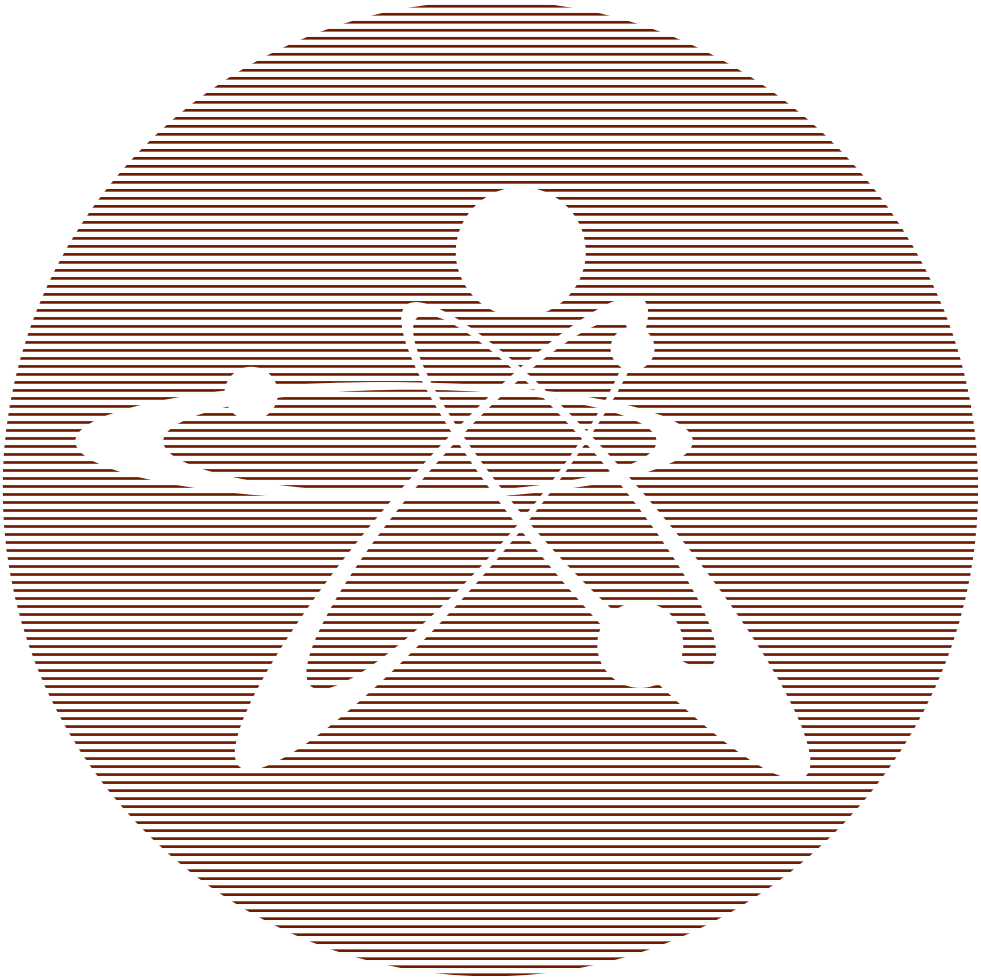
2015
ВЫПУСК 3
ISSN 1729-7516

ВЕСТНИК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(63), СЕНТЯБРЬ 2015

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н. БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – **заместитель главного редактора,**
д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., доктор инженерии ВИЕЛЕБА В.К. (Польша),
к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия), к.ф.-м.н. КОЗТАЕВА У.П.,
ЛУКАШЕНКО С.Н., д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е.,
д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., профессор ФУДЖИ-Е (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(63) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2015 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 3(63), SEPTEMBER 2014

Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК», решением Комитета по контролю в сфере образования и науки включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов:

- **по физико-математическим наукам,**
- **по специальности 25.00.00 – науки о Земле.**

В журнале представлены доклады XIV ежегодной конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК (13 – 15 мая 2015 г., Курчатов, Казахстан), стр. 5-108.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛИЦИРОВАННОГО ГРАФИТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ
Курбанбеков Ш.Р., Дерявко И.И., Бакланов В.В., Миниязов А.Ж., Даулеткелдыев А.Д., Мухамеджанова Р.М., Оразымбеков Б.Т., Конырова К.Б. 5

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ ГРАФИТА МАРКИ IG-110 ИНТЕГРАЛЬНЫМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
Аскербеков С.К., Чихрай Е.В., Шестаков В.П., Кульсартов Т.В., Кенжина И.Е., Немкаева Р.Р. 9

ФОРМИРОВАНИЕ АССИМЕТРИЧНЫХ ТРЕКОВЫХ ПОР В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНОМ АРГОНА
Ахметшарипова Т.К., Сохорева В.В. 17

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА
Бекмулдин М.К., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Микиша А.В. 21

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО КАНАЛЬНОГО РЕАКТОРА
Иданова Д.С., Котов В.М. 26

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ЗЕЛЕНЫЕ НАСАЖДЕНИЯ
Надырова А.Р., Ермоленко М.В., Степанова О.А. 32

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА РАДИАЦИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ
Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б. 39

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДИФИКАЦИИ МНОГОХОРДОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ НА ФИЗИЧЕСКОМ ПУСКЕ ТОКАМАКА КТМ
Райханов М.Б., Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж., Вурим А.Д. 46

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 08Х16Н11М3 В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫСОКОДОЗНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-350
Рубан С.В., Захаров М.А., Максимкин О.П. 51

РАСЧЕТНЫЙ КОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С УЧЕТОМ НАВЕДЕННЫХ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В УСТАНОВКАХ ТИПА ТОКАМАК
Садыков А.Д., Скаков М.К., Шаповалов Г.В., Садыкова М.С. 55

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ТЯР НА ИМИТАЦИОННОМ СТЕНДЕ
Соколов И.А., Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Рахадилов Б.К., Туленбергенов Т.Р. 59

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СХЕМЕ АЭС С ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ
Сураев А.С., Котов В.М. 65

НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦИФРОВКИ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ
Великанова А.А., Узбеков А.Н., Алещенко И.Б. 72

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА ЦЕНТРАЛЬНОАЗИАТСКОЙ СЕТЬЮ СТАНЦИЙ
Дубровин В.И., Смирнов А.А. 78

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ГЛАВНОГО ЧИНГИЗСКОГО РАЗЛОМА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛЛИГОНА
Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. 82

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ
Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Великанов А.Е., Соколов А.Н. 87

О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ БЛИЗ КАРАГАНДЫ 21 ИЮНЯ 2014 ГОДА
Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н., Великанов А.Е., Узбеков А.Н. 94

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И НЕТЕКТОНИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ БЮЛЛЕТЕНЯХ KNDC
Узбеков Р.Б., Рябенко О.В., Сейнасинов Н.А. 101

МАССАСЫ АЙНЫМАЛЫ ШЕКТЕЛГЕН ҮШ ДЕНЕ МӘСЕЛЕСІНІҢ СЕРІКТІК ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ОРТОГОНАЛЬДІ ОРБИТАЛАРДЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ
Минглибаев М.Ж., Бекетауов Б.А. 109

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В РЕАКТОРНЫХ СТАЛЯХ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ И ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ
Максимкин О.П. 113

СПИСОК АВТОРОВ 124

УДК 536.2.088.8:621.039.546536.2.088.8:621.039.546

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛИЦИРОВАННОГО ГРАФИТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

[1] Курбанбеков Ш.Р., [1] Дерявко И.И., [1] Бакланов В.В., [1] Миниязов А.Ж., [1] Даулеткелдыев А.Д., [1] Мухамеджанова Р.М., [1] Оразымбеков Б.Т., [2] Конырова К.Б.

[1] Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2] ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

Настоящая работа посвящена вопросам разработки технологии получения силицированного графита. Подтверждено, что наиболее дешевым и перспективным материалом для получения силицированного графита является природное сырье (техническая сажа, графит и кварц). В работе экспериментально определены удельное соотношение компонентов и их гранулометрические параметры, также в результате микроструктурных исследований получены данные характеризующие структуру силицированного графита.

Введение

В последнее время в связи с ужесточением условий работы (высокие температуры, высокие давления, агрессивные среды) значительно повышаются требования к конструкционным материалам по их жаростойкости и коррозионной стойкости при воздействии различных агрессивных сред, а также к их износостойкости. Таким требованиям в значительной мере отвечает изделия из силицированного графита. Он жаропрочен, обладает хорошей стойкостью к теплосменам, хорошо сопротивляется износу и может длительно работать в контакте со многими агрессивными жидкостями и парами, как при комнатной, так и при высоких температурах [1-3].

Как правило, для силицирования используют специальные углеродные графитизированные и обожженные материалы. В промышленных условиях выпускаются силицированные графиты марок СГ-М, СГ-Т, СГ-П и др., а также легированные бором графиты. В таблице 1 представлена оценка некоторых свойств силицированных графитов, выпускаемых в разных странах. [5].

Силицированный графит представляет собой трехфазный материал, содержащий углерод, карбид кремния и непрореагировавший или свободный кремний. В отдельных случаях возможно наличие той или иной добавки, а также ее карбидов и силицидов, предназначенных для улучшения физико-механических или физико-химических характеристик в зависимости от конкретной области использования материала [4].

Распространенная технология получения силицированного графита в основном заключается в объемной пропитке углеродной заготовки, полученной механической обработкой либо прессованием, жидким кремнием или сплавами на основе кремния в вакууме при температурах 2123-2373 К [5].

Также известна технология прессования композиции с последующим ее спеканием, где для получения силицированных огнеупорных изделий применяют смесь, включающую графит (3-35 % мас.), кремний (3,0-12,5 % мас.), карбид кремния (1,5-40 % мас.), кокс (20-30 % мас.), фенольное связующее – остальное.

Таблица 1. Различные марки силицированного графита.

Марка графита	Плотность, кг/м^3	Химический состав, %		
		SiC	Si	C
Мелкозернистый СГ (ОАО «НИИ графит»), Россия	2750-2800	70-75	10-15	остальные
СГ на основе ТРГ (ИПМ НАН), Украина	2700-2900	-	-	-
CarSik-CT (Schunuk) Германия	2900	75	10	15
SD-DSG (SC-35) (CoorsTek), США	2800	-	-	-
PG-9725 (Morgan AM&T), Великобритания	2800	-	-	-

Силицированный графит, полученный с использованием указанной композиции, имеет достаточно большую долю углеродной составляющей, вследствие плохой силицируемости кокса, а в связи с этим и значительную долю свободного (непрореагировавшего) кремния, что усугубляется ранним введением в исходный состав свободного кремния. Значительное количество свободного кремния в конечном материале (до 25-30 % мас.) при использовании его, например, в качестве облицовочных защитных плит, может приводить к выпариванию кремния вследствие высокой упругости паров кремния, т.е. к появлению пористости материала и снижению его прочности. Подобная картина имеет место при контакте с агрессивными расплавами, например, жидким стеклом или базальтом [6].

Целью настоящей работы является изучение технологии получения силицированного графита с низкой себестоимостью, посредством использования дешевого природного сырья: техническая сажа, графит и кварц.

1. Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов для получения силицированного графита были использованы технический углерод (сажа) ГОСТ 7885-86 и кварцевый песок ГОСТ 22551-77.

Предложенная технология получения силицированного графита включает в себя следующие основные стадии: подготовку сырьевых материалов (измельчение, смешение компонентов), прессование и спекание. Данные операции выполняются с использованием следующего оборудования: вибрационный стол FRITSCH, на который последовательно устанавливается шаровая мельница из корунда и набор сит для автоматического просеивания частиц, лабораторный гидравлический пресс 300 -800-4Э. Спекание проводится в графитовом тигле на универсальном высокотемпературном стенде индукционного нагрева ВЧГ-135.

Выбор температурных режимов в данной технологии производится расчетным путем при анализе известной реакций восстановления оксида кремния углеродом:

$$SiO_2+2C \rightarrow Si+2CO \qquad (1)$$

По данным работ [7] и [8] изменение термодинамического потенциала Гиббса может быть рассчитано по уравнению:

$$\Delta = 697390\text{-}359{,}07\ T,$$

отсюда $\Delta = 0$, а $K_p = 1$ при 1943 K (1670 °C).

Это означает, что теоретически для начала восстановления кремнезема твердым углеродом по реакции (1) требуется обеспечение температуры 1670°C.

Также известен электротермический способ получения кремния в виде его соединения с углеродом (карбида кремния) путем восстановления оксида кремния углеродом в мощных электрических печах [9].

В данном способе шихта для получения карбида кремния состоит из смеси оксида кремния в виде кварцевого песка и нефтяного кокса. Восстановление оксида кремния углеродом кокса осуществляют при температурах 2200-2500 ºС, при этом нагревательным элементом печи является керн, выполненный из крупнокускового углеродистого материала. При восстановлении SiO_2 углеродом карбид кремния в качестве целевого продукта образуется в твердом виде по реакции:

$$SiO_2+3C \rightarrow SiC+2CO \qquad (2)$$

$$\Delta = 555615\text{-}322{,}11T \text{ кал},$$

отсюда $\Delta = 0$, а $K_p = 1$ при 1725 K (1452 °C).

Таким образом, данный способ получения силицированного графита в виде карбида кремния предполагает высокую температуру процесса, которая может быть достигнута в индукционной тигельной печи, такой как на стенде индукционного нагрева ВЧГ-135.

Стенд индукционного нагрева ВЧГ-135, созданный на базе высокочастотного электролампового генератора и герметичной водоохлаждаемой рабочей камеры с индуктором, предназначен для выполнения различных высокотемпературных материаловедческих исследований на образцах небольших размеров. Стенд позволяет осуществлять быстрый нагрев любых малогабаритных образцов до высокой температуры с последующим их охлаждением за счет утечек тепла в водоохлаждаемый индуктор при отключенном генераторе.

На стенде предусмотрена возможность видеосъемки процесса нагрева и охлаждения образца через смотровое окно в крышке рабочей камеры, а также возможность отбора проб газа в процессе эксперимента. Контроль температуры производится с помощью термопар и пирометров. Основными средствами измерения температуры являются вольфрамрениевые термопары ВР5/20, диапазон измерения температуры, которых составляет 1000-2500 °C. Такие термопары измеряют температуру на стенке и в центре экспериментальной тигельной сборки (см. рис.2).

Также в процессе эксперимента производится бесконтактное измерение температуры с помощью пирометров двух типов: spectral-ratio pyrometer MIKRON M770S, пирометр с встроенной высокотемпературной камерой IMPAC 140.

2. Эксперимент по высокотемпературному спеканию

Подготовка шихты осуществляется в два этапа. Измельчение порошков до дисперсности менее 50 мкм, что контролируется ситовым методом при прохождении частиц через ячейки сита соответствующего размера. Навески подготовленных порошков в заданных пропорциях также смешиваются (истираются) в шаровой мельнице в течении 30 мин. Полученную смесь формуют в специальной пресс-форме из углеродистой стали с усилием 7-8 МПа при температуре 180 °C в течение 30-35 минут для получения тестового образца диаметром 15 мм и толщиной 9 мм. Далее полученный цилиндрический образец, для обретения конечных технологических свойств, подвергают процедуре спекания.

Образцы помещаются внутрь графитового тигля, где между образцами устанавливаются графитовые дистанцирующие пластины. Полученная экспериментальная сборка помещается в рабочую камеру стенда ВЧГ-135, после чего камеру откачивают механическим форвакуумным насосом НВР-5 до давления 10^{-3} Па и заполняют инертным газом (аргон) до нормального давления. Схема экспериментальной сборки такого тигля приведена на рис. 1.

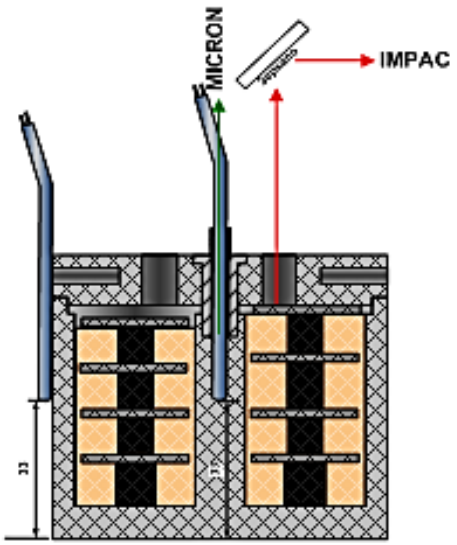


Рисунок 1. Схема экспериментальной сборки

Процедура проведения эксперимента по спеканию образцов включает два периода термообработки от комнатной температуры до 800 °С с выдержкой 30 минут и последующий нагрев до 1580-1600 °С с выдержкой 110-120 минут.

Диаграмма такого процесса нагрева при проведении спекания представлена на рис. 2.

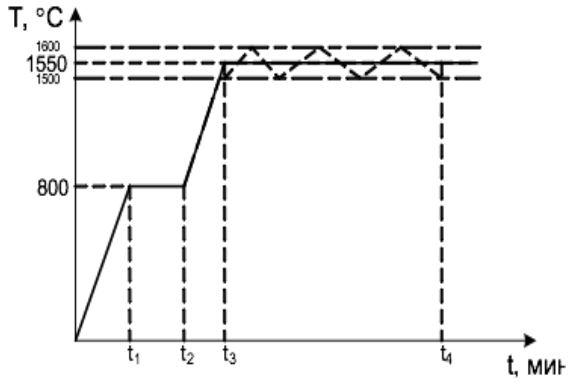


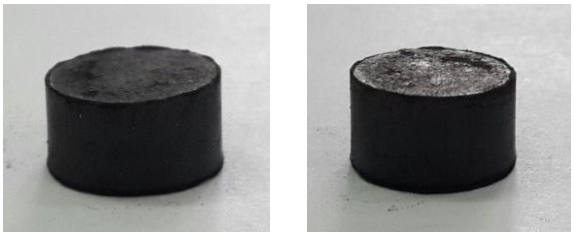
Рисунок 2. Диаграмма процесса нагрева

Эксперимент завершается после естественного охлаждения сборки до комнатной температуры. Конечным технологическим результатом данного процесса является получение материала с трехфазным составом, содержащего карбид кремния, углерод и свободный кремний.

3. Исследования структуры образцов после спекания

Внешний вид полученного образца в результате применения разработанной технологий представлен на рис. 3.

Полученный в результате спекания образец представляет собой достаточно плотный материал, сохранивший форму и без видимых изменений по цвету. На рис. 4 приведены фрагменты структуры поверхности образца после механической шлифовки и полировки, полученные методом оптической металлографий с помощью оптического микроскопа Olympus BX41M. В результате исследования структуры установлено, что внутренняя сторона образцов покрыта неглубокими язвами, имеются мелкие поры.



а) Прессованный образец до спекания *б) Образец после спекания*

Рисунок 3. Внешний вид образца, прошедшего все процедуры изготовления по разработанной технологии

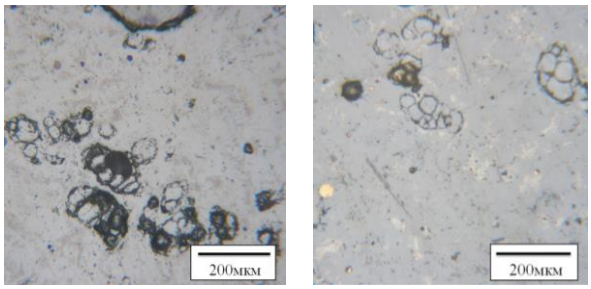


Рисунок 4. Структура образца. Оптическая металлография

Характеризация поверхностной микроструктуры проводилась методом сканирующей электронной микроскопий с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390 (РЭМ). Получение РЭМ-изображений проводилось в режиме вторичных электронов в высоковакуумном режиме.

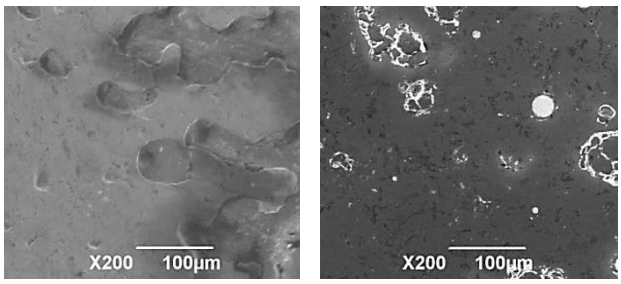


Рисунок 5. Микроструктура образца, полученная методом сканирующей электронной микроскопии

При анализе структуры поверхности материала было обращено внимание на наличие на снимках двух структурных составляющих, различающихся по цветовому оттенку. Эти составляющие были условно обозначены как «серая» и «темная» фаза (рис. 5).

Детальное исследование микроструктуры в различных участках поверхности поперечных шлифов показало, что в любом участке сечения изделия всегда фиксируются наличие двух фаз, различающихся по цвету, являющимися основными фазовыми составляющими силицированного графит. Было установлено также, что на поверхности шлифа образовались поры и крупные комочки (примерно это не прореагировавшие частицы кремния и углерода).

Заключение

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

– установлено определенное соотношение компонентов, в соответствии с технологией получения силицированного графита;

– отработана процедура проведения экспериментов на высокотемпературном стенде ВЧГ-135 и произведен выбор температурных режимов с составлением диаграммы процесса нагрева;

– выявлена двухфазная структура, которая характеризует материал силицированного графита.

Работа выполнена в рамках Договора №271 от 12.02.2015 года по теме «Разработка технологии изготовления силицированного графита с низкой себестоимостью».

Литература

1. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силлицированный графит. М., Металлургия, 1977. – 206 с.
2. N.R. Calderon, M. Martínez-Escandell, J. Narciso, F. Rodrıguez-Reinoso, The combined effect of porosity and reactivity of the carbon preforms on the properties of SiC produced by reactive infiltration with liquid Si, CARBON, Vol. 47, 2009, pp. 2200–2210.
3. Селезнев А. Н. Углеродистое сырье для электродной промышленности. М. Профиздат.: 2000, -256 с.
4. Сорокин О.Ю., Бубненков И.А., Кошелев Ю.И., Орехов Т.В. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами. Химия и химическая технология 2012, том 55 вып.6 – С. 12-16.
5. Ильющенко А.Ф., Звонарев Е.В., Осипов В.А., Фомихина И.В. К вопросу получения силицированного графита и карбидокремниевой керамики машиностроительного назначения «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка» 10-12 апреля 2013 г., г. Минск, Беларусь с. 441-445.
6. Пат. RU2370435, C2. Углеродсодержащая композиция для получения силицированных изделий/ Костиков В.И., Смирнов Л.Н., Скибневская О.С. (RU). Заявлено 20.05.2009; опубл. 20.10.2009.
7. Катков О.М. Выплавка технического кремния. Иркутск: изд-во ИПУ, 1997, 243 с.
8. Толстогузов Н.В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов. М.: Металлургия, 1992, 239 с.
9. Брантов С.К., Кузнецов Н.Н. Электрофизические свойства композиционного материала на основе силицированной углеграфитовой ткани // Материаловедение. — 2002. №5. — С. 25-27.

КРЕМНИЙ КАРБИДІ НЕГІЗІНДЕГІ СИЛИЦІРЛЕНГЕН ГРАФИТ АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЗЕРРТЕУ

[1)] Курбанбеков Ш.Р., [1)] Дерявко И.И., [1)] Бакланов В.В., [1)] Миниязов А.Ж., [1)] Даулеткелдыев А.Д., [1]Мухамеджанова Р.М., [1]Оразымбеков Б.Т., [2]Қонырова Қ.Б.

[1)] ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2)] Д. Серікбаев атындағы ШҚМТУ, Өскемен, Қазақстан

Бұл жұмыс силицирленген графит алу технологиясын дамыту барысындағы туындайтын сұрақтарды қарастыруға арналған. Силицірленген графитті алу үшін табиғи шикізаттың арзан және болашағы бар материал болып табылатыны белгілі болды. Жұмыс барысында эксперимент жүзінде қоспалардың қатынасы мен олардың гранулометриялық параметрлері анықталды. Сонымен қатар микроқұрылымын зерттеу барысында силицірленген графиттің құрылымы бойынша ақпараттар алынды.

STUDY OF TECHNOLOGIES OBTAINING OF SILICONIZED GRAPHITE BASED ON SILICON CARBIDE

[1)] Sh. Kurbanbekov, [1)] I. Deryavko, [1)] V. Baklanov, [1)] A. Miniyazov, [1)] A. Dauletkeldyev, [1)] R. Mukhamejanova, [1)] B. Orazymbekov, [2)] K. Konyrova

[2)] Branch Institute of Atomic Energy RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2)] EKSTU D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Present work is devoted the development of technology for production of siliconized graphite. It is confirmed that the cheapest and most promising material for siliconized graphite is a natural raw material (technical carbon black, graphite and quartz). The experimentally determined ratio of the specific components and their grain size parameters as a result of microstructural studies provided data characterizing the structure of siliconized graphite.

УДК: 620.19

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ ГРАФИТА МАРКИ IG-110 ИНТЕГРАЛЬНЫМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аскербеков С.К., Чихрай Е.В., Шестаков В.П., Кульсартов Т.В., Кенжина И.Е., Немкаева Р.Р.

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Работа посвящена актуальной проблеме исследования коррозии реакторных графитов. Эксперимент проводился на установке по исследованию высокотемпературного взаимодействия химически активных газов с реакторными материалами (CorrSiCa). Данная установка позволяет проводить испытания в условиях продувки газа сквозь камеру с образцом (со скоростью 1-100 л/ч). Кроме этого установка позволяет проводить масс-спектрометрический анализ состава газов в коррозионной камере во время экспериментов, с помощью масс-спектрометра RGA-100. В работе приведены измерения зависимости состава газовой смеси в коррозионной камере с образцом графита марки IG-110 при температурах 750-1400 °С с напуском паров воды в камеру на уровне давления 10-100 Па. Предложена феноменологическая модель, описывающая процессы высокотемпературной коррозии графита.

Введение

Для обеспечения безопасной работы высокотемпературного газо-охлаждаемого реактора (ВТГР) необходимо исследовать поведение топлива и графитовых элементов его активной зоны в случае попадания туда воздуха и/или воды. Дизайн активной зоны ВТГР должен предотвращать аварии с восстановлением критичности путем удержания геометрии топливных сборок, содержащих графитовые элементы и топливо с графитовым покрытием, и улучшением коррозионной стойкости графита в случае аварии с проникновением воздуха/воды.

На сегодняшний день работ по коррозии многочисленных сортов реакторных графитов в кислороде, воздухе и в парах воды недостаточны. Особенно мало данных по коррозии графитов в парах воды под высоким давлением, для исследования которой не подходят стандартные установки термогравиметрии и масс-анализаторы, и необходимо разрабатывать специальные печи и установки коррозии.

Поэтому исследование и испытание реакторных графитов, в особенности исследование их взаимодействия с химическими активными газами (воздух, вода), остается одной из актуальных и приоритетных задач прикладного материаловедения.

В настоящей работе приведен первый этап таких работ, а именно результаты экспериментов по исследованию высокотемпературного взаимодействия смеси газов в камере с образцами графита IG-110.

Исследуемый материал

В качестве объектов исследования были выбраны образцы японских марок реакторного графита мелкозернистого IG-110 (плотность 1,78 г/см^3, масса образца ~ 1 г, прочность на изгиб 39 МПа, твердость по Шору 51).



Рисунок 1. Вид исследуемых образцов

Образцы имели форму параллелепипеда размерами 3,3×3,3×55 мм (см рисунок 1). Длинная сторона образцов ориентирована перпендикулярно оси сжатия.

Экспериментальная установка

Коррозионные эксперименты с образцами реакторных графитов проводились на созданной установке для исследования коррозии реакторных материалов CorrSiC'a. Коррозионная камера собственной разработки на базе промышленной высоковакуумной трубчатой печи GSL-1600, обеспечивающий возможность проведения коррозионных исследований на максимальных температурах 1500-1600 °С при атмосферном давлении и 1400-1500 °С в вакууме (0,1 Па). Нагреваемая камера печи (рисунок 2) выполнена из трубы высококачественного оксида алюминия (Al_2O_3 99,8%) длиной 1000 мм. Внешним диаметром 50 мм и внутренним диаметром 40 мм (толщина стенки 5 мм) и снабжена вакуумными шлюзами с термостойким силиконовым уплотнением, обеспечивающими уровень натекания лучше 0,1 Па·л/мин. Длина нагреваемой зоны – 300 мм, зона однородного нагрева – 150 мм, точность поддержания температуры ±1 °С. Образец загружается в центр нагреваемой зоны в загрузочном тигле из высококачественного оксида алюминия (отрезок трубы длиной 15 см и диаметром 2 см). Для предотвращения нагрева излучением из горячей области тигля стальных вакуумных фланцев и силиконовых уплотнительных колец в них, в печь устанавливаются тепловые экраны из пористого оксида алюминия (искусственного корунда).

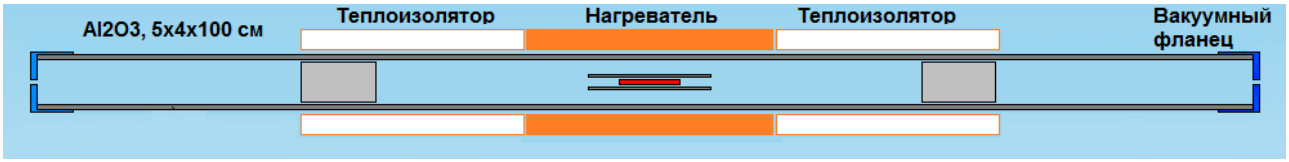


Рисунок 2. Схема расположения элементов рабочей камеры установки исследования коррозии графитов на базе трубчатой печи GSL-1600

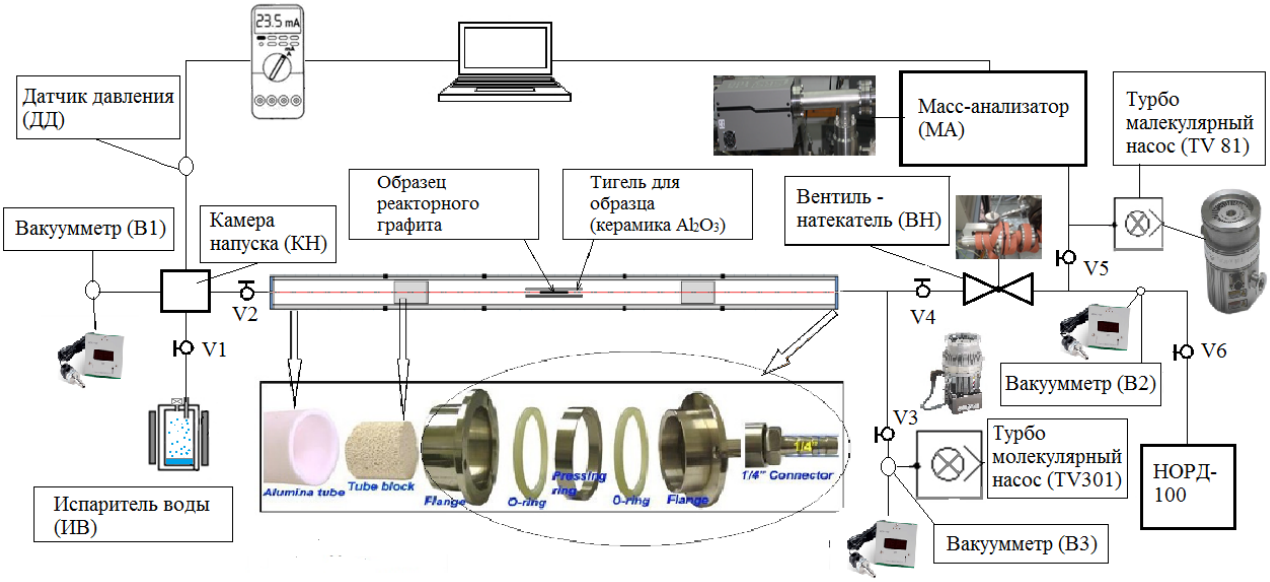


Рисунок 3. Структурная схема установки для исследования коррозии графитов

Корундовые экраны имеют 3 мм зазор со стенками трубы печи и, при установке их на краю зоны теплоизоляции, эффективно предотвращают нагрев фланцев выше 150 °С даже при температуре печи 1500 °С, не нарушая при этом движение медленных газовых потоков. Печь питается от сети однофазного переменного тока 220 В, 30 А, мощность 4 кВт.

Дополнительно установка коррозии была снабжена передвижным постом высоковакуумной без масляной откачки TPS-Compact на базе турбомолекулярного насоса TV-301 и сухого спирального насоса IDP-3 (Agilent Technologies), что позволяет полностью исключить возможность попадания высокомолекулярных органических соединений в вакуумную систему установки. Структурная схема установки приведена на рисунке 3. На рисунке 4 показан внешний вид установки.



Рисунок 4. Внешний вид установки коррозии CorrSiC'a

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перед экспериментами образец предварительно мыли в ультразвуковой ванне в дистиллированной воде и отжигали при температуре 500 °С в течении 5 часов. Затем образец взвешивался на аналитических весах (Sartorius CPA225D, точность 10 мкг) и проводились их микроструктурные исследования.

Далее образец закладывался в печь (коррозионную камеру), после чего система была откачана до давления 0,01 торр. После откачки камеры, с помощью механического натекателя организовалось натекание газовой смеси из камеры с образцом в камеру с масс-спектрометром. Далее, при продолжающейся постоянной откачке коррозионной камеры с образцом графита, включался ее нагрев со скоростью 5 или 10 °С/мин и производилась регистрация его газовыделения (термодесорбции) до достижения температуры 1400 °С. Таким образом, до стадии регистрации коррозионных процессов в парах воды, каждый образец проходил через стадию регистрации его исходного термо-десорбционного спектра (ТДС) при линейном нагреве в вакууме. После достижения температуры 1400 °С включался режим термостабилизации и эксперимент переходил в стадию регистрации коррозионных кривых при постоянных температурах образца. Исследований проводится ступенчато при температурах 1400 °С, 1300 °С, 1200 °С, 1100 °С, 1000 °С, 900 °С,750 °С, причем в процессе подачи воды в коррозионную камеру и установления равновесного баланса по газам в камере температура образца не изменяется. После снятия зависимости кинетики изменения состава газа в камере при подачи на образец паров воды при максимальной температуре образца, газовая смесь откачивается из камеры и проводится спуск к следующей исследуемой температуре образца. За все время экспериментов регистрировалось изменение состава газа в камере. После коррозионных экспериментов образцы снова взвешивались и проводились их микроструктурные исследования. Таким образом, в ходе одного эксперимента удается получить данные термодесорбционного газовыделения из образца и данные о скоростях коррозии в парах воды при определенных температурах образца. Данная методика оптимальна с точки зрения получения параметров высокотемпературной коррозии графита.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В соответствии с принятой методикой исследования были проведены коррозионные эксперименты с японским графитом IG-110. По результатам проведенных исследований были получены комплексные временные, температурные диаграммы экспериментов по коррозии. На рисунке 5 приведены характерные зависимости изменения давления различных газов в камере с образцов графита при напусках паров воды (полная диаграмма эксперимента).

На рисунке 6 приведены кинетики изменения состава газа в камере при коррозии графита для различных температур образца. Из графиков качественно видно, что коррозия графита протекает при разных температурах различным образом: отличаются как квазистационарные равновесные уровни давлений для различных газов, так и кинетика изменения состава газа в камере.

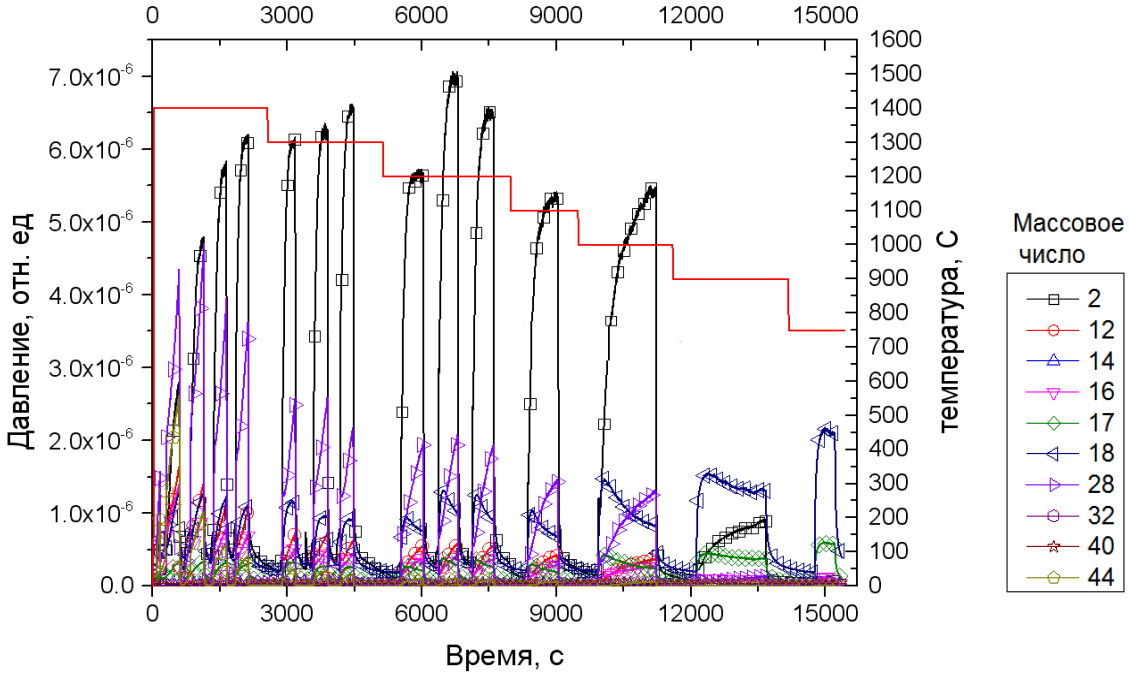


Рисунок 5. Зависимости изменения давления различных газов в камере с образцов графита IG-110

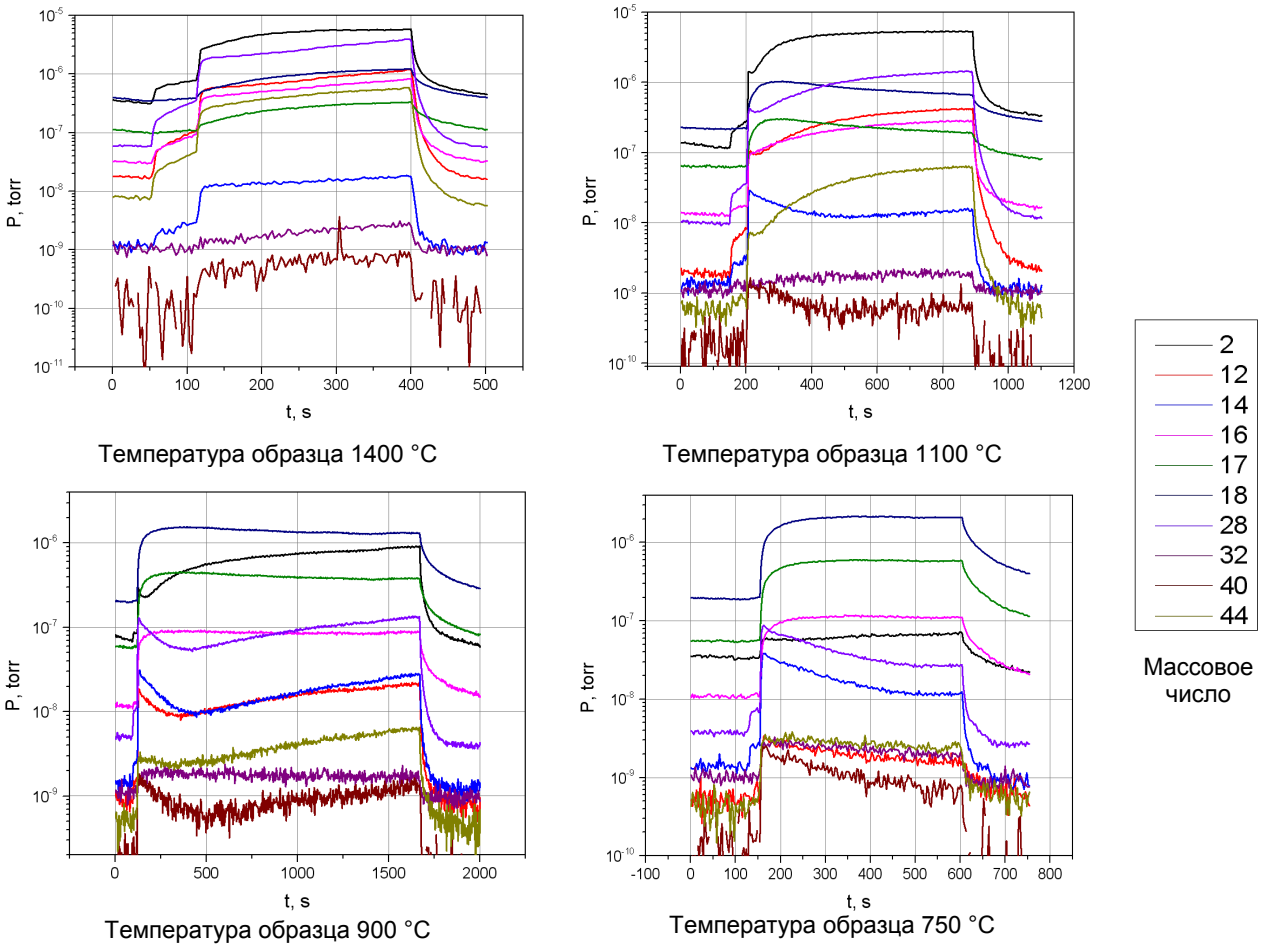


Рисунок 6. Зависимости изменения состава газа в камере с образцом графита при подаче в камеру паров воды

РЕАКЦИИ И МЕХАНИЗМЫ КОРРОЗИИ ГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полученные зависимости могут быть объяснены сложными процессами сорбции – десорбции и химическими реакциями, имеющими температурную зависимость. Здесь приведем лишь краткие выкладки по основным химическим реакциям, т.к. поведение графита в процессе коррозии определяются химическими свойствами углерода [1-4].

