществ и технологии их применения при производстве взрывов на больших глубинах в водных и водно-дисперсных средах, защищенные патентом Республики Казахстан. Созданные методы и технологии позволили провести эффективно ликвидацию объектов ядерной инфраструктуры на Семипалатинском испытательном полигоне.

В соответствии с Указом Президиума Республики Казахстан от 29.08.1991г. № 409 о закрытии Семипалатинского ядерного полигона в 1996-2001гг. на площадке «Балапан» ликвидировано 14 испытательных скважин специального назначения. С этой целью в скважинах диаметром 1,0-1,5 м проведены геофизические и опытные взрывы с массой взрывчатого вещества (ВВ) до 25 тонн при размещении зарядов под водой на глубине до 650 м при гидростатическом давлении до 7,0 Мпа. Ранее аналогичные взрывы в мировой практике как гражданскими, так и военными ведомствами не проводились.

По техническим проектам для этих взрывов в качестве взрывчатых материалов были определены: ВВ – гранулотол, промежуточные детонаторы – шашки Т-400Г, детонирующие шнуры ДШУ-33М, ДШЭ-12 и ДШН-10 [1]. .

Гранулотол имеет повышенную водостойкость, но в Республике Казахстан не производится и имеет высокую стоимость (750-800 долларов США за 1 т), что по технико-экономическим условиям ограничивает возможности его применения при экспериментальных и промышленных массовых подводных взрывах.

В мировой практике основным направлением в повышении эффективности и безопасности взрывных работ является разработка и внедрение новых простейших взрывчатых смесевых составов на основе аммиачной селитры – основного компонента и водомасляной эмульсии в качестве жидкого горючего. Эмульсионные ВВ состоят, в основном, из водного раствора неорганического окислителя, который в виде мелких капелек представляет дисперсную фазу, и жидкого горючего, являющегося непрерывной фазой. В качестве окислителя наиболее часто используют аммиачную селитру отдельно или в смеси с другими селитрами. Жидким горючим веществом обычно являются органические виды топлива (минеральное масло, дизельное топливо и т.д.). Для распределения мелких капелек раствора окислителя в фазе жидкого горючего применяют эмульгаторы. Эмульгатор является важнейшим компонентом эмульсионного ВВ, стабилизирующим состояние водомасляной эмульсии. Составы некоторых эмульсионных ВВ, применяемых в странах дальнего и ближнего зарубежья, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Составы некоторых эмульсионных ВВ

Наименование компонентов	Содержание компонентов, в % по массе					
	1	2	3	4	5	6
Жидкое горючее (нефтепродукты)	4,2	4,3	4,7	6,0	5,5	6,0
Аммиачная селитра	65,8	65,0	67,7	38,0	37,8	58,0
Нитрат натрия	13,2	13,0	13,5	-	-	15,0
Нитрат кальция	-	-	-	40,0	39,8	-
Вода	11,1	11,0	11,5	10,0	9,9	17,0
Эмульгатор	2,5	1,0	1,0	2,0	3,0	2,0
Стеклянные микросферы	3,0	4,0	1,5	4,0	4,0	2,0
Аэрирующий реагент	0,2	-	-	-	-	-

На горнодобывающих предприятиях Казахстана широкое применение (до 50% от общего потребления ВВ) получил эмульсионный гранулит Э, разработанный Казахским государственным научно-производственным центром взрывных работ (КГЦВР) под научным руководством доктора технических наук, профессора Ерофеева И.Е.

Гранулит Э – сыпучая механическая смесь гранулированной аммиачной селитры (85%) и водомасляной эмульсии (15%). Простота состава ВВ позволяет осуществлять приготовление гранулита Э непосредственно на местах производства взрывных работ (в карьере, на блоке), что значительно упрощает и удешевляет технологию производства взрывных работ, а также повышает безопасность при обращении с ВМ взрывперсонала.

На открытых горных работах России применяют взрывчатые вещества, базирующиеся на эмульсии порэмита. Порэмит – эмульсионное ВВ, представляющее собой пластичную массу от светло-

бежевого до коричневого цвета, предназначенную для механизированного заряжания скважин диаметром не менее 105 мм при взрывании пород средней крепости и любой степени обводнённости, не содержащих сульфидов. Для крепких пород могут быть использованы порэмиты повышенной мощности, в состав которых вводится энергетическая добавка – алюминиевый порошок. Присутствие газогенерирующей добавки (ГГД) в качестве сенсибилизатора позволяет применять эмульсию порэмита индивидуально, исключая сухую фазу – аммиачную селитру. Такую технологию в основном, используют при заряжании только сильно обводнённых скважин, так как в этом случае резко увеличивается расход водомасляной эмульсии, что приводит к удорожанию взрывных работ.

На бывшем Семипалатинском ядерном полигоне были проведены эксперименты с целью разработки промышленной технологии применения смесевых эмульсионных аммиачно-селитренных гранулированных ВВ для производства массовых взрывов в водных средах при гидростатическом давлении до 3,0 МПа. В основу экспериментов положены положительные результаты лабораторно-полигонных исследований, проведенных в 1997 г. на площадке «Балапан», а также опыт промышленного применения эмульсионного гранулита Э в АО «Донской ГОК».

Для экспериментов были использованы следующие взрывчатые материалы:

- эмульсионный гранулит Э, допущенный Госгортехнадзором РК к постоянному применению (журнальное постановление от 07.07.93г. № 2/93; ТУ 92 РК 01-94, зарегистрировано Госкомитетом РК по стандартизации и метрологии 16.03.1994г., № 116/004214);
- эмульсионный граммонит 79/21Э;
- патронированный аммонит № 6ЖВ (ГОСТ 21984-76);
- детонирующий шнур ДШЭ-12 (ГОСТ 6196-78).

В качестве жидкой добавки в составе гранулита Э и граммонита 79\21Э использован невзрывчатый компонент — водомасляная эмульсия (ТУ 92 РК 02-94, №116/004213).

В составе гранулита Э было 85% гранулированной аммиачной селитры (АС) и 15% водомасляной эмульсии (ВМЭ); в составе граммонита 79/21 Э - 68% АС, 17% гранулотола и 15% ВМЭ.

Эксперименты проведены в скважине № 1383 на площадке «Балапан». Фактическая глубина скважины на период проведения испытаний составляла 477 м. В скважине расположены 3 става обсадных труб, в том числе внутренний диаметром 800 мм, в котором и были размещены контейнеры с зарядами ВВ. Уровень воды от поверхности составлял 0,8 м. Контейнеры, выполненные из черного металла, имели емкость по 80 литров.

Эмульсионные гранулированные ВВ изготавливались вручную на деревянном поддоне покрытом полипропиленовой тканью. Для эксперимента было изготовлено по 250 кг гранулита Э и граммонита 79/21 Э.

На первом этапе проведения испытаний в контейнеры было загружено по 35 кг гранулита Э и граммонита 79/21Э, приготовленных по двум различным технологиям (всего 140 кг ВВ). Кроме того, в контейнерах были размещены 10 отрезков детонирующего шнура ДШЭ-12 с гидроизолированием концов по различным технологиям. Контейнеры закреплялись между собой по вертикали жесткими металлическими стяжками. Верхний из них крепился на трос, с помощью которого лебедкой контейнеры были доставлены на глубину 250 м под водой. Через сутки контейнеры были подняты на поверхность и из них отобраны и исследованы представительные пробы. Гранулиты и граммониты не растворились и сохранили свои физико-механические параметры.

Для проведения испытаний в 40 м от скважины № 1383 был подготовлен полигон, на котором пробурены 9 углублений диаметром 500 м глубиной 300 мм для размещения зарядов ВВ. В качестве стандартного заряда была взята одна пачка патронов аммонита № 6ЖВ (2 кг), а для сравнительных взрывов - по 20 кг гранулотола, граммонита 79/21, гранулита Э и граммонита 79/21 Э, подготовленных на поверхности (стандартные пробы); гранулитов (Э1 и Э2) и граммонитов 79/21Э (1 и 2) после суточного нахождения в воде на глубине 250 м. К магистрали ДШЭ-12 были подсоединены 10 испытываемых отрезков ДШЭ-12. Опасная зона была определена в 300 м. Способ взрывания - электрический. По результатам полигонного взрыва установлено, что все заряды ВВ и отрезки ДШЭ-12 сдетонировали полностью. Объем воронок взрыва относительно заряда сухого гранулотола, принятого за 1, составил: 1,1 – для граммонита 79/21Э, 1,0 – для гранулита Э; 0,80-0,85 - гранулиты и граммониты после суточного нахождения в воде на глубине 250 м. Таким образом, были установлены более низкие показатели по объему воронок взрывов для ВВ, находившихся под водой. Это объяснялось недостаточным импульсом для развития полной детонации при параметрах заряда 0,5×0,3 м, дополнительным насыщением межгранульного состава ВВ водомасляной эмульсией при высоком гидростатическом давлении в скважине и водой - при разгрузке контейнеров.

По результатам полигонных испытаний были внесены коррективы в составы ВВ по содержанию водомасляной эмульсии. В четыре контейнера загружалось по 60 кг гранулита Э и граммонита 79/21Э двух различных составов, которые были опущены по тросу на глубину 200 м. В качестве боевиков в каждом контейнере устанавливалось по одной пачке патронов аммонита № 6ЖВ (2 кг).

Инициирование взрыва осуществлялось с поверхности от магистрали из двух ниток ДШЭ-12. Соединение бухт ДШЭ-12 по длине магистрали осуществлялось способом «морской узел» через 45 м. Взрывание зарядов было осуществлено через 25 часов после спуска контейнеров электрическим способом. Параметры взрыва по данным сейсмоприемников, установленных на расстоянии 100 м от скважины, соответствовали взрыву 200-250 кг промышленных ВВ.

С целью усовершенствования технологии проведения подводных массовых взрывов с применением аммиачно-селитренных гранулированных взрывчатых веществ специалистами АО «Соколовско-Сарбайское ГПО» и ДГП «КГЦВР» в 2003 г. разработан и допущен к постоянному применению гранулит ЭМ [2].

В таблице 2 приведены различные составы и характеристики водомасляных эмульсий.

Таблица 2. Технико-экономические показатели водомасляных эмульсии для взрывчатых веществ

Наименование показателей	Эмульсия для взрывчатых веществ		
	Гранулит Э	Гранулит ЭМ	Порэмит
Массовая доля компонентов(%):			
- аммиачная селитра	28-32	56-64	59-62
- натриевая селитра	-	-	13-15
- нефтепродукт	36-38	14-20	5
- вода	28-32	20-24	14-15
- эмульгатор	2-4	0,5-2,5	2
- газогенерирующие добавки	-	-	1,5-0,5
Технико-экономические показатели: - 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, $	70-85	180-200	410-450

Результаты испытаний показали, что гранулит ЭМ (марки ЭМ-50), за счёт покрытия гранул аммиачной селитры обильным слоем водомасляной эмульсии, обладает достаточной водоустойчивостью, позволяющей отказаться от гидроизоляции зарядов после осушения скважин, даже если взрыв производят через 3-4 суток после заряжания.

Основными достоинствами гранулита ЭМ следует считать: широкий диапазон условий, в которых этот тип ВВ можно использовать, его высокие энергетические и детонационные характеристики, водоустойчивость, высокий уровень безопасности применения, а также низкую стоимость взрывных работ.

В связи с отсутствием дорогостоящих и дефицитных компонентов, в частности ГГД, эмульсионные взрывчатые смеси типа гранулитов Э и ЭМ значительно дешевле других типов эмульсионных взрывчатых веществ. Высокая стабильность и водоустойчивость, высокая степень безопасности ведения взрывных работ, возможность, в достаточно широких пределах, изменять рецептуру и характеристики, определяет большую перспективу применения этих ВВ для повышения эффективности и безопасности взрывных работ на горнодобывающих предприятиях Казахстана.

Результаты промышленных испытаний на карьерах АО «ССГПО» подтвердили высокую водостойкость, взрывчатую эффективность и стабильность взрывов после нахождения гранулита ЭМ в воде в течение 3-4 и более суток. Водомасляная эмульсия (ТУ 7500 РК 39884819ДГП-001-2004) полностью заполняет межгранульное пространство аммиачной селитры, что исключает дополнительное (сверх технических условий) поступление ВМЭ и воды, отрицательно влияющих на состав взрывчатого вещества и его энергетическую характеристики.

Разработанные методы и технологии защищены патентом Республики Казахстан № 7233 «Способ производства взрывов на больших глубинах в водных и водно-дисперсных средах» и обеспечивают полную гидроизоляцию зарядов гранулированных аммиачно-селитренных ВВ, детонирующих шнуров, и качественное производство экспериментальных и промышленных взрывов в водных средах.

Литература

1. Ерофеев И. Е., Ковалев В.В. Производство массовых взрывов на больших глубинах//Взрывное дело, № 1-2.- Алматы, 2003, с 45-51.
2. ТУ 7500 РК 39884819 ДГП-002-2004. Вещество взрывчатое промышленное гранулит ЭМ (ЭМ-30, ЭМ-40, ЭМ-50).

СУ АСТЫНДАҒЫ ЖАРЫЛЫСТАРЫН ӨНДІРУІНДЕ ЭМУЛЬСИЯЛЫҚ АММИАК-СЕЛИТРЛІК ЖАРЫЛҒЫШ ЗАТТАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ

Ковалев В.В., Масягин Д.Г., Пустовалов И.А.

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

Қазақстан Республикасының патентімен қорғалған жарылғыш заттардың эмульсиялық түйіршіктелген құрамы және оларды су және су-дисперсиялық орталарда үлкен терендікте жарылыстар өндіруінде қолдану технологиясы әзірленген. Жаратылған әдістер мен технологиялар Семей сынау полигонында ядролық инфрақұрылымының нысаналарын тиімді жоюына мүмкіншілік берген

ON EMULSIVE AMMONIA-SALTPETER EXPLOSIVES APPLICATION AT UNDERWATER EXPLOSIONS

V.V. Kovalev, D.G. Masyagin, I.A. Pustovalov

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

The contents of emulsion granulated explosives and the technology of their application while explosions at large depths in water and water-dispersion mediums protected by the patent of the Republic of Kazakhstan were developed. The methods and technology allowed fulfilling effective objects liquidation of nuclear infrastructure at Semipalatinsk Test Site.

УДК 621.039.7

СОЛЯНОЙ КУПОЛ ЗАПАДНЫЙ АЗГИР – КАК ВМЕЩАЮЩИЙ МАССИВ ДЛЯ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

[1)]Гильманов Д.Г., [2)]Ахметов Е.З., [1)]Березин С.А., [2)]Адымов Ж.И., [2)]Ерматов А.С., [3)]J. Ziegenhagen

[1)]Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов
[2)]Институт ядерной физики НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[3)]DBE, Peine, Germany

Рассмотрены вопросы выбора наиболее подходящего целостного массива каменной соли для размещения глубинного пункта захоронения радиоактивных отходов в ареале соляного купола Западный Азгир. В дальнейшем будут исследованы геолого-гидрогеологические характеристики соляного массива и осадочных пород как в зоне деформаций геологических структур, созданных ядерными взрывами, так и вне этой зоны.

ВВЕДЕНИЕ

Обстановка с утилизацией и захоронением радиоактивных отходов (РАО) в РК остается до сих пор нерешенной как из-за отсутствия пунктов захоронения РАО, отвечающих требованиям МАГАТЭ и Международного комитета по радиационной защите (МКРЗ), так и в связи с не разработанностью научно-технических, методических, социально-экологических и нормативных аспектов проблемы обращения и окончательного удаления РАО. Совершенно очевидно, что промедление с созданием хранилищ РАО приведет к задержкам в реализации программы развития атомной энергетики, обострению экологической ситуации и в конечном итоге к значительным экономическим издержкам. Тем более, что к 2006 г. возникнут проблемы удаления высокоактивных отходов, образующихся от демонтажа реактора БН-350 (г.Актау) и двух исследовательских реакторов (г.Курчатов). Также в перспективе необходимо учитывать большие объемы РАО, образующихся в будущем на Балхашской АЭС, начало строительства которой запланировано на ближайшее время. Следует отметить, что в Казахстане к 2005 г. РАО, подлежащие захоронению, были накоплены в следующих количествах [1].

- При работе энергетических и исследовательских реакторов – 62 400 м^3.
- При использовании ИИИ в медицине, науке и промышленности – 50 м^3.
- Часть грунта, загрязненного плутонием при ядерных взрывах на территории СИП – 5000 м^3 .

Таким образом, совершенно очевидно, что в Казахстане назрела острая необходимость создания постоянно действующего пункта (или пунктов) захоронения радиоактивных отходов. Решение проблемы надежной изоляции РАО является весьма актуальным для Казахстана, имеющего более чем полувековую историю деятельности на всей территории военно-промышленного комплекса СССР, создавшего более 500 радиационно опасных объектов различной степени радиологического воздействия на население и окружающую среду.

В индустриально развитых странах имеющих атомную энергетику длительное время проводятся работы по изысканию массивов горных пород для безопасного захоронения РАО, образующихся при эксплуатации и выводе из нее АЭС. При этом породы таких горных массивов должны удовлетворять таким основным требованиям как: слабая проницаемость и сейсмическая стабильность. Среди других требований следует отметить высокую теплопроводность, способность к пластичным деформациям, повышенные сорбционные свойства. Большинству этих требований отвечают массивы каменной соли [2].

ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ВЫБОРА ПЛОЩАДОК ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО В КАМЕННОЙ СОЛИ

1. При выборе отчуждаемого блока горного массива для размещения пункта захоронения РАО одним из основных требований является оптимальная протяженность вмещающей породы, позволяющей разместить не только подземные инженерные сооружения, но и создания вокруг них достаточно большого объема буферной защитной зоны.
2. Определенные требования к физическим, механическим, химическим и структурно-реологическим параметрам вмещающей породы. Массивы каменной соли характеризуются низкой проницаемостью, высокой теплопроводностью, пластичностью, конвергенцией, способностью залечивать трещины и разрывы, механической прочностью и удобством создания шахтных сооружений.
3. Изоляция массива каменной соли от обводненных зон, отсутствие в исследуемом блоке карстовых процессов, тектонических нарушений и линз рассолов, наличие защитных барьеров в виде глинистых пород от надсолевых вод.
4. Ограничение миграции радионуклидов в зонах контакта каменной соли с другими породами, например, ангидридом, глинами и гипсом. Малые протяженности структурных границ и контактов соли с другими по составу породами.

Создание поглощающей буферной зоны вокруг пункта захоронения радиоактивных отходов для сдерживания утечки РАО и изоляции радионуклидов на продолжительные периоды времени.

5. Низкая тектоническая и сейсмическая активность в регионе. Купольные структуры имеют положительные специфические свойства из-за того, что материал куполов испытал процесс интенсивного метаморфизма при протекании галокинеза и диапиризма, превратился в сравнительно гомогенную массу, при этом произошли перекристаллизация и залечивание возникших разрывных нарушений, уменьшилась пористость и выжимается из объема купола остаточная рапа, присутствовавшая в первоначальной пластовой залежи соли.
6. Отсутствие транспорта элементов в пределах отчуждаемого блока массива каменной соли и миграционных процессов между вмещающей средой и компонентами, генетически не связанными с процессами солеобразования, доказывает о наличии стабильности в массиве каменной соли.

О ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ НА БЫВШЕМ АЗГИРСКОМ ЯДЕРНОМ ПОЛИГОНЕ

За период с 22.04.1966 г. по 24.10.1979 г. в 10 скважинах было осуществлено 17 подземных ядерных взрывов различной мощности на глубинах от 161 до 1491 м, в результате чего образовались 9 полостей разного объема (от 10000 м^3 до 240000 м^3) и провальная воронка глубиной 30 м и диаметром 500 м [3]. На площадка А9 скважина значительно отклонилась от вертикали и на рабочей глубине 630 м (место заложения заряда) близко подошла к границе соль-глина на склоне купола, поэтому большая часть энергии взрыва после отдачи от соляного тела образовала неустойчивую полость на стыке соляного и глинистого массивов, после обрушения которой и образовалась провальная воронка [4], заполненная паводковыми и дождевыми водами объемом 20000 м^3, связанными с подземными водоносными горизонтами [5], т.е. происходит частичная подпитка водоема подземными водами. Полости А1÷А5 заполнены водой, полости А8 и А11 сухие, полости А7 и А10 заполнены водой частично. Полости А7, А8, А10 и А11 образованы групповыми взрывами – одновременными подрывами нескольких зарядов. Полость А5 на глубине ~ 1500 м создана для изучения стабильности существования хранилища в условиях поддержания в них постоянного противодавления.

Все взрывы проектировались как камуфлетные, т.е. без выхода радиоактивных продуктов взрыва на поверхность. Однако это не удалось, о чем свидетельствуют данные о продолжительности выбросов радиоактивных инертных газов из полостей – от нескольких дней до нескольких месяцев и об их суммарных активностях до $10^{17}\div10^{18}$ Бк. Общая активность находящаяся в подземных полостях, составляет 0,5÷1,0 млн Ки. При повторных вскрытиях полостей в атмосферу было инжектировано 10 млн Ки радиоактивных газов.

В результате всех проведенных взрывов в массиве каменной соли образовались устойчивые герметичные полости разного объема, существующие на протяжении около трех десятков лет. Исключение составили:

- Полость А5 - герметичная, сжимающаяся, специально создана для проверки теоретических предположений о заплывании на больших глубинах пустот каменной соли за счет резкого увеличения ее пластичности при высоких давлениях;
- Полости А1, А2, А3 и А4 - устойчивые, негерметичные, связаны трещинами с водоносными горизонтами, трещины образовались в массиве галита во время взрывов, данных о существовании трещин до взрывов не имеется.

Подземные ядерные взрывы были проведены с целью создания в массивах каменной соли подземных полостей-хранилищ большого объема и многоцелевого назначения. В небольших масштабах проводились и другие эксперименты: декаплинг – изучение сейсмических последствий и получение трансплутониевых элементов.

ПРИРОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЗГИРСКОГО ПОЛИГОНА

Рельеф участка – слабовсхолмленная равнина, в большинстве занятая массивами песков, представленных слабо закрепленными барханами и буграми высотой 3-5 м, придающих местности более волнистый и пустынный характер. В геоморфологическом отношении район представлен серией песчаных массивов, разделенных суглинистыми или супесчаными равнинами. Дневная поверхность территории полигона и прилегающей местности сложена глинами и тяжелыми суглинками, местами перемежающимися маломощными наносами песка. Поднятие в районе горы Чапчачи характеризуется сильно расчлененным профилем. Возле п.Азгир имеются два рапповых озера с пологими склонами, приуроченные к глубоким карстовым депрессиям рельефа. Глубина этих озер колеблется от 0,5-1,5 м в дождливое время года и до 0,1-0,2 м в засушливое. По химическому составу воды этих озер преимущественно хлоридно-натриевого типа с различной степенью минерализации от 1 г/л до 375 г/л.

Грунтовые воды залегают в зависимости от сезона года, рельефа и геологического строения на глубине от 0,5 м до 8-16 м от дневной поверхности. Доступ к ним возможен только благодаря редкой сети колодцев или скважин. Питание грунтовых вод осуществляется за счет выпадения атмосферных

осадков (100-200 мм/год) в форме сезонных весенне-осенних дождей, ночной конденсации влаги и таяния скудного снежного покрова. Наиболее распространенными грунтовыми водами являются гидрокарбонато-хлоридно-натрий-кальциевые, гидрокарбонато-кальциевые, гидрокарбонато-кальций-магниевые воды с минерализацией 0,5-3,0 г/л. Коэффициент фильтрации водовмещающих пород K_p = 0,1-5 м/сут. Наиболее мощные колодцы находятся в поселках: Азгир, Батырбек, Алгабас, Карагайте, Аккудук, Балкудук, Асан. Эти колодцы вскрывают небольшие линзы пресной и солоноватой воды четвертичных и неогеновых (апшеронских) отложений.