Реакции газ – графит

Сорбция молекул воды с формированием стабильных комплексов (CO) и сорбированных на поверхности графита атомов водорода:

$$H_2O + C \xrightarrow{K1} CO_S + H_S + H_S \quad (1)$$

Образование молекулы метана:

$$2H_2 + C \xrightarrow{K2} CH_4 \uparrow \quad (2)$$

Сорбция молекул водорода:

$$H_2 + C \xrightarrow{K3} C + H_S + H_S \quad (3)$$

Реакция взаимодействия газа CO_2 с формированием стабильных комплексов (CO):

$$C + CO_2 \xrightarrow{K4} 2CO_S \quad (4)$$

Реакции десорбции с поверхности графита

Десорбция водорода:

$$H_S + H_S \xrightarrow{K5} H_2 \uparrow \quad (5)$$

Десорбция CO:

$$CO_S \xrightarrow{K6} CO_g \uparrow \quad (6)$$

Реакции газ – поверхность CO_S

Реакция с молекулой воды:

$$H_2O + COs \xrightarrow{K7} CO_2 \uparrow + H_2 \uparrow \quad (7)$$

Реакция с молекулой водорода:

$$3H_2 + CO_S \xrightarrow{K8} CH_4 \uparrow + H_2O \uparrow \quad (8)$$

Реакции в коррозионной камере

Реакция водорода с CO (образование метана):

$$3H_2 + CO_g \xrightarrow{K9} CH_4 + H_2O \quad (9)$$

Реакция молекулы воды с CO:

$$H_2O + CO_g \xrightarrow{K10} CO_2 + H_2 \quad (10)$$

Распад метана:

$$CH_4 \xrightarrow{K11} 2H_2 + C \quad (11)$$

Механизм окисления либо окисление водяным паром графита состоит из последовательных физических и химических шагов [5-7]:

– Перенос окислителя на поверхность графита;

– Адсорбция окислителя на поверхность графита (физическая адсорбрция);

– Образование связи углерод-кислород (хемосорбция);

– Образование связи углерод-водород (см. формулу (2));

– Разрушение связей углерод-углерод;

– Десорбция CO или других продуктов;

– Перенос продуктов реакции с поверхности графита.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ГАЗА В КАМЕРЕ

Примем следующие обозначения для концентраций элементов в коррозионной камере:

N_{H2O}, N_{H2}, N_{COg}, N_{CO2}, N_{CH4} – концентрации соответственно воды, водорода, газа CO, углекислого газа, метана в камере установки (моль/м^3);

N_C, N_{COs}, N_H – концентрации соответственно поверхностно активных центров, комплексов CO и атомов водорода на поверхности образца (моль/м^2); N_{C0} –начальная концентрация поверхностно активных центров, такая что всегда верно

$$N_{C0} = N_C + N_{COs} + N_H ;$$

$K1$-$K11$ – константы соответствующих реакций (моль/м^3 с, моль/м^2 с);

Мы можем написать следующие выражения для скоростей реакции (1)-(11):

$q1 = N_{H2O} \times Nc \times K1 \times S$ *; где* $q1$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (1) – скорость уменьшения количества паров воды в камере; увеличение количества комплексов CO на поверхности образца;* $2*q1$ *– скорость увеличения количества атомов водорода на поверхности вещества;*

$q2 = N_{H2}^2 \times Nc \times K2 \times S$ *; где* $q2$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (2) – скорость увеличения количества молекул метана в камере, а* $2*q2$ *– скорость уменьшения количества молекул водорода в камере;*

$q3 = N_{H2} \times K3 \times Nc \times S$ *; где* $q3$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (3) – скорость уменьшения количества молекул водорода в камере;* $2*q3$ *– скорость увеличения количества атомов водорода на поверхности вещества;*

$q4 = N_{CO2} \times N_C \times K4 \times S$ *; где* $q4$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (3) – скорость уменьшения количества молекул углекислого газа в камере;* $2*q4$ *– скорость увеличения количества комплексов CO на поверхности вещества;*

$q5 = N_H^2 \times K5 \times S^2$ *; где* $q5$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (3) – скорость увеличения количества молекул водорода в камере;* $2*q5$ *– скорость уменьшения количества сорбированных атомов водорода на поверхности вещества;*

$q6 = N_{COs} \times K6 \times S$ *; где* $q6$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (3) – скорость увеличения количества молекул CO газа в камере; скорость уменьшения количества комплексов CO на поверхности вещества;*

$q7 = N_{H2O} \times N_{COs} \times K7 \times S$ *; где* $q7$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (1) – скорость уменьшения количества молекул воды в камере; скорость уменьшения количества комплексов CO на поверхности образца; скорость увеличения количества молекул водорода, углекислого газа в камере;*

$q8 = N_{H2}^3 \times N_{COs} \times K8 \times S$ *; где* $q8$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (2) – скорость увеличения количества молекул метана, воды в камере, скорость уменьшения количества комплексов CO на поверхности образца,* $3*q8$ *– скорость уменьшения количества молекул водорода в камере;*

$q9 = N_{H2}^3 \times N_{COg} \times K9$ *; где* $q9$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (2) – скорость увеличения количества молекул метана, воды в камере, скорость уменьшения количества молекул CO в камере,* $3*q8$ *– скорость уменьшения количества молекул водорода в камере;*

$q10 = N_{H2O} \times N_{COg} \times K10$ *; где* $q10$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (1) – скорость уменьшения количества молекул воды в камере; скорость уменьшения молекул газа CO в камере; скорость увеличения количества молекул водорода, углекислого газа в камере;*

$q11 = N_{CH4} \times K11$ *; где* $q11$ *– скорость изменения количества вещества (моль/с) обусловленного реакцией (1) – скорость уменьшения количества молекул метана в камере;* $2*q11$ *– скорость увеличения количества молекул водорода, углекислого газа в камере.*

Используя выражения для скоростей реакции, запишем уравнения баланса для концентраций атомов на поверхности образца и молекул газа в камере установки.

$$\frac{dN_{H2O}}{dt} = -q1 - q7 + q8 + q9$$

$$\frac{dN_{H2}}{dt} = -q2 - 2 * q3 - 3 * q8 - 3 * q9 + q5 + q10 + 2 * q11$$

$$\frac{dN_{COg}}{dt} = -q9 - q10 + q6$$

$$\frac{dN_{CO2}}{dt} = -q4 + q7 + q10$$

$$\frac{dN_{CH4}}{dt} = -q11 + q2 + q8 + q9$$

$$\frac{dN_C}{dt} = -2 * q1 - 2 * q3 - 2 * q4 + 2 * q5 + q6 + q7 + q8$$

$$\frac{dN_{COs}}{dt} = -q6 - q7 - q8 + q1 + 2 * q4$$

$$\frac{dN_H}{dt} = -2 * q5 + 2 * q1 + 2 * q3$$

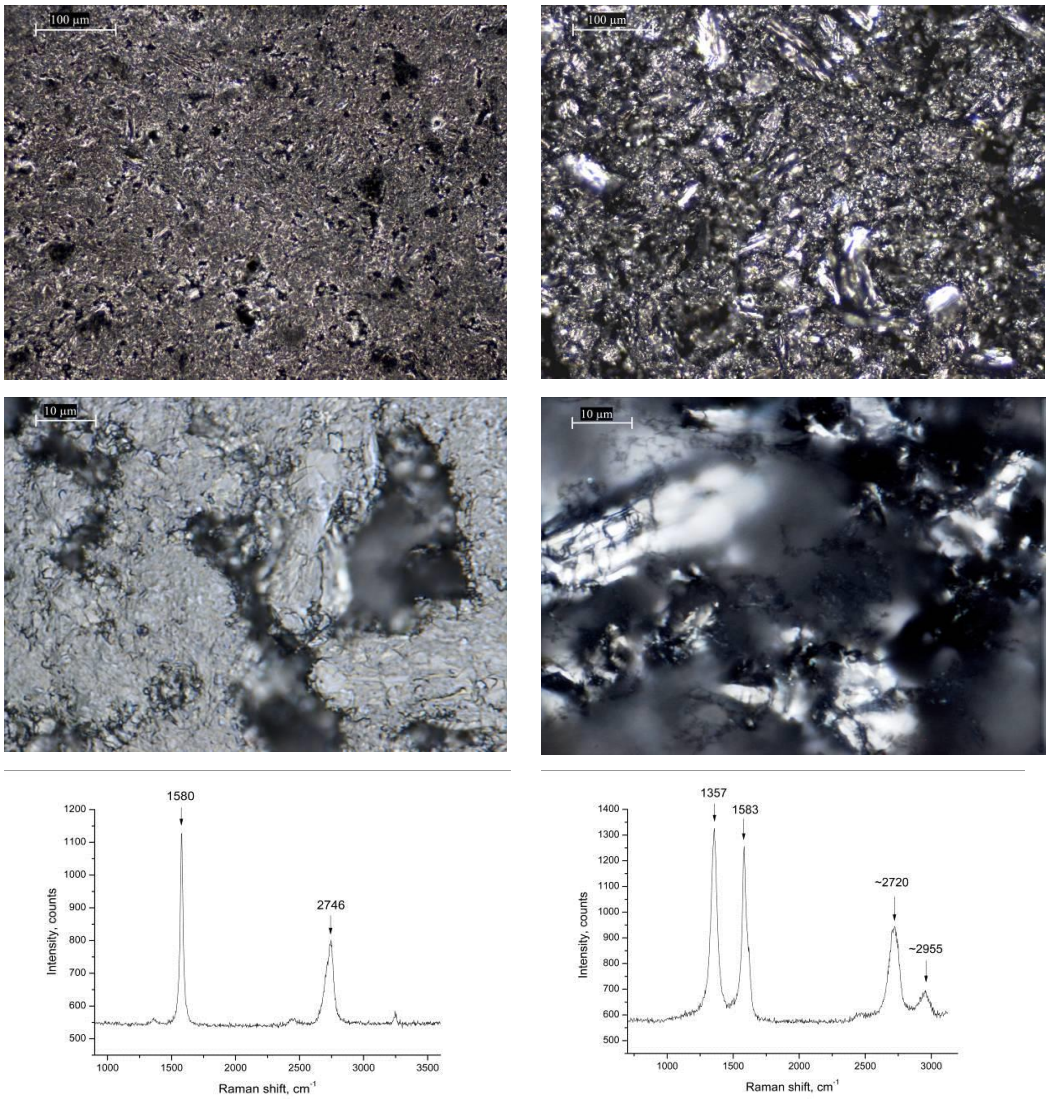
В качестве предположений модели полагаем, что в начальный момент времени $N_{H2O}(0)=N(0)$ (определяется начальным давлением паров воды в камере и может считаться заданным), $N_C(0)=NC$ (определяется начальной концентрацией поверхностно-активных центров и может считаться заданным; для всех остальных значений $N_i(0)=0$.

Результаты взвешивания и микроструктурного анализа

Повторное взвешивание образцов после коррозионных испытаний показало убыль массы Δm = 0,03807 г, что составляет около 2,6 % массы образца до коррозионных испытаний.

Результаты микроструктурных исследований позволили получить микроизображения поверхности и рамановские спектры исследуемых образцов (см. рисунок 7).

Видно, что исходный образец имеет характерную графитовую поверхность с соответствующим рамановским спектром, представленным двумя основными графитовыми пиками G со смещением 1580 см$^{-1}$ и 2D в области 2740 – 2750 см$^{-1}$.



До коррозионных испытаний *После коррозионных испытаний*

Рисунок 7. Результаты микроструктурных исследований поверхности образцов графита

После коррозионных испытаний наблюдается существенное потемнение и уменьшение плотности поверхности образца, в некоторых областях появляются сажевые и нитеобразные структуры. В рамановском спектре обработанного образца появляется интенсивный пик D в области 1360 $см^{-1}$, который свидетельствует о появлении большого количества дефектов в графитовой структуре.

Спектр, соответствующий областям с нитеобразными структурами, представлен довольно узкими пиками, и, несмотря на интенсивный дефектный пик D, существенного смещения G пика не наблюдается, при этом сохраняется интенсивный пик 2D, который свидетельствует о дальнем порядке структуры. Всё это позволяет предположить, что в обработанном образце имеются углеродные нано трубки.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены зависимости изменения состава газа в камере при напуске паров воды на различных температурах образца графита.

Для анализа полученных зависимостей были составлены выражения баланса газа в камере, с учетом различных реакций на поверхности графита и газофазных реакций в камере установки.

Предложена модель, основанная на определении концентраций различных газов в камере с помощью системы дифференциальных уравнений.

Результаты микроструктурных исследований графита до и после испытаний показали, что коррозия приводит к появлению большого количества дефектов в графитовой структуре на поверхности образца. Взвешивание образца позволило определить потерю массы образца за время испытаний, что составила около 2,6 %.

Литература

1. Minato, K. Thermodynamic Analysis of Behavior of HTGR Fuel and Fission Products under Accidental Air or Water Ingress Conditions/ K. Minato, K. Fukuda// Proc. IAEA Technical Committee Mtg. on Response of Fuel, Fuel Elements and Gas-cooled Reactor Cores under Accidental Air or Water Ingress Conditions, IAEA-TECDOC-784. – 1995. – Pp.86-91.
2. Гончаров В. В., Бурдаков Н. С., Виргильев Ю. С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1978. - 272 с.
3. Odeychuk, M.P. Graphites and CCCM for nuclear reactor plants: Ukraine's experience. – PROCER / M.P. Odeychuk // Proceedings of International Conference on Ceramic Processing, HR DD Guest House, Bombay Metropolitan Regional Chapter, Indian Ceramic Society. - 2004. – P. 103-123.
4. Ferng, Y.M. CFD investigating the air ingress accident for a HTGR simulation of graphite corrosion oxidation / Y.M Ferng,. C.W.Chi // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – V. 248. – P.55-65.
5. Stolz ,Von E. Kohlenstofftransport in den Hoch-emperaturreaktoren THTR und AVR / Von E. Stolz, F.Stolz, L.Werner // Report EUR-3900, THTR-44, Brown Boveri. Krupp Reaktorbau G.m.b.H. Mannheim. - 1968. — P. 99-103.
6. Pointud, M. L. Influence of different Metals on Corrosion Rate of Graphite / M. L. Pointud, W. Karcher, N. Pollitt et. al. // Symposium on Basic Research at A.E.R.E. Harwell. - 1964.
7. Tortelli, P.F. Effect of high water-vapor pressure on oxidation of SiC at 1200C / P.F. Tortelli, K.L. More // Journal of The American Ceramic Society. - 2003. -V. 86, №. 8. - P.1249-1255.

ИНТЕГРАЛДЫ МАСС- СПЕКТРОМЕТРИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН IG-110 МАРКА ГРАФИТЫНЫҢ ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ КОРРОЗИЯСЫНА ЗЕРТТЕУ

Әскербеков С.Қ., Чихрай Е.В., Шестаков В.П., Кульсартов Т.В., Кенжина И.Е., Немкаева Р.Р.

Эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,

Негізгі жұмыс реакторлық графит коррозиясын зерттеу, өзекты мәселесіне арналады. Зерттеулер, реакторлық материалдардың жоғары темпетарурада коррозиясын зеттреуге арналған қондырғыда өткізілді (CorrSiCa). Қондырғы, графит үлгісі орналасқан камерада (1-100 л/сағ жылдамдықпен) газ ағынын ұйымдастру жағдайында сынақ өткізуге мүмкіндік береді. RGA-100 масс-спектрометрімен жабдықталған бұл қондырғы, зерттеу уақытында, коррозия камерасының газ құрамын, масс-спектрометриялық талдау өткізуге мүмкіндік береді. Нағыз жұмыста, IG-110 марка графиті орналасқан коррозиондық камераның 750-1400 °С температураларда, 10-100 Па қысым аралығында су буынымен қаныққан жағдайда газ құрамының өзгеру нәтижелері келтірілген. Жоғары температурада графиттердің коррозиясы процестерін сипаттайтын феноменологиялық моделі ұсынылады.

THE HIGH-TEMPERATURE CORROSION OF IG-110 GRAPHITE USING INTEGRAL MASS SPECTROMETRIC METHOD

S.K. Askerbekov, Y.V. Chikhray, V.P. Shestakov, T.V. Kulsartov, I.E. Kenzhina, R.R. Nemkaeva

Institute of Experimental and Theoretical Physics of Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The work is devoted to the actual problem of corrosion studies of reactor graphite. The experiment was carried out at a set-up (CorrSiCa) for the investigation of high temperature reactive gases interaction with the reactor materials. This set-up allows to organize experiments with gas blow chamber with sample (at a rate of 1-100 l/h). Besides, the set-up allows the mass spectrometric analysis of gases composition in chamber during corrosion experiments using RGA-100 mass-spectrometer. The paper presents results of gaseous composition changes in corrosion cell with a sample of IG-110 graphite at temperatures 750-1400 °C with a flow of water vapor into the chamber at a pressure of 10-100 Pa. A phenomenological model describing processes of high-temperature graphite corrosion was suggested.

УДК 539.1.074

ФОРМИРОВАНИЕ АССИМЕТРИЧНЫХ ТРЕКОВЫХ ПОР В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНОМ АРГОНА

Ахметшарипова Т.К., Сохорева В.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

В работе рассмотрены особенности получения трековых мембран (ТМ) на классическом циклотроне У-120. На основе проведенных исследований созданы образцы химически стойкой трековой мембраны (ТМ). Структура пористой мембраны формировалась при облучении полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТФ) ионами аргона с энергией 41 МэВ с последующей термической обработкой и химическим травлением. Исследован химический состав тонких пленок и их структура в процессе химического травления. Исследован процесс травления треков в ТМ с нанесенным покрытием. Исследованные поверхностные свойства ассиметричной трековой мембраны после обработки в плазме и после прививки мономеров наблюдались на сканирующем электронном микроскопе. Наблюдается уменьшение размеров пор за счет увеличения толщины привитого слоя на стенках цилиндрических отверстий.

Трековая мембрана на основе ПЭТФ может быть использована для разделения солей сольватированных ионов, для биосенсоров, применяемых в анализе малых количеств биологических жидкостей. В данной работе использованы методы облучения мембранных матриц ПЭТФ $^{40}Ar^{+8}$, катодное распыление, магнетронное распыление, резерфордовское обратное рассеяние, одностороннее и двустороннее травление.

Ключевые слова: *ионы аргона, полиэтилентерефталат, кондуктометрическая ячейка, ассиметричные трековые поры, абляционная плазма.*

ВВЕДЕНИЕ

Основная проблема, препятствующая широкому применению мембранных технологий – отсутствие мембран, обладающих высокой разделяющей способностью при достаточной прочности, стабильностью эксплуатационных свойств и коммерческой доступностью. Среди разнообразия мембран важное место занимают трековые полимерные мембраны (ТМ) [1]. Отличительными особенностями ТМ являются малая толщина, высокая селективность разделения, технологичность производства и сравнительно невысокая стоимость.

Минимальный диаметр классической ТМ около 100 нм, что препятствует её использованию в прецизионных фильтрационных процессах при фильтрации лекарственных препаратов, малых количеств биологических жидкостей. Поэтому разработка ТМ с порами меньше 100 нм является актуальной задачей. Структура таких ТМ будет отличаться от симметричных ТМ наличием тонкого «селективного» слоя с малыми порами, лежащим на более толстом слое, имеющем поры большего размера. Такие ТМ называются ассиметричными трековыми мембранами (АСТМ). Они превосходят симметричные ТМ по производительности, поскольку тонкий селективный слой имеет меньшее гидравлическое сопротивление, чем симметричная мембрана с порами такого же размера. Так как предполагается использовать АСТМ [3] для фильтрации лекарственных препаратов и биологических объектов, они должны обладать устойчивостью к тепловым (стерилизующим) обработкам [2].

В настоящей работе приведены результаты исследования плазмохимической модификации ТМ. В качестве материала селективного слоя были выбраны: ^{12}C, SiO_2 и фтористоводородные полимеры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Полиэтилентерефталатная пленка (производства Владимирского хим. завода) толщиной 10 мкм облучалась согласно методике, описанной в [6], ионами $^{40}Ar^{+8}$ с энергией 41,5 МэВ, ускоренными на циклотроне Р-7М. Плотность треков ионов составляла 10^7 – 10^9 $см^{-2}$. Последующее химическое травление облученной трековой матрицы в растворе щелочи NaOH проводилось при температуре 72 °С до получения сквозных пор. Концентрация NaOH изменялась от 1,3 – 3 N.

При этом пористая структура ТМ симметрична, а поры имели цилиндрическую форму. Для формирования анизотропной структуры ТМ использовались методы: одностороннего травления, формирования тонких селективных слоев на поверхности ТМ, плазменной модификации ТМ [4].

После облучения трековая матрица ПЭТФ, облучалась ультрафиолетом, затем на ее поверхность осаждались в холодней плазме пленки различных диэлектриков: CF_2, SiO_2, SiO_2-C, C. Выбор диэлектриков был обоснован их устойчивостью к щелочным травителям.

Пленки осаждались катодным, магнетронным распылением и с использованием абляционной плазмы. У сформированных пленок с помощью метода резерфордовского обратного рассеяния (РОР) [5] определялась толщина слоя, атомный состав, наличие неконтролируемых технологических примесей для

различных условий осаждения и времени осаждения пленок. Были получены пленочные покрытия на ПЭТФ пленке при магнетронном распылении катода из оксида кремния, тефлона и углерода. Алмазоподобное углеродное покрытие наносилось посредством магнетронного распыления графитовой мишени в атмосфере аргона при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. Ток разряда был 300 мА. Предварительно поверхность полимерной пленки очищалась для улучшения адгезионных свойств наносимой пленки. Остаточное давление составляло $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. Время напыления составило от 3 до 9 минут. Толщина полученных пленок была соответственно от 0,01–0,04 мкм. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав и стехиометрия диэлектрических пленок на ТМ

Метод	Состав пленки	Толщина, Å	Примеси
Катодное распыление	SiO, SiO_2,, Si_xO_y ,$Si_{3x}N_4$, $(C_2F_4)_n$	100-3000	O, Ar
Магнетронное распыление	Алмазоподобное углеродное SiO, SiO_2, Si_xO_y, $Si_{3x}N_4$, $(C_2F_4)_n$	100-3000	O

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Формирование пор в трековой матрице (облученная пленка ПЭТФ) (рисунок 1) производилось в кондуктометрической ячейке, приведенной на рисунке 2.



Рисунок 1. Облученная пленка ПЭТФ



Рисунок 2. Кондуктометрическая ячейка.

Исследуемый образец полимерной пленки является перегородкой между левой и правой частями камеры кондуктометрической ячейки, в которых находятся платиновые электроды. В качестве электролита использовалась щелочь NaOH, которая одновременно являлась раствором для травления латентных треков ионов в ПЭТФ пленке. Пленка помещалась в термостат вместе с раствором щелочи и после достижения необходимой температуры электролит переводился в камеру травления с помощью поршней. Все детали ячейки были выполнены из тефлона, за исключением электродов. К электродам от источника переменного тока звукового генератора подавалось переменное напряжение с амплитудой 1–2 В, частотой 1000 Гц. Регистрировалось падение напряжения на ячейке. При этом измеряемое сопротивление обратно пропорционально произведению площади поры на их число.

Проводился ряд экспериментов по травлению образцов с различной толщиной посредством двух и одностороннего травления. Образцы с напыленной пленкой SiO_2 подвергались двухстороннему травлению.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 3 представлены результаты зависимостей сопротивления в ячейке от времени травления исходной пленки, облученной ионами Ar, и пленки с напыленным SiO_2. На рисунке 4 представлена микрофотография пленки с напыленным SiO_2.

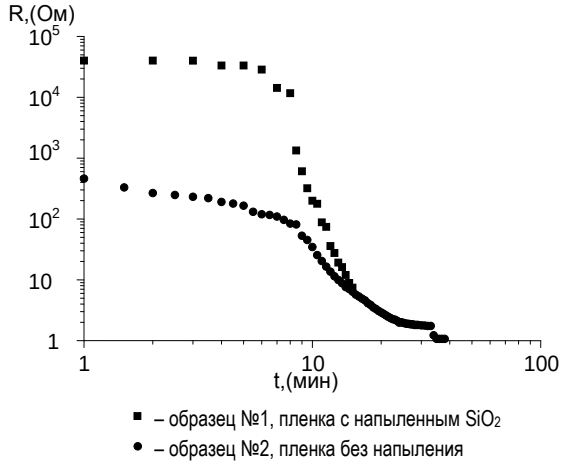


Рисунок 3. Зависимость R от t травления пленки в 2N растворе NaOH при температуре 73°C



Рисунок 4. Микрофотография мембраны с пленкой SiO_2.

При этом одна сторона образца с пленкой подвергается химическому травлению, а другая сторона образца контактирует и нейтрализуется. В результате получается мембрана с коническими порами. Сторона мембраны с меньшим диаметром пор является фактически селективным слоем. Ниже лежащий слой пленки с расширяющимися порами выполняет роль подложки [5].

Заключение

Разработана методика нанесения тонких пленок на поверхность ТМ, обеспечивающая контроль тонких слоев химически стойких материалов (SiO_2, CF_4, C) толщиной 10–13 мкм. Найдены также условия осаждения полимерных и оксидных пленок, при которых формируется пористая структура. Исследован химический состав тонких пленок и его структура в процессе химического травления. Исследован процесс травления треков в ТМ с нанесенным покрытием.

Литература

1. Флеров Г.Н. // Вестн. АН СССР, №4, 35 с. (1984)
2. Крючков Ю.Ю., Малютин В.М., Сохорева В.В. Экспериментальное исследование механизма обратного рассеяния заряженных частиц на атомных ядрах вблизи кулоновского барьера // Изв. вузов «Физика». - Томск - 1998.- Вып. - 4. – С. 84–92
3. Нечаев А.Н. Асимметричные трековые мембраны // Мембраны. – 2000. – № 6. – С. 17
4. H. Nedelmann et. all. Microwave plasma polymerization of acrylic acid on poly (ethylene terephthalate) track-etched membranes / / Surface and Coatings Technology, v. 116–119, Sept. 199, p. 973–980
5. Beumer, J. Gerrit et. all. Plasma polymer coatings on track-etched membranes // Polymer Preprints, Division of Polymer Chemistry, American Chemical Society, v. 38, Issue 1, April 1997 , p. 1006–1007
6. Сохорева В.В. и др. Трековые мембраны: особенности получения модификация мембранных свойств и темплейтные металлические микроструктуры // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 10/3. – С. 275–279

АРГОН ИОНЫМЕН САУЛЕНДІРІЛГЕН ПОЛИМЕРЛІ МАТРИЦАДАҒЫ АССИМЕТРИЯЛЫҚ ТРЕКТІ КУЫСТАРДЫН ҚАЛЫПТАСУЫ

Ахметшарипова Т.К., Сохорева В.В.

Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск, Рессей

Жұмыста тректі мембраналарды алудың жолдары классикалық У-120 циклотрон негізинде қарастырылған. Қарастырылған зерттеулер нәтижесінде химиялық тұрақты тректі мембрана (ТМ) құрастырылды. Кеуекті мембрана келесі жолмен алынды: полиэтилентерефталатты қабықша (ПҚ) арқылы 41 МэВ-та ион аргондарымен атқыланды, кеиіннен термиялық өңделініп және уландырылды. Оның химиялық құрамы қарастырылып, жұқа қабықшалары тексерілді. Тректі мембраналарды химиялық уландыру процессі қарастырылды. Зерттелген ассиметриялық тректі мембраналардың беттік қасиеттері каралып, плазмалық өңдеуден кеиінгі өзгерістер электронды микроскоп арқылы зерттелді.

ПҚ негізіндегі ТМ келесідей қолданылуы мүмкін: солватты иондардан тұздарды бөлу, биосенсерлі құрылғылардын құрамында биологиялық сұйықтықтардың анализін анықтау. Жұмыста келесі әдістер зерттелген: ПҚ 40Ar+8 мембранды матрицаларын сәулелендіру арқылы, катодты ыдырату, магнетронды ыдырату, резерфордтық кері ыдырату, біржақты және екіжақты уландыру.

Түйінді сөздер: *аргон иондары, полиэтилентерефталат, кондуктометриялік ұяшық, ассиметриялық тректі мембрана, аблация плазмалық.*

THE FORMATION OF ASYMMETRIC TRACK PORES IN POLYMER MATRIX IRRADIATED WITH ARGON ION

T.K. Ahmetsharipova, V.V. Sochoreva

National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The special features ion track membrane obtaining with use of U-120 classic cyclotron were considered. On the basis of studies made samples chemically resistant track membrane (TM). The structure of the porous membrane formed by irradiating a polyethylene terephthalate film (PETF) with argon ions with an E=41 MeV with subsequent thermal pretreatment and chemical etching. The chemical composition of the thin film and its structure in the process of chemical etching. The process of etching tracks in the TM coated. Studied the surface properties of ASTM after plasma treatment and after grafting monomers were observed under a scanning electron microscope. A decrease in pore size by increasing the thickness of the grafted layer on the walls of the cylindrical holes.

Track Membrane based PETF can be used for the separation of salts of solvated ions to a biosensor used in the analysis of small quantities of biological fluids. In this paper we used the methods of irradiating the membrane matrix PETF $^{40}Ar^{+8}$, sputtering, magnetron sputtering, Rutherford backscattering, one-sided and two-sided etching.

Keywords: *argon ions, polyethylene terephthalate, conductivity cell, asymmetric track pores, ablation plasma.*

УДК 533.6.011.8

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА

Бекмулдин М.К., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Микиша А.В.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье приведены результаты проведенных исследований по определению параметров потока гелия, генерируемого газодинамическим источником, на модели вакуумной камеры токамака КТМ. Определены характеристики источника сверхзвукового молекулярного пучка на модели вакуумной камеры токамака КТМ вакуумного стенда.

ВВЕДЕНИЕ

Во время разряда плазмы в токамаке КТМ происходит утечка заряженных частиц в диверторную область и в облицовку вакуумной камеры. В связи с этим для достижения стабильного рабочего режима токамака КТМ необходимо во время разряда поддерживать постоянным общее число частиц плазмы, то есть производить подпитку плазмы (компенсировать потери).

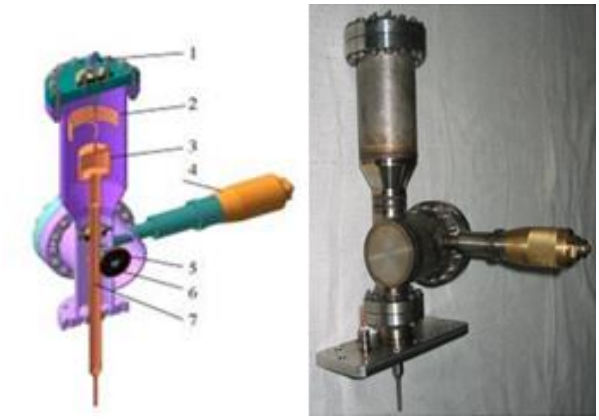
Для подпитки и гашения плазмы на установке КТМ предлагается использовать газодинамический источник молекулярного газового пучка (ГДИ). В настоящее время газодинамические источники молекулярных пучков уже применяются на некоторых исследовательских установках, в качестве систем подачи топлива и гашения плазмы [1, 2, 3].

Газодинамический метод изменения плотности плазмы основан на порционной подаче сверхзвукового молекулярного потока газа в вакуумную камеру токамака с «зажженной» плазмой. Сверхзвуковой поток обладает высокой энергией и может эффективно проникать внутрь плазменного потока. В зависимости от вида подаваемого газа (плазмообразующий газ или примесный газ), попавший в плазму молекулярный пучок или поддерживает горение плазмы, или приводит к ее тушению. Основным элементом системы изменения плотности плазмы, основанной на использовании газодинамического метода, является газодинамический источник сверхзвукового молекулярного пучка.

Для реализации метода подпитки и гашения плазмы разработано устройство на основе источника сверхзвукового молекулярного пучка и модель вакуумной камеры токамака КТМ, предназначенные для отработки режимов работы источника молекулярного пучка.

1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для отработки режимов подпитки и гашения плазмы на токамаке КТМ с помощью ГДИ газа была изготовлена модель вакуумной камеры токамака КТМ, представляющая собой 1/20 часть тороидальной вакуумной камеры токамака КТМ. Местом для установки ГДИ на модели вакуумной камеры определен верхний трековый патрубок, где минимальное расстояние от внутренней поверхности стенки токамака до границы плазмы составляет 50-60 мм. Такое расположение газодинамического источника молекулярного пучка является наиболее благоприятным с точки зрения реализации режимов подпитки и гашения плазмы [4]. Основными элементами ГДИ являются малогабаритный быстродействующий электромагнитный клапан, предназначенный для импульсной подачи газа в сопло, и, примыкающее к нему, сверхзвуковое газодинамическое сопло, которые устанавливаются на шток механизма перемещения сопла. На рисунке 1 показана конструктивная схема механизма перемещения импульсного клапана со сверхзвуковым соплом и его общий вид.

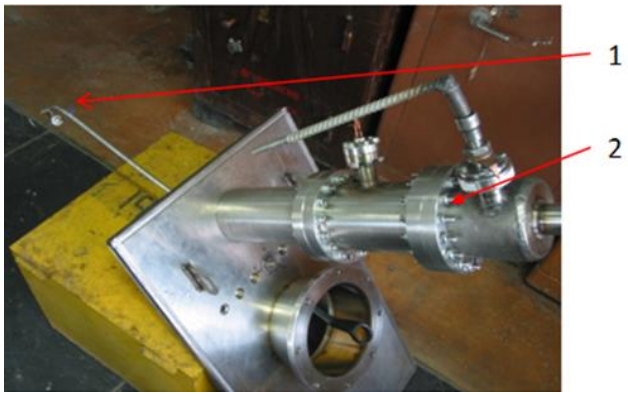


1 – штуцер подвода газа; 2 – трубопровод подачи газа; 3 – демпферный объем; 4 – ручка управления перемещением сопла; 5 – вал-шестерня; 6 – колесо-шестерня на вале; 7 – шток с трубопроводом

Рисунок 1. Общий вид и схема устройства перемещения сверхзвукового сопла ГДИ

Для определения параметров газодинамической струи были изготовлены специальные устройства: механизм перемещения газодинамического сопла ГДИ и механизм перемещения датчика давления с импульсной трубкой. С помощью механизма перемещения газодинамического сопла ГДИ выполняются операции по перемещению сопла вдоль оси струи газа, задавая, таким образом, расстояние от точки измерения давления до сопла. Внутри механизма имеется специальная система подачи рабочего газа в сверхзвуковое сопло, состоящая из трубопровода-

пружины, демпферного объема и штока – трубопровода подачи газа (см. рисунок 1). Разработанная конструкция позволяет перемещать сопло газодинамического источника молекулярного пучка вдоль потока на расстояние до 100 мм.

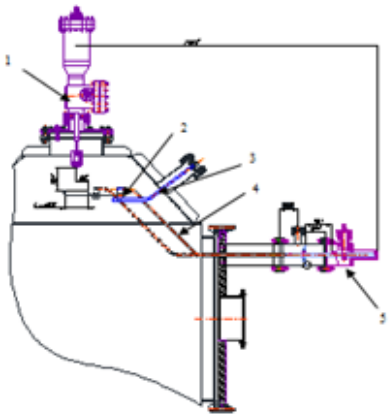


1 – датчик давления; 2 – устройство перемещения

Рисунок 2. Механизм для перемещения датчика давления



1 – газодинамический источник молекулярного пучка;
2 – механизм перемещения импульсного датчика давления



1 – устройство перемещения сопла ГДИ; 2 – датчик давления;
3 - направляющая; 4 – штанга; 5 – устройство перемещения датчика давления

Рисунок 3. Общий вид модели вакуумной камеры токамака КТМ с газодинамическим источником молекулярного пучка

Механизм перемещения датчика давления с импульсной трубкой предназначен для отбора давления в различных точках газового потока. Механизм перемещения датчика давления обеспечивает его движение в радиальном направлении относительно оси газодинамической струи на расстояние ±30 мм. Общий вид механизма перемещения датчика давления показан на рисунке 2.

Для проведения испытаний максимально приближенных к реальным условиям была изготовлена модель камеры токамака КТМ, представляющая собой 1/20 часть тороидальной камеры токамака.

На рисунке 3 показан общий вид модели вакуумной камеры токамака КТМ с газодинамическим источником и схема размещения на ней механизмов перемещения сопла и датчика давления.

Как видно из рисунка 3, механизм перемещения сопла устанавливается на специальный трековый патрубок, расположенный в верхней части вакуумной камеры, а механизм перемещения датчика давления для удобства проведения измерений на прямоугольный фланец камеры. Для измерения давления в потоке газа на расстоянии до 65 мм от сопла на механизм перемещения датчика давления установлена специальная штанга (4), которую от вибраций предохраняет направляющая (3). Вывод электрических сигналов от датчика давления до преобразователя сигнала осуществляется через специальный гермопроходник, вмонтированный в прямоугольный фланец модели вакуумной камеры.

2 Методика определения параметров сверхзвуковой струи газа

С целью определения параметров сверхзвуковой струи газа в вакууме на модели вакуумной камеры токамака КТМ были проведены эксперименты при давлении газа на входе в сопло ГДИ от 1,1 МПа до 4,1 МПа с длительностью подачи газа 30 мс и 50 мс. В качестве рабочего газа использовался **гелий.** Измерения параметров потока проводились как в осевом, так и в радиальном направлении. Расстояние от сопла до приемной трубки датчика давления задавалось путем перемещения сопла в диапазоне от 15 мм до 65 мм. Измерения в радиальном направлении от оси потока осуществлялись на расстоянии до ±9 мм, путем перемещения датчика давления с импульсной трубкой.

Эксперименты проводились в следующей последовательности. В модели вакуумной камеры с помощью двух форвакуумных и одного турбомолекулярного насосов поддерживалось давление около 10^{-5} Торр. В процессе эксперимента вакуумные насосы работали постоянно. Перед началом эксперимента приемная трубка датчика давления устанавливалась на минимальном расстоянии от сопла, равном 15 мм. В радиальном направлении с помощью устройства перемещения датчика давления приемная трубка размещалась в одном из крайних положений – на расстоянии до 9 мм от оси струи газа.

Перед электромагнитным клапаном подачи рабочего газа с помощью редуктора устанавливалось рабочее давление газа. Далее открывался импульсный клапан на время 30 мс и 50 мс. Регистрировалось изменение напряжения на датчике давления в точке размещения приемной трубки датчика давления с частотой 10^6 раз в секунду в течение 3 с. Затем приемная трубка передвигалась по радиусу потока с шагом 1 мм и эксперимент повторялся.

После прохождения всего диапазона изменения положения приемной трубки датчика давления по радиусу, сопло, с помощью устройства перемещения сопла, перемещалось на расстояние 10 мм и измерения по радиусу проводились снова.

3 Результаты испытаний

В таблице 1 приведены экспериментальные значения давления гелия по длине и радиусу молекулярного потока при разных значениях давления гелия перед соплом. Там же приведены расчетные значения плотности и скорости молекулярного потока газа [5].

Было определено экспериментальным путем, что распределение давления в потоке газодинамической струи практически не зависит от длительности импульса подачи гелия. Поэтому в таблице 1 приведены параметры газодинамической струи для одной длительности импульса подачи гелия 50 мс.

Согласно данным источника [6] давление приграничной плазмы в токамаке КТМ составляет P = 6900 Па при плотности плазмы $n_e = 0{,}5 \cdot 10^{20}$ 1/м^3. В таблице 1 выделены значения давления на оси струи гелия, полученные на расстоянии 55 мм от сопла ГДИ (минимальное расстояние от стенки до периферийной плазмы в вакуумной камере КТМ) близкие по своим значениям к параметрам приграничной плазмы в КТМ.

Таблица 1. Параметры гелия на оси струи при длительности импульса подачи 50 мс в зависимости от давления гелия перед соплом

Наименование параметра		Значение параметра					
		Расстояние между соплом и трубкой датчика давления, мм					
	Давление подачи газа, МПа	15	25	35	45	55	65
Давление газа в потоке, Па	1,1	1804,3	805,2	466,7	318,2	212,4	108,5
	1,6	10746,4	5389,4	2289,4	943,4	732,4	490,1
	2,1	38335,8	16416,9	8101,2	4715,1	3303,6	2305,6
	3,1	57940,3	27077,7	13861,9	9047,6	**5340,5**	3842,5
	3,6	68467,2	51923,6	29528,2	19172,3	**9922,3**	5967,8
	4,1	81912,2	65093,8	43801,6	26569,7	14246,7	8648,8
Плотность молекулярного потока газа ×10^{23},1/м^3	1,1	4,6	2	1,2	0,8	0,5	0,3
	1,6	27,2	13,6	5,8	2,4	1,9	1,2
	2,1	97	41,5	20,5	11,9	8,4	5,8
	3,1	146,6	68,5	35,1	22,9	**13,5**	9,7
	3,6	173,3	131,4	74,7	48,5	**25,1**	15,1
	4,1	207,3	164,7	110,8	67,2	36,1	21,9
Скорость потока газа, м/с	1,1	1606,6	1624,9	1634,3	1639,8	1644,7	1651,2
	1,6	1555	1584	1610,1	1628,9	1633,1	1639
	2,1	1494	1547,4	1579	1597,6	1607,7	1616,5
	3,1	1492,2	1541,5	1573,2	1589,1	1605,2	1613,7
	3,6	1491	1510,9	1544,9	1565,7	1591	1606,3
	4,1	1487,1	1504,2	1530	1556,7	1582,9	1599,5

На рисунке 4 показано распределение давления в потоке гелия в радиальном и осевом направлениях при давлении подачи газа 3,6 МПа. Указанное давление выбрано как одно из наиболее близких значений, необходимых для подпитки плазмы.

Для большей наглядности данных, представленных в таблице 1, были построены графики 5 и 6. На рисунке 6 приведена зависимость плотности молекулярного потока газа от давления перед соплом. Указанная зависимость приведена для расстояния 55 мм от сопла до импульсной трубки датчика давления. Красными точками показаны экспериментальные данные, аппроксимированные линией.

На рисунке 6 приведена зависимость давления газа в потоке от давления газа перед соплом на расстоянии 55 мм от сопла до трубки датчика давления.

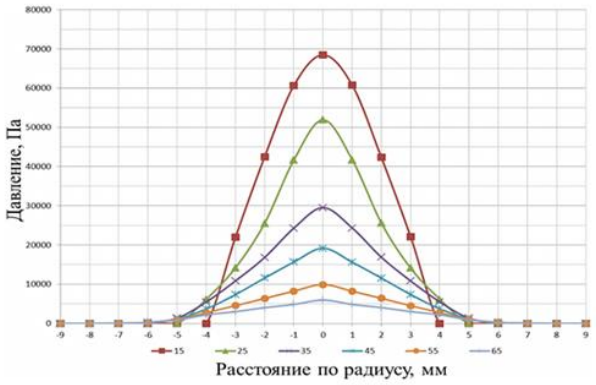


Рисунок 4. Изменение давления в потоке гелия в радиальном и осевом направлениях при давлении подачи газа 3,6 МПа

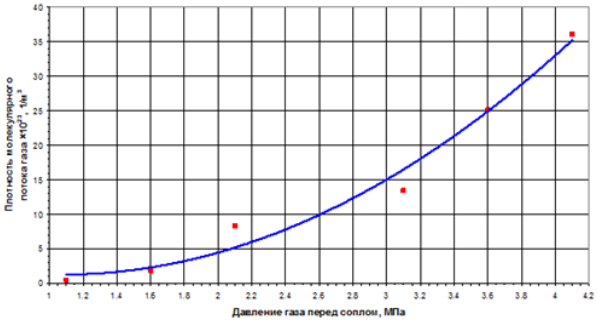


Рисунок 5. Изменение плотности потока газа от давления перед соплом на расстоянии 55 мм от сопла

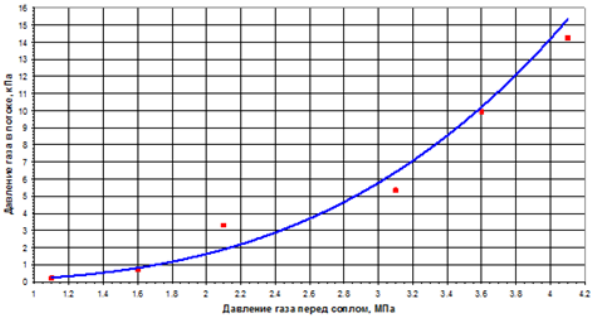


Рисунок 6. Зависимость давления газа в потоке от давления газа перед соплом на расстоянии 55 мм от сопла до трубки датчика давления

Для подпитки плазмы токамака значения давления и плотности молекулярного пучка газодинамического источника должны быть выше соответствующих параметров приграничной плазмы токамака КТМ. Из графиков, приведенных на рисунках 5 и 6, видно, что давление на оси струи гелия на расстоянии 55 мм от сопла ГДИ равное 6900 Па будет реализовано при значении давления газа перед соплом ГДИ 3,18 МПа (при плотности плазменного пучка $17{,}5 \cdot 10^{23}$ 1/м^3). На основании этого можно сделать заключение, что для осуществления режимов подпитки и гашения плазмы в токамаке КТМ необходимо создать давление газа перед соплом не менее 3,18 МПа.

Заключение

В ходе проведения экспериментов были определены параметры молекулярного потока гелия при различных значениях давления газа перед соплом и разной длительности импульса подачи газа. Получены данные о распределении давления в потоке гелия, как по радиусу, так и по длине газовой струи. Определены средняя плотность частиц в потоке гелия и скорость потока гелия на оси струи.

В результате проведенных исследований были достигнуты значения давления в струе газа и плотность частиц выше аналогичных параметров в периферийной плазме токамака КТМ. Проведенные эксперименты показывают, что для проникновения струи газа, генерируемой ГДИ, в плазму необходимо обеспечить уровень давления газа перед соплом ГДИ не менее 3,2 МПа.

Полученные данные показывают принципиальную возможность применения газодинамического источника молекулярного газового потока для подпитки и гашения плазмы на токамаке КТМ. Изготовленные элементы и устройства могут быть использованы для создания системы изменения плотности плазмы на КТМ и проведения дальнейших исследований эффективности газодинамического источника молекулярного пучка газа для подпитки и гашения плазмы непосредственно на токамаке КТМ.

Литература

1. Experiments With Supersonic Gas Injector on NSTX / V.A. Soukhanovskii, H. Kugel, R. Kaita.– NSTX FY' 04 Research Forum, 10-12 November 2003, Princeton, NJ;
2. Исследование состава смеси паров воды с аргоном методом масс-спектрометрии сверхзвукового молекулярного пучка / М.А. Ходорковский, Т.О. Артамонов, С.П. Мурашов [и др.] // ЖТФ.– 2007.– Т. 77, вып. 10;
3. Ленин, Л.В. Метод определения параметров сверхзвукового молекулярного пучка из времяпролетных спектров // Вестник Московского университета, сер. 2. Химия.– 1999.– Т. 40, вып. 2;
4. Разработка и обоснование проекта адаптации системы изменения плотности плазмы на основе ГДИ к токамаку КТМ: отчет о НИР (промежуточный) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. В.А. Зуев.– Курчатов, 2012 – 27 с;
5. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика: ч. 2.– Наука, 1991;
6. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ: эскизный проект. Книга 1.– Москва; Санкт-Петербург, 2000.– 101 с.

МОЛЕКУЛЯРЛЫҚ ШОҚТЫҢ ГАЗДЫ ДИНАМИКАЛЫҚ КӨЗІНІҢ НЕГІЗІНДЕ ПЛАЗМА ТЫҒЫЗДЫҒЫН ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІН СЫНАУ

Бекмулдин М.К., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Микиша А.В.

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада КТМ токамагінің ваккумдық камера моделінде өндірілетін гезды динамикалық көзімен гелий ағынының параметрларын анықтау бойынша жүргізілген зерттеулер нәтиежелері келтірілді. Ваккумдық стендтің КТМ токамагінің ваккумдық камера моделіне асыра дыбысты молекулярлық шоқ көзінің сипаттамалары анықталды.

TESTING THE PLASMA DENSITY CHANGE SYSTEM BASED ON GAS-DYNAMIC SOURCE OF MOLECULAR BEAM

M.K. Bekmuldin, V.A. Zuyev, D.A. Ganovichev, A.V. Mikisha

Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper addresses results of conducted experiments on identifying parameters of the helium flux generating with gas-dynamic source based on the model of KTM tokamak vacuum chamber. The study determines properties of the source of supersonic molecular beam on the model of KTM tokamak vacuum stand.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО КАНАЛЬНОГО РЕАКТОРА

Иданова Д.С., Котов В.М.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе рассчитаны нейтронно-физические характеристики вариантов реактора, отличающихся составом топлива, материалом оболочек твэлов и корпуса ТВС, типом решетки ТВС, их количеством и шагом, наличием компенсаторов избытка реактивности с выработкой делящихся материалов, составом замедлителя и отражателя, размерами отражателя. Критерием оптимизации служила величина воспроизводства делящихся нуклидов в различных видах кампании. Показаны преимущества варианта реактора, обеспечивающего полное использование природного урана, стабильность работы реактора и достижение высокого выгорания в топливе.

Введение

Газоохлаждаемый канальный реактор с водным замедлителем [1] имеет ряд преимуществ перед существующими реакторами и известными проектами перспективных реакторов по эффективности использования природного урана, достижимому коэффициенту полезного действия, малой материалоемкости и высокой экономической эффективности в целом.

В работе [1, 2] рассмотрены варианты замедлителя и отражателя, содержащие тяжелую воду и смесь тяжелой и обычной воды в различных пропорциях, использовано урановое топливо.

Данный тип реактора имеет хорошие предпосылки для повышения воспроизводства делящихся нуклидов и снижения потребности в природном уране. Основой этому может служить использование компенсаторов избытка реактивности с выработкой делящихся материалов [3]. То есть, основа работы состоит в использовании для компенсации избыточной реактивности поглощения нейтронов в торий, обеспечивающего наработку делящегося ^{233}U, имеющего предшественника с большим периодом полураспада.

Работа проведена с целью совершенствования нейтронно-физических характеристик газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем.

Проведенные расчеты нейтронно-физических характеристик вариантов реактора отличались составом топлива, материалом оболочек твэлов и корпуса ТВС, типом решетки ТВС, их количеством и шагом, наличием компенсаторов избытка реактивности с выработкой делящихся материалов, составом замедлителя и отражателя, толщиной отражателя.

Конструкция реактора

Исследуемый реактор содержит 549 ТВС, в каждой ТВС содержится 59 твэлов с металлическим сердечником. Основа сердечника – ^{238}U. Плотность урана в сердечнике установлена 10 г/см^3, что соответствует количеству урана в диоксидном топливе. Для исключения влияния распухания сердечника при облучении он выполнен по решению [4]. Оболочка твэлов и корпус ТВС выполнены из циркониевых сплавов. Между твэлами и корпусом ТВС тепловой экран не устанавливается. Высота ТВС 220 см. В углах решетки ТВС установлены компенсаторы избытка реактивности, содержащие торий. В верхнем и нижнем отражателе установлены тракты прохода теплоносителя. Принципиальная схема АЭС на основе газоохлаждаемого реактора представлена на рисунке 1.

Материалы замедлителя и отражателя

В работах [1, 2] рассмотрены варианты отражателя и замедлителя, выполненные из смесей тяжелой и обычной воды. Хорошие результаты получены для смеси, содержащей 95 % тяжелой воды. При этом шаг треугольной решетки ТВС составляет 16 см.

Использование тяжелой воды в таких объемах требует больших финансовых затрат. В настоящей работе предпринята попытка замены части тяжелой воды на графит, имеющий достаточно хорошие нейтронно-физические характеристики и меньшую стоимость. Совместное размещение графита и воды приводит к необходимости решения определенных задач. Во-первых, пористость графита приведет к проникновению воды в эти поры, соответственно, к изменению характеристик миграции нейтронов. Во-вторых, по условиям работы реактора с использованием энергии замедления нейтронов и протечек из ТВС в замедлитель, необходимо оставлять водный зазор вблизи ТВС. В таблице 1 приведены основные расчетные данные по вариантам активной зоны, отличающимся составами замедлителя и отражателя.

Замена части тяжелой воды на графит в варианте 2 приводит к некоторому снижению утечки нейтронов, увеличению доли поглощения в ^{238}U (за счет изменения спектра нейтронов в топливе и увеличения резонансного поглощения нейтронов), снижению деления в ^{233}U и ^{235}U и, в целом, к падению $K_{эфф}$ на 10 %.

В варианте 4 наблюдается дальнейшее уменьшение утечки, величина поглощения в ^{238}U остается близкой к варианту 2 и рост деления в ^{233}U и ^{235}U против варианта 2, $K_{эфф}$ остается меньшим, чем в ва-

рианте 1, но большее поглощение в ^{238}U существенно компенсирует этот недостаток.

Изменение спектра нейтронов в топливе и увеличение резонансного поглощения нейтронов будет наблюдаться в дальнейших исследованиях при образовании ^{241}Pu, что положительно скажется на характеристиках кампании с урановым топливом.

Вариант 4 является лучшим из рассмотренных.

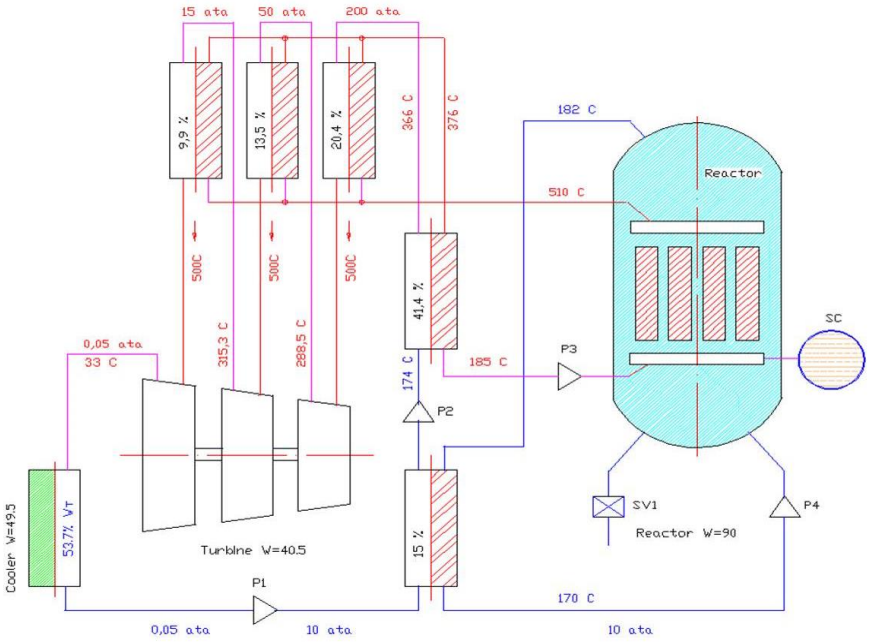


Рисунок 1. Принципиальная схема АЭС с ГО реактором и циклом Ренкина

Таблица 1. Характеристики вариантов активной зоны

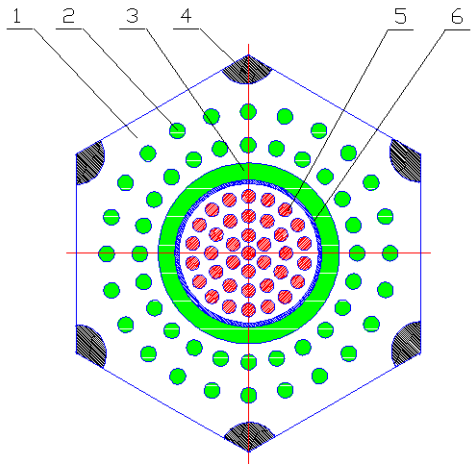
Место	Параметр \ Вариант	1	2	3	4
Замедлитель по массе	D_2O, %	100	23	36	45
	C, %	0	77	64	55
Отражатель по массе	D_2O, %	100	23	23	23
	C, %	0	77	77	77
Реактор	$K_{эфф}$	1,098	0,969	0,997	1,033
	Утечка, %	4,56	3,89	3,67	3,28
Торий	Поглощение, %	22,6	22,0	22,6	22,0
Отражатель	Поглощение, %	0,65	2,5	2,4	2,2
Топливо, %	^{233}U деление	24	21	22	23
	^{235}U деление	19	16	16	17
	^{238}U деление	1,5	1,8	1,7	1,6
	^{233}U поглощение	2,7	2,6	2,6	2,7
	^{235}U поглощение	4,1	3,8	3,9	3,9
	^{238}U поглощение	21,0	25,0	24,0	24,0

ТИПЫ РЕШЕТОК ТВС

Первоначально исследовались треугольные решетки ТВС с шагом 16 см. Между ТВС в углах решеток устанавливались ториевые стержни (рисунок 2).

Было установлено, что при переходе к квадратным ячейкам ТВС с одинаковой площадью замедлителя расстояние от ТВС до ториевых стержней увеличивается. Это создает предпосылки для снижения доли быстрых нейтронов в ториевых стержнях.

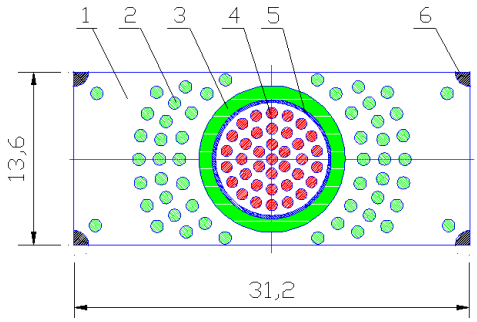
Было найдено техническое решение, обеспечивающее возможность дальнейшего уменьшения доли быстрых нейтронов в ториевых стержнях, и, соответственно, уменьшения образования вредной цепочки ^{232}Pa – ^{232}U – ^{208}Tl. Решение заключается в использовании прямоугольной решетки. При этом количество ТВС в активной зоне составило 342 штуки. На рисунке 3 представлена геометрия такой решетки, имеющей равную площадь с треугольной решеткой шага 16 см.



1 - графитовый замедлитель, 2 - каналы с тяжелой водой,
3 - зазор тяжелой воды, 4 - ториевые стержни, 5 - твэлы с топливом,
6 - корпус ТВС

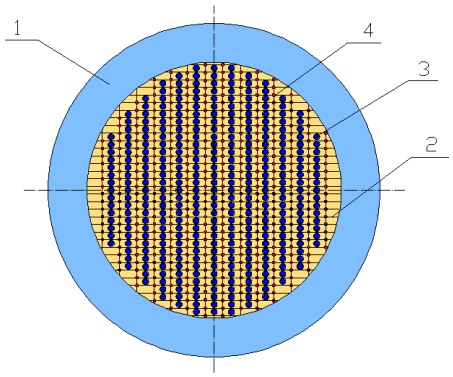
Рисунок 2. Ячейка ТВС и ториевых стержней треугольной решетки

Отверстия в графите обеспечивают высокие характеристики миграции нейтронов и, кроме того, обеспечивают повышение доли воды замедлителя в ходе парообразования, необходимого для гашения реактивности в аварийной ситуации.



1 - графитовый замедлитель, 2 - каналы с тяжелой водой,
3 - зазор тяжелой воды, 4 - твэлы с топливом, 5 - корпус ТВС,
6 – ториевые стержни

Рисунок 3. Ячейка ТВС и ториевых стержней прямоугольной решетки



1 - отражатель боковой, 2 - замедлитель, 3 – каналы ТВС,
4 – ториевые стержни

Рисунок 4. Схема реактора с прямоугольной решеткой ТВС

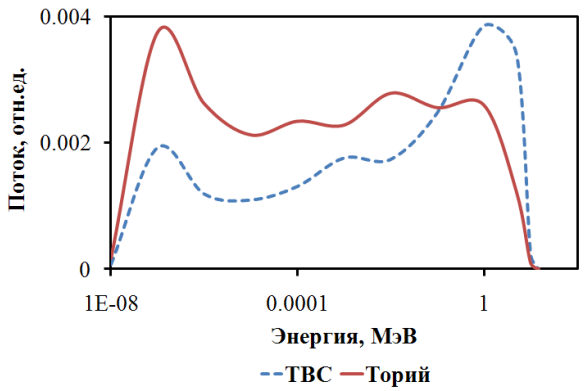
Геометрия активной зоны с использованием прямоугольной решетки представлена на рисунке 4.

На рисунке 5 показаны спектры нейтронов в ТВС и ториевых стержнях для треугольной и прямоугольной решеток. Видно, что поток быстрых нейтронов, участвующих в n-2n реакции на ^{232}Pa в ториевых стержнях в прямоугольной решетке в 6-8 раз меньше, чем в треугольной решетке и более чем в 30 раз меньше, чем в твэлах ТВС. [5].

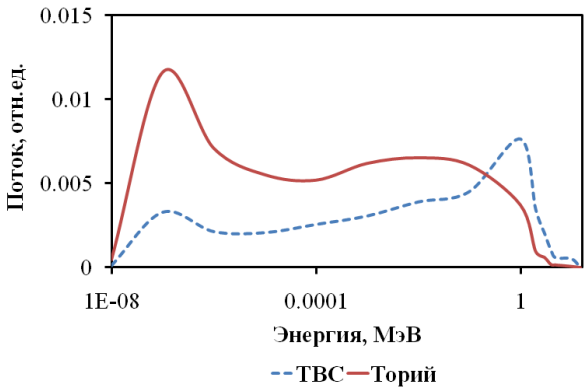
ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ В ТОРИИ

Исследовано влияние ^{233}U, накапливаемого в тории, на спектр нейтронов. Для стабилизации температуры тория ведется его охлаждение. При использовании охлаждаемых ториевых стержней наблюдается различие в потоке тепловых нейтронов в тории. При охлаждении обычной водой поток тепловых нейтронов в тории выше, чем в случае охлаждения тяжелой водой. Близкая картина наблюдается при добавлении в торий 0,2 % ^{233}U. Поток быстрых нейтронов в тории стал больше в 1,5 раза. Относительный поток тепловых нейтронов в ТВС стал меньше (таблица 2).

Наличие ^{233}U в тории не повлияло в значительной мере на образование ^{232}U в данной технологии.



а) Треугольная решетка



б) Прямоугольная решетка

Рисунок 5. Спектры нейтронов в ТВС и ториевых стержнях

ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

В предыдущих работах материалы оболочек твэлов и корпуса ТВС выполнены на основе сплава циркония с добавкой 1 % ниобия. В ряде вариантов использовался изотопно модифицированный цирконий – ^{90}Zr. В таблице 3 приведены характеристики реакторов, отличающихся составом циркониевых сплавов оболочек твэлов и корпусов ТВС. Сплав циркалой на основе ^{90}Zr и ^{120}Sn показал лучшие характеристики со снижением поглощения относительно широко используемого сплава природного циркония и ниобия на 1,4 %. Эта замена позволит выработать дополнительно 15,9 кг ^{233}U в реакторе с прямоугольной решеткой.

ВАРИАНТЫ КАМПАНИИ РЕАКТОРА

Расчет характеристик кампании проводился таким образом, чтобы при заданном начальном содержании делящихся веществ в топливе и выработке ^{233}U в ториевых стержнях обеспечивалась длительность работы реактора, соответствующая выгоранию не менее 50 МВт·сут/кг. Выработанный в ходе кампании ^{233}U устанавливался в свежее топливо последующих кампаний.

Рассматривались варианты с различными соотношениями ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu и ^{241}Pu в начальном топливе. Общее содержание делящихся нуклидов в топливе находилось на уровне 2,5 % от общей массы топлива. Начальное содержание делящихся веществ в топливе и количество тория в стержнях решетки задавались таким образом, чтобы $K_{эфф}$ был близок к единице. В расчетах использовался вариант с лучшей композицией замедлителя, отражателя, оболочек твэлов и корпуса ТВС.

Наилучший результат по ряду характеристик, как и предсказывалось в [3], был получен при соответствии начального содержания ^{239}Pu и ^{241}Pu их равновесному содержанию в кампании. Для ^{239}Pu это соответствует 0,5%.

Оказалось, что в данных условиях выработка ^{233}U существенно превосходила его выгорание в кампании с выгоранием топлива на уровне 50 МВт·сут/кг. Это позволило уменьшить до нуля потребность в ^{235}U, рассмотреть варианты как с замкнутым топливным циклом (начальное и конечное содержание делящихся нуклидов одинаково), так и с нулевым содержанием ^{239}Pu и ^{241}Pu. В таблице 4 приведены примеры характеристик кампаний с различным составом делящихся веществ в начальном топливе [6].

Таблица 2. Поток нейтронов в охлаждаемых водой ториевых стержнях и в ТВС

	$\Phi_{макс}$, МэВ/г	Th + обычная вода	Th + тяжелая вода	Th +^{233}U + обычная вода	Th +^{233}U + тяжелая вода
Торий	Тепловые нейтроны	2,56	2,45	2,38	2,23
	Быстрые нейтроны	0,02	0,02	0,03	0,03
ТВС	Тепловые нейтроны	1	1	0,95	0,97
	Быстрые нейтроны	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблица 3. Характеристики реакторов, отличающихся составом циркониевых сплавов

Состав сплава циркония	Поглощение нейтронов, %
Zr прир - 99 %, ^{93}Nb - 1 %	1,68
^{90}Zr - 98 %, ^{91}Zr - 1 %, ^{93}Nb - 1 %	0,5
^{90}Zr - 99 %, ^{93}Nb - 1 %	0,4
^{90}Zr - 98 %, ^{120}Sn - 5 %	0,33
^{90}Zr - 98 %, ^{120}Sn - 2 %	0,28

Таблица 4. Характеристики кампаний вариантов газоохлаждаемого реактора

Вариант		1	2	3	4
Решетка		**Треугольная**		**Прямоугольная**	
Начало кампании	^{235}U, %	1,0	0,5	0,5	0,14
	^{233}U, %	1,5	1,4	1,4	0,5
	^{239}Pu, %	-	0,72	0,72	0,72
	^{241}Pu, %	-	-	-	0,21
	^{232}Th, кг	15709	15709	11523	7607
	^{238}U, кг	17235	17408	10844	10958
	mTh/m^{238}U	0,911	0,902	1,063	0,69
Конец кампании	Выгорание, МВт·сут/кг	42,23	39,16	63,12	74,38
	^{235}U, %	0,08	0,07	0,03	0,01
	^{233}U, %	0,07	0,11	0,03	0,005
	^{239}Pu, %	0,6	0,75	0,75	0,62
	^{241}Pu, %	0,2	0,21	0,23	0,17
	^{232}Th, кг – %	14722 – 93,7	14732 – 93,8	10436 – 90,6	6670 – 87,7
	^{238}U, кг – %	16457 – 95,5	16741 – 96,2	10186 – 93,9	10200 – 93,1

Достижимое выгорание в приведенных вариантах кампании зависит от начального состава делящихся веществ и того, какое количество тория устанавливается для воспроизводства ^{233}U. Лучший результат достигается при начальном содержании ^{239}Pu и ^{241}Pu равном (или близком) равновесному их значению для данного реактора и потока нейтронов. Заметим, что при уменьшении размерности реактора с прямоугольной ячейкой ТВС (с 17 тонн до 11 тонн по ^{238}U) характеристики воспроизводства делящихся веществ остались на одинаковом уровне.

На рисунке 6 показано изменение количества делящихся веществ в период кампании реактора в ТВС и стержнях с торием.

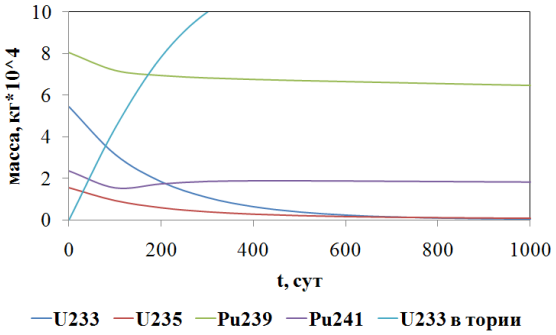
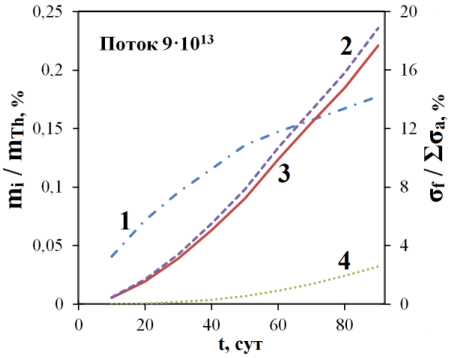


Рисунок 6. Динамика накопления и выгорания ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu в ТВС и стержнях с торием

На рисунке 7 представлены зависимости накопления ^{233}Pa, ^{233}U и продуктов деления в ториевом стержне и изменение отношения суммарного сечения деления, к суммарному сечению поглощения в ториевом стержне в ходе облучения в реакторе. Время облучения поддерживают таким, чтобы сечение поглощения стержня уменьшалось не более чем на 20 %.



1 - ^{233}Pa, 2 - сечение деления/ сечение поглощения, 3 - ^{233}U, 4 - продукты деления

Рисунок 7. Характеристики производства ^{233}U в ториевых стержнях

Ход уменьшения количества ^{233}Pa в ходе выдержки представлен на рисунке 8. При времени выдержки 120 суток количество протактиния снижается до 2 %.

Следует отметить, что существующая программа расчета характеристик кампании [6] рассчитана на установку всех топливных нуклидов в состав ТВС, а в предлагаемой технологии торий устанавливается вне ТВС. В ближайшем будущем программа [6] будет модернизирована. Для оценки работоспособности реактора в конце кампании в настоящей работе проводился расчет характеристик реактора в конце кампании с учетом выгорания ^{233}U и ^{235}U, которые не воспроизводятся в топливе в ходе работы реактора, а устанавливаются в свежее топливо.

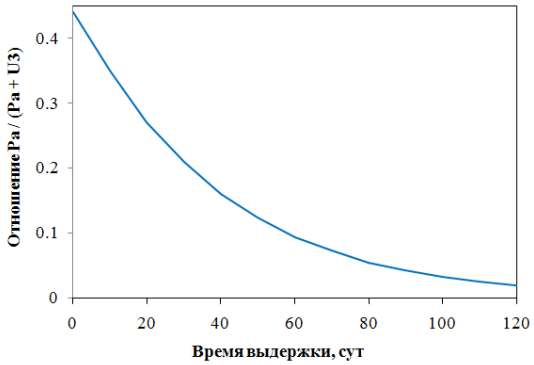


Рисунок 8. Отношение количества ^{233}Pa к количеству ^{233}Pa и ^{233}U в ходе выдержки

Программа будет модернизирована для получения характеристик оптимизации перестановок ториевых стержней. Расчеты подтвердили работоспособность всех приведенных вариантов.

Выводы

Предложенный газоохлаждаемый реактор с гелием в качестве теплоносителя обеспечивает высокое воспроизводство делящихся нуклидов благодаря ряду принятых технических решений. Расчет нейтронно-физических характеристик показал, что применение гомогенизации графита и тяжелой воды в качестве отражателя и замедлителя обеспечивает необходимую миграцию нейтронов к компенсаторам избытка реактивности из тория и решает проблему дороговизны тяжелой воды.

Показана возможность применения сплава циркалоя на основе ^{90}Zr (98 %) и ^{120}Sn (2 %), обеспечивающего существенное снижение поглощения нейтронов в оболочках твэлов и корпусах ТВС.

Использование прямоугольной решетки ТВС сводит к минимуму возможность реакции n-2n в ^{232}Th и, соответственно, к уменьшению радиационной опасности при получении ^{233}U.

Работа с поддержанием равновесного содержания ^{239}Pu и ^{241}Pu в ходе кампании обеспечивает оптимальные условия как по воспроизводству делящихся веществ, так и по достижению максимального выгорания.

Предлагаемый реактор может эффективно работать в различных типах топливных циклов, открытых и замкнутых, с использованием урана из отвалов обогатительных производств, с практически полным использованием природного урана в замкнутом цикле.

Литература

1. Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С. Возможности газоохлаждаемых реакторов с водяным замедлителе// Атомная энергия – 2014. – Вып.1.– С. 6–10.
2. Котов В.М., Сураев А.С. Расчет характеристик газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем// Вестник НЯЦ РК – 2014. – Вып.4.– С. 87–92.
3. Kotov V.M. Termal reactors with high reproduction of fission materials. – In: Nuclear Power – Practical Aspects. Rijeka: Intechopen.com, 2012, p. 179–218.
4. Котов В.М., Ерыгина Л.А. Твэл с составным металлическим сердечником. - Заключение о выдаче инновационного патента на изобретение. Национальный институт интеллектуальной собственности Министерства юстиции РК. № 250/14 от 10 декабря 2014 г.
5. MCNP/5: A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, 2003.
6. Котов В.М., Иркимбеков Р.А. Расчет характеристик кампании энергетических реакторов // Вестник НЯЦ РК – 2011. – Вып.3. – С. 118–122.

ГАЗБЕН САЛҚЫНДАТЫЛАТЫН КАНАЛДЫҚ РЕАКТОРДЫҢ НЕЙТРОНДЫҚ-ФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Иданова Д.С., Котов В.М.

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста реактор нұсқаларының отын құрамымен, ЖШЖ корпусы және твэлдер қабықшаларының материалымен, ЖШЖ торының типімен, оның қадамы және санымен, бөлінетін материалдардың өнімімен реактивтілігінің артық өтемдеуіштердің барымен, баяулатқыш пен шағылыстырғыштың құрамымен, шағылыстырғыштың өлшемдерімен ерекшеленетін нейтрондық-физикалық сипаттамалары есептелінді. Оңтайландыру белгілері болып кампанияның әр түрлі түрлерінде бөлінетін нуклидтердің ұдайы өндіріс мөлшері қызмет етті. Табиғи уранды толық пайдалануды, реактор жұмысының тұрақтылығын және отында жоғары күйіп кетуіне жетуді қамтамасыз ететін реактор нұсқасының артықшылығы көрсетілді.

STUDY OF NEUTRONIC PROPERTIES OF GAS-COOLED PRESSURIZED-TUBE REACTOR

D.S. Idanova, V.M. Kotov

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The study calculates neutronic properties for variants of the reactor having differences in fuel composition, material of fuel pin cladding and FA housing cladding, their quantity and pitches; presence of excess reactivity compensator with fission materials’ production, composition of moderator and reflector and dimensions of the reflector. The value of reproduction of fissile nuclides in various types of campaigns is the criterion for optimization. The paper illustrates advantages of type of reactor fully ensuring usage of natural uranium, stable reactor operating and achieving high burnup in the fuel.

УДК 504.05(574.42-2С)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ЗЕЛЕНЫЕ НАСАЖДЕНИЯ

[1, 2] Надырова А.Р., [1] Ермоленко М.В., [1] Степанова О.А.

[1] Государственный университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан
[2] Филиал ‹‹Институт атомной энергии›› РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В результате работы был изучен качественный и количественный состав выбросов от теплоснабжающих предприятий города Семей в зависимости от времени года, исследовано содержание тяжелых металлов в снеге и ветвях растений котельных города Семей.

Введение

В современном городе складывается специфическая и во многом неблагоприятная для жизнедеятельности человека экологическая обстановка. Ее отличительными особенностями являются повышенное содержание атмосферных загрязнений, более резкие колебания температурного и радиационного режимов, наличие шума и вибраций разного рода и т.д. [1].

В настоящее время негативное воздействие загрязнения атмосферного воздуха на растительность очевидно. Воздух никогда не бывает чистым. Атмосферный воздух представляет собой удивительную смесь газов и паров, а также микроскопических частиц различного происхождения. Естественно, что не каждый компонент атмосферного воздуха является загрязняющим веществом. К ним следует отнести те составляющие атмосферы, которые оказывают неблагоприятное воздействие на растения. Эффекты воздействия некоторых веществ на растения могут быть уловимыми, но приводящими к физиологическим нарушениям, а в отдельных случаях и к полному отмиранию и гибели растения. Отрицательное воздействие на растения оказывают практически все атмосферные выбросы, однако, особого внимания заслуживают так называемые приоритетные загрязняющие вещества:

- окислы серы, образующиеся при сгорании ископаемого топлива;
- мелкие частицы тяжёлых металлов;
- углеводороды и окись углерода, содержащиеся в выхлопных газах автотранспорта;
- соединения фтора, образующиеся при производстве алюминия и фосфатов;
- фотохимическое загрязнение.

Именно эти соединения приносят наибольший вред растительности, однако, перечень загрязняющих веществ ими не ограничивается. Хлориды, аммиак, окислы азота, пестициды, пыль, этилен, а также комбинации всех этих веществ могут причинять вред растительности.

Среди указанных выше загрязняющих веществ наибольшую опасность для растений, произрастающих в черте города, представляют выбросы в атмосферу, а также углеводороды и окись углерода.

Действие каждого загрязняющего вещества на растения зависит от его концентрации и продолжительности воздействия; в свою очередь каждый вид растительности по-разному реагирует на действие различных веществ. Более того, каждая реакция растения на загрязнение воздуха может быть ослаблена или усилена влиянием многих геофизических факторов. Таким образом, число возможных сочетаний загрязняющих веществ, изменение времени их воздействия, при котором появляются негативные эффекты, являются бесконечными.

Общеизвестно, что значительное количество загрязняющих веществ по мере их выпадения из атмосферы осаждается на растительность. Далее эти вещества проникают в растения и их внутриклеточное пространство, где некоторое абсорбируются клетками растения и может возникнуть взаимодействие с компонентами клетки. Очевидно, что только после завершения всех этих процессов можно выявить токсичность загрязняющего вещества.

Самым простым, дешевым, натуральным очистителем воздуха считается высадка быстрорастущих пород деревьев и кустарников. В последнее время в качестве интегрального показателя загрязненности атмосферы в зимний период, приходящийся на отопительный сезон, используется снег. В связи с этим актуальным является исследование техногенного воздействия энергетических предприятий на зеленые насаждения и снег, с целью разработки дальнейших мер по улучшению экологической обстановки города.

Целью данной работы является исследование техногенного воздействия энергетических предприятий на зеленые насаждения и снег.

1 Выбросы ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей

По данным инвентаризации источников выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от источников ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей были определены выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, описаны и охарактеризованы процессы производства как источников загрязнения атмосферы [2].

Источниками загрязнения ГКП «Теплокоммунэнерго» выбрасываются в атмосферу 26 загрязняющих вредных веществ, из них:

– твердые: железо оксиды, марганец и его соединения, углерод черный (сажа), взвешенные частицы PM10, бензапирен, мазутная зола, пыль неорганическая: 70-20% двуокиси кремния, пыль абразивная, пыль неорганическая ниже 20% двуокиси кремния.

– жидкие и газообразные: азот диоксид, азот оксид, серная кислота, сера диоксид, сероводород, углерод оксид, фтористые газообразные соединения, смесь углеводородов предельных С1-С5, смесь углеводородов предельных С6-С10, пентилены, бензол, ксилол, толуол, этилбензол, углеводороды предельные С12-19, бензин, керосин.

Суммарные выбросы для ГКП «Теплокоммунэнерго» (таблица 1) согласно существующему положению на 2012 год и разработанному проекту на 2013-2017 годы составляют – 14684.443883 т/год, в т.ч.: твердых – 6073.2087571 т/год, жидкие и газообразные – 8611.235126 т/год [2].

Наибольшее количество выбросов приходится на пыль неорганическую, углерода оксид, серы диоксид и азот (рисунок 1), содержание остальных вредных веществ составляет менее 1 % от общего количества выбросов.

В сумме представленные на графике выбросы составляют 99% от общего количества выбросов.



Рисунок 1. Процентное содержание выбросов от общего количества выбросов ГКП «Теплокоммунэнерго» г. Семей

2 Методика и результаты исследования

В качестве объекта исследования были выбраны 6 котельных и одна ТЭЦ города Семей, расположенных в разных частях города.

Для определения количественного содержания накопленных вредных веществ отбор проб снега и древесных растений проводили единовременно: в начале (декабрь), середине (январь) и конце (апрель) отопительного периода.

Веточки срезали специальными ножницами и помещали в подготовленные полиэтиленовые пакеты, плотно закрывали для транспортировки в лабораторию. На пакете обозначали маркировку места отбора пробы [3, 4].

Таблица 1. Суммарные выбросы для ГКП «Теплокоммунэнерго»

Наименование загрязняющего вещества	Всего выброшено в атмосферу т/год
ВСЕГО:	14684.44388
в том числе:	
Твердые	6073.208757
PM10 – взвешенные частицы диаметром менее 10 мкм	0.089134
Железо (II, III) оксиды /в пересчете на железо/	0.06406
Марганец и его соединения /в пересчете на марганца (IV) оксид/	0.009184
Углерод черный (Сажа)	0.0939078
Бензапирен	0.000398
Мазутная зола теплоэлектростанций / в пересчете на ванадий/	1.7909
Пыль неорганическая: 70-20% двуокиси кремния (шамот, цемент, пыль цементного производства - глина, глинистый сланец, доменный шлак, песок, клинкер, зола,кремнезем и др.)	6020.568574
Пыль неорганическая: ниже 20% двуокиси кремния	50.5503753
Пыль абразивная	0.042224
Газообразные и жидкие	8611.235126
Азот (IV) оксид (Азота диоксид)	1003.902467
Азот (II) оксид (Азота оксид)	0.07387826
Серная кислота	0.000000587
Сера диоксид	3044.618963
Сероводород	0.00405971
Углерод оксид	4561.08755
Фтористые газообразные соединения (гидрофторид, кремний тетрафторид) /в пересчете на фтор/	0.004887
Смесь углеводородов предельных С1-С5	0.053735
Смесь углеводородов предельныхС6-С10	0.0130784
Пентилены (амилены – смесь изомеров)	0.00177925
Бензол	0.001423
Ксилол (смесь изомеров о-, м-, п-)	0.000106785
Толуол	0.00103206
Этилбензол	0.000035575
Бензин (нефтяной, малосернистый) /в пересчете на углерод/	0.411004
Керосин	0.212645
Углеводороды предельные С12-19 /в пересчете на С/	0.848481

Отбор проб снега проводили почти на всю глубину снежной толщи. Снег отбирали пластмассовой бутылкой без дна с диаметром свыше 100 мм. Выделенный снеговой блок переносили совком в подготовленные полиэтиленовые пакеты или чистые банки, плотно закрывали для транспортировки в лабораторию. На пакете или банке обозначали маркировку места отбора пробы [3, 4].