Климат региона резко континентальный, засушливый, формируется под преобладающим влиянием арктических, иранских и туранских воздушных масс. В холодный период года господствуют массы воздуха, поступающих с западных отрогов сибирского антициклона, а в теплый период года они сменяются континентальными туранскими и иранскими воздушными массами. Среднегодовое количество осадков в районе не превышает 200 мм, а максимум осадков выпадает в летний период, однако их испаряемость превышает их количество в 4-5 раз. Высота снежного покрова около 20 см и средний запас воды в снеге при наибольшей его высоте 41 мм. Гидротермический коэффициент – 0,3, коэффициент увлажненности – 0,15-0,20. Среднегодовая температура воздуха 7,3°С, средняя температура января -11°С, июля 25,1°С. Для региона характерны постоянные ветры северных (летом) и восточных (зимой) румбов со скоростями до 15-20 м/с и более.

Гранулометрический состав поверхностного почвенного слоя характеризуется в основном присутствием глинистой фракции и мелких пылеватых частиц размерами от 0,063 мм до 0,10 мм [6].

Краткая горно-геологическая и гидрогеологическая характеристика купола Западный Азгир

Солянокупольное поднятие Большой Азгир расположено на западной части обширной Прикаспийской соленосной провинции площадью 470000км^2. Территория провинции ограничена с юга нижним течением р. Эмба и Каспийским морем, с запада - р. Волга, с севера линией Саратов-Оренбург-Орск и с востока западными склонами Мугоджарских гор и средним течением р. Эмба. Каменная соль распространена по всей провинции в виде широкой платформы [7]. Мощность пласта соли по данным сейсморазведки достигает 7-9 км, уменьшаясь в так называемой прибортовой (периферийной) зоне. К дневной поверхности соль приближается участками за счет ранее образовавшихся куполов. Поднятие Большой Азгир входит в систему локальных структур Богдо-Чапчачинского вала, является обширной брахиантиклинальной складкой диапирового типа, осложненной двумя соляными куполами – Западный Азгир и Восточный Азгир, которые отстоят друг от друга, в среднем, на 10-12 км и разделяются компенсационной мульдой Ужантатор. Участок купола Западный Азгир расположен на расстоянии 75 км к северо-востоку от железнодорожной станции Харабалинская (Астраханская обл., Россия).

При знакомстве с геолого-гидрогеологической структурой региона, особый интерес представляют материалы, характеризующие геологическое состояние местности в довзрывной период, когда геологические формации находились в первозданных условиях, т.е. еще не испытали сейсмических и иных воздействий ПЯВ [8]. Регион в сейсмическом отношении относится к стабильным. Геолого-литологические разрезы боевых скважин А1 и А2 (в довзрывной период) представлены на рисунке 1. Геологическое строение Большого Азгира включает в себя Кунгурские соленосные пласты, которые представлены, в основном, крупнокристаллическим галитом. По химическому составу каменная соль на 92-98% представлена галитом, а 2-8% приходится на нерастворимый остаток. Проявлений текучести соли (конвергенции) до глубины 1000-1100 м не обнаружено.

Западный купол является открытой системой – в его юго-восточной части каменная соль залегает непосредственно у дневной поверхности, достигая абсолютных отметок +5÷6 м. Здесь, находится наивысшая точка купола, известная как гора Чапчачи. Основные водоносные горизонты, расположенные в надсолевых отложениях, повсеместно перекрыты практически водонепроницаемыми глинистыми породами и характеризуются застойным режимом. Первыми от поверхности располагаются водоносные комплексы неогена и перми. Определяющими факторами формирования первых от поверхности водоносных горизонтов являются климат и геоморфологические условия. Питание вод происходит, в основном, за счет атмосферных осадков.

Основные требования к целостному массиву для захоронения РАО на куполе Западный Азгир

В настоящее время подземные полости Азгира являются фактически хранилищами радиоактивных отходов – продуктов ядерной реакции и наведенной активности. За 30–40 летний поствзрывной период не было зафиксировано выхода радионуклидов из полостей на дневную поверхность.

A1

Возраст	Литологический разрез	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м	Описание пород
Четвертичный		8	8	Супеси, суглинки, пески
Пермские отложения		161.3	153.3	Каменная соль разнозернистая, средне и крупно кристаллическая, белая, серая, прозрачная с обломком серого доломита

A2

Возраст	Литологический разрез	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м	Описание пород
Четвертичный		1.0	1.0	Суглинок
Неогеновые отложения		200	199	Глина слоистая, плотная, с прослойками песчанников и песка
		250	50	Известняк
		300	50	Гипсо-ангидритовая толща. Ангидрит плотный с прослоями глины
Пермские отложения		597.2		Каменная соль - плотная, крупнокристалличес-кая с прослоями гипса и ангидрита
		750	450	

Рисунок 1. Геолого-литологический разрез по скважинам А1 и А2

Это свидетельствует о стабильности и герметичности как водозаполненных, так и сухих подземных полостей. Ввиду перспективности использования соляной формации для захоронения РАО по контракту Европейской комиссии в 1996-1997 г.г. специалисты НЯЦ РК (Казахстан), Consulting und Engineering GmbH и Stoller Ingenieurtecnik GmbH (Германия) исследовали возможность окончательного удаления РАО в подземные полости, созданные ядерными взрывами в соляных куполах Большой Азгир [1]. При этом рассматривались все условия и требования безопасности, предъявляемых к таким объектам: отсутствие или минимальный уровень сейсмичности и тектонических движений, непроницаемость и прочность каменной соли, геотермические условия, обеспечение радиационной безопасности, отсутствие поверхностных и подземных вод, отдаленность от крупных промышленных и сельскохозяйственных зон, количество осадков, отсутствие полезных ископаемых и другие. Существо проблемы заключается в том, что будет ли обеспечена стабильность и герметичность подземных полостей в течение хотя бы исторического периода времени (`~10000 лет) и более. Состояние изолированности подземных полостей и транспорт радионуклидов в будущем в водоносные горизонты и на дневную поверхность приобретают особую актуальность и являются наиболее важными факторами при определении пригодности полостей как места захоронения РАО. Потенциальной угрозой для хранилищ в подземных ядерных полостях являются воды надсолевых пород и внутрисолевые рассолы терригенных песчаных линз, прослоев или замкнутых каверн с высоким давлением. В перекрывающих соли осадочных песчано-глинистых породах фиксируются водоносные горизонты. Безопасность захоронения в течение длительного периода времени в основном определяется наличием воды – носителя радионуклидов. В результате совместных исследований оказалось невозможным однозначно определить степень пригодности полостей для окончательного захоронения РАО, т.к. трудно гарантировать безводный режим в подземных полостях в течение хотя бы исторического периода времени.

Поэтому казахстанскими и российскими специалистами в 2004-05 г.г. проводятся работы по выбору целостного массива для размещения пункта захоронения РАО средней активности в соляном куполе Западный Азгир (в рамках Проекта МНТЦ К-943). Строительство шахтным или скважинным способом в соляном целике могильника РАО представляется более безопасной альтернативой, чем захоронение РАО в полостях, созданных ядерными взрывами. При обосновании оптимального выбора отчуждаемого блока горного массива для размещения хранилища (пункта захоронения) РАО следует придерживаться концепции системного подхода к глубинному удалению РАО. По этой концепции основным барьером для распространения радионуклидов в случае окончательной изоляции РАО является фактически сама геологическая формация, в нашем случае – каменная соль. Хранилища и пункты захоронения в таком системном подходе представляются как сложные геотехнологические системы, размещенные в галите (соли), который характеризуется отсутствием или очень малым содержанием воды, кроме поровых вод (межкристаллических включений), состояние которых зависит от полей напряжения в системе геологических структур Прикаспийской провинции. В фазе сжатия происходит отдача поро-

вых вод, в фазе растяжения – обратный процесс. Соответственно, отдача воды сопровождается повышением уровня Каспийского моря [2] и очень низкой водопроницаемостью. Галит рассматривается как реальная сплошная изотропная среда, обладающая такими реологическими свойствами, как упругость, пластичность и ползучесть. Системный подход к геологической концепции глубинного захоронения РАО изложен в нашем докладе на Международной конференции по размещению радиоактивных отходов. DISTEC-2004. Берлин [9].

При проведении работ по выявлению целостности массива каменной соли для захоронения радиоактивных отходов необходимо предварительно определить границы зон деформаций в среде галита, совершенных в свое время действием ядерных взрывов. Зоны деформаций и различные геолого- и геофизические характеристики купола Западный Азгир вне сферы непосредственного воздействия ядерных взрывов на массив каменной соли определяются из имеющихся и приобретаемых ведомственных архивных геологических и геофизических материалов. При недостатке информации будут выполнены необходимые полевые геофизические и геолого-гидрогеологические изыскания. Они включают сейсмические, магнитные и электроразведочные съемки на исследуемых участках, химический и радионуклидный анализ воды из подземных горизонтов в надсолевых отложениях, определение физико-химических и минерало-петрографических характеристик горных пород.

По результатам проводимых в 2004-05 гг. полевых и камеральных изыскательских работ будут получены данные, характеризующие состав, свойства и состояние массива каменной соли – вмещающей породы для размещения пункта захоронения РАО:

- геолого-гидрогеологическая характеристика солянокупольной структуры Западный Азгир, включающей осадочные и вмещающие породы, вне зоны деформаций соляного массива, наведенных ядерными взрывами;
- распределения и размеры пластов различных типов горных пород, расположение зон изменений, наведенных ядерными взрывами, положение и ориентировку границ разделов сред с различными физическими и минералогическими свойствами;
- гидрогеологические характеристики и литологический состав предполагаемого отчуждаемого блока горного массива каменной соли и осадочных пород;
- определение месторасположения трещин и линз рассолов, возможных границ миграции радиоактивных рассолов в ареале отчуждаемого блока каменной соли и вне зоны деформации соляного массива;
- сведения, характеризующие геотермические условия исследуемого блока геологической среды;
- информация по стабильности и объемам водонезаполненных полостей, образовавшихся при проведении подземных ядерных взрывов в 80 годах прошлого столетия.

Заключение

Использование опыта создания на солянокупольном месторождении Большой Азгир с помощью ядерных взрывов уникальных подземных полостей, не имеющих аналогов в мировой практике, и методических разработок, примененных в 1980-90 г.г. специалистами РФ, при изучении поствзрывных последствий и исследований зон деформации соляного массива от воздействия ядерных взрывов в ареале площадок А1 и А2, позволяют успешно выполнить поисковые работы по выявлению целостного массива (целика) каменной соли, пригодного для захоронения РАО. Для выявления целика проводятся геофизические и геолого-гидрогеологические изыскания как в зоне деформаций в среде галита, обусловленных воздействием ядерных взрывов, так и вне вышеупомянутой зоны, где деформации в виде трещин и пустот являются следствием геологических процессов, происходивших ранее в эпоху после стабилизации соленакопления в прикаспийской провинции. Полости, заполненные радиоактивным рассолом, представляют значительный интерес для получения данных по миграции радионуклидов по соляному массиву, которые необходимы для решения актуальной проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Проведение поисковых работ с учетом разработок специалистов РФ по созданию подземных могильников РАО создают предпосылки для выбора наиболее подходящего целостного отчуждаемого блока горной породы - массива каменной соли для размещения глубинного могильника РАО. Очень важно отметить, что при строительстве могильника шахтным способом или скважинного типа выбираемая соль может быть транспортирована и размещена в существующие полости Азгирского полигона для соблюдения экологических требований – предотвращения солевого загрязнения окружающей среды в регионе.