Экспериментальные исследования образцов древесных растений и снега проводились в испытательной региональной лаборатории инженерного профи-

ля «Научный центр радиоэкологических исследований» Государственного университета имени Шакарима города Семей.

Результаты данных исследований отображены в протоколах испытаний. Были проведены масс-спектральный и рентгеноспектральный анализы.

По результатам рентгеноспектрального анализа существенных различий в микроструктуре растений не наблюдаются. Со всех котельных были взяты образцы проб клена и лишь с центральной котельной были взяты пробы березы (рисунок 2). Пористость существенных различий не имеет.

По результатам проведения масс-спектрального анализа содержание в образцах растений и снега таких химических элементов как барий, хром, марганец, мышьяк, кобальт, никель, медь, цинк, кадмий, рубидий, свинец, селен, стронций не превышало 1 мг/кг. Содержание остальных химических элементов представлено графически на рисунках 3–5.

Для нормального роста и развития растениям необходимо сбалансированный состав, который обеспечивается за счет макро- и микроэлементов. Недостаток того или иного элемента приводит к возникновению физиологических расстройств и к поражению растений неинфекционными заболеваниями и даже к гибели.

Исходя из представленных графиков, можно сделать вывод по содержанию элементов в образцах.

Наибольшая концентрация калия находится в образцах растений, взятых с РК 1, наименьшая концентрация калия в образцах растений, взятых Центральной котельной. Калий не входит в состав органических соединений растений. Однако он играет важнейшую физиологическую роль в углеводном и белковом обмене растений, активизирует использование азота в аммиачной форме, влияет на физическое состояние коллоидов клетки, повышает водоудерживающую способность протоплазмы, устойчивость растений к увяданию и преждевременному обезвоживанию и тем самым увеличивает сопротивляемость растений кратковременным засухам.

При недостатке калия (несмотря на достаточное количество углеводов и азота) в растениях подавляется передвижение углеводов, снижается интенсивность фотосинтеза, восстановления нитратов и синтеза белка.

Наибольшая концентрация фосфора находится в образцах растений, взятых с Центральной котельной, наименьшая концентрация фосфора в образцах растений, взятых с ТЭЦ 1. Фосфор участвует в обмене веществ, делении клеток, размножении, передаче наследственных свойств и в других сложнейших процессах, происходящих в растении.

Наибольшая концентрация магния находится в образцах растений, взятых с котельной Габбасова, наименьшая концентрация магния в образцах растений, взятых РК 1. При недостатке магния усиливаются процессы окисления в растениях, а содержание аскорбиновой кислоты сахара снижается. Хорошее же обеспечение растений магнием способствует усилению в них восстановительных процессов и приводит к большему накоплению восстановленных органических соединений — эфирных масел, жиров и др.

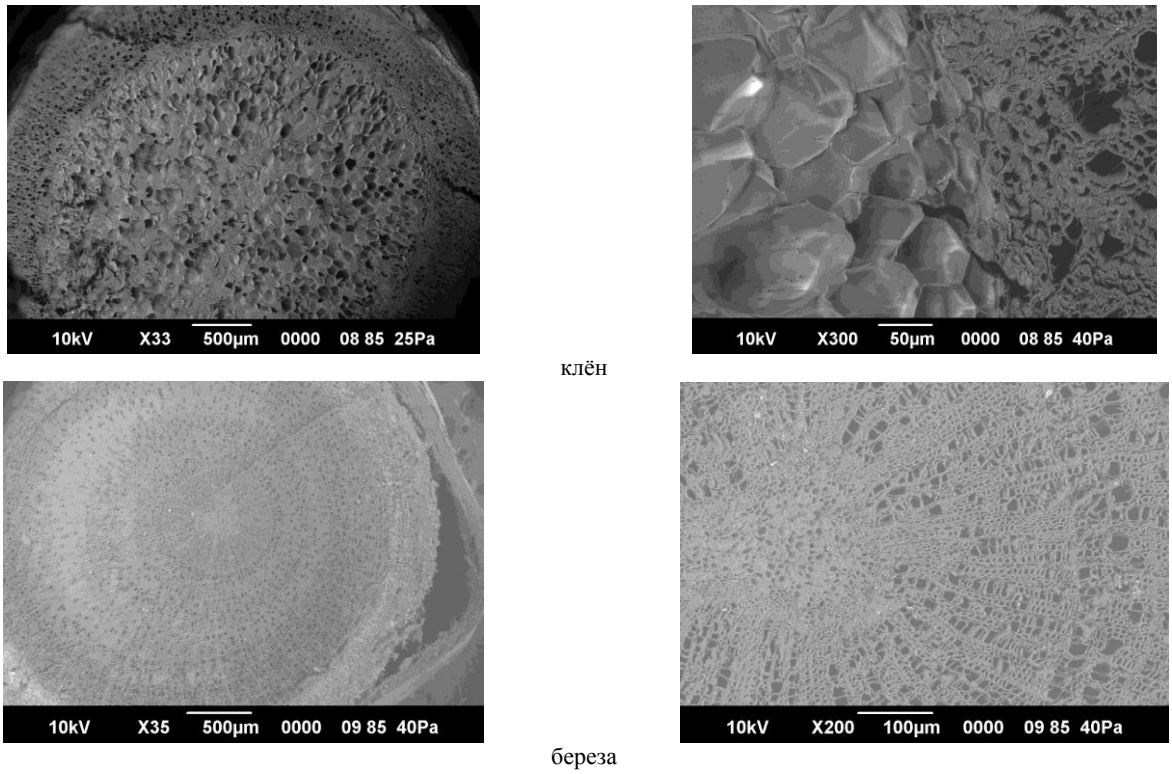


Рисунок 2. Фото проб веток при проведении рентгеноспектрального анализа

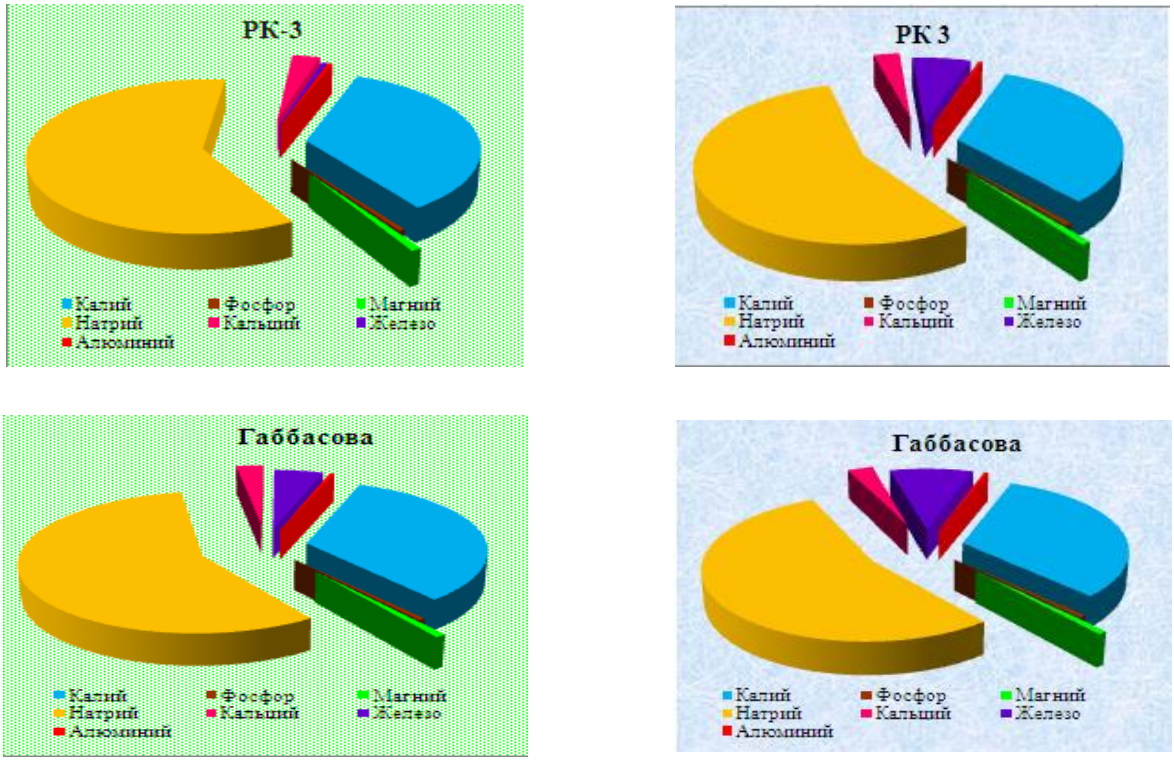
Наибольшая концентрация натрия находится в образцах растений, взятых с котельной РК 3, наименьшая концентрация натрия в образцах растений, взятых РК 1. Натрий находится в растениях в значительном количестве.

Наибольшая концентрация кальция находится в образцах растений, взятых с котельной РК 3, наименьшая концентрация кальция в образцах растений, взятых РК 1. Кальций, регулирует водный баланс, связывает кислоты почвы, обеспечивает нормальные условия для развития корневой системы растений, улучшает растворимость многих соединений в почве. При увеличении количества кальция в почве возрастает поступление в растение ионов аммония, молибдена, но снижается подвижность марганца, цинка, бора. Недостаток катионов кальция в почве приводит к повышению кислотности почвенного раствора (если только почва не засолена — не содержит избыток натрия). Излишек кальция намного вреднее его недостатка: он связывает соединения железа и делает их недоступными для растения, приводит к нарушению усвоения азота, калия и бора, вызывая мезжилковый хлороз листьев и появление светлых бесформенных пятен отмирающих тканей листа.

Наибольшая концентрация железа находится в образцах растений, взятых с котельной Габбасова, наименьшая концентрация железа в образцах растений, взятых Центральной котельной. Недостаток железа сказывается на снижении содержания в листьях хлорофилла и подавлении активности фотосистем. Изменения фотосинтеза отражаются на углеводном обмене растений, в частности, наблюдается снижение содержания сахаров и крахмала в листьях. Визуально симптомы недостатка железа проявляются следующим образом: становится заметна белесая, бледно-зеленая или желтая окраска тканей листа между жилками. На почве, обогащенной растворимыми формами железа, может наблюдаться токсическое воздействие данного элемента на растения. Обычно это происходит на сильнокислых почвах, кислых сульфатных и пойменных почвах. Токсичность железа часто бывает связана с засоленностью почв и низким содержанием в них фосфора и оснований.

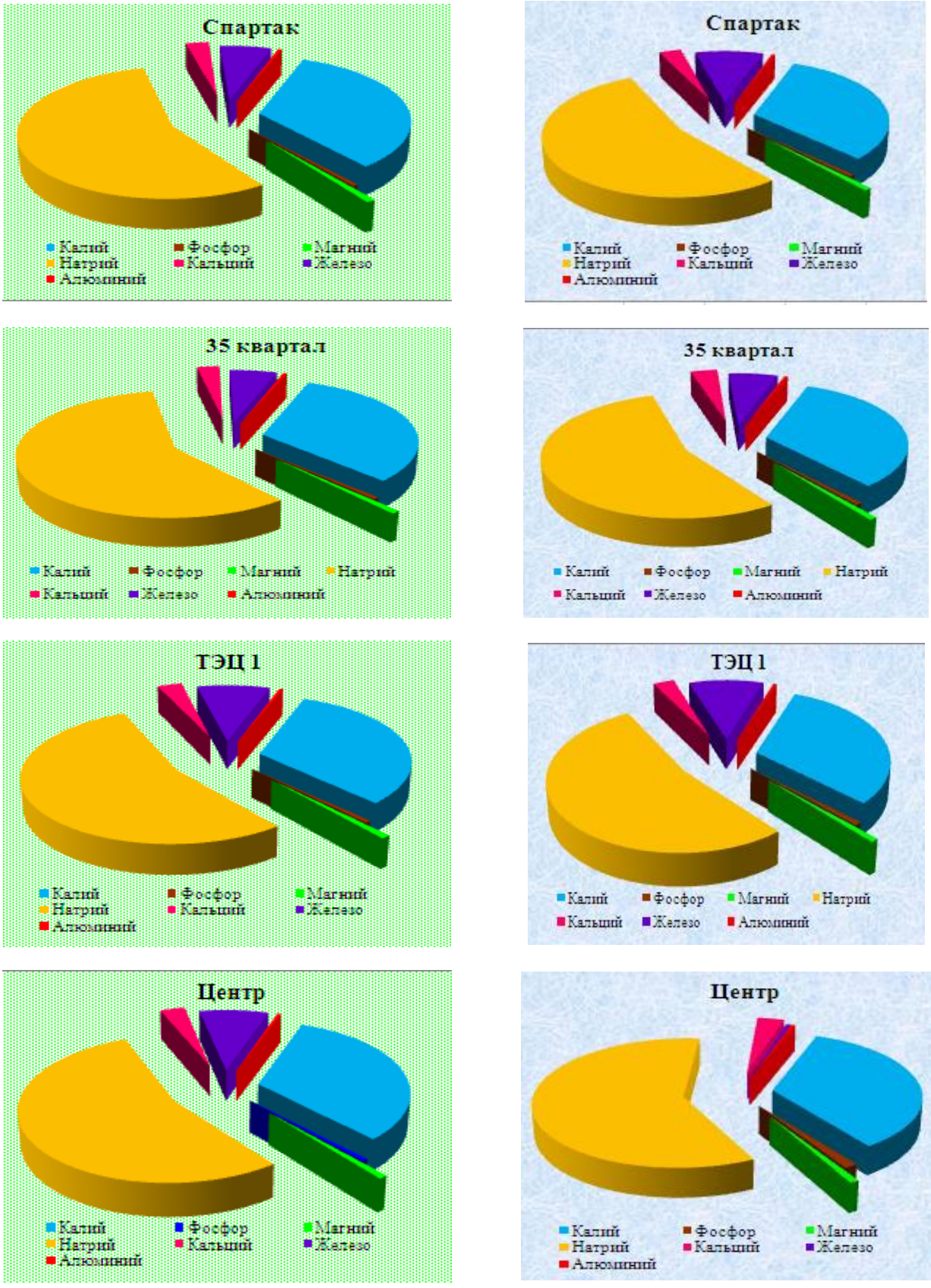
Наибольшая концентрация алюминия находится в образцах растений, взятых с котельной Габбасова, наименьшая концентрация алюминия в образцах растений, взятых Центральной котельной. Алюминий в растениях может содержаться в значительных количествах: на его долю в золе некоторых растений приходится до 70 %. Алюминий нарушает обмен веществ в растениях, затрудняет синтез Сахаров, белков, фосфатидов, нуклеопротеидов и других веществ.

В целом отклонений содержания калия, магния, натрия, железа, кальция, фосфора и алюминия в образцах от норм не наблюдается.



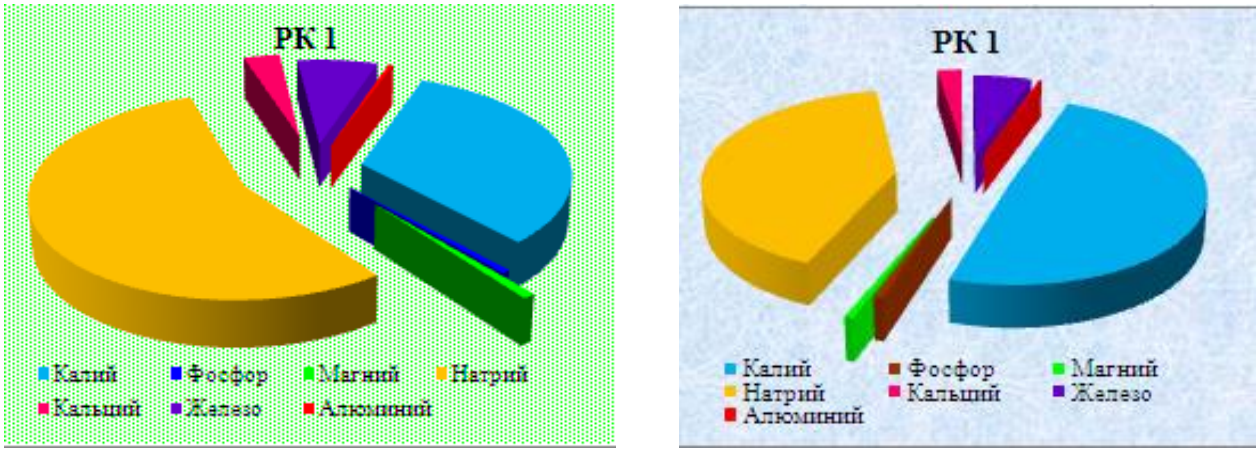
ветки снег

Рисунок 3. Содержание химических элементов в пробах



ветки снег

Рисунок 4. Содержание химических элементов в пробах по результатам масс-спектрального анализа



ветки снег

Рисунок 5. Содержание химических элементов в пробах по результатам масс-спектрального анализа

Заключение

В качестве основных выводов по работе можно выделить следующее:

– построенные графики содержания выбросов ТЭЦ;

– исследован качественный и количественный состав выбросов от теплоснабжающих предприятий города Семей в зависимости от времени года;

Полученные в ходе выполнения работы результаты позволят дать научное обоснование принципов озеленения города Семей для обеспечения снижения вредного воздействия объектов энергетики, так как беспорядочно посаженные деревья и кустарники в некоторых случаях увеличивают возможность сорбции вредностей и взаимодействия разных вредных веществ друг с другом, ухудшают в ряде случаев условия рассеивания загрязнений. Выполненная работа позволит выявить степень соответствия показателей качества зеленых насаждений в городе нормативным критериям и обосновать наиболее устойчивые к воздействию вредных выбросов объектов энергетики растения для города Семей. В целом отклонений содержания калия, магния, натрия, железа, кальция, фосфора и алюминия в образцах от норм не наблюдается.

Экспериментальные исследования образцов древесных растений и снега на содержание радионуклидов будет проведено в испытательной региональной лаборатории инженерного профиля «Научный центр радиоэкологических исследований» ГУ имени Шакарима города Семей. Выполнение работы рассчитано на два года. Данный отчет носит промежуточный характер.

Литература

1. Неверова О. А. «Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города»
2. Проект нормативов предельно-допустимых выбросов (ПДВ) для ГКП «Теплокоммунэнерго» ГУ «Отдел жилищно-коммунального хозяйства, пассажирского транспорта и автомобильных дорого г. Семей» на праве хозяйственного ведения. Семей -2012 г.
3. Дмитриев М.Г., Казнина Н.И., Пинигина И.А. Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. Москва: Химия, 1989.-С.3-240
4. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман М.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985. – С.3-181.

ЖАСЫЛ ӨСІМДІКТЕРГЕ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ КӘСІПОРЫНДАРЫНАҢ ТИГІЗЕТІН ТЕХНОГЕНДІ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

[1] Надырова А.Р., [2] Ермоленко М.В., [2] Степанова О.А.

[1] Семей қаласының Шәкәрім атындағы мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан
[2] ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Семей қаласының жылумен қамтамасыз ету кәсіпорындарынан жыл мезгіліне сәйкес шығатын қалдықтарының сан және сапа құрамын зерттеу нәтижелері көрсетілген, Семей қаласы қазандықтарының қар және өсімдіктердегі ауыр металдар көлемі зерттеленген.

RESEARCH TECHNOGENIC IMPACT OF ENERGY ENTERPRISES OF GREEN AREAS

[1] A.R. Nadyrova, [2] M.V. Ermolenko, [2] O.A. Stepanova

[1] Shakarim State University of Semey, Semey, Kazakhstan
[2] Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

As a result the work has been studied qualitative and quantitative composition of emissions from district heating enterprises of Semey city, depending on the time of year. The content of heavy metals in snow and branches of boiler plants Semey.

УДК 533.9.01

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА РАДИАЦИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б.

Институт ядерной физики РК, Алматы, Казахстан

В работе получены полуэмпирические зависимости коэффициента распыления металлов от энергии и угла падения ионов разных типов в диапазоне энергий 10-150 кэВ. Определены параметры, позволяющие распространить предложенный формализм в сторону значительно больших энергий. Рассчитаны энергетические зависимости коэффициентов распыления некоторых металлов с различной структурой распыляемой поверхности, а также зависимости коэффициентов распыления металлов с различной структурой поверхности от глобального угла падения ионов β.

Введение

Облучение материалов покрытия первой стенки, пластин дивертора ТЯР потоками ионов из плазмы сопровождается процессом радиационной эрозии, которая в свою очередь, определяется суперпозицией трех процессов: химической эрозии, физического распыления и радиационно-усиленной сублимации.

Химическое распыление – особый вид распыления твердого тела химически активными ионами (атомами, молекулами, радикалами), при котором эмиссия вещества с поверхности осуществляется не только в результате физических процессов, но и вследствие образования летучих химических соединений, которые затем покидают поверхность. Химическая эрозия начинает играть большую роль в припороговой области энергий, а радиационно-усиленная сублимация (установлена не для всех материалов) проявляется лишь при температурах, близких к температуре плавления.

Определяющий вклад в радиационную эрозию в условиях ТЯР вносит физическое распыление [1]. Физическое распыление происходит за счет непосредственной передачи кинетической энергии (импульса) при столкновении налетающей частицы с атомом облучаемого материала. Таким образом, происходит развитие каскада атом-атомных соударений, при котором атомы мишени могут смещаться в различных направлениях, в том числе и противоположном потоку облучения. В результате часть атомов из объема материала перемещается на границу и, обладая достаточной энергией, способна покинуть его. Этот процесс характеризуется коэффициентом распыления, который определяется как среднее число выбитых с поверхности атомов вещества одной частицей, т.е. коэффициент распыления соответствует вероятности выбивания атома вещества в одном акте взаимодействия частицы с поверхностью.

Распыление конструкционных материалов в термоядерных установках оказывает сугубо отрицательное воздействие на их работоспособность. Как следствие, обращенные к плазме компоненты конструкционных материалов теряют свои эксплуатационные свойства и разрушаются. Кроме того, из-за загрязнения атомами распыленного материала ухудшаются рабочие характеристики термоядерной плазмы, что затрудняет управляемость процесса синтеза.

Поэтому изучение эффекта распыления материалов облицовки первой стенки, а также выбор на его основе конструкционных материалов, наименее подверженных распылению при взаимодействии с заряженными ускоренными частицами, является актуальной задачей радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения [2].

1 Распыление гладкой поверхности

Коэффициент распыления зависит от многих параметров, важнейшими из которых являются тип и энергия налетающих ионов, угол падения ионного потока к облучаемой поверхности, температура и элементный состав поверхности.

В общем случае зависимость коэффициента распыления S поверхности металлов от энергии ионов E_0 можно представить в виде [3]:

$$S(E_0) \sim \frac{C E_0^{\frac{1}{2}} \ln(E_0)}{1 + A_1 E_0^{\frac{1}{2}} + A_2 E_0 + A_3 E_0^{\frac{3}{2}}}. \qquad (1)$$

Это соотношение содержит в себе характеристики атомов мишени и бомбардирующих частиц, а также отражает потенциал их взаимодействия. Входящие в (1) константы C, A_1, A_2 и A_3 находятся путем аппроксимации доступных экспериментальных данных. В настоящее время наряду с экспериментальными результатами широкое распространение для этих целей получило использование результатов компьютерного моделирования.

Выбор вида аппроксимации полученных результатов всегда имеет некоторую неопределенность и зависит от предполагаемого вида потенциала ядерного взаимодействия. В настоящей работе мы использовали программный пакет SRIM-2012, который позволяет рассчитывать каскады атомных соударений для широкого спектра ионов и мишеней. Проанализировав полученные результаты, мы установили общий характер зависимости коэффициента распыления от энергии облучаемых частиц в виде [4]:

$$\lg S(E_0) = (a\,(\lg E_0)^2 + b\,\lg E_0 + c)/(\lg E_0 + d), \qquad (2)$$

где E_0 – энергия частиц; a, b, c и d – константы, различные для разных случаев облучения.

Результаты моделирующих расчетов и их аппроксимации соотношением вида (2) представлены на рисунке 1.

В таблице 1 приведены параметры фитирования для вольфрама, распыляемого ионами He^+ и Ar^+ при разных энергиях.

Таблица 1. Параметры фитирования для вольфрама, распыляемого ионами He^+ и Ar^+ при разных энергиях

	a	*b*	*c*	*d*
He	−1.103	7.185	−13.57	−1.615
Ar	−0.877	8.441	−17.78	−0.6793

Более крупные и тяжелые ионы имеют большее сечение взаимодействия с атомами мишени, тормозятся быстрее и слабее отклоняются от первоначального направления полета, чем, например, протоны и α-частицы. Легкие ионы с малым сечением взаимодействия проникают гораздо дальше вглубь мишени, причем даже высокоэнергетичные могут достигать больших расстояний без значительных энергетических потерь. Многократно отражаясь от атомов, они могут резко менять направление своего движения и инициировать каскады атомных соударений практически с любой глубины. Направление ионных потоков во всех случаях было выбрано нормальным к поверхности облучаемого образца.

Теория каскадных процессов распыления позволяет получить зависимость коэффициента распыления от угла облучения α (угол между нормалью к поверхности мишени и направлением пучка частиц) в виде:

$$S(\alpha) \approx S(\alpha = 0) \times cos^{-\nu}\alpha, \qquad (3)$$

где $S(\alpha = 0)$ – коэффициент распыления при нормальном падении пучка частиц; ν – показатель степени порядка или более единицы для различных случаев облучения.

В области значений $\alpha = 70 \div 80^o$ коэффициент распыления достигает максимального значения, а затем убывает из-за возрастающей роли ионов, отраженных от поверхности мишени.

Анализ экспериментальных данных и учет особенностей развития каскадов смещений при больших углах облучения дает более точное соотношение между $S(0<\alpha<90^o)$ и $S_0(\alpha=0)$ [5]:

$$\frac{S(E_0,\alpha)}{S(E_0,0)} = \left\{cos\left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^*}\frac{\pi}{2}\right)^c\right]\right\}^{-f} \times$$
$$\times\, exp\left(b\left\{1 - 1/cos\left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^*}\frac{\pi}{2}\right)^c\right]\right\}\right). \qquad (4)$$

Параметр α^* отражает тот факт, что угол падения 90^o не может быть достигнут, поскольку налетающая частица и атомы мишени имеют энергию связи E_{sp} (что моделирует химическую связь).

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента распыления вольфрама от угла падения ионов с различными энергиями.

Параметры фитирования для вольфрама, распыляемого ионами He^+ и Ar^+ при разных энергиях приведены в таблице 2.

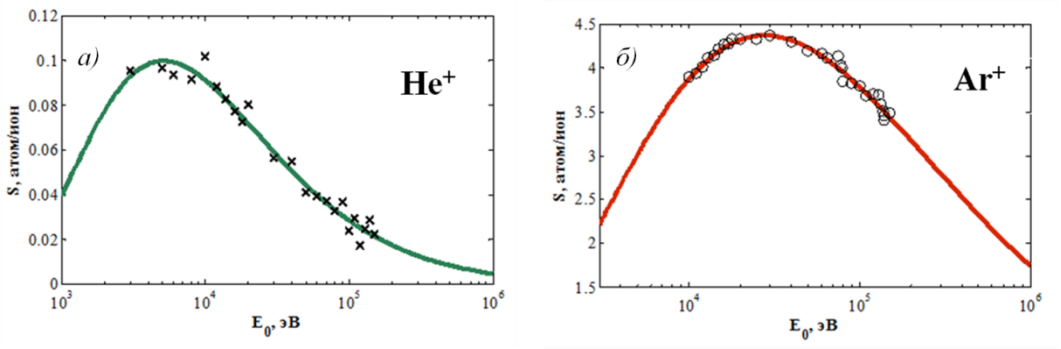


Рисунок 1. Зависимости коэффициента распыления вольфрама от энергии ионов E_0 при облучении: а) гелия; б) аргона. Точками обозначены результаты моделирования, линиями – результаты расчетов согласно аппроксимационной формуле (2)

Таблица 2. Параметры фитирования для вольфрама, распыляемого ионами He^+ и Ar^+ при разных энергиях

	He			Ar		
E_0, кэВ	***c***	***f***	***b***	***c***	***f***	***b***
10	0.9226	1.391	0.1921	0.7763	1.71	0.6062
75	0.9499	1.824	0.1475	0.8573	1.845	0.4199
150	0.9743	1.697	0.08929	0.8899	1.927	0.3734

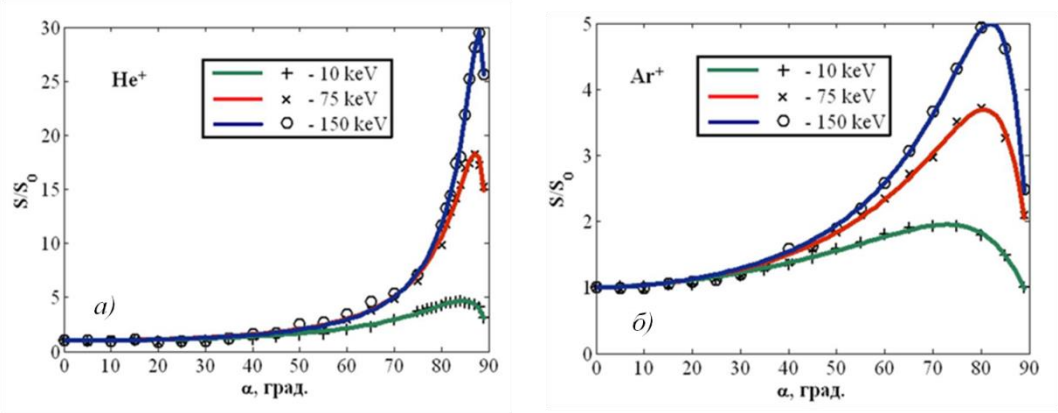


Рисунок 2. Зависимости коэффициента распыления вольфрама от угла падения ионов He^+(б) и Ar^+(в) с различными энергиями. Точками обозначены результаты SRIM-моделирования, линиями – результаты аппроксимации согласно (4)

Необходимо отметить, что знание закономерностей зависимости коэффициента распыления от угла падения потока ионов важно для построения математической модели распыления, учитывающей шероховатость поверхности.

2 Распыление шероховатой поверхности

Шероховатость поверхности — совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. Шероховатость относится к микрогеометрии твёрдого тела и определяет его важнейшие эксплуатационные свойства. Исходная шероховатость является следствием технологической обработки поверхности материала. В результате эксплуатации параметры исходной шероховатости, как правило, меняются.

Микрорельеф поверхности также может оказывать существенное влияние на среднее значение коэффициента распыления. Шероховатость с размерами, равными или превосходными линейный размер каскада столкновений (~500 Å), приводит к увеличению распыления по сравнению с плоской поверхностью. Есть несколько каналов влияния поверхностной шероховатости на процессе распыления [6, 7], один из них рассмотрен ниже.

Зависимость коэффициента распыления от поверхностной шероховатости выражается в данном случае в том, что угол α_i падения налетающих частиц на поверхностный сегменты Δl_i (локальный угол падения) не совпадает с углом падения потока частиц на базовую поверхность распыляемого материала (глобальный угол падения). Поскольку коэффициент распыления имеет сильную угловую зависимость, это приводит к увеличению его среднего значения для шероховатой поверхности по сравнению с гладкой поверхностью.

Если $S(E_0, \alpha)$ - зависимость коэффициента распыления от локального угла падения (при энергии ионов E_0) для плоской поверхности сегментов, то

$$S_R(E_0) = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{k} S(E_0, \alpha_i) \cdot \Delta x_i \qquad (5)$$

представляет собой коэффициент распыления шероховатой поверхности длиной L, состоящей из k фрагментов Δl_i, имеющих проекции на базовую плоскость Δx_i [8].

Рассмотрены шесть типов двумерных поверхностей: плоская (гладкая), две – двух-фрагментных с постоянными углами наклона, полугексагональная, полукруглая и поли-фрагментарная (в данном случае 10) произвольная поверхность. Они представлены на рисунке 3. Пунктирными линиями изображена базовая поверхность материала, сплошными линиями – локальные поверхности, L – период шероховатости, m – серединная линия, стрелки - направление потока ионов, $\boldsymbol{n}_i$ – локальные нормали, α_i – углы между $\boldsymbol{n}_i$ и нормалью к базовой поверхности (в данном случае она совпадает с направлением потока ионов). Произвольная поверхность была получена следующим образом: задается число k – количество различно-ориентированных фрагментов, содержащихся в L; случайным образом интервале [0 ÷ 1] разыгрывается длина их проекций на базовую плоскость и нормируется на L; вводится величина R_{max} – амплитуда шероховатости (в данном случае R_{max} = L/2); случайным образом в интервале 0 ÷ R_{max} разыгрывается y-координата фрагмента; углы α_i определяются исходя из пространственной ориентации фрагментов.

В качестве примера, иллюстрирующего данный подход, на рисунке 4 представлены результаты вычислений энергетической зависимости коэффициента распыления вольфрама при облучении ионами аргона с энергиями 30 эВ - 150 кэВ.

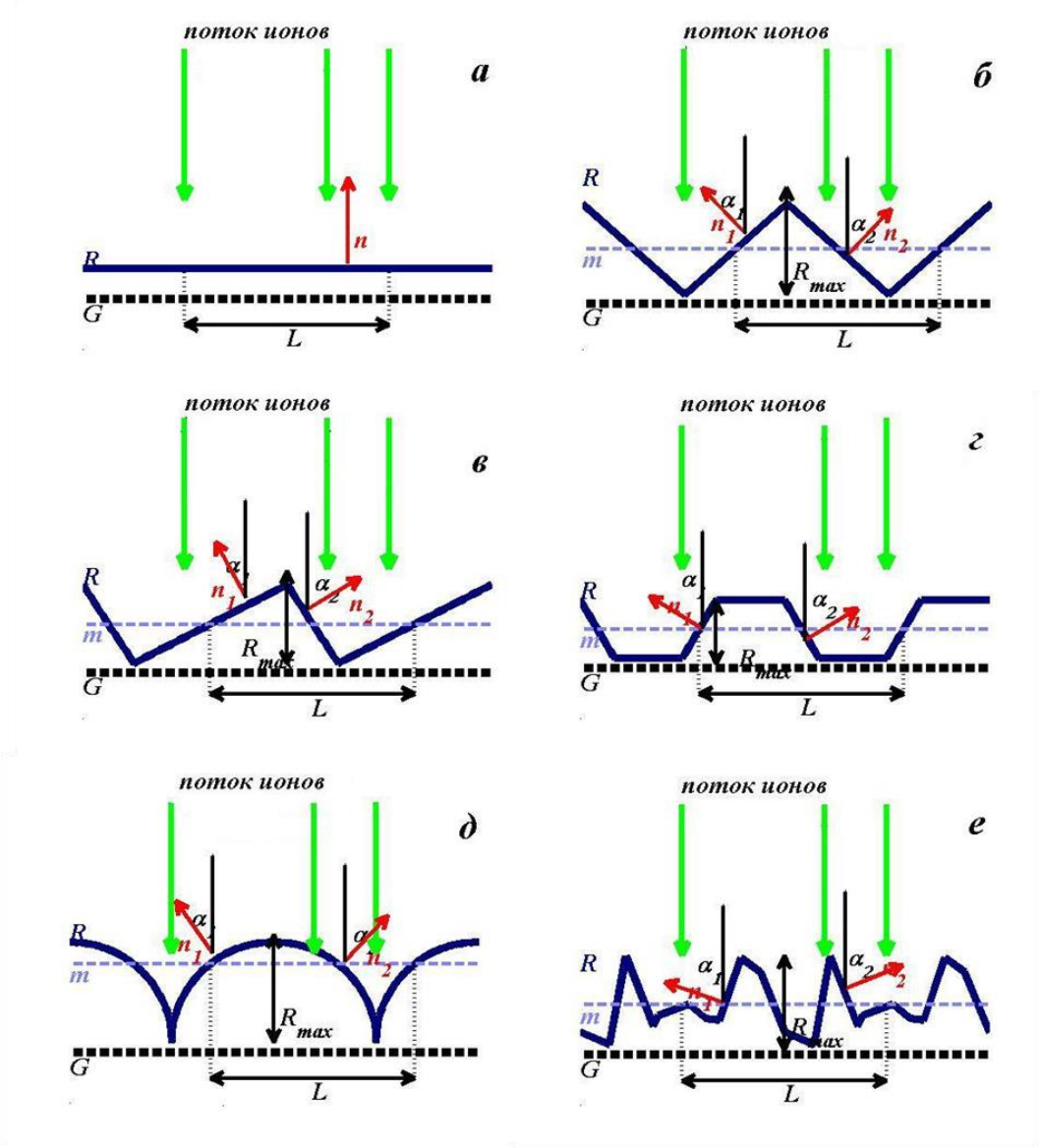


Рисунок 3. Структурные элементы рассмотренных поверхностей: гладкая поверхность (а), двухфрагментные поверхности с углами наклона фрагментов 45° (б), 30° и 60° (в), полугексагональная (г), полукруглая (д) и 10-фрагментарная поверхность со случайной ориентировкой фрагментов (е)

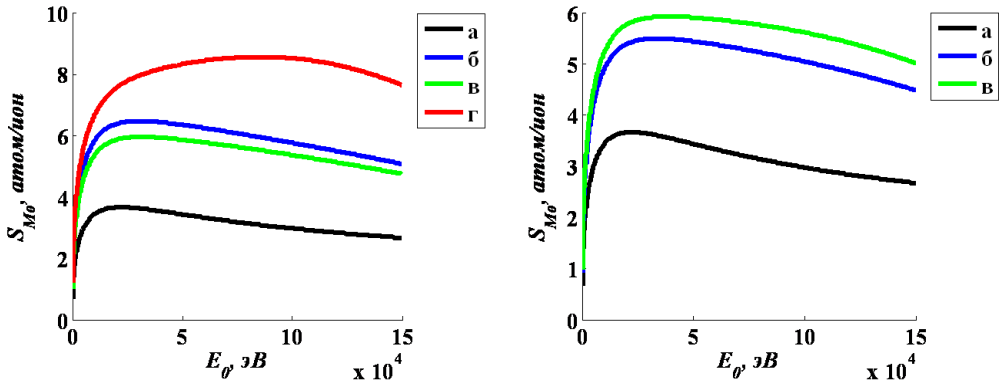


Рисунок 4. Энергетическая зависимость коэффициентов распыления Mo, облученного ионами Ar^+, при нормальном глобальном падении потока на поверхности из рисунка 3

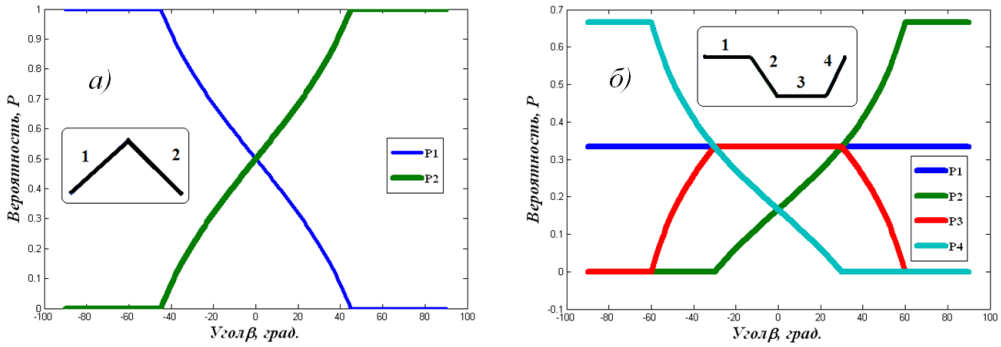


Рисунок 5. Вероятности попадания налетающего иона на i-й фрагмент поверхности облучаемого материала: а) для двухфрагментной; б) для полугексагональной поверхностей

Из рисунка видно, что учет шероховатости поверхности приводит к значительному увеличению коэффициента распыления по сравнению с гладкой поверхностью. Степень увеличения зависит от структуры распыляемой поверхности, причем в наибольшей мере этот эффект проявляется на поверхности со случайной разориентировкой фрагментов.

В отличие от энергетической зависимости коэффициента распыления шероховатой поверхности, угловая зависимость имеет ряд особенностей, выражающихся в образовании и развитии "освещенных" и "затененных" участков поверхности. Под "затененными" подразумеваются участки поверхности, огражденные от прямого попадания ионного потока соседними выступами. С изменением угла облучения β соотношение между величинами "освещенных" и "затененных" участками меняется, соответственно, меняется и вероятность попадания иона на тот или иной фрагмент поверхности. Поскольку разные фрагменты имеют различные пространственные ориентировки, это влияет на изменение коэффициента распыления.

Вклад каждого *i*-го фрагмента в распыление шероховатой поверхности при глобальном угле падения β равен произведению коэффициента распыления при локальном угле падения β_i на вероятность попадания иона на *i*-й фрагмент. Коэффициент распыления шероховатой поверхности равен сумме вкладов всех фрагментов. К примеру, для двухфрагментной поверхности вероятности попадания бомбардирующих частиц на каждый из фрагментов поверхности будет описываться следующими соотношениями:

при $0 < \beta \le \alpha_1,\ P_1 = 1;\ P_2 = 0;$

при $\alpha_1 < \beta \le \alpha_2,\ P_1 = \frac{\alpha_1 \cos(\alpha_1 - \beta)}{L \cos\beta};\ P_2 = \frac{\alpha_2 \cos(\alpha_2 - \beta)}{L \cos\beta};$

при $\alpha_1 \le \beta < 90,\ P_1 = 0;\ P_2 = 1.$

Для наглядности на рисунке 5 приведены расчеты вероятности попадания налетающего иона на *i*-й фрагмент поверхности облучаемого материала для двухфрагментной и полугексагональной поверхностей.

Расчеты $S(E_0,\alpha_i)$ для фрагментов представленных поверхностей проведены путем компьютерного моделирования каскадов атомных соударений с использованием программного пакета SRIM-2012 и дальнейшей аппроксимацией полученных результатов. Энергетическая зависимость при нормальном падении рассчитывалась согласно (2), угловая зависимость была взята в виде (3). Константы *c*, *f* и *b* - также энергетически зависимые, определялись аппроксимацией модельных значений *S* для 13 значений α при каждом из 12 значений E_0 из исследуемого интервала. В результате был создан пакет программ, который позволяет вычислять $S(E_0, \alpha)$ для любой величины α и E_0 из исследованного энергетического интервала, а также $S_R(E_0)$ для любого числа *m* и распределения граничных сегментов. В качестве входных параметров, характеризующих материал и налетающую частицу, были использованы литературные данные.

Результаты расчетов зависимости коэффициента распыления шероховатой поверхности вольфрама от глобального угла падения ионов β представлены на рисунке 6. При расчетах S_R в этом случае вместо (5) использовалось соотношение

$$S_R(E_0,\beta) = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{k} S(E_0, \beta - \alpha_i) \cdot P_i(\beta - \alpha_i), \quad (6)$$

где $P_i(\beta - \alpha_i)$ – вероятность попадания иона на *i*-ый фрагмент.

Как следует из рисунка 6, учет структуры поверхности приводит к значительному изменению вида угловой зависимости коэффициента распыления. Это проявляется в некотором увеличении S_R по сравнению с *S* при небольших β (~30°) и значительном (до 3-х раз) уменьшении S_R при больших углах облучения, которое сопровождается исчезновением ярко выраженных пиков при β ~80°.

Таким образом, результаты проведенных расчетов показывают, что учет структуры поверхности необходим для оптимизации эксплуатационных свойств конструкционных материалов ядерных реакторов.

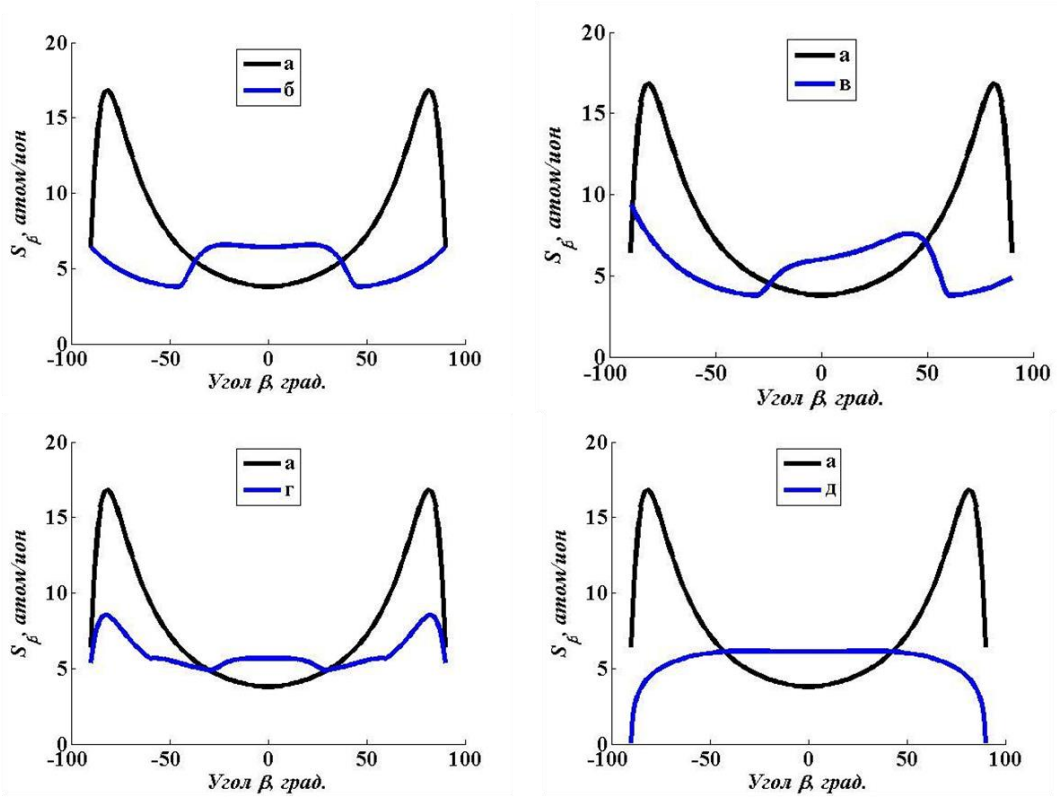


Рисунок 6. Зависимость коэффициента распыления шероховатой поверхности вольфрама от угла падения ионов аргона с энергией 100 кэВ на поверхности из рисунка 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящей работе, заключаются в следующем:

1. Проведены расчеты коэффициентов распыления вольфрама и молибдена от энергии ионов при облучении поверхности протонами, альфа-частицами и ионами аргона в диапазоне энергий 10-150 кэВ. Расчеты выполнены с использованием программного пакета SRIM-2012, являющегося одним из основных средств моделирования каскадов атомных соударений.

2. Определена функциональная зависимость коэффициентов распыления от энергии ионов; также определены параметры, позволяющие распространить предложенный формализм в сторону значительно больших энергий.

3. Рассчитана зависимость коэффициентов распыления молибдена и вольфрама от угла падения ионов H^+, He^+ и Ar^+ относительно нормали к поверхности облучения. Определены параметры c, f и b, позволяющие представить ее в виде $S(\alpha) = S_0\{cos[(\alpha)^c]\}^{-f} exp(b\{1 - 1/cos[(\alpha)^c]\})$ для всего интервала углов падения. Расчеты выполнены для энергий ионов в интервале 10-150 кэВ. Изучение закономерностей поведения коэффициента распыления в зависимости от угла падения потока ионов важно для построения математической модели распыления, учитывающей шероховатость поверхности.

4. Рассчитаны энергетические зависимости коэффициентов распыления металлов (вольфрам, молибден) с различной структурой распыляемой поверхности. Установлено, что учет шероховатости поверхности при нормальном глобальном падении ионов приводит к повышению коэффициента распыления в ~1.5÷2 раза в зависимости от типа облучаемой поверхности во всем исследованном интервале энергий.

5. Рассчитаны зависимости коэффициентов распыления металлов (вольфрам, молибден) с различной структурой поверхности от глобального угла падения ионов β. Влияние шероховатости проявляется в некотором увеличении S_R по сравнению с S при небольших β (~30°) и значительном уменьшении S_R при больших углах облучения.

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы относительно роли шероховатости в процессе ионного распыления металлов:

1. При нормальном падении ионов учет шероховатости всегда приводит к повышению коэффициента распыления. Это обусловлено тем, что величина локальных углов падения ионов изменяется в интервале $-90^o > \alpha_i > 90^o$, а коэффициент распыления определяется четной функцией $S(\alpha_i) = F(cos^{-n}\alpha_i)$ и имеет минимум при 0^o. Физически это отражает тот факт, что область развития каскадов соударений при

наклонном локальном падении ионов располагается ближе к поверхности облучаемого материала, чем при нормальном.

2. При расчетах угловой зависимости проявляются два конкурирующих процесса: изменение локальных углов падения и "эффект тени". Этот эффект выражается в образовании и развитии "освещенных" и "затененных" участков поверхности (то есть огражденных от прямого попадания ионного потока соседними выступами). С изменением угла облучения β соотношение между величинами "освещенных" и "затененных" участками меняется, соответственно, меняется и вероятность попадания иона на тот или иной фрагмент поверхности. Это проявляется в том, что для некоторых поверхностных структур коэффициент распыления остается практически постоянным в значительном интервале углов. Исчезновение ярко выраженных пиков при больших (~80°) углах облучения является позитивным фактором при эксплуатации отдельных конструкционных узлов реакторов.

3. Учет структуры поверхности необходим для оптимизации эксплуатационных свойств перспективных реакторных материалов.

Литература

1. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физическое распыление одноэлементных твердых тел. Пер. с англ. / Под ред. Р.Бериша. – М.: Мир, 1984. – 336 с.
2. An Evaluated Data Base for Sputtering / E.W. Thomas, R.K. Janev, J. Botero [et al].– Vienna: IAEA, 1993. – 48 p.
3. Particle Induced Erosion of Be, C and W in Fusion Plasmas. Par t B: Physical Sputtering and Radiation-Enhanced Sublimation. / W. Eckstein, J. A. Stephens, R. E. H. Clark [et al]. – Vienna: IAEA, 2001. – 196 p.
4. Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б. Теоретическое исследование распыления вольфрама при облучении ионами водорода, гелия и аргона // Вестник НЯЦ РК. – 2014. – Выпуск 3 (59). – С.23-28.
5. Sputtering by Particle Bombardment. Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies / R. Behrisch, W. Eckstein. – Berlin: Springer,. 2007. - 470 p. - ISBN 987-3-540-44500-5.
6. Borisov A.M., Mashkova E.S., et al. Effect of ion-induced relief on high-dose sputtering of graphite// PAS&T/TF 2004, Iss. 2, P. 65 -72.
7. Bizyukov I., Mutzke A., Schneider R. Effect of increasing surface roughness on sputtering and reflection// PAS&T 2012, №6 (82), P.111-113.
8. Kozyreva M.S., Karpikov A.N., Kislitsyn S.B. The contribution of a surface roughness to physical sputtering of metals // Book of abstracts «Nuclear science and its application» VII Eurasian Conference. – Baku, 2014. – P. 250-251.

МЕТАЛДАРДЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ТОЗАҢДАТУҒА БЕТТІК ҚҰРЫЛЫМНЫҢ ӘСЕРІ

Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б.

ҚР Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Жұмыс барысында металдарды тозаңдату коэффициентінің энергияға жартылай эмприкалық тәуелділігі және 10-150 кэВ энергия ауқымындағы әр түрлі типтегі иондардың құлау бұрышы алынды. Ұсынылған нысаншылдықты анағұрлым үлкен энергиялар жағына таратуға мүмкіндік беретін параметрлер анықталды. Тозаңдату бетінің құрылымы әр түрлі болатын кейбір металдардың тозаңдату коэффициенттерінің энергетикалық тәуелділігі, сонымен бірге тозаңдату бетінің құрылымы әр түрлі болатын металдардың тозаңдату коэффициенттерінің β иондарының ғаламдық құлау бұрышына тәуелділігі есептелінді.

THE EFFECT OF THE SURFACE STRUCTURE ON THE RADIATION SPUTTERING OF METALS

M.S. Kozyreva, A.N. Karpikov, S.B. Kislitsin

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

The paper represents the produced semi empirical dependencies of tungsten and molybdenum sputtering factors from the energy and the incidence angle of the ions of various types in the energy range of 10-150 keV. The parameters have been determined, allowing us to extend the proposed formalism to the side of significantly larger energies. We have calculated the energy dependence of the sputtering coefficients of some metals with different structure sputtering surface, and also dependence of the sputtering coefficients of metals with different surface structure from the global hade of ion β.

УДК 533.9.082.5

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДИФИКАЦИИ МНОГОХОРДОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ НА ФИЗИЧЕСКОМ ПУСКЕ ТОКАМАКА КТМ

Райханов М.Б., Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж., Вурим А.Д.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В данной статье рассмотрена возможность применения рентгеновской трубки с молибденовым анодом для отработки методики модификации рентгеновского детектора, предназначенного для измерения температуры электронов плазменного шнура токамака КТМ. Приведен первый этап отработки методики увеличения чувствительности рентгеновского детектора, включающий предварительные расчеты спектральной чувствительности предполагаемых смесей рабочих газов (Ar, Kr, Xe и Ne с 10% добавкой гасящего газа – метана CH_4) и экспериментальные результаты для смеси газа Kr 90%+метан10% по предложенной методике.

Введение

Высокотемпературная плазма с магнитным удержанием в установках типа токамак является объектом исследовании ученых с 50-х годов прошлого века, как один из перспективных источников энергии, основанной на реакции синтеза легких ядер. Для понимания и изучения процессов, протекающих в высокотемпературной плазме, были разработаны и внедрены различные методы измерения параметров плазмы [1]. В частности, диагностическая система регистрации мягкого рентгеновского излучения из плазменного шнура является важной частью любого диагностического комплекса токамака. Так как испускаемое рентгеновское излучение связано с температурой электронов, а также плотностью и примесями плазмы, оно позволяет проводить исследования этих параметров [2].

Для обеспечения измерения температуры плазмы установки токамака КТМ был разработан и изготовлен ООО «Инжиниринговым центром Сфератек» многохордовый рентгеновский детектор. В штатном режиме токамака КТМ при максимальном токе плазмы Ip=750 кА и с использованием ВЧ-нагрева плазмы ожидается температура электронов $T_e \geq 1$ кэВ [3], что попадает в регистрируемый спектральный диапазон чувствительности 1-25 кэВ многохордового рентгеновского детектора. Однако, при получении плазменного шнура на физическом пуске токамака КТМ предполагаются пониженные параметры плазменного шнура (ток плазмы ~100 кА), а также не будет использоваться ВЧ-нагрев, что приведет к уменьшению температуры электронов плазмы в 3-5 раз. В результате чего появляется необходимость повышения спектральной чувствительности многохордового рентгеновского детектора для измерения температуры электронов ($T_e \leq 1$ кэВ) на пониженных параметрах плазменного шнура на физическом пуске токамака КТМ. В настоящей работе приведен первый этап отработки методики увеличения чувствительности данного детектора, включающий предварительные расчеты спектральной чувствительности предполагаемых смесей рабочих газов и предварительные эксперименты с использованием промышленного источника рентгеновского излучения.

Описание и принцип действия многохордового рентгеновского детектора

Многохордовый рентгеновский детектор предназначен для одновременного измерения пространственного распределения параметров плазмы токамака КТМ в двух энергетических диапазонах и определения профиля электронной температуры плазмы методом фольг. Основные технические характеристики монитора приведены в таблице 1.

Таблица 1.Основные технические характеристики

Многопроволочная пропорциональная камера	
Диапазон регистрируемых энергий	1-25 кэВ
Число каналов	2×32
Размер чувствительной площадки одного канала	4×16 мм^2
Максимальный полный угол обзора	50°
Быстродействие	20 мкс
Время непрерывной работы от баллона газовой смеси	3000 час
Напряжение смещения пропорциональной камеры	1,3-2,3 кВ
Динамический диапазон выходных напряжений	0-9 В
Штатная смесь газов	криптон 90% + метан 10%

Многохордовый рентгеновский детектор (далее рентгеновский детектор) состоит из камеры обскура с установленной на ней двойной многопроволочной пропорциональной камерой «ДМП-камерой» с предусилителями. Камера-обскура устанавливается на верхний фланец токамака через вакуумный затвор и фторопластовый изолятор. Со стороны токамака камера-обскура имеет щелевую апертуру размером 2×18 мм^2 отдельную от вакуума установки бериллиевой фольгой толщиной 50 мкм. С противоположенной стороны камера-обскура имеет фланец на котором устанавливается ДМП-камера. Камера-обскура заполняется гелием для уменьшения паразитного излучения плазмы.

ДМП-камера состоит из двух идентичных многопроволочных пропорциональных камер, установленных друг за другом. Каждая камера имеет 32 канала регистрации. Предусилители размещены внутри корпусов камер для уменьшения паразитных ёмкостей и шумов. Сигналы с предусилителей выводятся группами по 16 каналов на 4 разъема типа DB-37F. Через эти же разъемы подводится питание предусилителей. На рисунках 1 и 2 показан общий вид многопроволочной пропорциональной камеры. Кроме того, на корпусе ДМП-камеры расположены два высоковольтных разъема для подачи высокого напряжения на пропорциональные камеры [4].

Пропорциональные камеры имеют толщину 8 мм и заполняются смесью газов состоящей на 90% из криптона и 10% метана, при атмосферном давлении. Первая камера смотрит на плазму через 100 мкм бериллиевый фильтр и обеспечивает в тепловом диапазоне. Вторая камера смотрит на плазму через фильтр, состоящий из 200 мкм бериллия плюс 8 мм 90%Kr+10%CH_4 и 10 мм воздуха, обеспечивая тем самым измерения излучения плазмы в надтепловой области. На рисунках 4-7 показаны графики зависимости спектральной чувствительности от энергии прошедших через фильтры для пропорциональных камер.

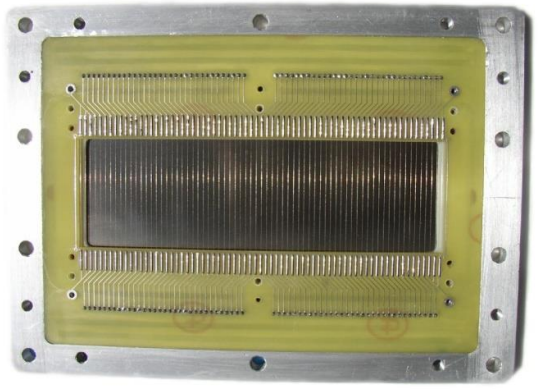


Рисунок 1. Общий вид многопроволочной пропорциональной камеры со стороны плазмы

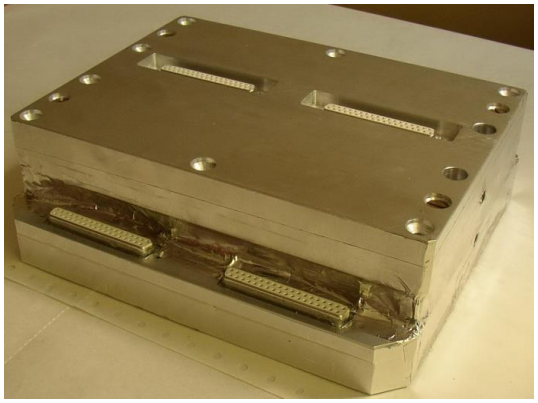


Рисунок 2. Общий вид многопроволочной пропорциональной камеры

Для обеспечения работы монитора камера-обскура должна продуваться гелием, а пропорциональные камеры смесью 90%Kr+10%CH4. Продувка осуществляется от баллонов с газом через редуктор и натекатель. В работах [5-8] подробно изложены характеристики рентгеновской диагностики. Схематический вид детектора представлен на рисунке 3.

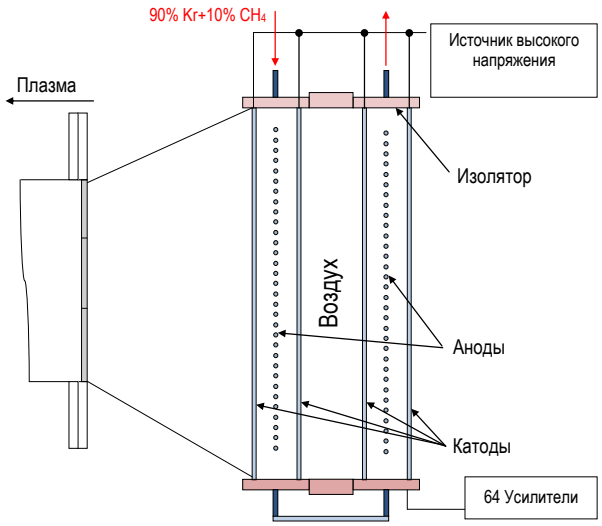


Рисунок 3. Схематический вид конструкции детектора

Принцип действия диагностики основан на абсорбционных свойствах фильтров, расположенных перед двумя линейками детекторов.

Электрический выходной сигнал пропорциональных камер, величина которого пропорциональна энергии регистрируемого излучения плазмы, усиливается предварительным усилителем и поступает на выход ДМП-камеры. Пропорциональные камеры расположены друг за другом и «видят» плазму токамака через одну щель камеры обскура. При этом первая камера является фильтром, поглощающим низкоэнергетическую часть спектра излучения плазмы, попадающего во вторую камеру. В результате этого монитор обеспечивает одновременное многохордовое измерения профиля излучения плазмы токамака в двух энергетических диапазонах. После регистрации выходных сигналов пропорциональных камер электронная температура определяется из следующей зависимости:

$$T_e \sim \frac{I_1}{I_2} \sim \frac{\int_0^\infty exp(-\mu_1 x_1)(1-exp(-\mu_2 x_2))f(E,U)dE}{\int_0^\infty exp(-\mu_3 x_3)(1-exp(-\mu_4 x_4))f(E,U)dE} \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – токи камер; μ_n – абсорбционные коэффициенты фильтров; x_n – толщины фильтров; $f(E,T_e)$ – спектральная плотность тормозного и рекомбинационного излучений плазмы.

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ РАЗНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА

Расчеты спектральной чувствительности к рентгеновскому излучению инертных газов с гасящей

добавкой, прошедшему через разные толщины абсорбционных фильтров, проведены по формуле [9]:

$$\varepsilon = e^{-\mu_1 x_1}(1 - e^{-\mu_2 x_2}) \qquad (2)$$

где μ_1 и x_1 – соответственно коэффициент поглощения в фильтре и его толщина, μ_2 и x_2 – коэффициент поглощения в смеси газа детектора и его размер, т.е. длина пути, проходимая рентгеновским излучением в счётчике. Коэффициенты поглощения в фильтре взяты из [10].

На рисунках 4а-г приведены расчетные зависимости относительной спектральной чувствительности от энергии для смеси 90% инертных газов плюс 10% метана, для выбранной схемы эксперимента, рисунок 5.

На рисунках 4а-г видно, что максимум спектра чувствительности первой камеры значительно превосходит аналогичный максимум для второй камеры, что объясняется частичным поглощением рентгеновского излучения в первой камере. С другой стороны, максимумы спектров на рисунках 4б-г второй камеры и частично первой камеры сдвинуты влево по отношению к спектрам штатного варианта детектора, показанным на рисунке 4а. Это говорит о том, что есть возможность увеличить чувствительность детектора для физического пуска токамака КТМ на меньших энергиях рентгеновского излучения плазмы.

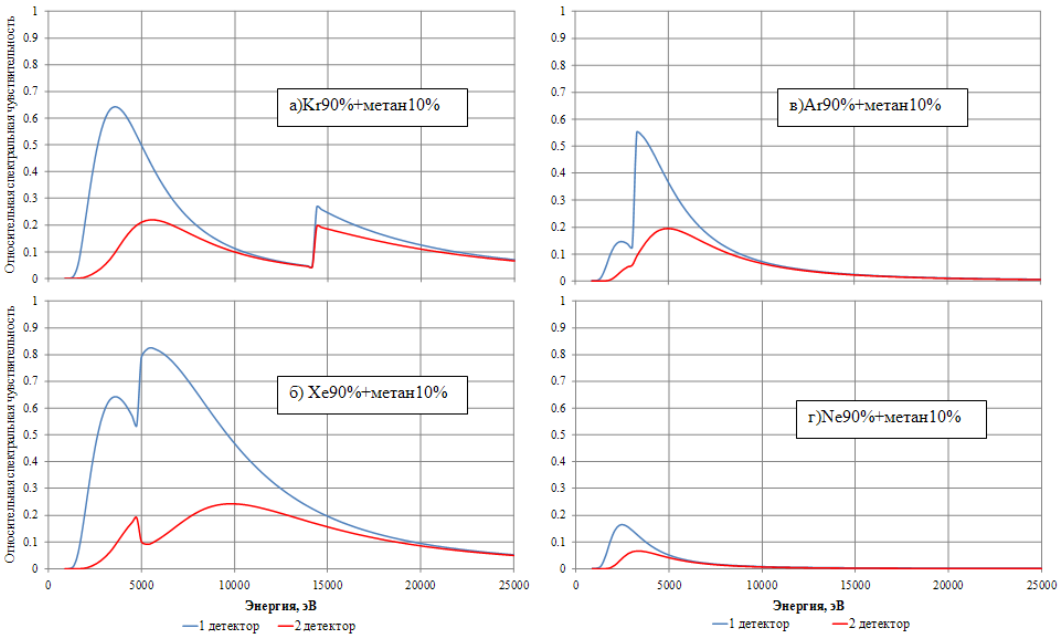


Рисунок 4. Расчеты спектральной чувствительности от энергии для смеси газов: синяя линия – первого детектора, красная линия – второго детектора

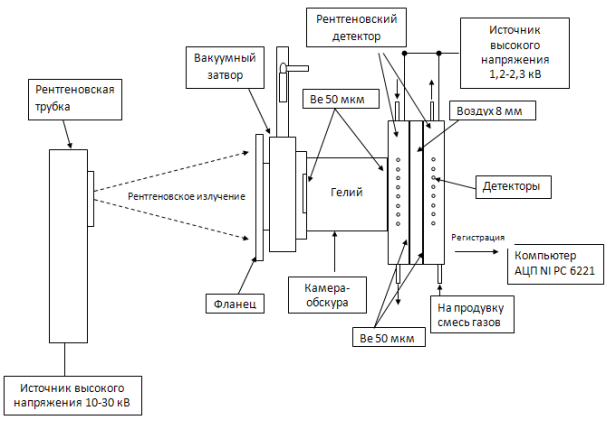


Рисунок 5. Схема эксперимента по отработке методики повышения спектральной чувствительности

Так как расчетные зависимости спектральной чувствительности рассчитываются по приближенным формулам, то вероятно реальные спектры могут быть смещены влево еще больше. Эксперименты на следующем этапе работы могут уточнить данное утверждение.

Схема эксперимента и предварительные результаты

В данной работе предполагается вместо рентгеновского излучения плазмы использовать тормозное излучение рентгеновской трубки. Известный спектр рентгеновской трубки, при разных напряжениях предполагается регистрировать рентгеновским детектором с разной смесью газов.

Схема экспериментов по отработке методики повышения спектральной чувствительности рентгеновского детектора показана на рисунке 5.

Здесь видно, что излучение рентгеновской трубки подается на детектор и ее напряжение может ме-

няться от 1 до 30 кВ. На аноды детектора относительно земли подается напряжение из диапазона 1.3-2.3 кВ. Рабочая смесь продувается через обе камеры детектора. Регистрация сигналов усилителей выполняется через оцифровку на компьютер. Расстояние между рентгеновской трубкой и детекторами 0,5 м.

В данном варианте экспериментов вместо температуры электронов плазмы определяется напряжение на рентгеновской трубке и сравнивается с поданным напряжением на рентгеновскую трубку. Поэтому выражение (1) можно преобразовать в выражение (3) и его использовать в отработке методики. При этом вместо спектра электронов в плазме необходимо использовать спектр излучения рентгеновской трубки.

$$U \sim \frac{I_1}{I_2} \sim \frac{\int_0^\infty exp(-\mu_1 x_1)(1-exp(-\mu_2 x_2))f(E,U)dE}{\int_0^\infty exp(-\mu_3 x_3)(1-exp(-\mu_4 x_4))f(E,U)dE} \qquad (3)$$

где I_1 и I_2 – токи камер; μ_n – абсорбционные коэффициенты фильтров; x_n – толщины фильтров; члены подинтегрального выражения: первый – спектральная чувствительность детектора; второй – $f(E,T_e)$ – спектральная плотность тормозного излучения рентгеновской трубки.

На рисунке 6 показана рентгеновская трубка (РТ) фирмы Oxford Instruments HXR-505-50-01, использованная в предварительных экспериментах. Был рассчитан непрерывный спектр рентгеновской трубки с молибденовым анодом с применением интерполяционного полинома [11], который приведен на рисунке 7 для напряжения 20 кВ между катодом и анодом.



Рисунок 6. Рентгеновская трубка HXR-505-50 Oxford Instruments

Были проведены предварительные расчеты интегралов по выражению (3) в зависимости от напряжения на РТ. Расчеты выполнены для вакуумной и воздушной среды между РТ и детектором. В дальнейшем по схеме экспериментов получены сигналы детекторов для разных напряжений РТ и получены аналогичные зависимости, по которым можно оценить степень адекватности рассчитанных спектральных чувствительностей, и судить о работоспособности методики.

На рисунке 7 видно, что спектр рентгеновского излучения РТ имеет максимум на уровне 10 кэВ при напряжении на РТ 20 кВ. Это говорит о том, что спектр смещен влево относительно напряжения на РТ и при меньших напряжениях в составе рентгеновского излучения может быть достаточное количество рентгеновских квантов низкочастотного спектра для тестирования данного детектора. В дальнейшем предполагается измерить спектр рентгеновского излучения РТ с помощью рентгеновского спектрометра.

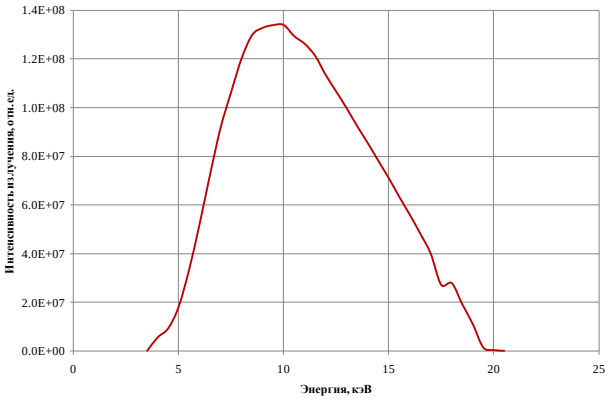


Рисунок 7. Расчетный спектр рентгеновской трубки HXR-505-50 при напряжении 20 кВ

На рисунке 8 видно, что экспериментальные зависимости несколько отличаются от расчетных, особенно для малых энергий. Что можно объяснить погрешностью измерений или неточностью расчетной модели, о чем шла речь выше. Тем не менее, тенденция увеличения отношений сигналов при уменьшении энергий рентгеновского излучения сохраняется, что позволяет надеяться на успешное продолжение работ по увеличению чувствительности рентгеновского детектора на энергиях порядка 1 кэВ с планируемыми новыми смесями газов на следующем этапе работ.

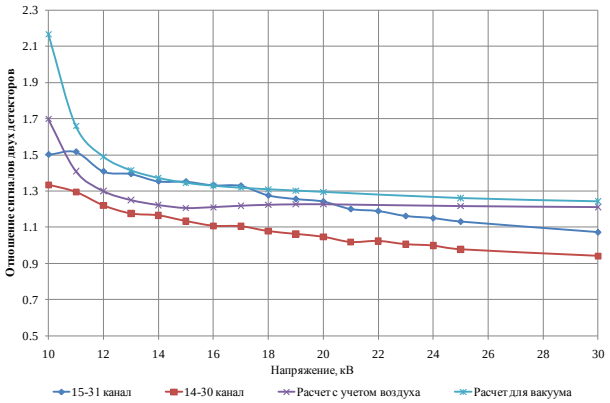


Рисунок 8. Расчетные и экспериментальные зависимости отношения сигналов одного детектора от напряжения на рентгеновской трубке для штатной смеси газа: Kr 90% + метан 10%

Заключение

В данной работе приведены предварительные результаты отработки методики увеличения чувствительности рентгеновского детектора на основе ДМП-датчиков. Проведены расчеты спектральной чувствительности планируемых газовых смесей, которые показали возможность их использования для увеличения чувствительности детектора при уменьшении энергии тормозного рентгеновского излучения электронов плазмы на физическом пуске токамака КТМ. Разработана схема экспериментов для отработки методики определения чувствительности детектора на разных смесях. Получены предварительные результаты зависимости отношения сигналов детекторов от напряжения на рентгеновской трубке для штатной смеси газа Kr 90% + метан 10%.

Полученные результаты будут использованы в дальнейшей отработке методики и определении чувствительности детектора на разных смесях рабочих газов, которые покажут возможность определения параметров плазмы при его применении на физическом пуске токамака КТМ.

Литература

1. В.И. Давыденко, А.А. Иванов, Г. Вайсен. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Новосибирск, 1999.
2. Колесников В.Н. Спектроскопическая диагностика плазмы: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007. – 220 с.
3. E. A. Azizov, et al., «Kazakhstani Tokamak for Material Testing» VANT series: Electro-Physical Apparatus, iss. 3(29), 2005, 13-18.
4. Алексеев Г.А., Азизов Э.А., «Монитор профиля электронной температуры для установки КТМ» Техническое описание. Москва, 2004.
5. A. V. Sushkov, V. F. Andreev, and D. E. Kravtsov. «Duplex multiwire proportional x-ray detector for multichord time-resolved soft x-ray and electron temperature measurements on T-10 tokamak» Review of Scientific Instruments 79, 10E319. 2008.
6. M. I. Patrov, S. E. Bender, V. K. Gusev, D. Й. Kravtsov, I. A. Mironov, Yu. V. Petrov, and A. V. Sushkov. «Diagnostics of MHD Instability in the Globus-M Spherical Tokamak» PLASMA PHYSICS REPORTS. Vol. 33 No.2. 2007.
7. A.V. Sushkov, D.E.Kravtsov. «Modernisation of the T-10 tokamak x-ray imaging diagnostic». 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA Vol. 27A, P-2.63.
8. A. Sushkov and V. Andreev. «High-resolution multiwire proportional soft x-ray diagnostic measurements on TCV» Review of Scientific Instruments 79, 023506. 2008.
9. Горн Л. С., Хазанов Б. И. Позиционно-чувствительные детекторы. Москва, Энергоиздат, 1982.
10. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest.
11. Boone JM, Fewell TR, Jennings RJ. “Molybdenum, rhodium, and tungsten anode spectral models using interpolating polynomials with application to mammography.” Med Phys. 1997.

КТМ ТОКАМАКТІ ФИЗИКАЛЫҚ ІСКЕ ҚОСУ КЕЗЕҢДЕГІ ПЛАЗМА ЭЛЕКТРОНДАРЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАСЫН ӨЛШЕУ ҮШІН КӨП ХОРДАЛЫ РЕНТГЕН ДЕТЕКТОРЫН МОДИФИКАЦИЯЛАУ ӘДІСІН СЫНАУ

Райханов М.Б., Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж., Вурим А.Д.

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл мақалада КТМ токамағындағы плазма электрондарының температурасын өлшеуге арналған рентген детекторының модификациялау әдісін сынау үшін молибден анодынан тұратын, рентген түтігін пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Рентген детекторының спектральді сезімталдығын арттыруға арналған модификациялау әдісін сынаудың бірінші кезеңі көрсетілген. Онда газ қоспаларының (Ar, Kr, Xe, Ne + метан 10%) спектральді сезімталдығының алдын ала есептеулері және ұсынылған әдіс бойынша Kr 90% + метан 10% газ қоспасы үшін эксперименттік нәтижелері көрсетілген.

TESTING OF MODIFICATION METHOD OF MULTI-CHORD X-RAY DETECTOR FOR MEASURING THE ELECTRONS TEMPERATURE OF THE PLASMA ON THE PHYSICAL STARTING KTM TOKAMAK

M.B. Raikhanov, G.V. Shapovalov, B.Zh. Checktybaev, A.D. Vurim

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This article reviews the possibility of using X-ray tube with molybdenum anode for testing modification technique of X-ray detector for measuring the electron temperature of the plasma column in tokamak KTM. It is the first stage of testing techniques to increase the sensitivity of X-ray detector, comprising the preliminary calculations of the spectral sensitivity of the mixtures of assumed gases (Ar, Kr, Xe and Ne with 10% additive quenching gas – methane CH_4) and experimental results for a mixture of gas Kr 90% + metan10% of the proposed technique.

УДК: 539.21:539.12.04:669.3

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 08Х16Н11М3 В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫСОКОДОЗНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-350

Рубан С.В., Захаров М.А., Максимкин О.П.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Проведены комплексные материаловедческие исследования образцов стали 08Х16Н11М3, вырезанных из чехлов отработавших ТВС реактора БН-350, облученных до высоких повреждающих доз. Получены новые данные о распухании и микротвердости по ширине грани ТВС, а также в зависимости от повреждающей дозы. Обнаружено, что ребра ТВС распухают значительнее, чем грани. Применение методики механических испытаний по схеме «Shear Punch» в интервале температур испытания 20-300 °С позволило определить пределы текучести и прочности высокооблученных образцов ТВС при этих температурах. Обнаружено появление ферромагнитной фазы в облученной до 23 сна стали 08Х16Н11М3.

Введение

Применение аустенитной стали 08Х16Н11М3 (аналог AISI 316) в реакторах на быстрых нейтронах обусловлено ее сравнительно высокой стойкостью к радиационному распуханию и коррозии среди реакторных сталей своего класса. Ранее ее использовали в различных модификациях в изготовлении тепловыделяющих сборок таких атомных реакторов как БН-350 (выведен из эксплуатации), БН-600 (эксплуатируется) и планируется к применению в качестве ВКУ в реакторе БН-800. В этой связи исследователи проявляют интерес к ее радиационной стойкости, например, к распуханию [1, 2]. В то же время, в литературе до последнего времени отсутствуют детальные исследования состояния области граней и ребер отработавших ТВС и в ряде случаев при оценке распухания ограничиваются общей профилометрией шестигранных чехлов. Кроме того, в литературе практически отсутствуют данные по механическим свойствам высокооблученной стали 08Х16Н11М3 при повышенных температурах, близких к температурам теплоносителя работающего реактора.

В настоящей работе представлены результаты материаловедческих исследований образцов, вырезанных из чехлов отработавших ТВС реактора на быстрых нейтронах БН-350 и облученных до различных повреждающих доз (макс. 43 сна). Определены величины плотности и микротвердости в зависимости от повреждающей дозы и места вырезки образцов (области грани или ребер). Использование методики испытаний по схеме «Shear Punch» позволило впервые определить механические характеристики в интервале температур 20-300°С высокооблученной нейтронами стали 08Х16Н11М3.

Исследованный материал и методика экспериментов

Исследовали образцы стали 08Х16Н11М3 в состоянии МТО до облучения, вырезанные из стенок чехлов эксплуатировавшихся ТВС реактора БН-350 с отметок, по высоте близких к центру активной зоны и близкими температурами облучения, а также с отметки верха активной зоны для сравнения (таблица 1).

Таблица 1. Описание исследованных образцов ТВС

Повреждающая доза, сна	Маркировка ТВС	Отметка от ЦАЗ, мм	Температура облучения, °С
0,2	ЦЦ-197	+1205	420
7	Н-214(2)	−500	309
15,6	Н-214(2)	0	337
23	№2	−300	300
43,1	П-41	0	290

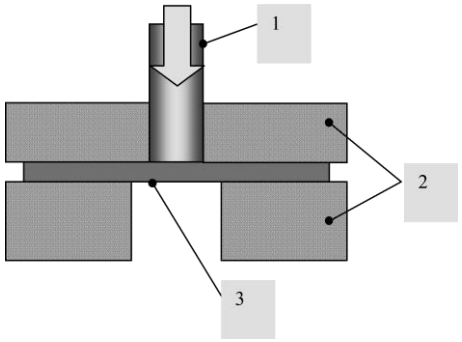
Первоначально заготовки под образцы представляли собой пластины длиной 50 мм, шириной 10 мм и толщиной 2 мм. Впоследствии эти пластины разрезали электро-искровой резкой на различные фрагменты, шлифовали, полировали, а также проводили металлографические исследования. Для определеня плотности методом гидростатического взвешивания использовались образцы размером 4×10×2 мм. Взвешивание проводилось на весах KERN-770 с точностью до 0,0001 г. После измерения плотности образцы разрезались на пластины 4×10 мм и толщиной от 200 до 400 микрон. Такие пластины использовались в механических испытаниях по схеме «Shear Punch», подробно описанной в [3] и приведенной на рисунке 1.

При определении пределов текучести и прочности использовали формулу:

$$\tau = \frac{F}{2\pi Rh}$$

где F – сила, прикладываемая к пуансону, 2R – диаметр пуансона, h – толщина образца.

Нагружение пуансона и регистрация нагрузки проводились на универсальной испытательной машине Instron-1195. Нагрев матрицы и пуансона осуществлялся через специально сконструированное керамическое кольцо с нагревательным элементом, а температура образца контролировалось термопарой с терморегулятором UNIT-F51.



1 – пуансон из высокопрочной стали, 2 – пластины матрицы, между которыми зажимается образец, 3 – образец

Рисунок 1. Принципиальная схема «Shear Punch»-испытаний

Измерение индуцированной облучением намагниченности некоторых образцов производилось с помощью феррозонда Fischer MP-30. Микротвердость (Н) определяли на твердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 г.

Экспериментальные результаты

В таблице 2 приведены результаты определения плотности стальных образцов, характеризующихся различной повреждающей дозой. В качестве исходного значения плотности была принята плотность образцов стали, вырезанных из ТВС ЦЦ-197, имевшей на отметке «+1205» повреждающую дозу 0,2 сна.

Таблица 2. Плотность стали 08Х16Н11М3 в зависимости от повреждающей дозы

Маркировка ТВС	Отметка от ЦАЗ, мм	Доза, сна	Температура облучения,° С	Плотность, г/см³	Распухание S, %
ЦЦ-197	+1205	0,2	420	7,972	0
Н-214(2)	−500	7	309	7,95	0,31
Н-214(2)	0	15,6	337	7,947	0,32
№2	−300	23	300	7,943	0,35
П-41	0	43,1	290	7,867	1,31

Поскольку ранее было установлено [2], что изменение плотности связано с распуханием вследствие образования в облученном материале пор, то в таблице 2 также приведены оценки величины распухания S. Известно, что распухание зависит от температуры облучения и скорости набора повреждающей дозы, поэтому образцы подбирались таким образом, чтобы температуры обучения были примерно одинаковыми. Из таблицы 2 видно, что сталь 08Х16Н11М3 демонстрирует значительную стойкость к радиационному распуханию плоть до повреждающей дозы 23 сна.

В ходе экспериментов было обнаружено, что такие свойства как распухание и микротвердость могут различаться по ширине грани чехла на одной высоте от ЦАЗ. На рисунке 2 представлена зависимость величины распухания и микротвердости для отметки «−300» (23 сна) по ширине грани и в области ребер чехла ТВС.