Литература

1. Оценка пригодности мест и сооружений в Дегелене и Азгире в РК в качестве места захоронения РАО. Отчет по договору №Д-1/96 (контракт ЕС №С/ЕТИ/1169, г. Курчатов, РК – г. Хемнитц, Германия).
2. Кривохатский и др. Каменная соль как среда для захоронения РАО. Радиохимия, №5, 1982.
3. Ахметов Е., Гильманов Д. и др. Полигон Азгир. Препринт 1-96 ИЯФ НЯЦ РК. Алматы, 1996.
4. Анализ и обобщение материалов по геологии, гидрогеологии и проведенным подземным ядерным взрывам на солянокупольном месторождении Большой Азгир. Отчет ВНИПИПромтехнология. М., 1998.
5. Анализ и поэтапная реконструкция радиационной обстановки в районе объекта ГАЛИТ. Отчет НПО «Радиевый Институт». С.-П., 1994.
6. Ахметов Е.З. и др. Распределение цезия-137 и америция-241 по гранулометрическим фракциям почвенного грунта на площадках Азгирского полигона. Вестник НЯЦ РК, №3, 2001 г., г. Курчатов, Казахстан
7. Отчет о комплексной геолого-гидрогеологической съемке М1:200000 на площади листа Л-38-VI. Астраханская комплексная геологическая экспедиция, 1984 г. Западно-Казахстанский геологический фонд, инв. №4541.
8. Комплексное эколого-экономическое исследование природных территорий и оценка состояния здоровья населения на Азгирском и Тайсойганском полигонах. Отчет Санкт-Петербургского Государственного Университета. С.-П., 1991.
9. Gilmanov D., Akhmetov E., Berezin S. et al. Bolshoi Azgir Solt Dome – Proposed Radioactive Waste Disposal Site. International Conference on Radioactive Waste Disposal (DISTEC 2004). April, 2004, Berlin – Germany.

СОЛЯНОЙ КУПОЛ ЗАПАДНЫЙ АЗГИР – КАК ВМЕЩАЮЩИЙ МАССИВ ДЛЯ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

[1)]Гильманов Д.Г., [2)]Ахметов Е.З., [1)]Березин С.А., [2)]Адымов Ж.И., [2)]Ерматов А.С., [3)]Ziegenhagen J.

[1)]Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов
[2)]ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[3)]DBE, Peine, Germany

Рассмотрены вопросы выбора наиболее подходящего целостного массива каменной соли для размещения глубинного пункта захоронения радиоактивных отходов в ареале соляного купола Западный Азгир. В дальнейшем будут исследованы геолого-гидрогеологические характеристики соляного массива и осадочных пород как в зоне деформаций геологических структур, созданных ядерными взрывами, так и вне этой зоны.

WEST AZGIR SALT DOME AS MASSIF FOR LOCATING RADIOACTIVE WASTE BURIAL

[1)]D.G. Gilmanov, [2)]E.Z. Akhmetov, [1)]S.A. Berezin, [2)]Zh.I. Adymov, [2)]A.S. Ermatov, [3)]J. Ziegenhagen

[1)]National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov
[2)]Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan
[3)]DBE, Peine, Germany

The issues on the selection of the most suitable integral massif of rock salt for locating a deep radioactive waste burial in the West Azgir Salt Dome area have been considered. In future, geological-and-hydrogeological characteristics of the salt massif and sediments will be studied as in the zone of geological structure deformation, which resulted from the nuclear explosions, as outside it.

УДК 621.039.572

РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ РАСТВОРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Зверев В.В., Супрунов В.И.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

В статье представлены результаты разработки модели индукционного нагрева и проведения расчета экспериментального режима. Математическая модель описывает некоторые физико-химические процессы при плавлении экспериментальной кассеты, содержащей цирконий и двуокись урана.

В разработанной модели присутствует учет движения материалов при плавлении и растворении, переноса энергии вместе с движением материала, изменение свойств расплава-раствора циркония с двуокисью урана вследствие изменения концентрации в растворе циркония, изменение результатов электромагнитного расчета (энерговыделения) вследствие движения материалов, точность работы модели контролируется по законам сохранения массы и энергии.

Расчет эксперимента показал хорошее соответствие температуры, измеренной термопарами при проведении эксперимента, с температурой в точках расчетной схемы, совпадающих по расположению с соответствующими термопарами.

Поскольку результаты, полученные с помощью модели, близки к показаниям термопар при проведении эксперимента, разработанная модель может быть использована для расчета температурного поля и расположения материалов экспериментальной кассеты при заданном режиме подачи мощности к установке.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиями запроектных аварий с частичным или полным расплавлением активной зоны реактора занимаются ученые различных стран.

На стендах Института Атомной Энергии проводятся внереакторные эксперименты по исследованию процессов, сопровождающих тяжелую аварию легководного энергетического ядерного реактора с плавлением его активной зоны и взаимодействием расплавленной ураносодержащей композиции материалов активной зоны реактора (кориума) с теплоносителем и конструкционными материалами реактора. При проведении внереакторных экспериментов кориум получают с использованием индукционных электроплавильных печей (ЭПП).

Целью индукционного нагрева является получение расплава материалов активной зоны легководного энергетического реактора для последующего моделирования FCI, MCCI или LHI.

Температура кориума в тигле ЭПП перед его сливом порядка 3000 К, что приводит к отказу термопар (приблизительно при 2500 К).

При нагреве двуокиси урана и циркония до ≈2100 К происходит физико-химический процесс растворения двуокиси урана цирконием [1-5], что позволяет получить жидкий кориум при температуре ниже температуры плавления двуокиси урана.

В связи с отказом термопар, важным является расчетное определение температуры расплава перед его сливом из ЭПП, базируясь, в том числе, и на измеренных при проведении предшествующих экспериментов параметрах. Расчетное определение температуры кориума перед его сливом и прогнозирование параметров, характеризующих работу ЭПП на режимах планируемых экспериментов, можно проводить с использованием расчетной модели ЭПП.

Расчетная модель ЭПП состоит из двух взаимосвязанных блоков:

- Электромагнитного блока, в котором с учетом полученной из теплового расчета температуре элементов конструкции ЭПП рассчитывается энерговыделение;
- Теплового блока, где по рассчитанному полю энерговыделения определяется температура материалов элементов конструкции ЭПП, аналогичная описанной в [6]. В тепловом же блоке проводится расчет параметров физико-химической реакции.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Для определения электромагнитных параметров ЭПП разработана двухмерная осесимметричная расчетная модель установки (расчетная схема модели установки представлена - рисунок 1), индуктор которой сопряжен с внешним колебательным контуром.

В пространственной расчетной модели описаны следующие элементы конструкции:

- экспериментальная кассета, в состав которой входят таблетки диоксида урана и циркониевые оболочки твэлов;
- графитовый тигель;
- верхняя, нижняя и боковая теплоизоляция тигля;
- медный 16 витковый водоохлаждаемый индуктор;
- стальной корпус индукционной печи;
- медные водоохлаждаемые верхняя и нижняя крышки;
- прилегающий к корпусу индукционной печи объем воздуха;

- конечные элементы, моделирующие поведение электромагнитного поля на бесконечности.

Внешний контур модели состоит из независимого источника напряжения, активных сопротивлений (сопротивления проводов), конденсаторной батареи и катушки индуктивности с точкой, принадлежащей электромагнитным элементам индуктора пространственной модели.

При разработке электромагнитной модели использованы элементы, описывающие электрический контур, и конечные элементы трех типов.

Электрический контур выполнен из элементов, моделирующих отдельные объекты электрической схемы (резистор, конденсатор и т.п.) в точечном приближении, и элементов для сопряжения точечных элементов с моделью из конечных элементов (Рисунок 2, 3). Элементы контура имеют до 6 узлов для определения компонентов контура и до трех степеней свободы на узел.

Для моделирования областей расчетной схемы применены элементы, которые могут быть четырехугольными и треугольными (Рисунок 4).

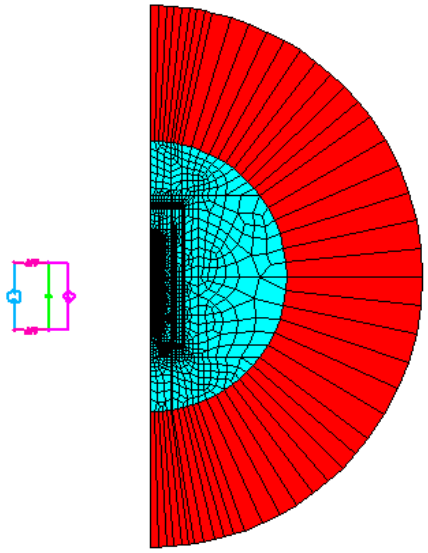


Рисунок 1. Расчетная схема ЭПП для проведения электромагнитного расчета

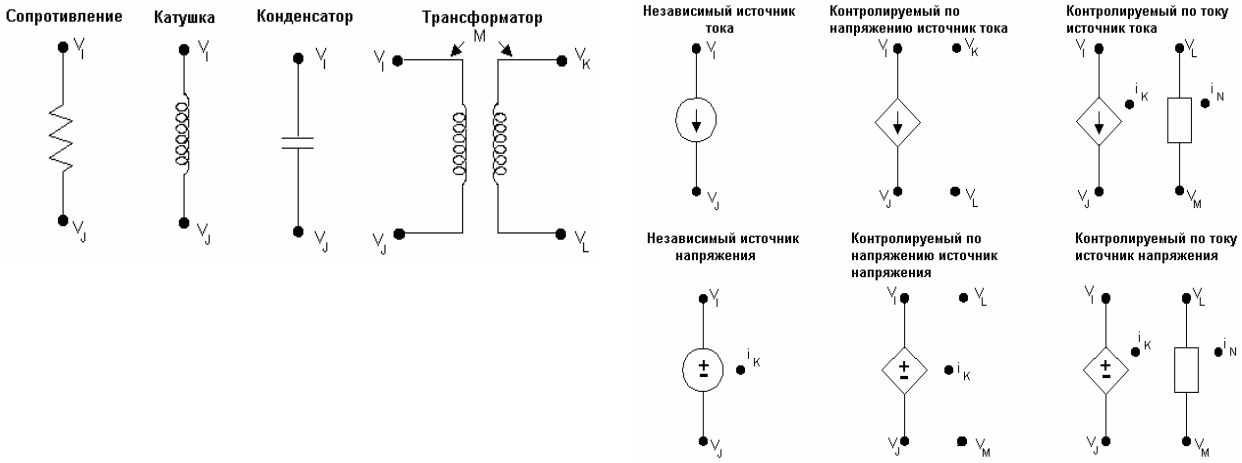


Рисунок 2. Элементы, моделирующие пассивные элементы внешнего контура (слева) и источники электрического тока и напряжения (справа)

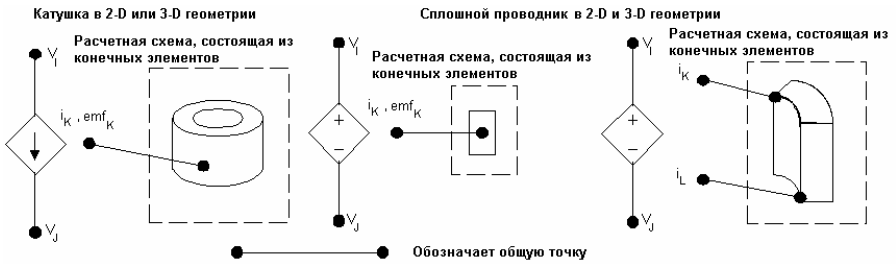


Рисунок 3. Задание сопряженного электромагнитного взаимодействия пространственной модели с внешним электрическим контуром

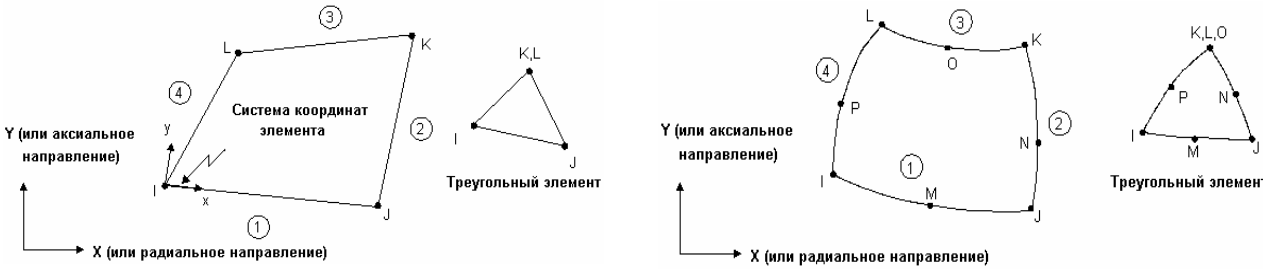


Рисунок 4. Форма элементов, примененных при моделировании областей, не относящихся к индуктору (слева) и форма элементов для моделирования индуктора ЭПП

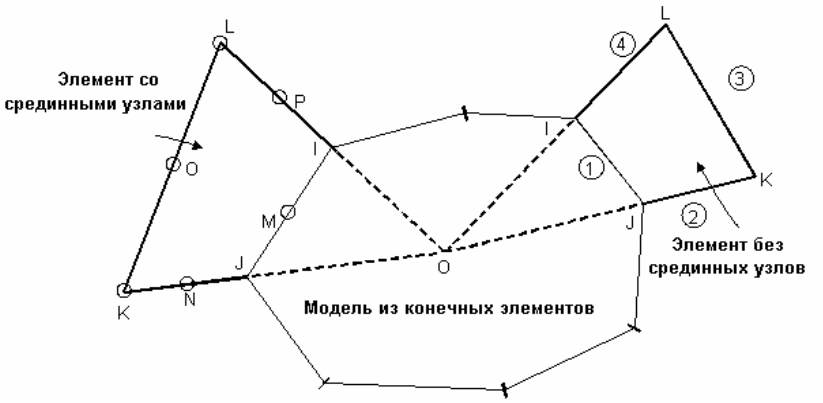


Рисунок 5. Элементы, использованные для моделирования внешних границ двумерной осесимметричной модели

Для определения электромагнитного поля на бесконечности применены элементы, предназначенные для моделирования открытых границ двумерной модели (Рисунок 5).