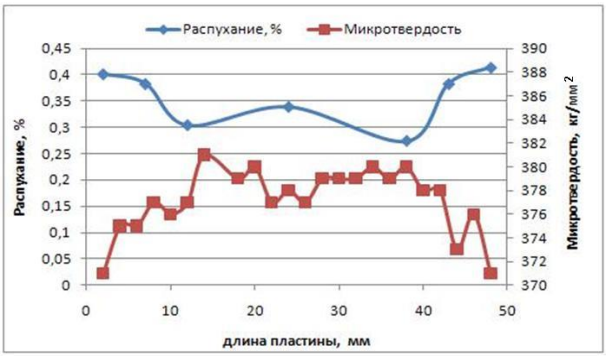


Рисунок 2. Распределение распухания S и микротвёрдости H по ширине грани чехла ТВС №2 стали 08Х16Н11М3 с отметки от ЦАЗ «−300». Начало и конец кривых соответствуют значениям S и H на ребрах чехла

Из рисунка 2 видно, что сталь значительнее распухает в области ребер чехла, чем в середине грани. Этот факт может быть связан с термомеханической обработкой, предшествовавшей облучению, поскольку в ходе прокатки круглой трубы и приданию ей формы шестигранного чехла сильнее всего деформируются ребра. Так, из полученных распределений следует, что, чем больше распухание, тем ниже микротвердость. Вероятнее всего, это объясняется тем, что большее число пор в области ребер снижает прочность материала матрицы.

Грань ТВС, облученная до 23 сна, также подвергалась сканированию по ширине с помощью феррозонда. Полученные результаты представлены на рисунке 3, из которого следует, что в изначально парамагнитной стали 08Х16Н11М3 непосредственно после облучения, без деформации, наблюдается небольшое количество ферромагнитной компоненты, которая неравномерно распределена по грани.

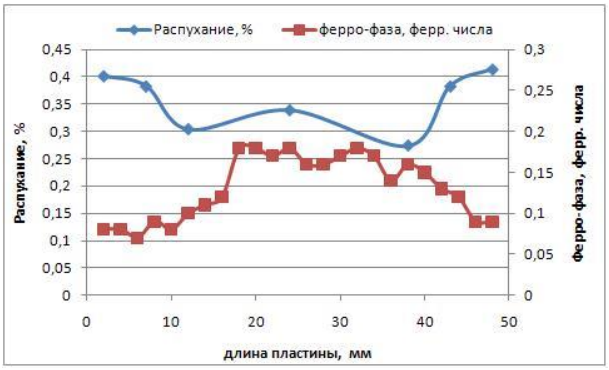


Рисунок 3. Зависимость распухания и феррофазы по грани чехла ТВС №2 стали 08Х16Н11М3 с отметки от ЦАЗ «−300». Начало и конец кривых соответствуют значениям на ребрах чехла

В тех частях грани, где распухание меньше, ферромагнитной фазы больше, и наоборот. В работе [2] по результатам электронной микроскопии высказано предположение, что за содержание феррофазы могут быть ответственны петли Франка, наблюдающиеся при дозах 1-20 сна.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБЛУЧЕННОЙ ОТ 0,2 ДО 23 СНА СТАЛИ 08Х16Н11М3 В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 20-300 °С

На рисунке 4 приведены кривые испытания образцов стали 08Х16Н11М3 при комнатной температуре по схеме «Shear Punch». Кривые имеют типичную форму для подобных испытаний и позволяют определять предел текучести и предел прочности «на сдвиг». При этом, как видно из рисунка, текущие нагрузки существенно зависят от толщины испытуемого образца. С целью отработки методических особенностей механических испытаний «на сдвиг» для стали 08Х16Н11М3 на примере образцов, облученных до 23 сна, был проведен ряд экспериментов с пробами различной толщины (рисунок 5).

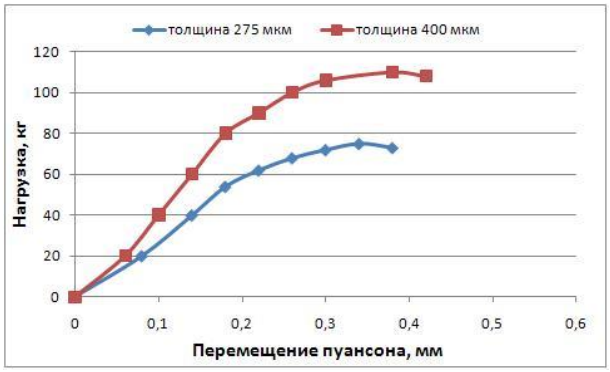


Рисунок 4. Кривые испытания «на сдвиг» облученных до 23 сна образцов стали 08Х16Н11М3 различной толщины (комнатная температура испытания)



Рисунок 5. Влияние толщины образцов на величины пределов текучести и прочности для стали 08Х16Н11М3, облученной до 23 сна (ТВС №2 отметка «−300»). Комнатная температура испытания

В результате установлено, что при толщине образцов 290-400 мкм исследуемые характеристики практически не изменяются, что согласуется с данными, полученными в работе [3]. В дальнейших экспериментах для определения механических характеристик по схеме «Shear Punch» использовались образцы толщиной 350-400 мкм.

В таблице 3 приведены результаты экспериментов «на сдвиг» в интервале температур испытания 20-300°С. Из таблицы 3 видно, что в области повреждающих доз 7-16 сна наблюдается уменьшение пределов текучести и прочности при различных температурах по отношению к менее облученной стали. Возможно, причиной тому является отличная от других микроструктура облученной стали и более высокая температура облучения.

Таблица 3. Значения пределов текучести $\sigma_{тек}$ и пределов прочности $\sigma_{пр}$ (МПа) для стали 08Х16Н11М3 по результатам испытаний «на сдвиг» в зависимости от повреждающей дозы в интервале температур 20-300 °С

Доза, сна \ $T_{исп}$, °С		20	100	200	300
0,2	$\sigma_{тек}$ / $\sigma_{пр}$	542 / 678	511 / 644	436 / 524	355 / 455
7	$\sigma_{тек}$ / $\sigma_{пр}$	522 / 601	– / –	– / –	330 / 412
15,6	$\sigma_{тек}$ / $\sigma_{пр}$	508 / 564	– / –	387 / 483	301 / 395
23	$\sigma_{тек}$ / $\sigma_{пр}$	648 / 869	616 / 727	553 / 648	395 / 569

Результаты механических испытаний свидетельствуют о том, что сталь 08Х16Н11М3 при температурах, характерных для работающего атомного реактора, сохраняет свою работоспособность, как минимум, до набора повреждающей дозы 23 смещений на атом. При этом характер кривых, приведенных на рисунке 4, свидетельствует о ненулевой пластичности облученного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе материаловедческих исследований стали 08Х16Н11М3, облученной в реакторе БН-350 до различных повреждающих доз, было установлено следующее:

– исследуемая сталь достигает существенного распухания при величинах повреждающей дозы ~40 смещений на атом;

– обнаружена неравномерность в распухании вдоль ширины грани чехла ТВС, облученного до 23 сна. Распухание стали взаимосвязано с ее микротвердостью и количеством образовавшейся под облучением ферромагнитной фазы;

– применение методики механических испытаний «на сдвиг» по схеме «Shear Punch» при повышенных температурах позволило определить механические характеристики стали 08Х16Н11М3 в температурных условиях, сравнимых с режимом работающего реактора на быстрых нейтронах (~300 °С);

– установлено, что изначально парамагнитная нержавеющая сталь в результате облучения быстрыми нейтронами обогащается ферромагнитной фазой, что подтверждает ранее полученные данные [4, 5];

– сталь 08Х16Н11М3 показала свою работоспособность и радиационную стойкость при повреждающих дозах, как минимум, до 23 сна.

Литература

1. Чуев, В. В. Поведение конструкционных материалов в спектре быстрого реактора большой мощности: дисс… докт. техн. наук /В. В. Чуев. Защищена 26 октября 2007. Диссертационный совет Д201.003.01. ГНЦ РФ ФЭИ. – г. Обнинск. – 2007. – 265 с.
2. Цай, К. В. Микроструктурные особенности радиационного распухания и упрочнения аустенитных нержавеющих сталей, облученных в реакторах БН-350 и ВВР–К: дисс… докт. физ.-мат. наук /К. В. Цай. 01.04.07, защищена 10.2010, утверждена 02.2011. – Алматы. – 2010. – 242 с.
3. Гусев, М. Н. Shear Punch – новый прибор и метод определения механических свойств высокорадиоактивных материалов /М. Н. Гусев, О. П. Максимкин, Д. С. Матесов, П. В. Чакров //Вестник НЯЦ. – Вып. 4. – 2001. – С. 43-46.
4. Воронин, И. М. Ферромагнитные свойства аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов, облученных до высоких флюенсов нейтронов /И. М. Воронин, С. И. Порollo // Атомная энергия. – 1989. – Т.66. – Вып. 1. – С. 33-37.
5. Максимкин, О. П. Образование ферромагнитной α-фазы в аустенитных нержавеющих сталях под воздействием нейтронного облучения / О. П. Максимкин //Вестник НЯЦ. – Вып.3. – 2013. – С 17-26.

ШН-350 РЕАКТОРЫНДА ЖОҒАРЫ ДОЗАЛЫ СӘУЛЕЛЕНДІРУ НӘТИЖЕСІНДЕ 08Х16Н11М3 БОЛАТЫНЫҢ ФИЗИКО-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНҢ ӨЗГЕРУІ

Рубан С.В., Захаров М.А., Максимкин О.П.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Жоғары бүліндіру дозаларына дейін сәулелендірілген, ШН-350 реакторының жұмыс істеп болған ЖБҚ қапщықтарынан кесіліп алынған, 08Х16Н11М3 болат үлгілеріне кешенді материалтанулық зерттеулер жүргізілді. ЖБҚ қырының ені бойынша бүліндіру дозасына тәуелді микроқаттылық пен ісіну туралы жаңа мәліметтер алынды. ЖБҚ-ның қабырғалары қырларына қарағанда анағұрлым ісінетіні анықталды. 20-300°С сынау температуралар аймағында «Shear Punch» сұлбасы бойынша механикалық зерттеулер әдітемесін қолдану осы температураларда жоғарысәулелендірілген ЖБҚ үлгілерінің беріктік және аққыштық шектерін анықтауға мүмкіндік берді. 23 сна-ға дейін сәулелендірілген 08Х16Н11М3 болатында ферромагнитті фзаның пайда болуы анықталды.

CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF 08Cr16Ni11Mo3 STEEL AFTER HIGH IRRADIATION IN THE BN-350 REACTOR

S.V. Ruban, M.A. Zakharov, O.P. Maksimkin

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

Conducted complex research on materials science 08Cr16Ni11Mo3 steel samples cut from the covers of fuel assembles of BN-350 reactor, irradiated to high doses. New data on the microhardness and swelling of the width of the verge of fuel assembles, and depending on the damage dose. It has been found that the ribs fuel assembles swollen greater than the face. Application of the method of mechanical testing scheme «Shear Punch» in the temperature range 20-300 ° C test allowed to determine the yield and breaking limits of samples high irradiated fuel assembles at these temperatures. It was found the appearance of a ferromagnetic phase in the irradiated 08Cr16Ni11Mo3 steel up to 23 DPA.

УДК 533.9.08, 621.039.6, 533.9:51-73

РАСЧЕТНЫЙ КОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С УЧЕТОМ НАВЕДЕННЫХ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В УСТАНОВКАХ ТИПА ТОКАМАК

Садыков А.Д., Скаков М.К., Шаповалов Г.В., Садыкова М.С.

Государственный университет имени Шакарима, Семей, Казахстан
Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье приведено описание кода моделирования динамики магнитных полей в токамаке. Моделирование основано на вычислении магнитного поля от внешних токов и численном решении уравнения цепей для наведенных вихревых токов для каждого временного шага.

Ключевые слова: *токамак, магнитное поле, численное моделирование.*

Введение

Во всех крупных научных центрах, занимающихся проблемами УТС, таких как Culham centre – Великобритания (токамаки JET и MAST), Naka centre – Япония (токамак JT-60), ОАО НИИЭФА им. Ефремова и Курчатовский институт – Российская Федерация, токамак KSTAR – Южная Корея, Принстонская лаборатория физики плазмы – США и др., используются числен-ные модели плазмы и токамаков для моделирования самых различных процессов. Численные коды для электромагнитного анализа являются одними из важнейших, особенно на стадиях конструирования токамака (вычисление силовых нагрузок от магнитных полей на элементы установки) и получения пробоя плазмы (анализ формы полей и напряжений на начальной фазе плазменного разряда токамака с учетом вихревых токов).

Расчетные коды для моделирования процессов в токамаках разрабатываются и совершенствуются целыми группами людей с высокой квалификацией на протяжении вот уже 20-25 лет. Даже простое обучение квалифицированного специалиста навыкам ведения расчета с помощью численного кода порой занимает не меньше полугода. Такая степень сложности численных кодов объясняется тем, что для пользования кодом нужно хорошо понимать не только физику исследуемых процессов, но и особенности численного метода данного кода. Если же говорить о разработке численных кодов, то также необходим хороший уровень владения навыками программирования на ЭВМ.

Отработка начальной стадии разряда на токамаках – это, по сути, поиск необходимой конфигурации магнитного поля внутри вакуумной камеры токамака. Учитывая сложную геометрию полей, которая формируется не только обмотками полоидального поля, но и токами, наводимыми на проводящих электрический ток элементах токамака, получение требуемых магнитных полей в токамаке является сложной задачей. Для того чтобы данная задача была осуществлена, необходимо либо получать магнитные поля экспериментально, вводя ток в различные обмотки электромагнитной системы токамака по различным законам и регистрируя большое количество диагностической информации, либо производить расчет на модели. Первый вариант влечет за собой большие капитальные затраты, в виду привлечения большого количества специалистов и использования большого количества электрической энергии. Поэтому численный код расчета динамики магнитных полей актуален для снижения капитальных и временных затрат на этапе подготовки токамака к экспериментам.

Постановка задачи и описание численного метода

Моделирование магнитных полей основано на электромагнитной теории Максвелла, основу которой составляет следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E}, \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c^2}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}, \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{1}{\varepsilon_0}\rho_q, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0. \end{aligned} \qquad (1)$$

Решение данной системы уравнений аналитически возможно только для некоторых идеализированных случаев. Решение системы уравнений Максвелла в общем случае возможно только с использованием численных методов.

Для удобства расчетов магнитных полей принято вводить новую векторную величину – векторный потенциал ***A***. Вводят ее из соображений, что дивергенция ***B*** всегда равна нулю и дивергенция ротора равна нулю. То есть магнитную индукцию ***B*** всегда можно представить в виде ротора другой векторной функции, то есть

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \qquad (2)$$

Такой выбор вспомогательной функции позволяет производить расчет статических магнитных полей по аналогии с расчетом статических электрических полей.

В случае моделирования магнитных полей на токамаках пользуются цилиндрической системой координат. Такая система координат позволяет рас-

считывать магнитные поля только для двух измерений, поскольку третье измерение в приближении аксиальной симметрии токамака является избыточным.

В цилиндрической системе координат вместо векторной величины магнитного поля используется скалярная величина потока магнитного поля Ψ через кольцо радиуса r:

$$\psi(r,z)=\int_0^r B_z(r,z)2\pi r dr, \qquad (3)$$

где B_z – вертикальная компонента вектора магнитной индукции.

Это значительно упрощает расчеты, потому что вместо трех проекций магнитного поля (по сути трех разных функциональных зависимостей $B_r(r,z,\varphi)$, $B_z(r,z,\varphi)$, $B_\varphi(r,z,\varphi)$), в расчетах используется только одна величина магнитного потока (одна функциональная зависимость $\Psi(r,z,\varphi)$).

Компоненты магнитного поля всегда могут быть найдены по формулам:

$$B_r=-\frac{1}{2\pi r}\frac{\partial\psi}{\partial z},\qquad B_z=\frac{1}{2\pi r}\frac{\partial\psi}{\partial r}. \qquad (4)$$

В виду аксиальной симметрии токамака (симметрия по углу φ) компонента $B_\varphi(r,z,\varphi)$ не используется в расчетах.

Для расчета величины потока в любой точке (точнее через любой контур в виде окружности) чаще всего используют так называемые в математической физике функции источника. Функция источника – это, по сути, некий коэффициент воздействия в точке пространства от какого-либо источника поля. В случае с магнитными полями для токамака источником являются электрические токи в проводящих элементах токамака (обмотки токамака, камера токамака и ее элементы, плазма), а функция источника представляется в виде:

$$G(r,z,r_p,z_p)=\sqrt{\frac{r\cdot r_p}{k^2}}\left[(2-k^2)K(k)-2E(k)\right], \qquad (5)$$

где

$$k^2=\frac{4r\cdot r_p}{(r+r_p)^2+(z-z_p)^2}, \qquad (6)$$

а $K(k)$ и $E(k)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода:

$$K(k)=\int_0^{\pi/2}\frac{d\Theta}{\sqrt{1-k^2\sin^2\Theta}},\qquad E(k)=\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-k^2\sin^2\Theta}\,d\Theta. \qquad (7)$$

Функция $G(r,z,r_p,z_p)$ – поток в точке (r,z) от кольцевого тока, расположенного в точке (r_p,z_p), то есть по сути взаимная индуктивность двух бесконечно тонких колец.

Такой подход позволяет вычислять скалярную величину потока для любой точки пространства от любого конечного числа проводников простым алгебраическим сложением действий всех источников.

Вычисление значения функции G для каждой точки расчетной области от всех источников поля является очень затратной в процессорном плане операцией. Но в виду того, что у современных ЭВМ установлен большой объем оперативной памяти, гораздо целесообразнее один раз рассчитать таблицу значений функции источника для всей расчетной сетки и сохранить ее в оперативную память. В дальнейшем вычисление магнитного поля будет представлять собой простое умножение величины воздействия источника (ток в элементе) на величину функции источника, что позволит значительно ускорить расчет.

Токи, наведенные на пассивных элементах, определяются в результате решения уравнений Кирхгофа

$$\mathbf{L}\frac{d\mathbf{I}}{dt}+\mathbf{R}\mathbf{I}=-\frac{\partial\boldsymbol{\psi}}{\partial t}, \qquad (8)$$

где $\mathbf{L}$ – матрица индуктивностей (положительно определенная и симметричная),

$\mathbf{I}$ – вектор токов пассивных элементов,

$\mathbf{R}$ – диагональная матрица сопротивлений,

$\boldsymbol{\psi}$ – вектор суммарного потока от внешних активных проводников.

В ходе преобразований (8) для схемы первого порядка (неявной схемы Эйлера) получим

$$\mathbf{I}_{k+1}=(\mathbf{E}+\mathbf{L}^{-1}\mathbf{R}\Delta t)^{-1}(\mathbf{I}_k-\mathbf{L}^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{\psi}_k}{\partial t}\Delta t), \qquad (9)$$

где $\mathbf{I}_{k+1}$ – вектор токов на шаге $(k+1)$,

$\mathbf{I}_k$ – вектор токов на шаге k,

$\mathbf{E}$ – единичная матрица,

$\mathbf{L}^{-1}$ – матрица, обратная к L,

Δt – шаг по времени.

Расчет собственных и взаимных индуктивностей пассивных элементов производится при помощи функции Грина.

Для решения уравнения (9) необходима процедура обращения матриц. Для реализации обращения матриц будет использована библиотека alglib [1]. Данная библиотека удобна тем, что она свободна для использования и поставляется в исходных кодах.

ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОГРАММОЙ

Графический интерфейс программы разработан на основе интерфейса численного кода «TOKSCEN» [2-4] (рис. 1).

Рабочая область главного окна разделена на две области:

– Область управления расчетами – левая часть окна, где расположены кнопки управления расчетом.

– Область графического отображения – правая часть окна, где происходит отображение геометрии токамака, линий уровня рассчитанной функции потока $\Psi(R,Z)$ и различных рассчитанных данных.

Элементы токамака изображены следующим образом:

– активные обмотки изображены в виде прямоугольников (красного цвета – с положительным током, синего цвета – с отрицательным, зеленого цвета – с нулевым);

– пассивные элементы изображены в виде заштрихованных прямоугольников;

– лимитеры изображены в виде крестиков (в программе для моделирования динамики магнитных полей данный объект будет удален из программы).

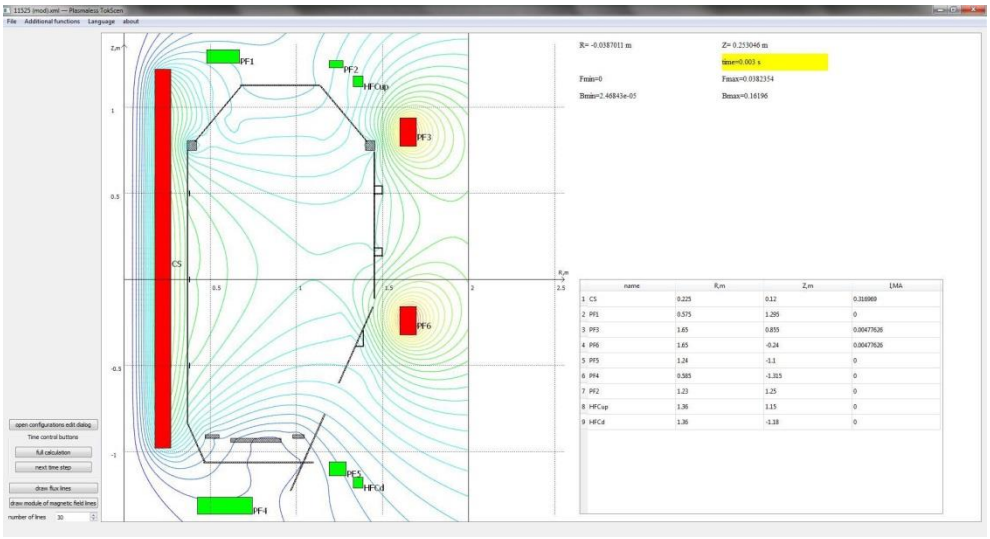


Рисунок 1. Главное окно программы

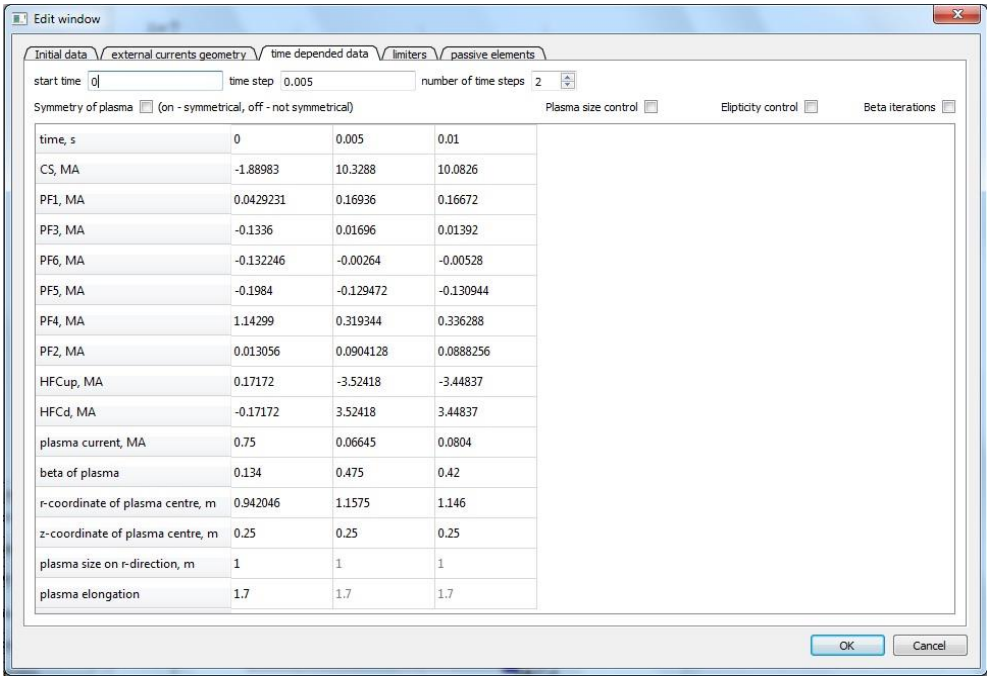


Рисунок 2. Окно редактирования данных программы (вкладка данных с временной зависимостью)

В начале любого расчета необходимо ввести в программу набор входных данных. На рисунке 2 показано окно редактирования данных. Как видно из рисунка 2 входные данные сгруппированы по вкладкам.

В коде моделирования динамики магнитных полей вводимых данных будет значительно меньше, чем в коде «TOKSCEN». Ввод лишних данных будет удален из программы.

В меню «additional functions» можно вызвать просмотр таблицы индуктивностей для пассивных элементов и графиков токов, наведенных на них, таблицы магнитных полей по координатам, заданным пользователем.

Реализована возможность сохранения текущей конфигурации в файл формата *.xml. В файл будут сохраняются все исходные данные и данные, полученные при расчете на данном временном шаге (таблицы потоков от внешних обмоток и пассивных элементов и др.). При загрузке параметров из файла расчет продолжается с момента, когда было произведено сохранение.

Заключение

В данной работе представлен план по разработке расчетного кода динамики магнитных полей в токамаке. Данный код позволит рассчитывать конфигурацию магнитного поля в установке токамак, с учетом вихревых токов, наводимых в проводящей структуре установки, при заданных функциях изменения токов в обмотках. Расчет заключается в вычислении функции потока магнитного поля для каждого момента времени с учетом динамических эффектов при переходе на каждый следующий шаг по времени.

В программе реализован удобный и понятный интерфейс расчетного кода «TOKSCEN», графический интерфейс которого был разработан при помощи библиотек Qt [5], которые являются свободно распространяемыми под лицензией GNU LGPL 2.1 и кросс-платформенными.

Разработка данного расчетного кода является частью работ по гранту МОН РК № 2064/ГФ4. Разрабатываемый расчетный код предполагается использовать для поиска предпробойных конфигураций магнитного поля в токамаке КТМ.

Литература

1. Интернет-сайт библиотеки alglib: http://alglib.sources.ru/
2. A.D. Sadykov *et al* 2015 *Nucl. Fusion* 55 043017. doi:10.1088/0029-5515/55/4/043017. http://stacks.iop.org/0029-5515/55/043017
3. А.Д. Садыков, Г.В. Шаповалов, Б.Ж. Чектыбаев, Д.Ю. Сычугов, Н.А. Гасилов Расчетный код «TOKSCEN» моделирования сценария разряда в токамаке (модуль библиотеки «Виртуальный токамак»). – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2013 вып. 4, с. 94-101.
4. Садыков А.Д., Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж., Сычугов Д.Ю., Гасилов Н.А., Расчетный код моделирования эволюции плазмы в токамаке КТМ «TOKSCEN». – Вестник НЯЦ РК, №3, 2013, с. 80-83.
5. Интернет-сайт библиотеки Qt: http://www.qt.io/

ТОКАМАКТА ИНДУКЦИЯЛАНҒАН ҚҰЙЫНДЫ ТОКТАРДЫ ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП МАГНИТ ӨРІСТЕРІНІҢ ДИНАМИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ КОМПЬЮТЕРЛІК КОДЫ

Садыков А.Д., Скаков М.К., Шаповалов Г.В., Садыкова М.С.

Шәкәрім атындағы Мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан
ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада токамак магнит өрістері динамикасының модельдеу коды сипатталады. Модельдеу сыртқы токтардың магнит өрістерін есептеу мен әр уақыт қадамы үшін индукцияланған құйынды токтар тізбегінің теңдеулерін сандық есептеу негізінде жүзеге асырылады.
Түйінді сөздер: *токамак, магнит өрісі, сандық модельдеу.*

COMPUTATIONAL CODE FOR MODELING THE DYNAMICS OF MAGNETIC FIELDS CONSIDERING THE INDUCED EDDY CURRENTS IN TOKAMAKS

A.D. Sadykov, M.K. Skakov, G.V. Shapovalov, M.S. Sadykova

State university named after Shakarim, Semey, Kazakhstan
Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The description of the code for modeling of magnetic field dynamics has been shown in the article. The modeling bases on calculation of the magnetic field from outer currents and numerical solution of circuit equations for eddy currents for every time step.
Keywords: *tokamak, magnetic field, numerical modeling.*

УДК 538.97-405

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ТЯР НА ИМИТАЦИОННОМ СТЕНДЕ

Соколов И.А., Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Рахадилов Б.К., Туленбергенов Т.Р.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Задача данной работы заключалась в определении параметров плазмы на имитационном стенде, выборе режима проведения экспериментов, соответствующего нагрузкам со стороны пристеночной плазмы ТЯР на материалы первой стенки и проведении самого эксперимента с последующими исследованиями материала. В статье приведены параметры плазмы, достигнутые на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой, рассчитанные с помощью зондовой диагностики плазмы. Положено начало для создания базы данных по параметрам взаимодействия плазмы с материалами ТЯР на имитационном стенде в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Отработана методика исследований взаимодействия плазмы ТЯР с материалами на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой.

Введение

В начале восьмидесятых годов прошлого века на ионно-пучковых установках были получены основные представления о процессах, которые происходят под действием ионов на поверхность твердого тела. К таким процессам относятся распыление материала, захват и отражение от поверхности твердого тела частиц. В настоящее время продолжаются исследования взаимодействия плазмы с конструкционными материалами ИТЭР на действующих токамаках. Но материаловедческие исследования процессов на токамаках достаточно сложны и дорогостоящи. Поэтому большая доля таких исследований проводится на сравнительно простых имитационных установках.

Существует достаточно много установок, используемых для моделирования взаимодействия плазмы термоядерных установок с обращенными к ним элементами. Это американская установка PISCES-A и PISCES-B, японская NAGLIS (TPD,NAGLIS-II) немецкая PSI (PSI-1, PSI-2). Все эти установки получили название линейные симуляторы, так как представляют собой источники плазмы с дуговым разрядом в продольном магнитном поле напряженностью до 0,1 Тл [1].

Эти установки используются для изучения приграничной плазмы и поведения в ней различных материалов. Типичная схема реализации подобного симулятора – это длинная, как правило, цилиндрическая вакуумная камера, помещенная в прямой соленоид из коротких катушек (первый PISCES, ЛЕНТА, NAGLIS, PSI и другие) длиной несколько метров.

Несмотря на то, что существующие имитационные установки могут воспроизводить лишь отдельные повреждающие факторы термоядерного реактора (ТЯР), они весьма эффективны для проведения исследований, поскольку позволяют оперативно проводить испытания кандидатных материалов, пополнять базу данных по разнообразным аспектам плазменно-поверхностного взаимодействия, проверять расчетные модели и отрабатывать диагностические методики в достаточно хорошо программируемых условиях.

Для достижения оптимальных параметров, необходимых для поддержания плазменного разряда в КТМ, требуется провести испытания материалов первой стенки термоядерного реактора, дивертор-ных приемных пластин и других внутрикамерных элементов реактора, выполнить предварительные расчетно-теоретические и экспериментальные работы, направленные на изучение изменений свойств и структуры конструкционных материалов в условиях их взаимодействия с плазмой.

1. Описание плазменно-пучковой установки

Стенд имитационных испытаний предназначен для изучения взаимодействия плазмы КТМ с материалами, для проведения испытаний диагностического оборудования, а также для развития существующих и разработки новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы, изучения свойств и поведения материалов при взаимодействии с плазмой [2].

Использование ППУ дает возможность оперативно получать предварительные экспериментальные данные о поведении материалов в условиях взаимодействия их с плазмой, что позволяет вносить коррективы в основные экспериментальные исследования на КТМ.

Основными элементами ППУ являются электронно-лучевая пушка (ЭЛП), камера плазменно-пучкового разряда (ППР), камера откачки ЭЛП, вакуумная камера взаимодействия, катушки ЭЛП, мишенное устройство, шлюзовое устройство и камера загрузки. Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда показан на рисунке 1.

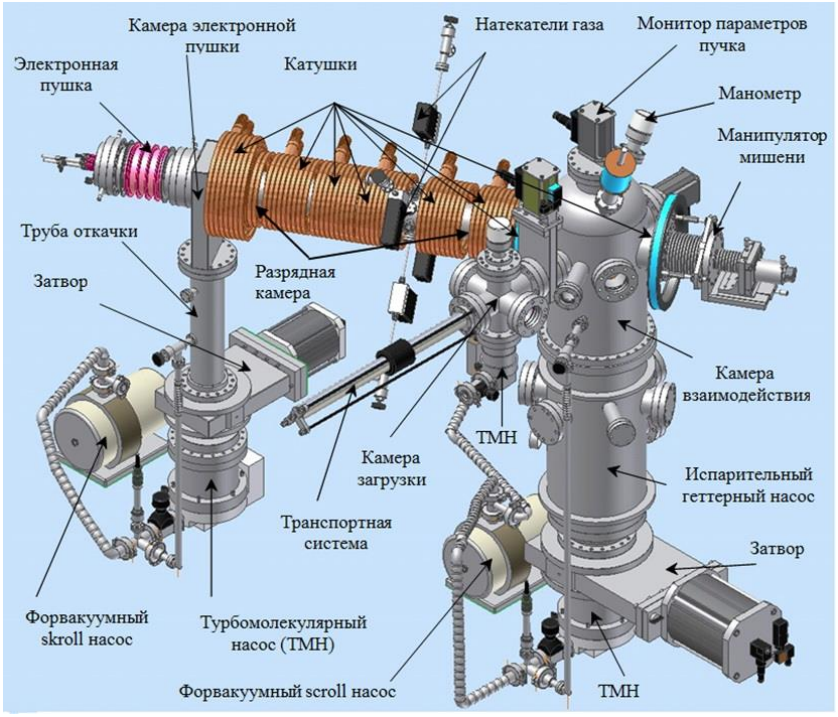


Рисунок 1. Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда

Установка обеспечивает получение следующих параметров плазменного потока: диаметр плазменного потока перед мишенью – до 30 мм; напряженность магнитного поля на оси камеры ППР – 0,1 Тл; величина плотности тока в плазме ~ 300 мА/см^2; плотность плазмы в пучке – до 10^{18} м$^{-3}$; электронная температура плазмы – до 100 эВ.

2. Подготовка образцов и установки с плазменно-пучковым разрядом

Как известно, для изготовления первой стенки ТЯР рассматриваются материалы с малыми атомными номерами Z – литий, бериллий, бор, а для компонентов, обращенных к плазме, подверженных экстремально высоким тепловым нагрузкам – вольфрам. В проекте международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (ITER) в качестве кандидатного материала первой стенки рассматривается бериллий, а для элементов горловины дивертора и частей диверторных мишеней – вольфрам [6, 7].

Применение вольфрама в ИТЭР рассматривается для компонент дивертора, испытывающих высокую тепловую нагрузку и контактирующих с низкотемпературной плазмой. Основное требование к материалам дивертора состоит в стойкости к экстремально высоким тепловым и корпускулярным нагрузкам, от которой напрямую зависит работоспособность его компонентов. Из-за невысокой глубины проплавления, при типичных параметрах срыва до 100 мкм [8, 9], вольфрам выглядит привлекательным для облицовки мишеней дивертора.

В связи с вышеизложенным в качестве материала для исследования выбран поликристаллический вольфрам марки СВИ-1. В таблице 1 приведен химический состав вольфрама марки СВИ-1.

Таблица 1. Химический состав вольфрама марки СВИ-1

Элемент	W	Y_2O_3	Mo	Si	Ni	Al	Fe	Ca
Содерж., %	97,623	1,5-2,3	0,040	0,010	0,005	0,005	0,007	0,010

Заготовки исследуемых образцов были изготовлены в виде дисков диаметром 10 мм и высотой 5 мм из прутка вольфрама марки СВИ-1. Вырезка образцов выполнялась на электроискровом станке модели № 4531 с использованием в качестве электрода латунной проволоки диаметром 0,3 мм. При этом образец не испытывал деформации и термического воздействия.

3. Проведение экспериментов по взаимодействию плазмы с образцами

Проведено облучение гелиевой плазмой двух образцов из вольфрама марки СВИ-1.

При запуске ЭЛП мощность накала катодно-подогревательного узла (КПУ) была выведена на рабочие параметры. Электрические параметры накала приведены в таблице 2.

Таблица 2. Электрические параметры накала электронной пушки

	Напряжение, В	Ток, А	Мощность, Вт
Прямой накал катода	5	14	70
Электронный накал катода	850	0,24	204

Для формирования электронного пучка электромагнитным полем, на блоки питания Genesys подавался ток:

- на катушку №1 ..... 350 А;
- на катушки №2-6 ..... 350 А;
- на катушку №7 ..... 350 А.

Для проведения экспериментов по облучению вольфрама плазменным пучком в камеру взаимодействия подавался рабочий газ – гелий до показаний высоковакуумных датчиков 10^{-3} Торр. Давление в камере ЭЛП составляло 5×10^{-5} Торр. После напуска рабочего газа в камеру ППР в каждом эксперименте определялся состав остаточных газов в камере взаимодействия: гелий (массовое число 4) – парциальное давление $1{,}4\times10^{-5}$ Торр; водяной пар (массовое число 18) с парциальным давлением $1{,}9\times10^{-6}$ Торр.

Типичная схема измерений параметров плазменно-пучкового разряда с помощью зонда Ленгмюра показана на рисунке 2.

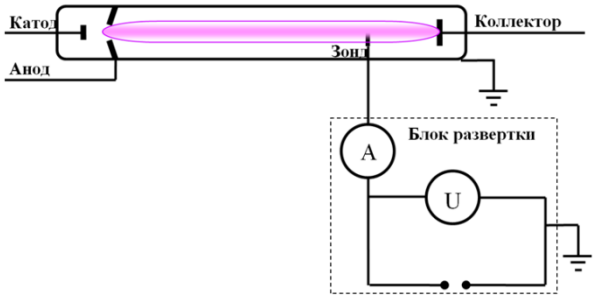
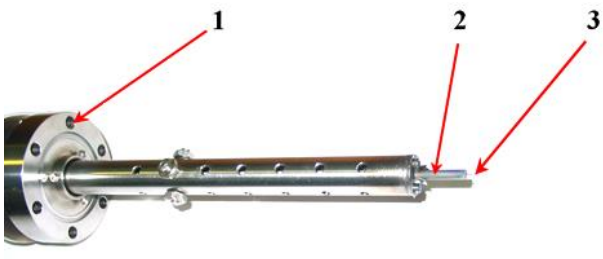


Рисунок 2. Принципиальная схема измерения параметров плазменно-пучкового разряда с помощью зонда Ленгмюра

Внешний вид зонда Ленгмюра показан на рисунке 3.

Электрод зонда изолирован по всей длине, кроме измерительной части, помещенной в плазму. Ток на зонде измеряется при различных значениях приложенного напряжения. По полученной вольт-амперной характеристике (ВАХ) рассчитывалась электронная температура и концентрация заряженных частиц согласно методикам [4, 5].



1 – фланец; 2 – изолятор; 3 – измерительный электрод зонда

Рисунок 3. Зонд Ленгмюра

ВАХ определяется следующим образом. Блок развертки генерирует импульс линейно изменяющегося напряжения от −200 В до +200 В длительностью около 25 мс. Когда зонд заряжен положительно относительно плазмы, электроны, двигаясь к нему, ускоряются, а ионы – отталкиваются. Ток, зарегистрированный на зонде, в этом случае в основном определяется электронами (1-й квадрант ВАХ). Когда зонд заряжен отрицательно относительно плазмы, ионы, двигаясь к нему, ускоряются, а электроны – отталкиваются. Ток, зарегистрированный на зонде, в этом случае в основном определяется ионами (3 квадрант ВАХ).

Были облучены 2 образца вольфрама с продолжительностью облучения 2 и 6 часов в стационарном режиме при одинаковых параметрах воздействия плазмы марки СВИ-1 в режиме ППР. Параметры облучения образцов плазмой в стационарном режиме приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры облучения образцов

Наименование параметра	Значение	
Давление гелия в камере плазменно-пучкового разряда и в камере взаимодействия, Торр	10^{-4}	
Индукция магнитного поля на центральной оси плазменно-пучкового разряда, Тл	0,1	
Напряжение пучка $U_{э\text{-}л.п}$, кВ	5	
Ток электронного пучка $I_{э\text{-}л.п.}$, мА	90	
Потенциал мишени $U_{миш}$, В	-900	
Ток мишени $I_{миш}$, мА	22	
Температура поверхности мишени Тм, °С	200	
Материал облучаемого образца	вольфрам СВИ-1	
Время облучения образцов t, ч	№ 1	2
	№ 2	6

4. Результаты исследований

4.1 Расчет параметров плазменного пучка

Для зажигания ППР использовался рабочий газ – гелий. На рисунке 4 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) зонда Ленгмюра, снятая при параметрах ППР приведенных в таблице 3.

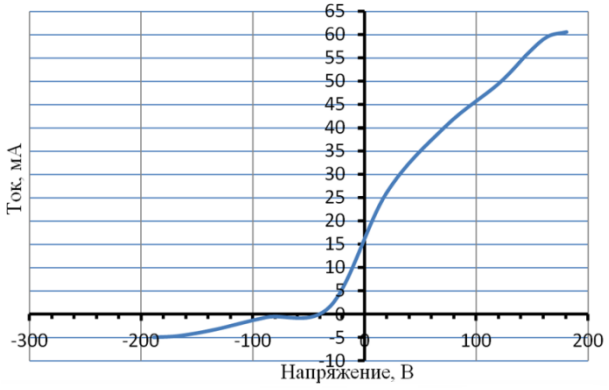


Рисунок 4. Вольт-амперная характеристика плазменно-пучкового разряда при мощности первичного пучка 450 Вт

Из полученной ВАХ в соответствии с формулой Бома [4, 5] ионный ток насыщения равен:

$$I = 0.4 n_i e \sqrt{\frac{2kT_e}{M}} S, \qquad (1)$$

где e – заряд электрона, e = 1.6×10^{-19} Кл;

ni – концентрация ионов, $м^{-3}$;

k – постоянная Больцмана, k=1.38×10^{-23} Дж/К;

S – площадь поверхности зонда, S = 1.1304×10-5 $м^2$ (диаметр зонда 0,6 мм и высота измерительной части 6 мм);

Te – температура электронов, К;

M – масса иона водорода, M = 1.67×10^{-27} кг.

Зная температуру электронов, из формулы (1) можно определить концентрацию ионов плазмы. Ионный ток насыщения (определяется по 3 квадранту ВАХ) равен 5×10^{-3}А.

Зависимость плавающего потенциала от электронной температуры [4,5] определяется по следующей формуле:

$$V_{пл} = \frac{kT_e}{e}\ln\left(1.4\sqrt{\frac{m}{M}}\right), \qquad (2)$$

где m – масса электрона, m = $9.11\cdot10^{-31}$ кг.

Плавающий потенциал (потенциал, при котором ток равен нулю), судя по ВАХ, приведенной на рисунке 3, равен −40 В.

Из формулы (2) следует, что электронная температура равна:

$$T_e = \frac{eV_{пл}}{k\ln\left(1.4\sqrt{\frac{m}{M}}\right)} = 1.36\times10^5\ К = 11.7\ эВ$$

Концентрация ионов согласно формуле Бома равна:

$$n_i = \frac{I}{0.4e\sqrt{\frac{2kT_e}{M}}S} = 1.46\times10^{17}\ 1/м^3$$

В ходе эксперимента был реализован режим работы ППУ при мощности первичного пучка 450 Вт с параметрами плазмы, которые приведены в таблице 4.

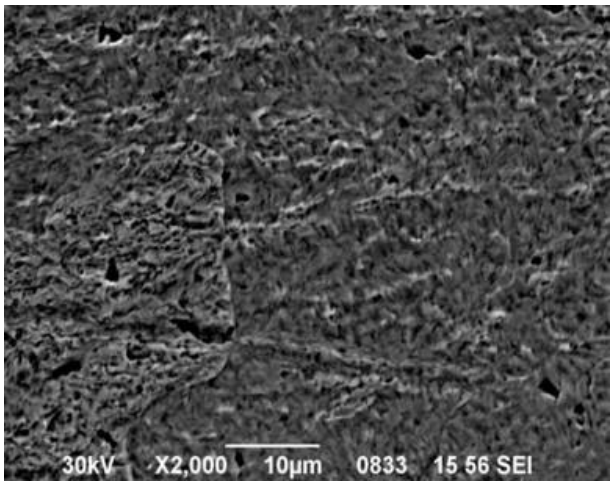
Таблица 4. Значения параметров плазменно-пучкового разряда

Мощность первичного пучка, Вт	Ионный ток насыщения, мА	Плавающий потенциал, В	Электронная температура, эВ	Концентрация ионов, 1/м³
450	5	-40	11,7	$1{,}46\cdot10^{17}$

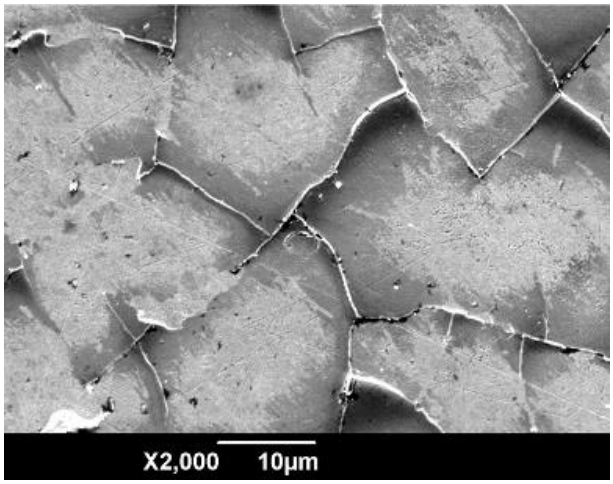
4.2 Исследование структуры образцов вольфрама СВИ-1

Перед проведением экспериментов была исследована поверхностная структура образца вольфрама марки СВИ-1 в исходном состоянии при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-6390, показанная на рисунке 5(а). Видно, что поверхность представляет собой однородную структуру, не имеет трещин и других дефектов.

На рисунке 5(б) показана структура образца №1 после облучения гелиевой плазмой в течение 2 часов. Для сравнения на рисунке 5(а) показана структура образца до облучения. Видно, что после облучения поверхность вольфрама полируется и происходит изменение ее рельефа. Этот эффект связан с тем, что различные кристаллографические плоскости обладают различной стойкостью к эрозии.



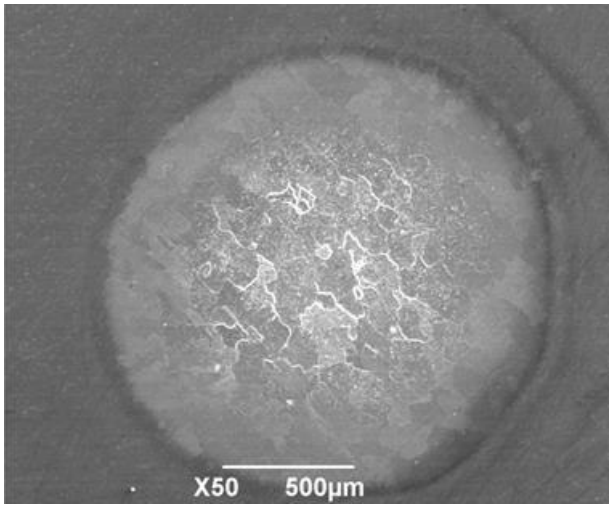
а) до облучения



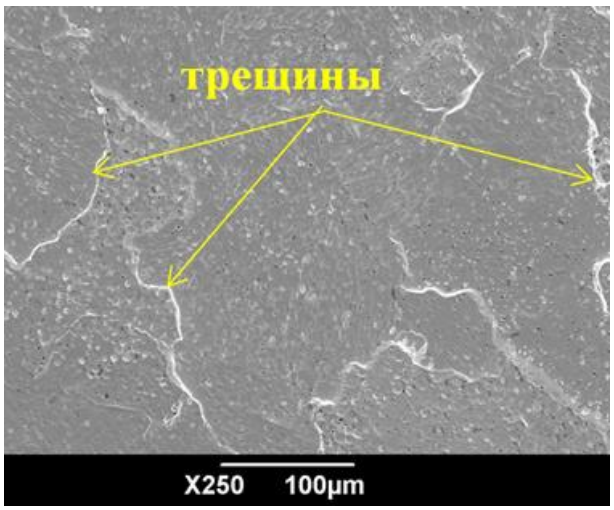
б) после облучения

Рисунок 5. РЭМ-изображение поверхности образца №1 до и после облучения плазменным пучком (2000-кратное увеличение)

На рисунке 6 приведены РЭМ-изображения образца №2. Этот образец был облучен гелиевой плазмой в течение 6 часов. На рисунке 6(а) показано пятно, образовавшееся в результате плазменного воздействия на вольфрам. В теле пятна видно большое количество микротрещин. На рисунке 6(б) трещины показаны под большим увеличением. Предполагается, что причиной появления этих структурных нарушений являются механические напряжения в решетке вольфрама, вызванные имплантированным гелием. Система трещин создает транспортный путь между поверхностью и объемом образца и можно ожидать глубокое проникновение гелия в объём металла.



а) пятно, образовавшееся в результате плазменного воздействия



б) трещины (250-кратное увеличение)

Рисунок 4. РЭМ-изображение поверхности образца №2 после облучения плазменным пучком

Таким образом, установлено, что облучение стационарной плазмой продолжительностью 6 часов приводит к формированию структурных нарушений поверхности вольфрама в виде микротрещин, а при облучении стационарной плазмой с продолжительностью 2 часа на поверхности вольфрама отсутствуют аналогичные дефекты.

Заключение

Отработана методика проведения испытаний, направленных на изучение взаимодействия плазмы с исследуемыми материалами с целью получения данных о влиянии плазмы на материалы КТМ.

Определены параметры водородного плазменного пучка такие, как электронная температура и концентрация ионов плазмы.

Проведены два эксперимента по исследованию взаимодействия гелиевой плазмы с вольфрамом в течение 2 и 6 часов. Мощность электронного пучка в обоих случаях равна 450 Вт.

Исследованы изменения поверхности вольфрама, возникшие в результате облучения вольфрама гелиевой плазмой:

– при облучении вольфрама гелиевой плазмой в течение 2 часов поверхность вольфрама полируется; происходит изменение ее рельефа;

– облучение вольфрама гелиевой плазмой длительностью 6 часов приводит к образованию микротрещин.

Результаты проведенных исследований положат начало для создания базы данных по параметрам взаимодействия плазмы с материалами ТЯР в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Литература

1. Обзор имитационных установок для моделирования взаимодействия плазмы с веществом в термоядерном реакторе и обоснование параметров имитационного стенда в сопровождение исследования на токамаке КТМ : промежуточный отчет : 85-3-021-129: Ч.1. – М. : МИФИ, 2005. – 40 с.
2. Стенд имитационных испытаний в сопровождение исследований на токамаке КТМ (СИИ-КТМ): итоговый отчет : 85-3-021-129: Ч.1. – М.: МИФИ, 2005. – 46 с.
3. Исследование взаимодействия плазмы с конструкционными материалами КТМ на плазменно-пучковой установке : Программа и методика испытаний /Филиал «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК». – Курчатов. – 2013. – 17 с. – №958 вн./13-240-02 от 19.06.2014.
4. Электрический зонд в плазме. Козлов О.В.: М., Атомиздат, 1969 г.
5. Зондовые методы исследования плазмы. Лабораторная работа. Составители: Сеченов В.А., Сон Э.Е.: М. 2002 г.
6. ITER Physics Basis / Ed. F.W. Perkins, D.E. Post, N.A. Uckan et al. // Nuclear Fusion. - 1999. - Vol. 39, No. 12. - P. 2080-2637.
7. Summary of the ITER final design report. - Garching, 2001. - 80 p. (Report of ITER Joint Central Team, G AO FDR 4 01-07-21 R0.4).
8. Assessment of erosion and tritium codeposition in ITER-FEAT / G. Federici, J.N. Brooks, D.P. Coster et al. // J. Nucl. Mater. - 2001. - Vol. 290 - 293. - P. 260 - 265.
9. Philipps V.. Roth J., Loarte A. Key issues in plasma-wall interactions for ITER: European approach // Plasma Physics and Controlled Fusion. - 2003. - Vol. 45. - P. 17-30.

ЕЛІКТЕУЛІ СТЕНДТТЕ ТЯР МАТЕРИАЛДАРЫМЕН ПЛАЗМАНЫҢ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕМЕСІН ЖЕТІЛДІРУ

Соколов И.А., Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Рахадилов Б.К., Туленбергенов Т.Р.

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Осы жұмыстың міндетті еліктеулі стентте плазма параметрларын анықтауда, бірінші қабырға материалдарына ТЯР қабырғалық плазма жағынан жүктеулерге сәйкес тәжірибелерді жүргізу режімін таңдау және материалды кейінгі зерттеумен тәжірибенің өзін жүргізуде болды. Мақалада плазманың зонд дигностикасының көмегімен есептелген плазмалық-шоқ қондырғымен еліктеулі стендте жеткізілген плазма парамтерлары келтірілді. Пайдаланудың нақты жағдайларына жақын еліктеулі стентте плазманың ТЯР материалдарымен өзара әрекеттесу параметрлары бойынша деректер базасын құру үшін басталуы салынған. Плазмалық-шоқ қондырғымен еліктеулі стендте материалдармен ТЯР плазмасының өзара әрекеттесуін зерттеу әдістемесі жетілдірілді.

DEVELOPMENT OF RESEARCH APPROACH ON PLASMA-TNR MATERIALS' INTERACTION BASED ON SIMULATOR

I.A. Sokolov, A.A. Kolodeshnikov, V.A. Zuyev, D.A. Ganovichev, B.K. Rakhadilov, T.R. Tulenbergenov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The study is aimed at identifying of plasma parameters on simulating test bench; choice of the appropriate experiment mode suitable for loadings providing from the side of the near-wall NTR plasma on the materials of first wall and realization of the experiment followed by the material investigation. The paper addresses plasma parameters achieved on the simulator with plasma-beam device having calculated by means of plasma probe diagnostics; laid foundation for creation of data base on the parameters of interaction between the plasma and TNR materials on the simulator under conditions close to real operation; developed research approach on plasma - TNR materials' interaction based on simulator with plasma-beam device.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СХЕМЕ АЭС С ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ

Сураев А.С., Котов В.М.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе рассчитаны теплофизические параметры теплообменных аппаратов АЭС с газоохлаждаемым реактором. Рассмотрены особенности схемы передачи тепла от реактора в контур паровой турбины. Проведено сравнение массы теплообменных аппаратов газоохлаждаемого реактора с парогенераторами реакторов типа ВВЭР. Рассмотрена возможность применения тонкостенных теплообменных трубок, разработана схема установки и для исследования процессов парообразования и перегрева пара. Показаны преимущества данного реактора над аналогичными зарубежными проектами газоохлаждаемых реакторов.

Введение

Катастрофические последствия тяжелых аварий на АЭС окончательно сформировали и укрепили общественное мнение о том, что АЭС небезопасны. В этой связи развитие атомной энергетики последние десятилетия направлено в сторону совершенствования систем безопасности АЭС. Внедрение большого числа активных, пассивных систем безопасности, многократное дублирование, резервирование важных узлов, призвано обеспечить безопасную эксплуатацию станции при любых, даже самых маловероятных исходных событиях. Такой подход привел к значительному увеличению капитальных затрат на строительство.

В данной работе показаны технические решения, способные сократить капитальные затраты на строительство АЭС, даже при условии постоянного роста процентных ставок экономики.

В работах [1, 2] отмечается, что лучшими по экономическим характеристикам среди современных реакторов являются водо-водяные реакторы. В работе [2] рассматривается возможность улучшения их технических и экономических характеристик. Показано, что предельные параметры таких реакторов, изначально определенные материальным составом активной зоны и контурами теплопередачи, уже достигнуты. В качестве возможной альтернативы указывается на реакторы канального типа, в которых достижение высоких параметров пара не вызывает однозначную необходимость повышения давления в корпусе реактора.

В работах [3-6] рассмотрен канальный реактор с газовым теплоносителем и водным замедлителем, обеспечивающий КПД до 45 – 50 %. Решения [4-6] имеют хорошее обоснование по ряду параметров.

В настоящей работе рассматриваются схемы передачи энергии от реактора в пароводяной контур. Приведены результаты теплофизического и конструкционного расчета теплообменников. Показана возможность использования тонкостенных теплообменных трубок. Проведен расчет энергетического баланса АЭС. Показаны преимущества предлагаемой схемы АЭС на основе газоохлаждаемого реактора.

Схема передачи тепловой энергии

Все АЭС с газоохлаждаемыми реакторами выполняются по двухконтурной схеме с использованием эффективных паровых турбин традиционной энергетики. Такой подход значительно упрощает и удешевляет проекты. Создание одноконтурной АЭС с гелиевым теплоносителем пока не представляется возможным, так как в этом случае давление газа будет на уровне 9 МПа. При таком давлении из-за высокой текучести гелия нормальная эксплуатация реактора будет затруднена. В данной работе АЭС на основе газоохлаждаемого реактора так же выполнена по двухконтурной схеме. Отличительной особенностью является использование энергии замедления нейтронов и утечек тепла из ТВС, а также тройной перегрев пара до начальных параметров перед каждой ступенью турбины.

Принципиальная схема контура передачи тепла в рассматриваемом газоохлаждаемом реакторе с водным замедлителем представлена на рисунке 1.

Данная схема включает в себя: газоохлаждаемый реактор, подогреватель, парогенератор, три пароперегревателя, турбину, конденсатор, циркуляционные насосы.

Реактор канального типа тепловой мощностью 1000 МВт. Это обусловлено наличием газового теплоносителя и водно-графитового замедлителя. Большая замедляющая способность легкой воды делает активную зону максимально компактной. В одном из рассматриваемых вариантов компоновки активная зона реактора состоит из 549 ТВС с внешним диаметром корпуса 10 см. Диаметр активной зоны 3 м, высота топливного сердечника в ТВС – 2,2 м. Каждая ТВС содержит 59 твэлов с внешним диаметром 6,8 мм. Давление замедлителя 2,5 МПа при температуре на входе в реактор 170 °С, теплоносителя – гелия на входе в ТВС 6 МПа. Максимальная температура теплоносителя составляет 615 °С. Таким образом есть возможность увеличения КПД за счет увеличения максимальной температуры теплоносителя.

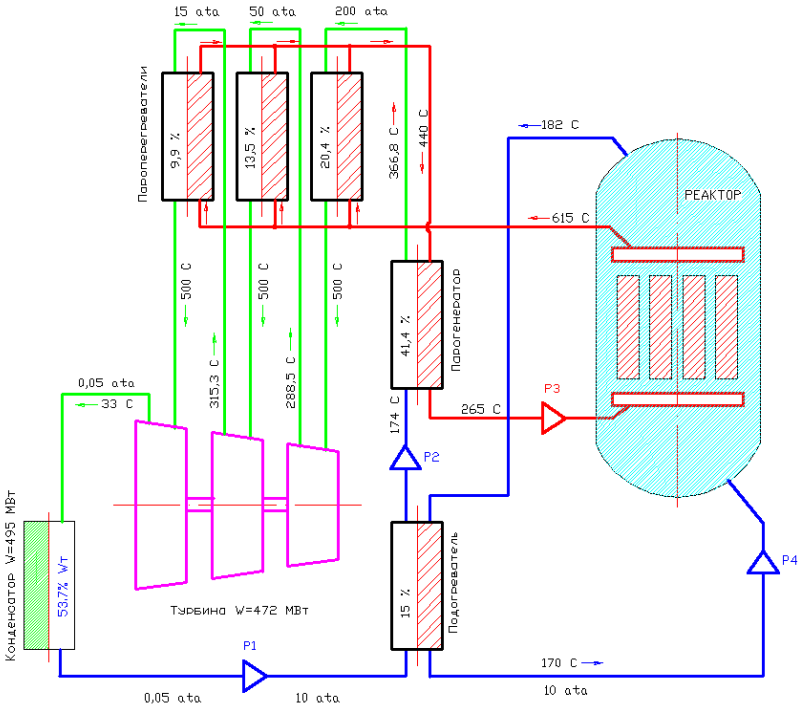


Рисунок 1. Принципиальная схема АЭС с ГО реактором и циклом Ренкина

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ РЕАКТОРА

В газоохлаждаемом реакторе схема передачи тепла от реактора к турбине реализована пятью теплообменными аппаратами различной мощности и назначения. Такой подход обеспечивает распределение нагрузки и способствует повышению надежности всего контура.

Подогреватель. Данный теплообменник мощностью 150 МВт предназначен для предварительного подогрева питательной воды перед производством пара. Особенность этого теплообменника заключается в том, что для подогрева используется энергия замедления нейтронов.

Парогенератор. Парогенератор кожухотрубного типа мощностью 414 МВт. В отличие от парогенератора ВВЭР-1000, в данном парогенераторе отсутствуют сепарационные узлы, что уменьшает его габариты и, следовательно, массу, а также обеспечивает более компактное и плотное размещение трубного пучка.

Пароперегреватели. Три пароперегревателя мощностью 204, 135 и 99 МВт реализуют ступенчатый перегрев пара до рабочей температуры 500 °С. Так же, в первом пароперегревателе происходит полное осушение пара, поступающего из парогенератора.

Таким образом, контур передачи тепла в рассматриваемом реакторе состоит из: подогревателя, парогенератора и трех пароперегревателей.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННИКОВ

На основе методик [7, 8], проведены оценочные расчеты всех теплообменных аппаратов. Полученные характеристики полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к теплообменникам газоохлаждаемого реактора – обеспечивается заданная производительность, простота исполнения, малый вес конструкции (по сравнению с теплообменниками ВВЭР-1000). Результаты представлены в таблице 1. Как следствие – малые финансовые затраты.

РАСЧЕТ МАССЫ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Масса теплообменника, а значит, и его металлоемкость напрямую влияют на стоимость изготовления. В таблице 2, для сравнения, приведены значения массы парогенераторов реактора ВВЭР-1000 и теплообменников газоохлаждаемого реактора. Данные свидетельствуют о том, что при нормировке мощности реакторов, теплообменные аппараты газоохлаждаемого реактора имеют массу почти вдвое меньшую, чем парогенераторы, используемые на ВВЭР-1000.

Уменьшение габаритов парогенератора газоохлаждаемого реактора стало возможным за счет следующих факторов:

– использование гелия в качестве теплоносителя;

– отсутствие сепарационных узлов (окончательное осушение пара происходит в первом пароперегревателе);

– использование тонкостенных трубок (улучшает теплопередачу и обеспечивает достаточную прочность);

– заполнение большей части объема кожуха теплообменными трубками (уменьшение диаметра кожуха, что напрямую влияет на его массу).

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В СХЕМЕ

Расчет энергетического баланса является неотъемлемым этапом теплофизических расчетов. Данные для расчета взяты из программы [9]. С его помощью осуществляется проверка значений параметров полученных в результате тепло-гидравлических расчетов. Также проведен оценочный расчет мощности турбины. При тепловой мощности реактора 1000 МВт мощность турбины составляет 472 МВт. Таким образом, электрический КПД-брутто данной схемы составляет 47,2 %. Результаты расчета баланса энергии представлены в таблице 3.

Таблица 1. Характеристики теплообменных аппаратов

Характеристика	Подогреватель	Парогенератор	Пароперегреватели		
			1	2	3
Исходные данные					
Мощность, МВт	150	414	204	135	99
Греющий теплоноситель	вода	гелий			
Температура на входе, °С	182	440	615		
Температура на выходе, °С	170	265	440		
Нагреваемый теплоноситель	вода	вода	водяной пар		
Температура на входе, °С	33	174	366,84	288,5	315,3
Температура на выходе, °С	174	366,84	500		
Давление в трубках, МПа	1,0	6,0	6,0		
Давление в кожухе, МПа	1,0	20,0	20,0	5,0	1,5
Расчетные данные					
Мощность расчетная, МВт	152,6	415,6	211,4	139,6	102,6
Паропроизводительность, т/ч	-	756,5	-	-	-
Расход общий, кг/с	2833	454,9	224	148,2	108,7
Скорость теплоносителя, м/с	2,83	50	49,2	49,8	49,9
Материал трубок	сталь 12Х18Н10Т				
Количество трубок, шт.	14562	15636	5010	3284	2439
Размеры трубок, мм	Ø7×0,3×2000				
Шаг треугольной решетки	10,5				
Масса трубок, кг	3641	3909	1252,2	821,2	609,9
Материал кожуха	сталь 12Х18Н10Т				
Внутренний диаметр, м	2,33	3,36	1,6	1,3	1,3
Толщина стенки, мм	100				
Масса кожуха, кг	30254	43093	31027	25327	22032
Масса теплообменника, кг	33895	47002	32279,2	26148,2	22641,9

Таблица 2. Сравнение масс теплообменников АЭС с ВВЭР-1000 и ГОР

	Парогенераторы ВВЭР-1000	Теплообменники газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем				
		Подогреватель воды	Парогенератор	Пароперегреватели		
				1	2	3
Мощность, МВт	4×800	152	415	211	139	102
Давление, МПа	16,0	1	20		5	1,5
Масса, т	4×264	34	47	33	27	23
Суммарная масса, т	1 056	164				
Удельная масса, (отн. ед.), отнесенная к тепловой мощности	1	0,47				

Таблица 3. Энергетический баланс

		Нагреватель (гелий)				Приемник тепловой энергии (пар-вода)				Турбина		
		Температура, °С		W тепл, МВт	G, кг/с	Температура, °С		W тепл, МВт	G, кг/с	Температура, °С		W мех, МВт
		вход	выход			вход	выход			вход	выход	
Подогреватель		182	170	150	2851,9	33	174	149,9	251			
Парогенератор		370	265	273,2	500,0	174	365,7	270,8				
		440	370	182,1		365,7	366,8	146,9				
Пароперегреватели	**1**	615	440	212,2	233,0	366,8	500	197,9		500	288,5	88,8
	2			140,1	153,9	288,5		137,2			315,3	91,0
	3			103,0	113,1	315,3		100,8			33	292,4
ИТОГО:				**1060,7**				**1003,6**				**472,2**

Проверочный расчет

Для проверки вышеприведенных оценочных расчетов было принято решение провести тепло-гидравлический расчет одного из теплообменников в программе ANSYS Fluent [10]. Была разработана расчетная модель подогревателя мощностью 150 кВт. Масштабное уменьшение мощности подогревателя обусловлено вычислительными возможностями. Трехмерная сеточная модель подогревателя представлена на рисунке 2.

Проведен теплофизический и гидравлический расчет. Результаты расчета модели подогревателя приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты проверочного расчета модели подогревателя

Параметр	Значение	
	Греющий теплоноситель	Нагреваемый теплоноситель
Мощность теплообменника, кВт	150	
Вид теплоносителя	вода	
Давление, МПа	1,1	
Расход, кг/с	2,83	0,24
Т на входе, °С	182	33
Т на выходе, °С	170	174
Средняя скорость, м/с	2,4	
Размеры теплообменных трубок, мм	Ø7×0,3×2000	
Масса теплообменных трубок, кг	3,65	
Количество теплообменных трубок, шт.	37	
Площадь теплообмена, м²	1,6	
Коэффициент теплопередачи, Вт/м²К	5360	

Сравнение с мировыми проектами ВТГР

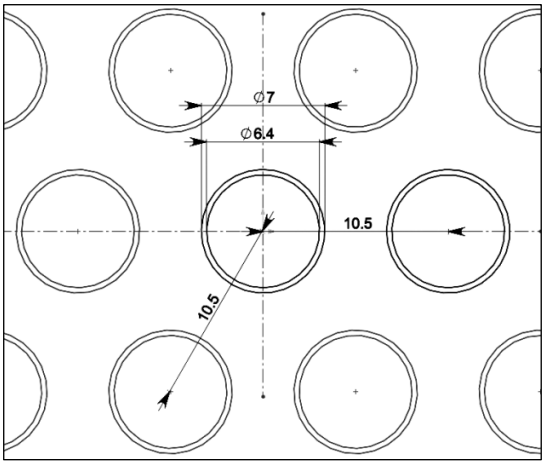
По данным МАГАТЭ [11] на сегодняшний день в мире идет разработка четырех проектов АЭС на основе газоохлаждаемых реакторов. Проекты АЭС представлены разными странами, имеют разную мощность, и преследуют различные цели. Примечательно то, что во всех проектах теплоносителем является гелий, а замедлителем графит. Если выбор графита как замедлителя очевиден, то многочисленные недостатки гелия вызывают споры в отношении целесообразности его применения. Тем не менее, данные приведенные в таблице 5 говорят о том, что на сегодняшний день гелий является лучшим газовым теплоносителем.

К недостаткам аналогичных зарубежных проектов можно отнести несколько факторов. Приведенные выше газоохлаждаемые реакторы относятся к высокотемпературным реакторам, работающим по циклу Брайтона или по неполному циклу Ренкина. Высокие температуры теплоносителя вынуждают отказаться от распространенных стержневых твэлов, что усложняет изготовление, эксплуатацию и переработку топлива. Малая мощность этих реакторов и меньший по сравнению с предлагаемым реактором КПД также показывают их неэффективность.

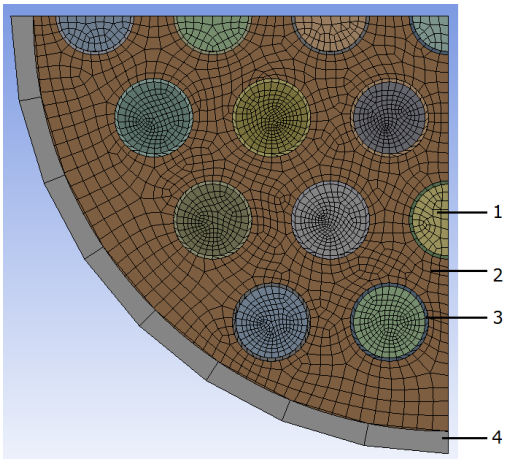
Разработка установки по исследованию процессов парообразования

Из наиболее значимых проблем связанных с эксплуатацией парогенераторов можно выделить следующие: коррозия, эрозия, виброизнос, кавитация, накопление отложений, разрыв теплообменных трубок. К вероятным причины их возникновения можно отнести: нарушение водного режима, высокие скорости теплоносителя, высокая температура, неэффективность систем продувки и промывки и т.д.

В рамках данной работы планируется проведение экспериментов, основной целью которых является изучение процессов происходящих в теплообменных трубках при интенсивном парообразовании с последующим перегревом пара относительно точки кипения на 150 °С. В современных реакторах этот перегрев близок к нулю.



а) размещение трубок



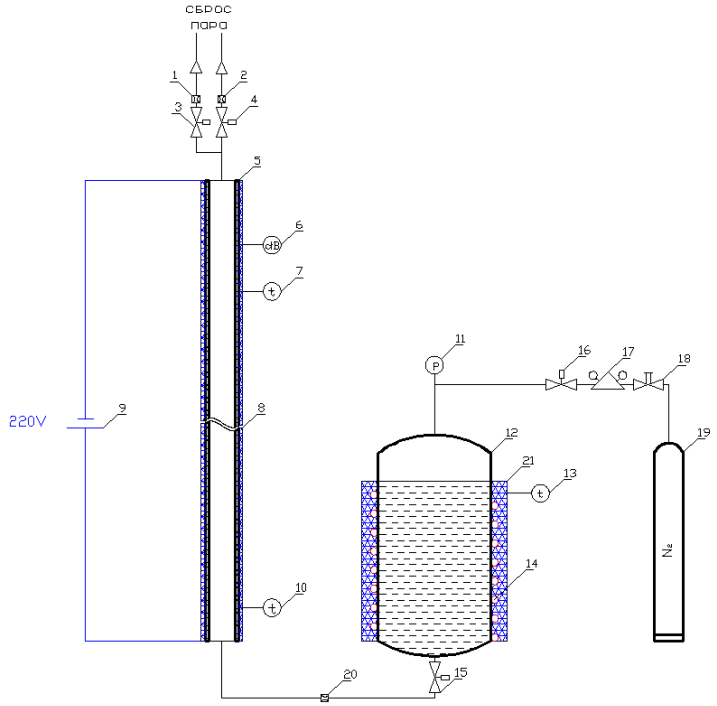
б) сеточная модель вид сверху

1 – трубное пространство; 2 – труба 7×0,3 мм; 3 – межтрубное пространство; 4 – корпус

Рисунок 2. Четвертая часть сеточной модели подогревателя

Таблица 5. Сравнение проектов газоохлаждаемых реакторов

Характеристика	ГОР с ВЗ	GTHTR300C	HTR-PM	PBMR	Prismatic HTR
Страна	Казахстан	Япония	КНР	ЮАР	США
Тепловая мощность, МВт	1000	600	500	400	350
КПД, %	46	45,6	42,2	41,2	42,9
Спектр нейтронов	тепловые нейтроны				
Теплоноситель	гелий				
Замедлитель	вода	графит			
Расход теплоносителя ч/з реактор, кг/с	549	439	96	96	157,1
Давление теплоносителя, МПа	6	7	7	6	6,39
Температура теплоносителя в реакторе (вход/выход), °С	265 / 615	587 / 850	250 / 750	250 / 750	322 / 750
Тип ТВЭЛ	стержневой	сферический			призматический
Вид топлива	UO_2+Th	UO_2+MOX	UO_2	UO_2	UCO



1, 2, 20 – расход задающее устройство; 3, 4, 15, 16 – электромагнитные клапаны; 5 – модель теплообменной трубки; 6 – шумомер; 7, 10, 13 – термопары; 8 – теплоизоляция; 9 – регулятор напряжения; 11 – датчик давления; 12 – емкость 10 л; 14 – теплоизоляция емкости; 17 – редуктор; 18 – баллонный вентиль; 19 – баллон с азотом

Рисунок 3. Принципиальная схема установки

Актуальность такой работы обусловлена еще и тем, что в настоящее время большинство вертикальных и горизонтальных парогенераторов имеют ряд недостатков, устранение которых приведет к значительному увеличению срока их службы и предупреждению потенциальных аварий.

Использование тонкостенных теплообменных трубок влечет как увеличение тепловых характеристик теплообменников, так и потенциальные риски, связанные с меньшей прочностью, при высоких температурах.

Описание экспериментальной установки. На рисунке 3 представлена разработанная принципиальная схема установки и ее элементы. Основным элементом является теплообменная трубка, выполненная из стали марки 12Х18Н10Т. Вода, предварительно нагретая в емкости до температуры 300 °С, подается на вход теплообменной трубки. В свою очередь, теплообменная трубка также предварительно разогревается прямым пропусканием электрического тока до рабочей температуры, при которой поступающая вода будет интенсивно испаряться. Рабочее давление 10 МПа создается с помощью баллона со сжатым азотом емкостью 40 л. Двустороннее управление установкой выполняется дистанционно с использованием системы автоматизированного управления.

Основные параметры. Проведен предварительный расчет параметров установки. Определены основные элементы, обозначена методика проведения эксперимента. Основные параметры установки приведены в таблице 6.

Таблица 6. Параметры установки

Параметр	Значение
Основные параметры	
Расход воды через трубку, г/с	13,47
Время активного режима эксперимента, с	300
Масса воды в емкости, кг (двукратный запас)	8
Параметры трубки	
D × толщина стенки × длина, мм	Ø7×0,3×5000
Материал	Сталь 12Х18Н10Т
Рабочее давление, МПа	10
Рабочая температура, °С	до 550
Мощность нагревателя, кВт	4-5
Параметры емкости	
Рабочее давление, МПа	10
Рабочая температура, °С	310
Объем емкости, л	10
Мощность нагревателя, кВт	3-5
Толщина теплоизоляции, мм	100

Прочностной расчет теплообменной трубки. Построена расчетная модель теплообменной трубки. Прочностной расчет проведен в программе Ansys Workbench [12]. Для расчета задана геометрия, материальный состав и граничные условия, имитирующие реальные.

Допустимая нагрузка на трубку из стали 12Х18Н10Т при температуре 550 °С составляет 135-205 МПа [13]. Это значение выбрано в качестве верхнего предела допустимой нагрузки.

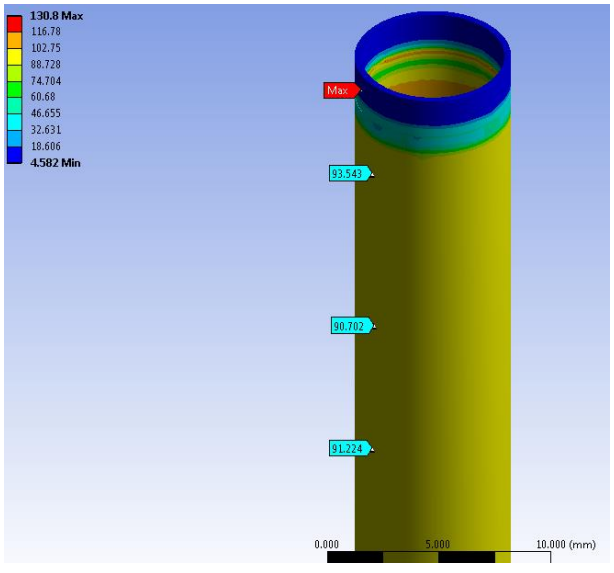


Рисунок 4. Результаты расчета

Проведенные расчеты показали, что максимальная нагрузка на трубку приходится в месте ее закрепления в трубную доску и составляет 130 МПа. Среднее же значение напряжения по длине трубки составляет 92 МПа. Таким образом, нагрузки, воздействующие на модель трубки Ø7×0,3 мм, не выходят за пределы допустимых значений. Распределение возникающих напряжений показано на рисунке 4.

Ожидаемые результаты эксперимента. Предварительные прочностные расчеты свидетельствуют о том, что тонкостенные теплообменные трубки могут быть использованы в парогенераторах. Результаты планируемого эксперимента позволят оценить правильность проведенных расчетов, выявить возможные проблемы и трудности, а также оценить потенциальные преимущества, связанные с использованием тонкостенных трубок для теплообменников. Интерес представляет влияние расположения теплообменной трубки (вертикальное, горизонтальное) на результаты эксперимента.

Выводы

Представленная схема реактора обеспечивает получение термодинамического КПД на уровне 46 % при температуре нагрева газа 615 °С, максимальном давлении пара 20,0 МПа и использовании теплообменных аппаратов кожухотрубного типа аналогично применяемым на ТЭС.

Использование гелия в качестве теплоносителя позволяет существенно уменьшить площадь теплообмена, так как его теплопроводность в несколько раз выше, чем у других газов (кроме водорода). Низкое давление теплоносителя значительно снижает вероятность возникновения больших течей и разрыва трубопроводов.

Турбина парового контура может быть построена с минимальным применением легированных материалов её лопаток, т.к. на выходе турбины достигается высокая сухость пара. Приведение параметров пара в пароперегревателях до 500 °С, позволяет получить электрический КПД порядка 47,2 %.

Удельная масса всех теплообменных аппаратов газоохлаждаемого реактора, приходящаяся на 1 МВт тепловой энергии, составляет менее 50% массы теплообменников реактора ВВЭР.

Разработана схема экспериментов, проведены предварительные расчеты, создана методика изучения характеристик теплообмена, включая парообразование.

Данная работа выполняется в рамках финансируемого проекта МОН РК «АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем».

Литература

1. Клименко А.В. Ядерная энергетика, у которой есть будущее / Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики / Сборник докладов XXIII Межведомственного семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом (Нейтроника-2012)». В 2-х томах. – Обнинск, ФГУП ГНЦ РФ&ФЭИ. 2013.– Том 1. С.107–124.
2. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010. – N 12. – С. 21-29 . – ISSN 0233-3619
3. Котов В.М., Зеленский Д.И. Газоохлаждаемый реактор с высоким коэффициентом полезного действия. Межотраслевая межрегиональная научно-техническая конференция "Перспектива развития атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения".Москва, 11-12 ноября 2010 г.
4. Котов В.М., Витюк Г.А., Иркимбеков Р.А., Мухаметжарова Р.А. Сопряжение тяжеловодного газоохлаждаемого реактора с циклом Ренкина. // Алматы. International Conference "Nuclear and Radiation Physics", 20-23 September 2011.
5. Котов В. М. Возможности газоохлаждаемых реакторов с водным замедлителем / Котов В.М., Витюк Г.А, Сураев А.С // Вестник НЯЦ РК – 2012. – Вып. 4. – С. 20–27.
6. Котов В. М. Возможности газоохлаждаемых реакторов с водным замедлителем / Котов В.М., Витюк Г.А, Сураев А.С // Атомная энергия. – 2014.– Т.116. – Вып. 1.– С. 6-10.
7. Новиков В.Н., Радовский И.С., Харитонов В.С. Расчет парогенераторов АЭС: Пособие к курсовому проектированию. ч. 2. М.: МИФИ, 2001. 68 с.
8. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.: ил.
9. Иванов М.Ю. Теплофизические свойства воды и водяного пара. Программный код Parvo 95. Версия 3.3. 2004 г. / http://fortraner.narod.ru/index.htm
10. Fluent version 6.3.26 User Reference; Fluent, Inc.; 2006.
11. IAEA’s web-accessible database ARIS /Advanced Reactors Information System/ https://aris.iaea.org/sites/GCR.html
12. Ansys Workbench version 14.5 User Reference; Ansys Inc.; 2014.
13. Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.: ил.

ГАЗДЫ САЛҚЫНДАТАТЫН РЕАКТОРЫМЕН АЭС СЫЗБАСЫНДА ЖЫЛУ АЛМАСТЫРУ ҮДЕРІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Сураев А.С., Котов В.М.

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмысында газды салқындататын реакторымен АЭС жылу алмастыру аппараттарының жылу физикалық параметрлары есептелді. Реактордан бу турбинаның контурына жылуды беру сызбасының ерекшеліктері қарастырылды. ВВЭР типті реакторлардың бу генераторларымен газды салқындататын жылу алмастыру аппараттарының массасын салыстыру жүргізілді. Жұқа қабырғалық жылу алмастыру түтікшелерді қолдану қажеттілігі қарастырылды, буды қатты қыздыру және будың пайда болу үдерістерін зерттеуге арналған қондырғы сызбасы әзірленді. Газды салқындататын реакторлардың ұқсас шетелдік реакторлардан осы реактордың ерекшеліктері көрсетілді.

THE STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE SCHEME OF NPP WITH GAS COOLED REACTOR

A.S. Suraev, V.M. Kotov

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RKN, Kurchatov, Kazakhstan

The work presents calculation of thermal parameters of heat exchangers of nuclear power plants with gas-cooled reactor. The features of the scheme of heat transfer from the reactor into the circuit of the steam turbine are considered. A comparison of mass of the heat exchangers of the gas-cooled reactor and steam generators of WWR-type reactors is carried out. The possibility of using thin-walled heat exchanger tubes is considered. The scheme of installation and study of vaporization and steam superheating processes is developed. The advantages of this reactor over similar foreign projects of gas-cooled reactors are shown.