Электромагнитные расчеты проводятся при условиях, что на независимый источник напряжения приложено напряжение частотой 2400 Гц, на оси симметрии задано условие параллельности магнитного потока, на внешней границе модели, указано, что эти элементы граничат с бесконечностью. А элементы, относящиеся к индуктору, объединены по степеням свободы электрический ток и ЭДС и связаны с элементом, описывающим катушку индуктивности. Учтена зависимость удельного электрического сопротивления материалов, входящих в конструкцию ЭПП, от температуры.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

В тепловой расчетной модели описаны следующие элементы конструкции ЭПП:

- экспериментальная кассета, в заданной композицией материалов;
- тигель ЭПП;
- верхняя, нижняя и боковая теплоизоляция тигля;
- индуктор ЭПП;
- стальной корпус индукционной печи;
- медные водоохлаждаемые верхняя и нижняя крышки.

Для проведения теплофизического расчета установки используется двухмерная осесимметричная модель. Модель набирается из элементов, имеющих восемь узлов с одной степенью свободы – температурой. Элементы данного типа могут иметь четырехугольную и треугольную форму подобную форме элементов, представленных выше (Рисунок 4, справа).

Расчетная схема тепловой модели является частью расчетной схемы электромагнитной модели, координаты узлов, номера элементов и их геометрические размеры расчетных схем электромагнитной и тепловой моделей совпадают, поэтому значения энерговыделения в материалах элементов конструкции ЭПП, рассчитанные с использованием электромагнитной модели, передаются в те же элементы схемы тепловой модели.

Экспериментальная кассета в модели представлена в виде набора соосных цилиндрических слоев, описывающих наружную циркониевую стенку, слои таблеток из диоксида урана и внутреннюю трубу, на которой крепятся таблетки.

Работа тепловой модели базируется на условии, что полезная мощность, подводимая к установке, расходуется на нагрев материалов печи и подогрев воды в трактах охлаждения крышки, днища и индуктора ЭПП.

Для моделирования изменения геометрии кассеты при плавлении или растворении диоксида урана в цирконии разработана математическая модель, в которой описаны происходящие при этом в кассете процессы.

При температуре 2100 К цирконий, из которого сделан корпус кассеты, плавится. При плавлении цирконий образует в донной области тигля бассейн, с большей, чем у газа, теплопроводностью. По мере

дальнейшего прогрева тигля цирконий на днище тигля повторно плавится и вступает в химическую реакцию растворения двуокиси урана.

Этот процесс происходит с поглощением тепла, что влияет на температурное распределение в кассете. Энергия, необходимая для растворения UO_2 в композиции цирконий- уран- кислород, является функцией от атомарного содержания входящих в неё составляющих. Выражение, применяемое для оценки энергии, взято из [7] приведено ниже (1), где Q - энергия, необходимая для растворения единицы массы UO_2 (Дж/кг); U- доля атомов урана в растворе; Z - доля атомов циркония в растворе.

Значения энергии, необходимой для растворения единицы массы двуокиси урана приведены на диаграмме ниже (Рисунок 6).

При высоких значениях температуры количество двуокиси урана, которое может быть растворено в цирконии определяется по формуле (2), взятой из литературного источника [7].

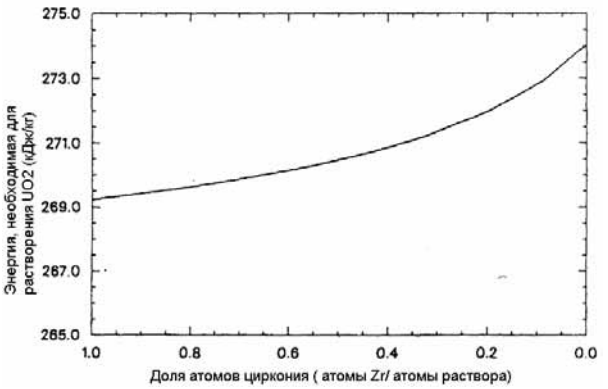


Рисунок 6. Зависимость энергии, необходимой для растворения двуокиси урана, от концентрации циркония в растворе

$$Q = \frac{1.5\cdot Z + 1.5\cdot U - 0.5}{1.5\cdot Z + 2.5\cdot U - 0.5}\cdot 2.69\cdot 10^5 + \left(\frac{U}{1.5\cdot Z + 2.5\cdot U - 0.5}\right)\cdot 2.74\cdot 10^5, \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{åñëè } \dot{O} \le 2103\hat{E} \\ 1.9143754 + T\cdot\left(1.2127195\cdot 10^{-3} + 3.1857023\cdot 10^{-7}\cdot T\right) & \text{åñëè } \dot{O} < 2673\hat{E} \\ 2.0859332 + \dot{O}\cdot\left(-1.1311691\cdot 10^{-3} + 2.5104264\cdot 10^{-7}\cdot \dot{O}\right) & \text{åñëè } 3119K \ge \dot{O} > 2673K \\ 1 & \text{åñëè } \dot{O} > 3119K \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку процесс растворения двуокиси урана цирконием может быть описан как поверхностная реакция, параметром, характеризующим скорость протекания данной реакции, может являться смещение фронта раствора, определяемое для данного процесса формулой (3) из литературного источника [7]:

$$\Delta\xi(T,t) = \left[K'(T)\cdot t\right]^{1/2}, \quad (3)$$

где $\Delta\xi$ – смещение фронта расплава (см); K'(T) – константа для расчета смещения фронта раствора ($см^2/с$).

Для рассматриваемой реакции константа для расчета смещения фронта раствора определяется по формуле (4) из источника [7]:

$$K'(T) = 3.85\cdot 10^{19}\cdot e^{-1067000/R\cdot T} \quad (4)$$

При построении математической модели использован подход расчёта с помощью аналитических соотношений. Для построения математической модели были приняты следующие предположения:

- определяется средняя температура газа и при расчётах используется только средняя температура газа;
- при температуре циркония выше температуры плавления рассчитывается его объём, и уровень расплавленного циркония на дне тигля;
- вместо расплавленных элементов циркония ставятся элементы со свойствами газа;
- в слое расплавленного циркония происходит растворение двуокиси урана;
- при растворении ряда элементов двуокиси урана моделируется оседание кассеты;
- температура элементов двуокиси урана движется вместе с материалом;
- при растворении проверяется, сколько осталось двуокиси урана в ряде элементов, и по мере «продвижения» процесса растворения элементы двуокиси урана заменяются элементами раствора;
- циркониевый лом оседает послойно при расплавлении;
- температура элементов циркониевого лома движется вместе с материалом;
- при превышении температуры плавления в циркониевом ломе его масса добавляется к массе раствора;
- рассчитывается снижение уровня расплава с учётом заполнения полостей;
- в зависимости от содержания в растворе циркония и двуокиси урана рассчитываются свойства раствора;

- при разработке математической модели считается, что кассета в тигле не теряет устойчивости в течение эксперимента;
- на вертикальной линии, проходящей через внешний радиус расположения таблеток двуокиси урана (Рисунок 7), происходит химическая реакция растворения двуокиси урана цирконием.

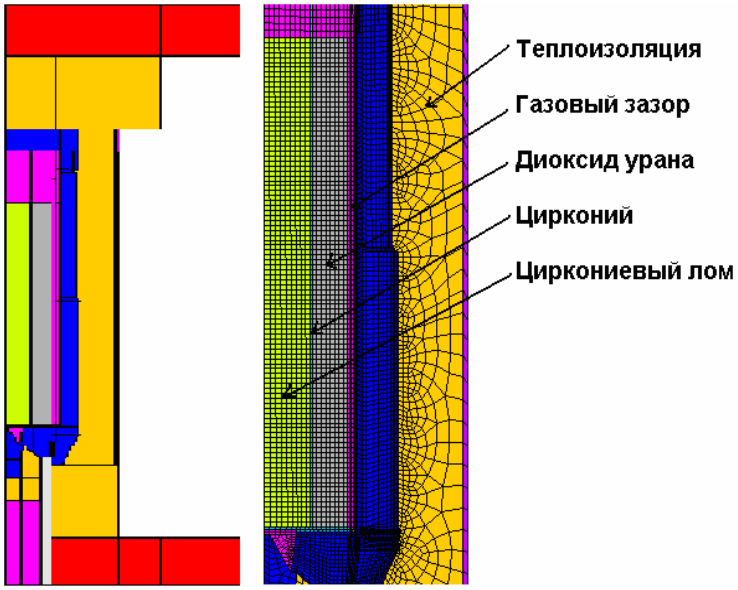


Рисунок 7. Расчётная схема теплофизической части

В модель введены три дополнительных материала, теплофизические и электрические свойства которых зависят от атомарного содержания циркония и молекулярного содержания двуокиси урана в растворе:

- раствор двуокиси урана и циркония;
- раствор между нерастворённых таблеток двуокиси урана;
- раствор в циркониевого лома.

При проведении тепловых расчетов ЭПП учитываются скрытая теплота плавления материалов, изменение теплофизических свойств материалов от температуры, смещение вниз массы расплавленного циркония, химический процесс растворения двуокиси урана в цирконии, лучистый теплообмен на боковой поверхности тигля и корпуса кассеты, корпуса кассеты и таблеток двуокиси урана, изменение свойств дополнительных материалов.

Определение эффективной теплопроводности графитового войлока

Одной из сложностей при проведении теплофизического расчёта является неопределенность свойств композитных материалов, которые могут изменяться в достаточно широком диапазоне. Примером такого материала в ЭПП является графитовый войлок, который в зависимости от плотности его укладки, может иметь различный коэффициент теплопроводности.

В сопряженных электромагнитных и теплофизических расчетах возникла задача определить свойства этих материалов так, чтобы они описывали поведение реальных материальных компонент в ЭПП.

Из [9] известно, что теплопроводность для цилиндрического слоя можно рассчитать по формуле (5).

$$\lambda = \frac{d_2 \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2 \cdot \Delta T} \cdot q, \qquad (5)$$

где d_1 – внешний диаметр; d_2 – внутренний диаметр; ΔT – перепад температуры между этими точками; q – заданный тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности.

Следовательно, задача определения эффективного коэффициента теплопроводности решается, если известны перепад температуры между поверхностями внутреннего и внешнего цилиндра и тепловой поток. Для определения коэффициента теплопроводности графитового войлока, используемого в электроплавильной печи (ЭПП) в качестве теплоизолятора, использованы экспериментальные данные по изменению температуры тигля, температуры внешней стенки теплоизоляции ЭПП и утечкам тепла из горячего тигля.

Температуру внешней поверхности теплоизоляции тигля измеряют термопары, их показания не превышают верхний предел измерения температуры с помощью термопар, и они остаются в рабочем состоянии в течение всего эксперимента. Поскольку тигель в эксперименте нагревается до 2700 - 3000 °С, термопары на его поверхности являются жерт-

венными и измеряют температуру только в начальной фазе эксперимента.

Для восстановления температуры тигля ЭПП с помощью модели, описанной в работе [6], проведён расчёт экспериментов MT-1, IT-2, LHI-4, LHI-5, LHI-6.

Экспериментальные данные и рассчитанная температура тигля были обработаны с использованием соотношения (5) для получения зависимости теплопроводности графитовой ваты от времени в течение эксперимента, при условии, что: d_1 – внешний диаметр тигля ЭПП; d_2 – внешний диаметр теплоизоляции ЭПП; ΔT – перепад температуры между тиглем и внешней стенкой теплоизоляции; q – тепловой поток в тракт охлаждения индуктора.

Затем значения теплопроводности графитовой ваты для экспериментов MT-1, IT-2, LHI-4, LHI-5, LHI-6 были построены в виде функции от среднего значения температуры между тиглем и внешней стенкой теплоизоляции (Рисунок 8).

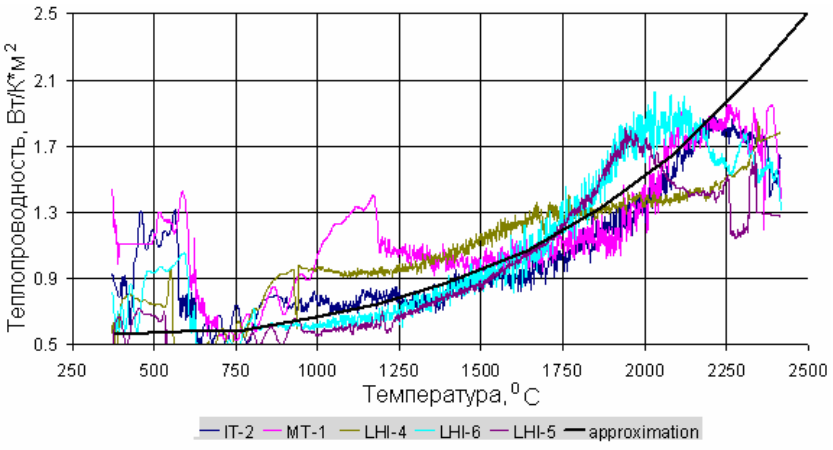


Рисунок 8. Зависимость теплопроводности графитовой ваты от среднего значения температуры на поверхности тигля и поверхности теплоизоляции

В диапазоне температуры от 600 °C до 2000 °C среднеквадратичная погрешность определения теплопроводности ваты находится в пределах 15-25 %. Для оценки теплопроводности графитовой ваты при более высоких значениях температуры проведена экстраполяция данных. Можно предположить, что теплопроводность графитовой ваты в области высоких значений температуры резко возрастает, поскольку увеличивается вклад лучистой составляющей.

Определение эффективной теплопроводности слоёв таблеток топливной кассеты

Другой сложностью является наличие в установке материалов, форма которых не является телом вращения вокруг оси симметрии, как, например, слои таблеток двуокиси урана, размещенные вокруг центральной трубы экспериментальной кассеты.

В процессе расчёта индукционного нагрева тигля необходимо учитывать тот факт, что вокруг внутренней трубы в экспериментальной кассете расположены слои таблеток из диоксида урана. Это трехмерная задача, так как таблетки, расположенные вокруг трубы, в модели не являются телом вращения.

Таблетки двуокиси урана в двумерной осесимметричной модели заданы в виде сплошного однородного цилиндрического кольца. Плотность и теплоёмкость этого цилиндрического кольца можно определить с учетом эффективной пористости слоя таблеток, однако, определение эффективной теплопроводности кольца вызывает определённые трудности.

Механизм теплообмена в слоях таблеток экспериментальной кассеты должен включать в себя составляющие, описывающие передачу тепла:

- теплопроводностью через материал таблеток;
- путём конвективного теплообмена между стенками таблеток и газом, заполняющим тигель установки;
- путём теплообмена излучением между внешней циркониевой оболочкой кассеты, поверхностью таблеток и внутренней трубой.

Эффективная теплопроводность этого цилиндрического кольца была определена путём ряда расчётов с помощью модели, описывающей сегмент трехмерной геометрии кассеты, выбранный из соображений симметрии экспериментальной кассеты (Рисунок 9) и включающий в себя три ряда таблеток (в каждом ряду по половине таблетки), циркониевую трубу, на которой крепятся таблетки и внешнюю циркониевую оболочку кассеты. Зазоры между таблетками заполнены аргоном.

На иллюстрации (Рисунок 9) красным цветом изображены три ряда по половине таблеток, зазоры, заполненные аргоном – розовым цветом, элементы конструкции кассеты, выполненные из циркония – синим цветом.

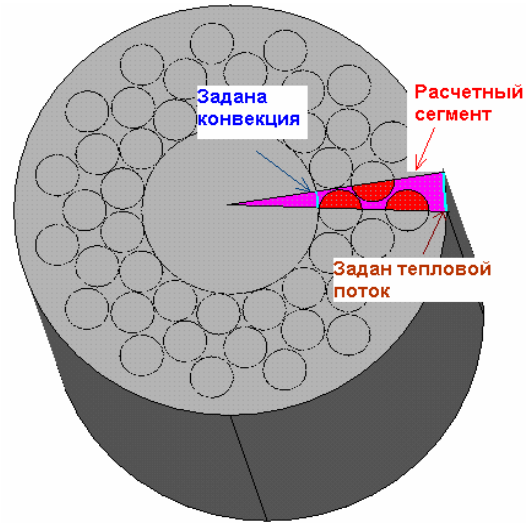


Рисунок 9. Модель экспериментальной кассеты для определения эффективной теплопроводности слоёв таблеток

В качестве граничных условий расчёта на внешней циркониевой оболочке кассеты задан тепловой поток (Рисунок 9) и условие конвективного теплообмена с окружающей средой на внутренней поверхности циркониевой трубы (Рисунок 9). В серии расчётов изменялась температура окружающей среды при конвективном теплообмене на внутренней поверхности циркониевой трубы.

При проведении расчёта использованы свойства материалов из литературных источников [7,8,10,11].

Результаты расчёта обработаны с использованием формулы для передачи теплоты через цилиндрическую стенку (5), где d_1 – диаметр циркониевой оболочки кассеты; d_2 – диаметр циркониевой трубы; ΔT – перепад температуры между этими точками; q – заданный тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности.

Зависимость эффективной теплопроводности слоев таблеток экспериментальной кассеты от температуры, полученная в итоге обработки результатов расчётов, показана ниже (Рисунок 10).

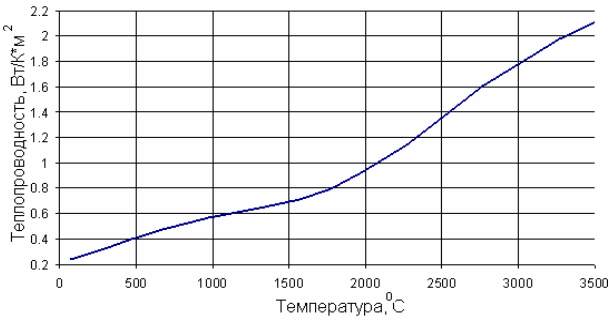


Рисунок 10. Зависимость эффективной теплопроводности слоев таблеток экспериментальной кассеты от температуры

Эффективная теплопроводность с ростом температуры возрастает вследствие увеличивающегося вклада теплообмена излучением в зазорах, заполненных аргоном.

Определение начальных и граничных условий

Начальное условие, приложенное к теплофизической модели с учётом физико-химических процессов, это температурное распределение, полученное с помощью методики, описанной в работе [6], в момент начала плавления циркониевого корпуса кассеты.

На каждом шаге к модели подводится энерговыделение, рассчитанное в электромагнитной части задачи. При процессе растворения двуокиси урана в цирконии рассчитываются и прикладываются отрицательные тепловые потоки в месте прохождения реакции растворения. Граничными условиями являются тепловые потоки в тракты охлаждения установки. Основная часть тепловых потоков в установке уходит в тракт индуктора.

Соотношение, связывающее утечки тепла в тракт охлаждения индуктора ЭПП и температуру на внешней поверхности теплоизоляции установки, получено путем аппроксимации экспериментальной зависимости утечек от температуры внешней поверхности теплоизоляции, измеренной в разные моменты времени в эксперименте (Рисунок 11).

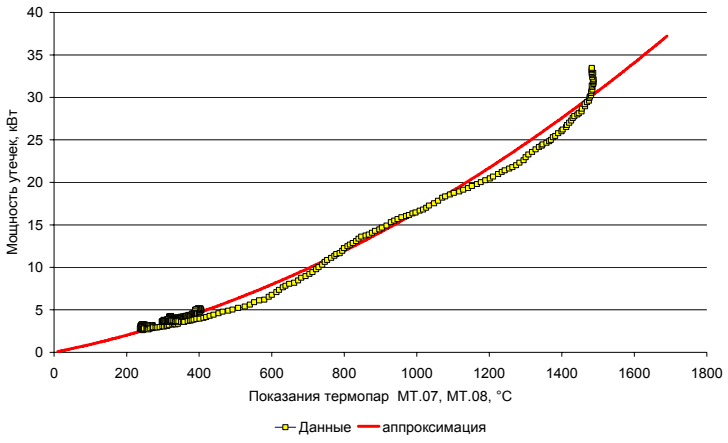


Рисунок 11. Экспериментальная зависимость мощности утечек в тракт охлаждения индуктора от температуры на внешней поверхности теплоизоляции и полученная аппроксимирующая кривая

Полученная аналитическая формула для расчёта зависимости утечек в тракт охлаждения индуктора от температуры внешней поверхности теплоизоляции для ЭПП установки «ЛАВА» имеет вид, представленный ниже (6).

$$Q=0.0085\cdot T+0.000008\cdot T^2,\ \hat{e}\hat{A}\grave{o} \qquad (6)$$

Расчёт эксперимента с учётом физико-химических процессов, происходящих при плавлении материалов активной зоны, предполагает множество расчётов, в каждом из которых существуют свои начальные данные.

Свойства дополнительных материалов (раствор и материалы, вводимые из-за применения двумерной осесимметричной модели, а не полноценной трёхмерной модели, такие как – смесь циркониевого лома с раствором, раствор в нерастворённых таблетках двуокиси урана) вычисляются на каждом шаге.

РАСЧЁТ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа математической модели была проверена при проведении расчета эксперимента на установке «ЛАВА» от 2 октября 2003 года. [12]. Основным из особенностей этого эксперимента является то, что слив произошёл, несмотря на то, что температура плавления диоксида урана не была достигнута. Вследствие чего можно предположить, что в данном случае произошло растворение двуокиси урана цирконием.

При проведении расчета параметров установки на эксперименте диаграмма изменения напряжения, подводимого к индуктору ЭПП, задавалась в соответствии с данными, измеренными на пуске. Утечки тепла в тракты охлаждения ЭПП рассчитывались с использованием соотношения (6).

Сравнение экспериментальных данных и тепловых параметров результатов расчёта

Расчет режимов этого эксперимента с использованием разработанной математической модели дал следующие результаты:

- изменение температуры в расчетных точках, совпадающих с местами расположения термопар М.Т.01 и М.Т.03 в тигле установки (Рисунок 12, 13) хорошо согласуются с данными, полученными при проведении экспериментов (до момента выхода термопар из строя). Показания термовелла ИК1 (Рисунок 14) также соответствуют расчетным значениям;
- момент времени, начиная с которого происходит разрушение кассеты (определяемый по отказу термопары) хорошо совпадает с рассчитанным временем изменения геометрии кассеты при растворении диоксида урана в цирконии;
- на момент слива расплава подавляющая часть материалов кассеты находится в растворенном или расплавленном состоянии.

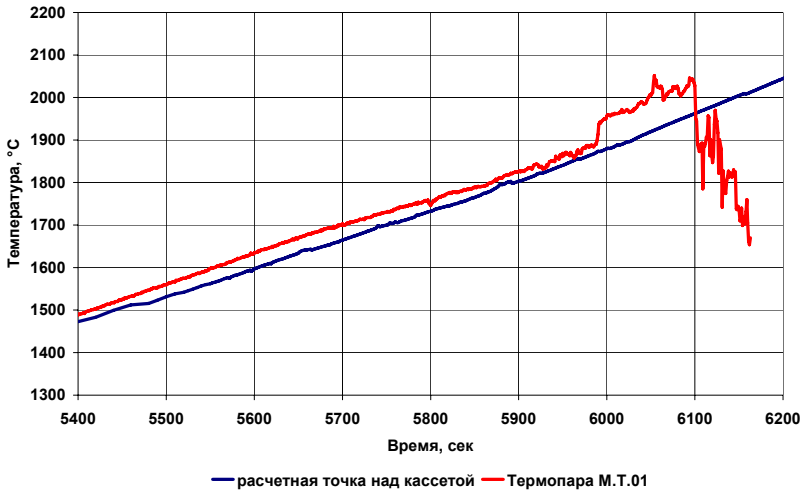


Рисунок 12. Сравнение расчётных данных и показаний термопары М.Т.01, измеряющей температуру газа над кассетой

Сравнивая показания термопары М.Т.03, расположенной в таблетках кассеты на высоте ~300 мм от крышки тигля, и результаты расчета (Рисунок 13) можно сказать, что на начальном этапе до плавления кассеты расчётные и экспериментальные данные совпадают. Однако, в модели используется консервативная оценка для времени прохождения процесса растворения. Возможно, что таблетки не сохраняют исходную геометрию, после того как нижние слои таблеток двуокиси растворены (момент времени 5600 секунд), а рассыпаются. При таком развитии событий поверхность контакта между двуокисью урана и цирконием получается много больше, процесс происходит быстрее и термопара оказывается под уровнем раствора с нерастворёнными таблетками двуокиси урана раньше, чем получено в расчетах (момент времени 5860 секунд).

Кинограммы изменения температурного поля и движения материалов в кассете представлены на рисунке 15.

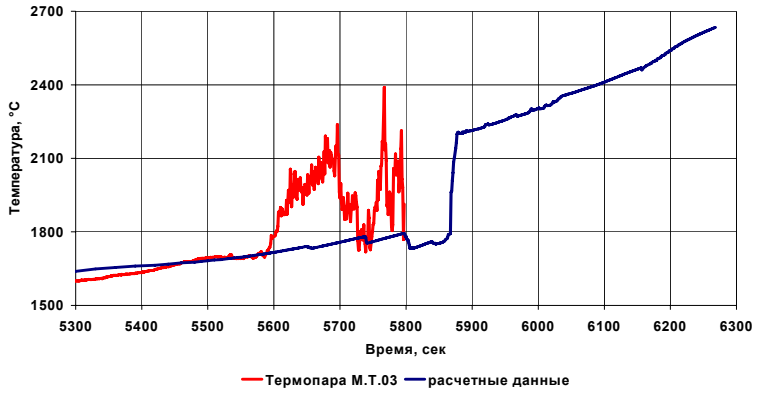


Рисунок 13. Сравнение экспериментальных (М.Т. 03) и расчётных данных (точка 10030) по изменению температуры в таблетках двуокиси урана на половине высоты

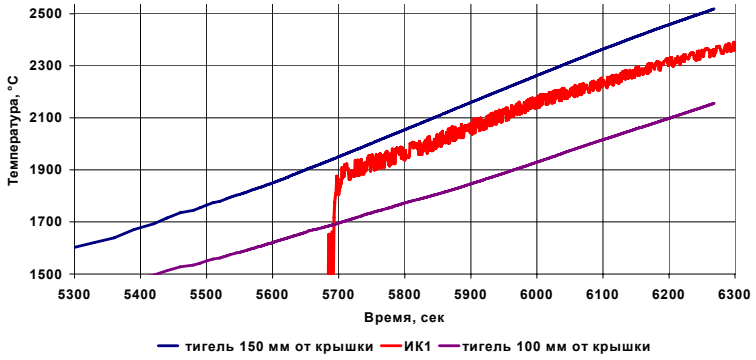


Рисунок 14. Сравнение температуры, измеренной ИК1 в эксперименте, и температуры внутренней поверхности тигля на расстоянии 100 мм (точка 11496) и 150 мм (точка 8736) от крышки

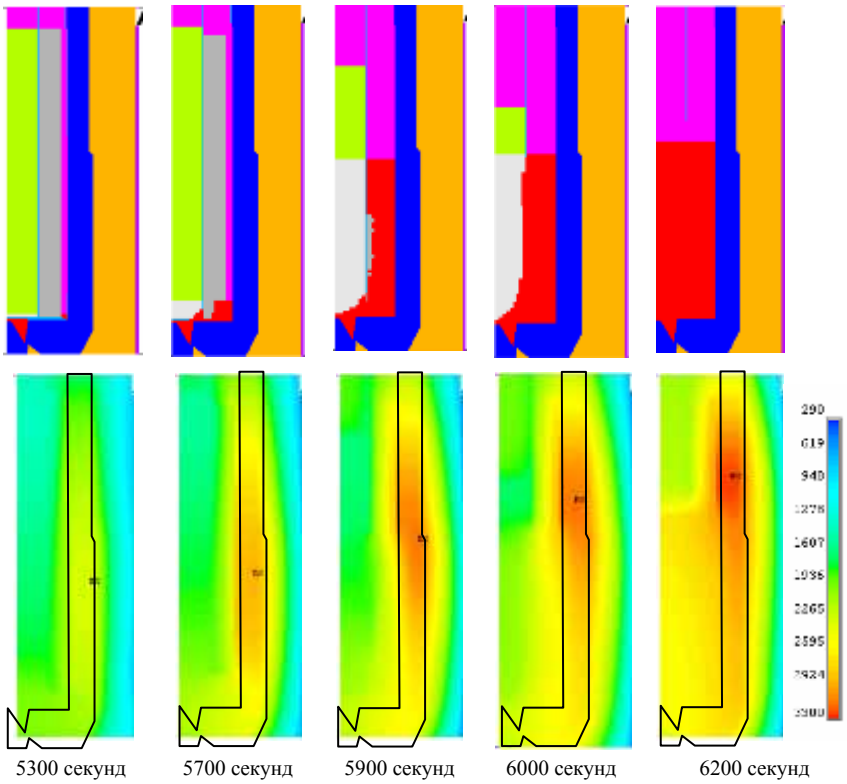


Рисунок 15. Кинограмма изменения температуры и движения материалов в кассете

Хорошее соответствие экспериментальных и расчётных данных позволяет предположить, что разработанная модель корректно описывает процессы, происходящие в тигле ЭПП.

Интегральные характеристики процессов плавления циркония и растворения двуокиси урана в цирконии

В расчетах принималось, что в тигель первоначально было заложено 41 кг двуокиси урана, 14 кг - циркониевого лома и 4 кг циркония, из которого сделан корпус экспериментальной кассеты. По результатам проведенного расчёта построена диаграмма (Рисунок 16), на которой показано изменение массы раствора и нерастворённых материалов в тигле. Можно отметить, что цирконий начал плавиться намного раньше, чем двуокись урана начала растворяться в нем, это объясняется низкой температурой на днище тигля в начале процесса растворения. Ступенчатое изменение массы нерастворенной двуокиси урана на диаграмме вызвано разбиением расчётной модели на конечные элементы и работой алгоритма модели. Из графика видно, что активный рост количества растворенного диоксида произошел в период 5800-5900 секунд.

Скорость растворения материальных компонент, показанная на диаграмме (Рисунок 17), резко возрастает в момент, когда происходит оседание новых слоёв таблеток, поскольку они обладают первоначальным радиусом и большей поверхностью, чем те таблетки, которые уже находятся в растворе. По мере растворения этих таблеток скорость реакции снижается, так как происходит уменьшение диаметра таблеток и, соответственно, площади взаимодействия между цирконием и двуокисью урана.

Из диаграммы (Рисунок 17) видно, что скорость процесса растворения до момента 5650 секунд не превышает 0.005 кг/сек и достигает максимальных значений 0.56 кг/сек в момент активного подъёма уровня раствора.

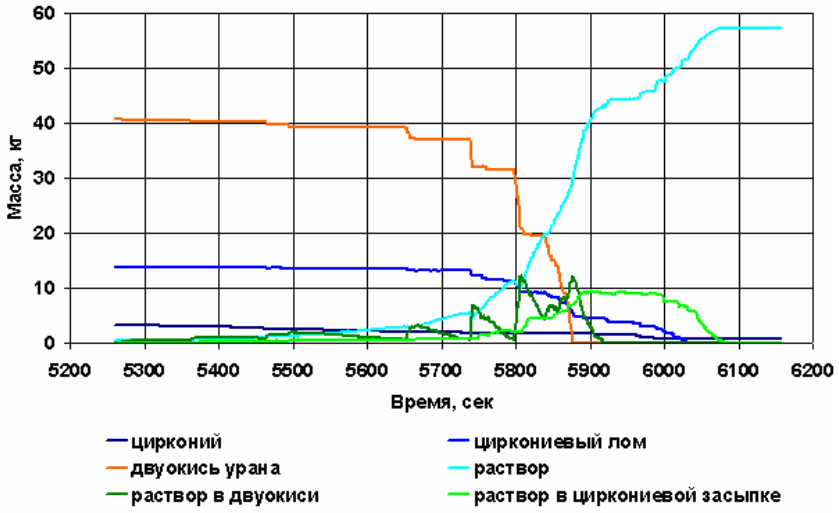


Рисунок 16. Изменение массы каждого из материалов кассеты в течение расчёта индукционного нагрева с учётом физико-химических процессов, происходящих при плавлении материалов в тигле ЭПП

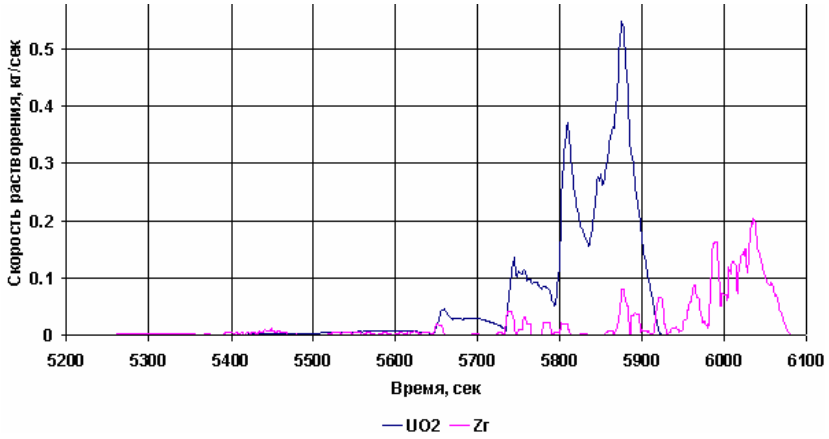


Рисунок 17. Скорость растворения материальных компонент

Заключение

В разработанной модели присутствует учет движения материалов при плавлении и растворении, переноса энергии вместе с движением материала, изменение свойств расплава-раствора циркония с двуокисью урана вследствие изменения концентрации в растворе циркония, изменение результатов электромагнитного расчета (энерговыделения) вследствие движения материалов, корректность работы модели контролируется по законам сохранения массы и энергии.

Расчет эксперимента, проведенный с использованием разработанной модели, показал хорошее соответствие температуры, измеренной термопарами при проведении эксперимента, с температурой в точках расчетной схемы, совпадающих по расположению с соответствующими термопарами.

Разработанная математическая модель описывает некоторые физико-химические процессы при плавлении экспериментальной кассеты, содержащей цирконий и двуокись урана.

При разработке данной математической модели использован встроенный язык программирования APDL, язык Tcl/Tk для написания интерфейсов. Вызов макросов непосредственно из ANSYS обеспечен использованием строки аббревиатур.

Литература

1. P. Hofmann and D. K. Kerwin-Peck, "UO_2/ Zircaloy Chemical Interactions Under Isothermal Conditions and Transient Temperature Conditions," J. Nucl. Mater., 124, 80(1984).
2. P. Hofmann and D. K. Kerwin-Peck, "Chemical Interactions of Solid and Liquid Zircaloy-4 with UO2 Under Transient Non-oxidizing Conditions," presented at Int. Mtg. Light Water Reactor Severe Accident Evaluation, Cambridge, Massachusetts, August 28-September 1, 1983
3. P. Nikolopoulos, P. Hofmann, and D. K. Kerwin-Peck, "Determination of the Interfacial Energy and Work of Adhesion in the U02/Zircaloy-4 Diffusion Couple," J. Nucl. Mater., 124, 106 (1984).
4. P. Hofmann, H. Uetsuka, A. N. Wilhelm, and E. A. Garcia, "Dissolution of Solid UO2 by Molten Zircaloy and Its Modeling," presented at Int. Symp. Severe Accidents in Nuclear Power Plants, Sorrento, Italy, March 21-25, 1988.
5. K. T. Kim and D. R. Olander, "Dissolution of UO2 by Molten Zircaloy," J. Nucl. Mater., 154, 85 (1988)
6. Зверев В.В., Супрунов В.И. «Сопряжённый электромагнитный и тепловой расчёт установок индукционного нагрева.» Отчет РГП «НЯЦ РК», Инв.№25 от 17.04.03
7. SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual. Volume IV: MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis, INEL, Idaho Falls, Idaho, 1993
8. Чиркин В.С. Теплофизические свойства веществ. – М.: Энергоатомиздат,1986.
9. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача М.: Энергоатомиздат, 1981
10. Справочник. ред. Самсонова Г.В. Физико-химические свойства окислов. – М.: Металлургия, 1978.
11. Котельников Р.Б. и др. Высокотемпературное ядерное топливо. – М.: Атомиздат, 1969.
12. ИАЭ, Протокол пуска IT 3-3 от 2.10.2003.

ЭКСПЕРИМЕНТТІК РЕЖІМІНІҢ ЕСЕПТЕУ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІҢ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ЗАТТАРДЫҢ БАЛҚУ ЖӘНЕ ЕРУ КЕЗІНДЕГІ ҚОЗҒАЛЫСЫН ҚАРАСТЫРУ

Зверев В.В., Супрунов В.И.

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов

Осы бапта индукциялық қыздыру моделінің әзірлемелерінің қорытындылары және эксперименттік режімінің есептеу жүргізілгені берілген. Математикалық модель құрамында цирконий және уранның қос тотығы бар, эксперименттік кассетаның балқу кезінде кейбір физика-химиялық процесстерін бейнелейді.

Әзірленген моделде заттардын балқу және еру кезінде қозғалысының есепке алуы, заттың қозғалысымен бірге энергияның тасымалдауы, цирконий ерітіндісінің концентрациясының өзгеруі салдарынан цирконийдің балқытылған-ерітіндісінің уранның кос тотығының қассеттерінің өзгеруі, заттардың қозғалыс салдырынаң электромагниттік есептеу (энергияның шығуы) нәтижелерінің өзгеруі қатысады және моделдің дәлдік жұмысы масса және энергия сақталу заңдары бойынша бақылауланады.

Эксперименттің есептеуі, эксперимент жүргізген кезде термопарамен өлшеуімен, есептеу жүйесінің нүктелеріндегі орналасуы бойынша сай келетін сәйкес термопараларының температурасымен, температураның жақсы сәйкестігін көрсетті.

Модельдің көмегімен алынған нәтижелер эксперимент жургізген кезде термопаралар көрсеткіштеріне сай болғандықтан әзірленген модель температуралық өрісті есептеуге және қондырғыға режім бойынша куат берілгені кезде эксперименттік кассета заттарының орналастыруы үшін пайдалануы мүмкін.

EXPERIMENT CALCULATION USING MATHEMATICAL MODEL DESCRIBING MATERIAL SOLUTION

V.V. Zverev, V.I. Suprunov

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov

In the article results of a model development for induction heating process and a calculation of experimental regime are introduced. The mathematical model describes some physics-chemical processes during melting of the experimental cassette comprising zirconium and uranium dioxide.

In the developed model material motion during melting and solution, heat transfer with substances, change of material properties of dioxide uranium – zirconium solution caused by change of dioxide uranium concentration, change of electromagnetic results (Joule heat distribution) caused by material motion effects are taken into the account. Accuracy is controlled by mass and energy conservation laws.

The calculation shows good accordance between temperature, measured by thermocouples during experiment, and temperature at nodes of developed model, located at points where thermocouples were located during experiment.

Since results obtained by the model are close to experimental results developed model can be used for calculation of temperature distribution and location of experimental cassette materials at specified power supply regime of the installation.

УДК 517.2

ЗАДАЧА ШТУРМА – ЛИУВИЛЛЯ

Едгебаев А.М.

Евразийский Национальный Университет им. Л.Н. Гумилева

Задача Штурма-Лиувилля о нахождении отличных от нуля решений дифференциального уравнения

Штурма — Лиувилля задача, задача о нахождении отличных от нуля решений дифференциального уравнения

$$-[p(x)y']' + q(x)y = \lambda y, \qquad (1)$$

удовлетворяющих граничным условиям вида

$$A_1y(a) + B_1y'(a) = 0,\ A_2y(b) + B_2y'(b) = 0$$

(т. н. собственных функций), а также о нахождении значений параметра λ (собственных значений), при которых существуют такие решения. При некоторых условиях на коэффициенты $p(x)$, $q(x)$ Ш.—Л. з. можно свести к рассмотрению аналогичной задачи для уравнения вида

$$-y'' + q(x)y = \lambda y. \qquad (2)$$

Была впервые (1837—41) исследована Ж. Лиувиллем и Ж. Ш. Ф. Штурмом.

Решение некоторых видов уравнений математической физики методом Фурье приводит к Ш.— Л. з. Например, задача о колебаниях однородной струны, закрепленной на концах, приводит к Ш.— Л. з. для уравнения $-y'' = \lambda y$ с граничными условиями $y(0) = y(\pi) = 0$. В этом случае существует бесконечная последовательность значений $1^2, 2^2, \ldots, n^2, \ldots$, которым соответствуют собственные функции $\sin nx$, образующие на отрезке $[0, \pi]$ полную ортогональную систему функций. Аналогично обстоит дело и в общем случае, возникающем, например, при изучении распространения тепла в неоднородном стержне и т.д. И здесь, если функция $q(x)$ в уравнении (2) непрерывна и действительна на отрезке $[a, b]$, а A_1, B_1, A_2, B_2 — действительные числа, существует возрастающая последовательность действительных собственных значений $\lambda_1, \ldots, \lambda_n, \ldots$, стремящаяся к бесконечности, причём каждому из λ_n соответствует определённая с точностью до постоянного множителя собственная функция $\varphi_n(x)$, имеющая n нулей на участке $a < x < b$. Функции $\varphi_n(x)$ образуют на $[a, b]$ полную ортогональную систему функций [для уравнения (1) имеет место ортогональность с весом $p(x)$]. Полнота такой системы функций была доказана В. А. Стекловым в 1896. Весьма общие теоремы о разложении функций в ряды Фурье по системе $\varphi_n(x)$ доказал Д. Гильберт (1904) с помощью теории линейных интегральных уравнений. При возрастании n собственные значения и собственные функции Ш.— Л. з. для уравнения (2) стремятся к собственным значениям и собственным функциям для уравнения $-y'' = \lambda y$ при тех же граничных условиях. Большинство встречающихся в математике ортогональных систем функций, например, многочлены Лежандра, многочлены Эрмита, являются системами собственных функций некоторых Ш.— Л. з.

Иногда Ш.— Л. з. называют краевую задачу для уравнения (1) при более общих краевых условиях:

$$\alpha_i y(a) + \beta_i y'(a) + \gamma_i y(b) + \delta_i y'(b) = 0,\ i = 1, 2,$$

где α_i, β_i, γ_i, δ_i — постоянные числа. Среди краевых условий такого вида наиболее важными являются $y(a) = y(b)$, $y'(a) = y'(b)$ (периодические условия) и $y(a) = -y(b)$, $y'(a) = -y'(b)$ (полупериодические условия).

Многие задачи математической физики (например, задача о распространении тепла в бесконечном неоднородном стержне) приводит к Ш.— Л. з. на полуоси или на всей оси. В 1-м случае рассматриваются решения уравнения (2), удовлетворяющие условию $A_1y(0) + B_1y'(0) = 0$; вместо последовательности собственных функций здесь появляется совокупность собственных функций $\varphi(x, \lambda)$, зависящих от непрерывно изменяющегося параметра λ. Вместо разложения в ряды Фурье рассматриваются разложения вида

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\lambda)\varphi(x, \lambda)d\rho(\lambda),$$

где $\rho(\lambda)$ — некоторая неубывающая функция. Эти разложения аналогичны Фурье интегралу. При этом

$$f(x) = F(\lambda) - \int_0^{\infty} f(x)\varphi(x, \lambda)dx$$

и

$$f(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} F^2(\lambda)d\rho(\lambda) - \int_0^{\infty} f^2(x)dx.$$

Аналогичные факты имеют место и для Ш.— Л. з. на всей оси. Для некоторых задач математической физики важное значение имеет обратная Ш.—Л. з., т. е. задача о восстановлении дифференциального уравнения по функции $\rho(\lambda)$. Эта задача была поставлена в частном случае В. А. Амбарцумяном, а в более общем случае швед. математиком Г. Бортом и решена М. Г. Крейном, И. М. Гельфандом и Б. М. Левитаном.

Ш.— Л. з. возникает также в некоторых вопросах квантовой механики и вариационного исчисления.

Литература

1. Курант Р., Гильберт Д., Методы математической физики, пер. с нем., 3 изд., т. 1, М.— Л., 1951.
2. Сансоне Дж., Обыкновенные дифференциальные уравнения, пер. с итал., т. 1, М., 1953.
3. Левитан Б. М., Разложение по собственным функциям дифференциальных уравнений второго порядка, М.— Л., 1950.

ШТУРМ – ЛИУВИЛЛЬ ЕСЕБІ

Едгебаев А.М.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық Ұлттық Университеті .

Дифференциалдық теңдеудің нолден басқа шешімін табу туралы Штурм – Лиувилль есебі.

STURM-LIOUVILLE PROBLEM

A.M. Edgebayev

The L.N. Gumilev's Euroasian National University

The Sturm-Liouville problem on detecting nonzero solutions of differential equations

СПИСОК АВТОРОВ

Ziegenhagen J., 57
Адымов Ж.И., 57
Ахметов Е.З., 57
Бакланов В.В., 19, 24, 29
Барсуков Н.И., 34
Березин С.А., 57
Гильманов Д.Г., 57
Горбунова Э.М., 4
Гордиенко Ю.Н., 34
Гусев М.Н., 46
Дерявко И.И., 19, 24, 29
Едгебаев А.М., 75
Ерматов А.С., 57
Жданов В.С., 24
Зверев В.В., 63
Квасникова Е.В., 4
Ковалев В.В., 53
Колбаенков А.Н., 24
Коновалов В.Е., 4
Коянбаев Е.Т., 29
Кукушкин И.М., 24
Ларин В.Н., 10
Лехто Ю.Л., 13
Лотов А.Б., 38
Максимкин О.П., 46
Малышева Е.В., 19, 29
Масягин Д.Г., 53
Митяев А.В., 10
Окапбаев Р.А., 29
Осинцев А.Ю., 10, 13
Осипов И.С., 46
Павлова Н.Н., 38
Понкратов Ю.В., 34
Потребеников Г.К., 38
Птицкая Л.Д., 4, 10
Пустовалов И.А., 53
Сафронов А.Д., 29
Стороженко А.Н., 24, 29
Стрильчук Ю.Г., 10
Стукин Е.Д., 4
Супрунов В.И., 63
Таинов Д.З., 24
Такибаев Ж.С., 38

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 25 мм; справа 15 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi).

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков.

Текст печатается через один интервал, между абзацами 2 интервала.

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 3 интервала, 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;
- иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере или в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка;
- математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation. Химические формулы и символы должны быть набраны при помощи инструментов 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;
- 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 к.ф.-м.н. М.К. Мукушева
тел. (095) 745-54-04, (322-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин
тел. (322-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 490060, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 6.

© 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
490060, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 6.