УДК 550.344

НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦИФРОВКИ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Великанова А.А., Узбеков А.Н., Алещенко И.Б.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Впервые в РГП ИГИ внедрена новая методика, позволяющая оцифровывать аналоговые сейсмограммы с дугообразными записями от приборов РВЗТ и КСЭ. В новой методике использовано программно-математическое обеспечение DEARC, разработанное в ИГИ совместно с Ламонт-Дохерской обсерваторией Колумбийского университета США. Оно позволяет корректировать дугообразные сейсмограммы и приводить их к стандартному прямолинейному виду. Создана база данных оцифрованных сейсмограмм ядерных взрывов, содержащая около 7500 записей, в том числе 700 записей с помощью новой методики оцифровки. В настоящее время записи оцифрованных сейсмограмм используются как для различных задач сейсмического мониторинга, так и для современного мониторинга ядерных испытаний. С их помощью решаются задачи обнаружения, распознавания типа источника, а также определения и оценки параметров сейсмических событий.

Введение

Непрерывные сейсмологические наблюдения в Казахстане начали проводиться с 1927 года. С целью детального изучения сейсмичности территории Центральной Азии с 1951 г. прошлого века была образована стационарная сеть станций, расположенная на территории Северного Тянь-Шаня. Кроме стационарных, устанавливались временные станции специально для регистрации ядерных взрывов на региональных расстояниях. Все станции имели аналоговую форму записи. В сейсмологических архивах разных организаций Казахстана имеются записи двух видов: с прямолинейной регистрацией на фотобумагу – приборы СКМ (сейсмометр Кирноса механический) и СКД (сейсмометр Кирноса длиннопериодный) и регистрацией пером с дугообразной записью чернилами на обычную бумагу приборы РВЗТ (регистратор видимой записи трёхкомпонентный) и КСЭ (регистратор, созданный в комплексной сейсмологической экспедиции). Кроме записей станций, расположенных на территории Казахстана и прилегающих территориях Центральной Азии, архивы содержат большое количество сейсмограмм станций, расположенных на Кавказе, Урале, в Сибири, на Дальнем Востоке. Сейсмограммы, накопленные в казахстанских архивах, уникальны и являются бесценным материалом для научных исследований. Однако, сейсмограммы на обычной бумаге и фотобумаге, пролежавшие много лет в архиве, со временем темнеют и становятся хрупкими, чернильные записи выцветают. Кроме того, аналоговая форма записи является препятствием для дальнейшего использования при решении задач, где предусмотрена цифровая математическая обработка. Поэтому задача оцифровки аналоговых сейсмограмм и сохранение их в современных цифровых форматах является чрезвычайно актуальной.

Параметры аналоговой аппаратуры и анализ существующего программно-математического обеспечения

В РГП ИГИ, начиная с 2005 года, стартовала бюджетная программа «Создание электронного архива исторических сейсмограмм ядерных взрывов и землетрясений, зарегистрированных станциями специального контроля» (2005 - 2011 гг.). Большое количество сейсмограмм с прямолинейной записью было оцифровано при помощи программного комплекса NXSCAN [2]. Однако значительная часть материала так и осталась не оцифрованной, ввиду отсутствия подходящего математического обеспечения. Это записи станций, на которых регистрация сейсмических колебаний производилась с помощью приборов РВЗТ и КСЭ с дугообразным переписцем (таблица 1).

В силу особенности регистрации эти сейсмограммы имеют дугообразные искривления, которые не могут быть оцифрованы и откорректированы при помощи программы NXSCAN. Эти станции были расположены в Западном, Центральном и Северном Казахстане, где отсутствовали другие виды регистрации (рисунок 1).

Таблица 1. Характеристики аналоговой аппаратуры сейсмических станций

Прибор	Собственный период T_0, с	Увеличение	Развертка по времени, мм/мин	Тип регистрации	Количество каналов
СКД	20	1.0К-1.5К	60 или 30	фотобумага	3
СКМ	1.5, 2	25К-80К	120 или 60	фотобумага	3
УСФ	1.5	50К-80К	240 или 120	фотобумага	3
РВЗТ	1.25, 1.5	100К-300К	120	чернильный переписец	3
КСЭ	1.25, 1.5	300К-1000К	120	чернильный переписец	1

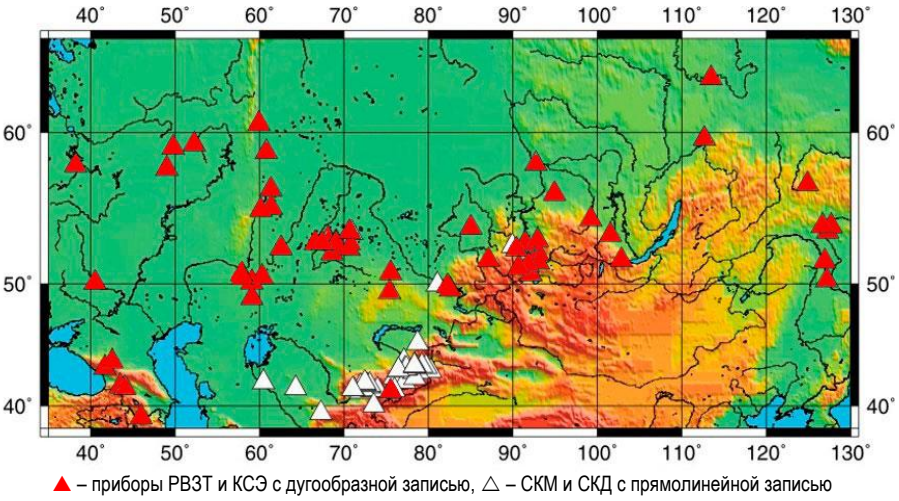


Рисунок 1. Карта расположения аналоговых станций КСЭ

Приборы на этих станциях имели увеличение, в десятки раз превышающие увеличение стандартных сейсмических станций, расположенных на Северном Тянь-Шане, что позволяло регистрировать даже самые слабые ядерные взрывы на удаленных расстояниях. Это видно по кривым амплитудно-частотных характеристик аналоговых приборов с прямолинейной (СКМ, СКД) и криволинейной (РВЗТ и КСЭ) записью, представленных на рисунке 2. В архивах содержатся несколько тысяч записей приборов РВЗТ и КСЭ с источниками на полигонах СИЯП, Новая Земля, в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории СССР, а также на ядерных полигонах Лобнор, Невада и др.

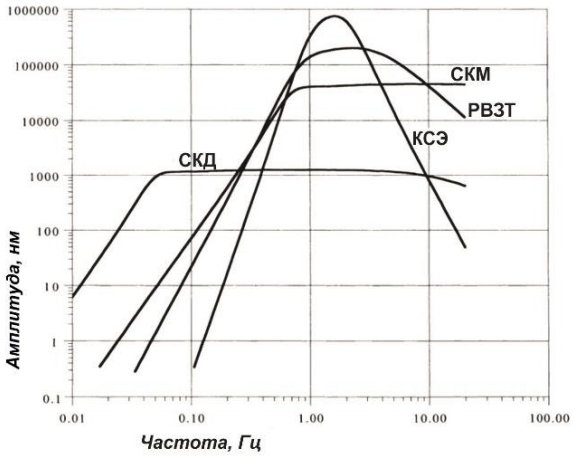
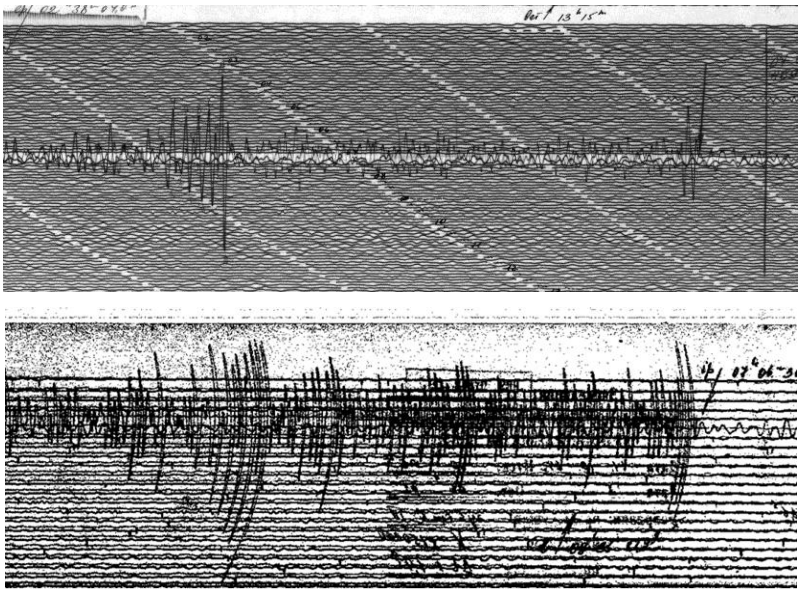


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики аналоговых приборов

Как пример, на рисунке 3 представлены фрагменты аналоговых сейсмограмм подземного ядерного взрыва на полигоне Новая Земля 16 октября 1969 г., t0=07-00-06.6, 73.38 с.ш., 54.796 в.д., зарегистрированных станцией Талгар TLG, приборами СКМ с прямолинейной записью и РВЗТ с криволинейной записью.

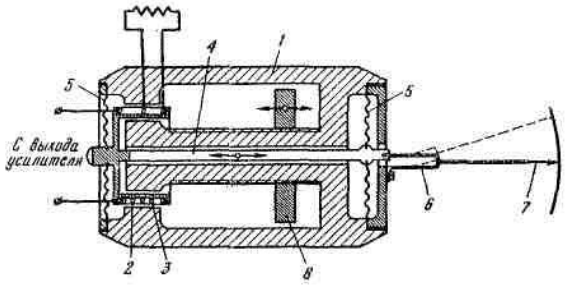


а)

б)

Рисунок 3. Фрагменты аналоговых сейсмограмм 16 октября 1969 г., t0=07-00-06.6, 73.38 с.ш., 54.796 в.д., зарегистрированных станцией Талгар TLG, прибор а) СКМ б) РВЗТ, компонента Z

На рисунке 4 представлен схематический разрез перопишущей головки приборов РВЗТ и КСЭ, а на рисунке 5 – механико-математическая схема регистрации дугообразного переписца.



1 – магнитная система, 2, 3 – катушки, 4 – стержень; 5 – дисковые пружины; 6 – п-образная пружина, 7 – перо, 8 – магнитный шунт

Рисунок 4. Схематический разрез перопишущей головки приборов РВЗТ и КСЭ

По схеме видно, что сейсмическая запись деформируется, и при оцифровке необходимо исправлять сейсмическую запись за счет кривизны, согласно формуле:

$$t(i)=\frac{60}{d}\left\{x(i)-r\frac{\arcsin\left(r^2+a^2-R^2+\left[y(i)-b\right]^2\right)}{2ar}+\right.$$
$$\left.+r\frac{\arcsin\left(r^2+a^2-R^2+b^2\right)}{2ar}\right\}. \quad (1)$$

Проведен анализ существующих программ оцифровки, позволяющих оцифровывать криволинейные сейсмограммы:

1) TESEO – разработана в INGV (Италия). Платформа LINUX, WINDOWS.

2) DGS – разработана в SYNAPSE (Россия). Платформа UNIX, LINUX, WINDOWS.

Оба программных пакета наряду с преимуществами имеют и ряд недостатков, DGS – лицензионный коммерческий продукт, а оцифровка с помощью TESEO занимает гораздо больше времени, чем программный комплекс NXSCAN, который используется в РГП ИГИ для оцифровки прямолинейных сейсмограмм.

МЕТОДИКА ОЦИФРОВКИ ДУГООБРАЗНЫХ АНАЛОГОВЫХ СЕЙСМОГРАММ

В 2012 году стартовал совместный с Ламонт-Дохертской обсерваторией Колумбийского университета США проект по оцифровке исторических сейсмограмм из архивов Казахстана, предусматривающий оцифровку дугообразных сейсмограмм, зарегистрированных приборами РВЗТ и КСЭ [1], и созданию общей базы данных сейсмограмм ядерных взрывов, оцифрованных в рамках различных проектов. На основе алгоритмов, составленных в ИГИ, сотрудники LDEO создали программно-математическое обеспечение DEARC, которое позволяет корректировать дугообразные сейсмограммы, приводить их к стандартному виду.

На рисунке 6 приведена схема – технология оцифровки дугообразных аналоговых сейсмограмм. Сканирование производится при помощи широкоформатного сканера ContexScanPlusIII-400T с разрешением 400 отсчетов/дюйм. При сканировании используется программно-математическое обеспечение CADImage. Далее отсканированные образы дугообразных сейсмограмм приводятся к стандартному прямолинейному виду при помощи программы DEARC, затем данные передаются по ftp на рабочую станцию SUN. Оцифровка проводится в полуавтоматическом режиме при помощи программно-математического обеспечения NXSCAN. Фрагменты аналоговых сейсмограмм, оцифрованные программой NXSCAN, сохраняются в формате SAC (Seismic Analysis Code), после чего преобразуются в формат CSS 3.0 (Center for Seismic Studies v.3.0). Из оцифрованного материала создается база данных, каждая запись в которой содержит следующие таблицы CSS 3.0: wfdisc, site, sitechan, assoc, origin, instrument, sensor.

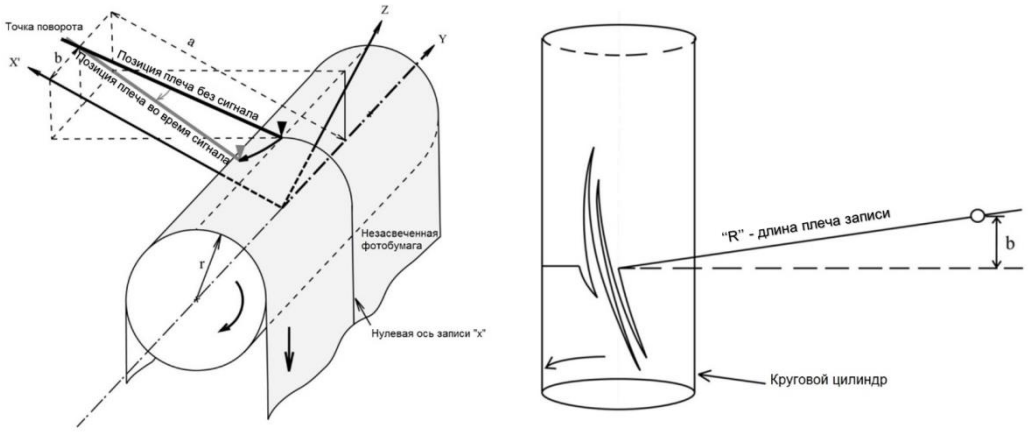
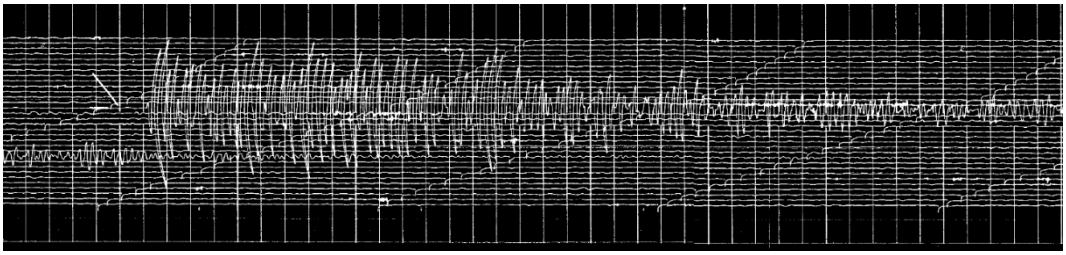


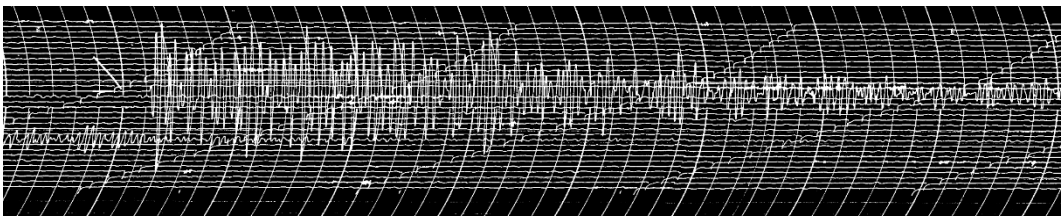
Рисунок 5. Механико-математическая схема регистрации дугообразного переписца по Stefano Pintore [3]



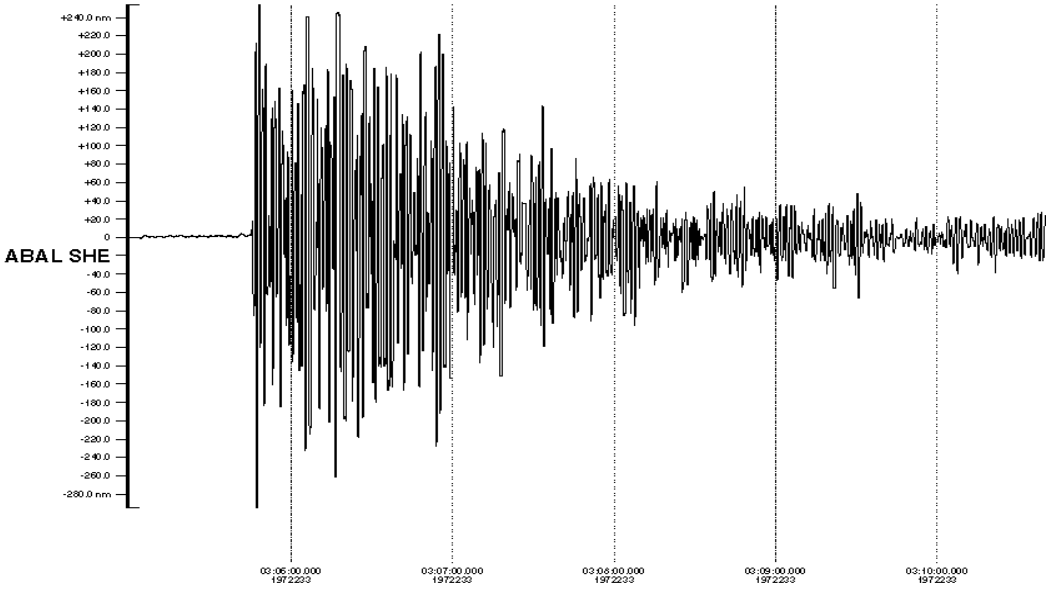
Рисунок 6. Технология оцифровки дугообразных аналоговых сейсмограмм



а) оригинальная сейсмограмма



б) сейсмограмма, преобразованная программой DEARC



в) оцифрованная сейсмограмма

Рисунок 7. Процесс преобразования сейсмограммы с дугообразной записью (а) в прямолинейную с помощью программы Dears (б) и последующей оцифровки записи (в) для мирного ядерного взрыва Регион-3, 20 августа 1972 г., t0=03-00-00, 49.400 с.ш., 48.142 в.д., зарегистрированная станцией Абалаково ABAL, прибор РВЗТ, компонента в-з

На рисунке 7 представлен пример оригинальной дугообразной сейсмограммы мирного ядерного взрыва Регион-3, 20 августа 1972 г., зарегистрированной станцией Абалаково (ABAL), сейсмограммы преобразованной к стандартному виду и оцифрованный фрагмент записи.

Новое программно-математическое обеспечение было протестировано и внедрено в ЦСОССИ, также проведена стажировка для сотрудников Курчатовской площадки РГП ИГИ. В настоящее время при помощи нового программно-математического обеспечения оцифровано около 700 исторических сейсмограмм, зарегистрированных приборами РВЗТ и КСЭ из архива КСЭ ИФЗ РАН.

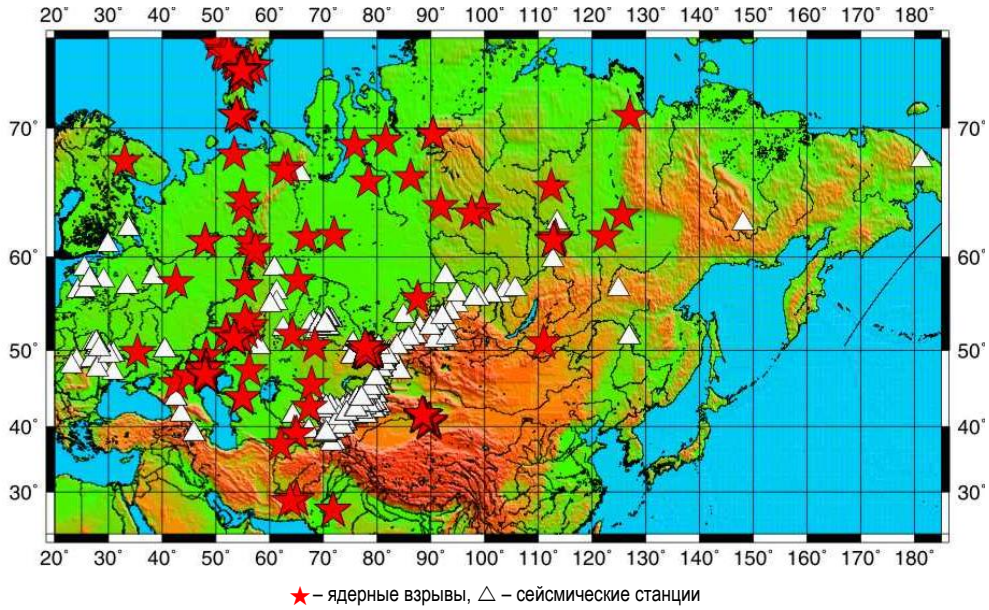


Рисунок 8. Карта расположения эпицентров ядерных взрывов и сейсмических станций на территории Евразии, сейсмограммы которых были оцифрованы в РГП ИГИ

Характеристика базы данных оцифрованных сейсмограмм

База данных оцифрованных сейсмограмм ядерных взрывов в данный момент включает более 7500 записей из районов испытательных полигонов: Семипалатинский испытательный полигон, Новая Земля, Лобнор, Похаран, Чагай, Мururoa, Невада, Амчитка, Ин-Эккер, а также в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории СССР и мощных химических взрывов на территории Центральной Азии. На рисунке 8 представлена карта расположения эпицентров ядерных взрывов и сейсмических станций на территории Евразии, сейсмограммы которых были оцифрованы в РГП ИГИ.

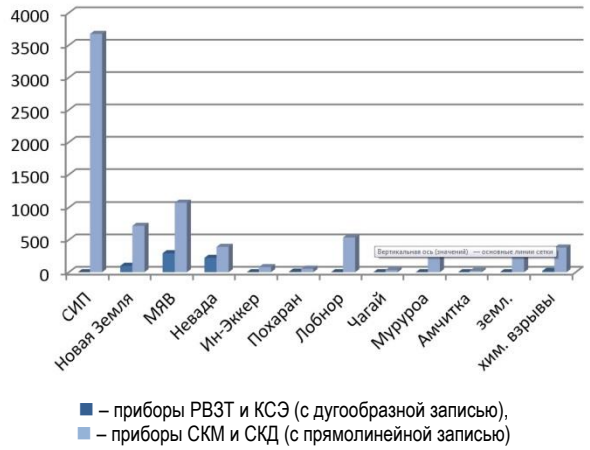


Рисунок 9. Распределение оцифрованных записей взрывов по испытательным полигонам мира

Работы по оцифровке исторических аналоговых сейсмограмм продолжаются. В настоящее время база данных оцифрованных сейсмограмм ядерных взрывов используется в ряде задач мониторинга, таких как сейсмическое распознавание, калибровка станций, построение региональных годографов и др. [4-6].

На рисунке 9 показана диаграмма распределения оцифрованных сейсмограмм по полигонам.

Заключение

1. Впервые в РГП ИГИ совместно с Ламонт-Дохерской обсерваторией Колумбийского университета США, разработана и внедрена новая методика, позволяющая оцифровывать аналоговые сейсмограммы с дугообразными записями от приборов РВЗТ и КСЭ, которые доступны для мирового сообщества.

2. В настоящее время создана и постоянно пополняется уникальная база данных сейсмограмм ядерных взрывов в формате CSS3.0, с использованием архивных записей. В базе данных содержится более 7500 сейсмограмм ядерных взрывов, землетрясений и мощных химических взрывов из районов испытательных полигонов. Из них 700 записей, зарегистрированных приборами РВЗТ и КСЭ.

3. Созданная база данных оцифрованных сейсмограмм активно используется для решения различных исследовательских задач сейсмологии: для сейсмического распознавания ядерных взрывов и землетрясений, изучения пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных волн, построения региональных годографов сейсмических волн, оценки сейсмической опасности и др.

Благодарности: *авторы выражают признательность сотруднику Ламонт-Дохертской Обсерватории Колумбийского университета США профессору В.-Я. Киму за разработку программного пакета DEARC, обучение сотрудников РГП ИГИ.*

Литература

1. Основные типы сейсмометрических приборов. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. З.И. /Аранович [и др.] - М.: Наука, 1974. – 43 – 117 с.
2. NXSCAN. Manual. Incorporated research institutions for seismology (IRIS), - Washington, - USA, 1992.
3. Stefano Pintore. Teseo User Manual / Stefano Pintore, MatteoQuintiliani / Instituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia. – Roma. – Italy, 2007.
4. Sokolova, I.N. Study of Historical Seismic Records in Kazakhstan / I.N. Sokolova, I.B. Aleschenko, A. A. Velikanova, A.N. Uzbekov // Eropean Seismological Commission 33rd General Assembly. - Moscow, - 2012. – 19 - 24 August.
5. Соколова, И.Н. Уточнение параметров слабых ядерных взрывов на семипалатинском испытательном полигоне на основе изучения исторических сейсмограмм / И.Н. Соколова., А.Е. Великанов // Вестник НЯЦ РК, 2013. - Вып. 2. - С. 49-56.
6. Узбеков, А. Н. Особенности волновой картины взрывов разных типов, произведённых на Семипалатинском испытательном полигоне / А. Н. Узбеков., А. А. Великанова / Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии // Международная конференция молодых учёных и специалистов. – 2012. – 6 - 8 июня. - С. 198-205.

ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫҢ ТАРИХИ ЖАЗБАЛАРЫН ЦИФРЛАУДЫҢ ЖАҢА ӘДІСТЕМЕСІ

Великанова А.А., Узбеков А.Н., Алещенко И.Б.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

ГЗИ РМК алғашқы рет, РВЗТ және КСЭ аспаптардан имек жазбаларымен аналогты сейсмограммаларды цифрлауына мүмкіншілік беретін, жаңа әдістемсін іске енгізген. Жаңа әдістемеде, АҚШ Колумбия университетінің Ламонт-Дохер обсерваториясымен бірлесіп ГЗИ-да әзірленген, DEARC жаңа программалық-математикалық жасауы қолданылған. Ол имек сейсмограммаларды түзетуіне және оларды стандартты түзусызықты түріне келтіруіне мүмкіншілік береді. Шамасы 7500 жазбалары бар, соның ішінде цифрлаудың жаңа әдістемесімен 700 жазбалар, ядролық жарылыстардың цифрланған сейсмограммаларының деректер базасы жасалған. Қазіргі кезде цифрланған сейсмограммалардың жазбалары сейсмикалық мониторингтін әр түрлі міндеттері үшін сонымен қатар ядролық жарылыстардың қазіргі кездегі монгиторингісі үшін пайдаланылады. Олардың көмегімен көздерді табу, түрін тану, сондай-ақ сейсмикалық оқиғаның параметрлерін анықтау және бағалау міндеттері шешіледі.

NEW TECHNIQUE FOR DIGITIZATION OF HISTORICAL RECORDS OF NUCLEAR EXPLOSIONS

Velikanova A.A., Uzbekov A.N., Aleshenko I.B.

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

For the first time the RSE IGR has introduced a new technique allowing to digitize analogue seismograms with curvilinear records from instruments RVZT and KSE. The new technique applies DEARC software developed by IGR in cooperation with Lamont-Doherty Observatory of the Columbian University, USA. It allows to correct the curvilinear seismograms and make standard linear form. The database of the digitized seismograms of nuclear explosions containing about 7500 records including 700 records digitized using a new technique was created. Currently, the records of digitized seismograms are used for different tasks of seismic monitoring and for contemporary monitoring of nuclear tests. These help to solve the tasks of detection and discrimination of a source type and to identify and assess the parameters of seismic events.

УДК 550.344

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА ЦЕНТРАЛЬНОАЗИАТСКОЙ СЕТЬЮ СТАНЦИЙ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Институт геофизических исследований проводит непрерывный инфразвуковой мониторинг. Производится локализация событий, классификация значимых источников инфразвука на территории Казахстана и прилегающих областей Центральной Азии. Используется программное обеспечение «Locinfra», предоставленное Комиссариатом атомной энергии Франции. Приведены первые результаты совместной обработки данных разных инфразвуковых станций и внедрения в практику текущего инфразвукового мониторинга методики автоматизированной локализации инфразвуковых событий, с использованием данных нескольких инфразвуковых станций, составляющих сеть инфразвуковых станций в Центральной Азии.

Введение

На протяжении почти десяти лет в ЦСОССИ на постоянной основе, ежедневно рассчитываются бюллетени инфразвуковых детектирований по станционным данным. Для составления бюллетеней используется информация станций IS31 Актюбинск, инфразвуковой группы Курчатов и российской инфразвуковой станции IS46 Залесово.

Инфразвуковая станция IS31 Актюбинск входит в состав Международной системы мониторинга (МСМ). Группа состоит из 8 элементов, оснащенных микробарометрами MB2000, апертура группы 2 км. Установлена на северо-западе Казахстана и была введена в эксплуатацию в 2001 г.

Инфразвуковая станция Курчатов «KURIS» располагается на северо-востоке Казахстана, на территории г. Курчатов. Эксплуатация начата в декабре 2010 года. Состоит из 4 элементов, использованы микробарометры MB2005. С мая 2011 года на постоянной основе составляются бюллетени инфразвуковых детектирований сигналов по всем поступающим от этой станции данным.

Инфразвуковая станция IS46 Залесово входит в состав МСМ, состоит из 4 элементов. Расположена вблизи границы с Казахстаном, на юге Западной Сибири. Данные этой инфразвуковой группы поступают в ЦСОССИ в режиме реального времени. С марта 2012 года, на постоянной основе в ЦСОССИ по ее данным составляются бюллетени инфразвуковых детектирований. Все инфразвуковые станции являются группами, варьируется только количество элементов. Расположение инфразвуковых групп показано на рисунке 1.

На рисунке 2 показаны азимутальные гистограммы детектирований инфразвуковых сигналов по каждой из трех станций за 1 месяц (январь 2015 г.). Количество детектирований варьирует от станции к станции. По IS31 фиксировано до 10000 сигналов, по IS46 – лишь несколько сотен.

Тем самым, в ЦСОССИ в течении последних трех лет имеются бюллетени детектирований трех инфразвуковых групп. Резонно предположить, что в этих бюллетенях имеют место сигналы от единых событий, зарегистрированных двумя или тремя станциями. Задачей работы является оптимизация параметров локализации событий, классификация значимых источников инфразвука на территории Казахстана и прилегающих областей.



Рисунок 1. Расположение инфразвуковых станций IS31-Актюбинск, IS46-Залесово и Курчатов



Рисунок 2. Гистограммы азимутального распределения детектирований инфразвуковых групп за январь 2015 г.

У инфразвуковых групп есть одно важное отличие от сейсмических. По данным одиночной сейсмической группы можно локализовать источник сигнала, определив азимут на источник по разности времен вступлений на различных элементах группы и эпицентральное расстояние, например, по разности времен прихода различных фаз. По данным одиночной инфразвуковой группы также можно детектировать сигналы и определять их азимуты прихода. Однако, в силу сильной, быстрой и практически не-

предсказуемой изменчивости скоростной структуры атмосферы по данным одиночной инфразвуковой группы нельзя определить эпицентральное расстояние. Для локализации эпицентра инфразвуковых сигналов необходимо как минимум две группы. При наличии двух и более групп источник определяется по перекрестному пеленгу.

Автоматический процесс сетевой локализации источников инфразвуковых сигналов с помощью ПМО «LOCKINFRA»

В конце 2013 г. Национальный центр данных (НЦД) передал в ЦСОССИ адаптированную версию ПМО «Locinfra» [1], используемого для локализации инфразвуковых событий во французском НЦД.

Методология обработки данных сети инфразвуковых станций описана в [2]. Весь процесс можно условно разделить на два основных этапа. Это: 1) очистка бюллетеней детектирований от ложных решений и 2) прелокализация и перекрестный пеленг.

Алгоритм обработки включает:

– ассоциирование детектирований, имеющих сходные характеристики. Учитываются такие параметры, как азимут, фазовая скорость, частота и время. Пороговые значения подбираются с учетом чувствительности каждой отдельной группы к этим параметрам.

– фильтрацию, при которой удаляются два типа детектирований: 1) местных источников при которой исключаются те, у которых доминантная частота выше 1,5 Гц и кажущаяся скорость выходит за пределы диапазона 0,32 – 0,45 км/с; 2) постоянно действующих источников, при которой выявляются кластеры детектирований, имеющие большую длительность, обычно превышающую 1800 с. В результате из бюллетеней отфильтровываются от 85 % до 95 % детектирований, главным образом, микробаром и местных промышленных сигналов. Входными данными для ПМО «Locinfra» являются РМСС-бюллетени по каждой станции.

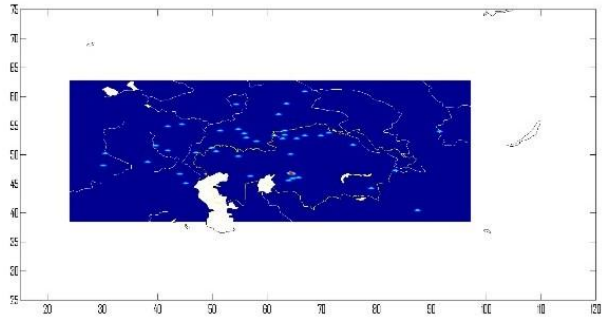


Рисунок 3. Карта плотности эпицентров инфразвуковых событий по данным трех инфразвуковых станций за 2013-2015 гг.

Автоматический расчёт бюллетеней инфразвуковых детектирований по станциям производится ежедневно. Получаемые данные позволяют делать обзор и проводить исследования для классификации источников событий. На рисунке 3 приведена обзорная карта плотности эпицентров событий, локализованных по данным трех станций, за период с января 2013 г. по март 2015 г.

Результаты анализа инфразвуковых источников на территории Казахстана и Центральной Азии

Уже первые результаты внедрения методики позволили локализовать на территории Казахстана и в прилегающих районах эпицентры как ранее известных (микробаромы, факелы сгорания, карьерные взрывы и др.), так и никогда ранее не детектировавшихся источников. [3].

Как видно из рисунка 3, тремя инфразвуковыми станциями удалось локализовать источники на достаточно большой территории Евразии - на территории Казахстана, части территорий России и Китая. Самое яркое по плотности эпицентров «пятно» относится к территории космодрома Байконур. Инфразвуковые сигналы от запусков ракет-носителей имеют большую интенсивность и уверенно регистрируются всей сетью инфразвуковых станций [4].

Далее из известных нам источников хорошо локализуются активные карьеры, где производятся взрывы для добычи полезных ископаемых. Такие карьеры отмечены по инфразвуковым данным на севере и западе Казахстана, на российской территории в Кузбассе в ряде других мест. Следует заметить, что ряд зарегистрированных источников не находит пока объяснения о природе их возникновения.

Для оценки изменчивости картины локализуемых инфразвуковых событий во всем регионе были построены карты плотности эпицентров за каждый квартал с 2013 по 2015 год. При этом анализировались события, локализованные как по трем, так и по двум инфразвуковым станциям. На рисунках 4, 5, 6 представлены некоторые поквартальные карты плотности эпицентров.

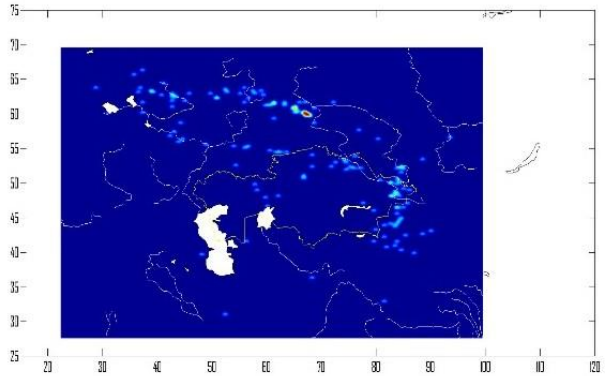


Рисунок 4. Карта плотности эпицентров инфразвуковых событий за I квартал 2013 года

На рисунке 4 представлена карта за 1 квартал 2013 года. На этой карте наиболее яркое «пятно» находится на территории России в районе нефтегазо-

добывающих районов Западной Сибири. Также на карте прослеживается *ряд карьеров, где проводились взрывы. Можно отметить большое количество дополнительных инфразвуковых источников непонятной природы.*

На карте за III квартал 2013 года самое яркое «пятно» плотности эпицентров находится в Восточном Казахстане. Оно наблюдалось и в другие кварталы 2013 года, но практически исчезло в первые три квартала 2014 года. Этот источник пока неизвестной природы будет исследоваться нами дополнительно. Большие надежды при этом возлагаются на открытие новой инфразвуковой станции Маканчи, которая уже начата сооружаться близ сейсмической группы Маканчи в сотрудничестве с AFTAC.

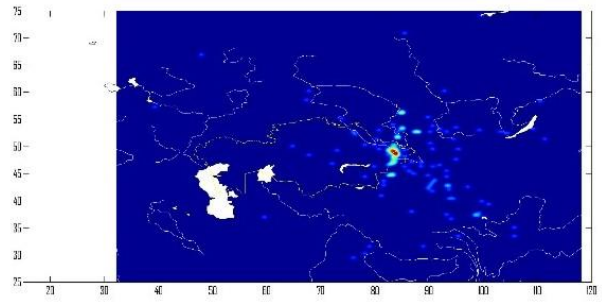


Рисунок 5. Карта плотности эпицентров инфразвуковых событий за III квартал 2013 года

На рисунке 6 за IV квартал 2014 года обращает на себя внимание значительно возросшее количество событий на всей исследуемой территории. Это может быть связано с тем, что в предыдущее время на одной из станций инфразвуковой сети - станции Залесово - работали не все элементы, что не позволяло по ее данным проводить надежное детектирование сигналов. В 2014 году станция была реконструирована и заработала в полном объеме. Количество локализованных событий увеличилось, что нашло отражение на картах. Очень четко проявляются взрывные районы в Кузбассе, карьеры в северном Казахстане. Много источников требуют дополнительных исследований их природы.

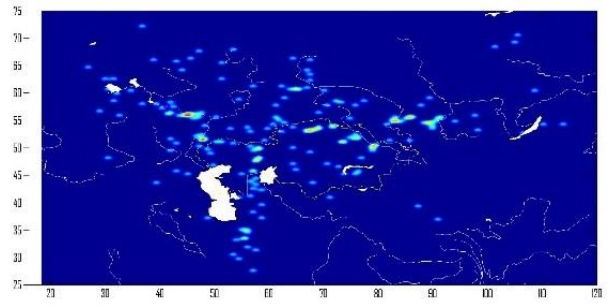


Рисунок 6. Карта эпицентров инфразвуковых событий за IV квартал 2014 года

Итак, анализируя карты плотности эпицентров инфразвуковых событий за разные отрезки времени, можно утверждать, что вариациям подвержено как количество событий, так и их пространственное распределение. Имеются как источники, наблюдающиеся практически во всех временных отрезках, так и те, которые действуют только в короткое время. При этом заметим, что на первом этапе работы с ПМО «Locinfra» уже были исключены из рассмотрения такие мощные постояннодействующие источники, как факелы сжигания попутного газа на месторождениях и микробаромы.

Рассмотрим вариации количества событий, в локализации которых участвовали отдельные станции сети. На рисунке 7 показано общее количество локализованных инфразвуковых событий, а также число локализаций, в которых участвовали конкретные станции инфразвуковой сети.

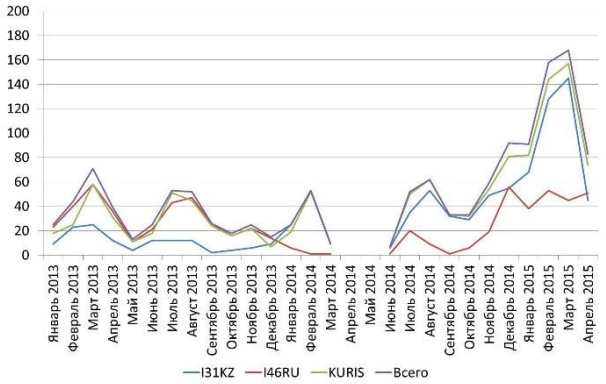


Рисунок 7. Вариации количества локализованных инфразвуковых событий по всей сети и по отдельным станциям

На графиках видны вариации, которые отражают как объективный факт связи обнаруживаемых событий с атмосферными вариациями, так и субъективные факты влияния состояния работоспособности станций. На общем графике (сиреневая линия) отмечаются полугодовые вариации, связанные со сменой направления ветров в атмосфере. Чередуются периоды высокой «детектируемости» сигналов с почти полным отсутствием обнаружений, как например в апреле-мае 2014 года. До 2014 года количество локализаций максимально доходило до 150 в месяц. С конца 2014 года количество инфразвуковых событий резко возросло (более, чем в два раза). Это объективный факт, поскольку видно, что, как по станции IS31 Актюбинск, так и по станции «KURIS» число событий также резко возросло в этот период. Станция Залесово (красная линия) с 2014 года наладила свою работу, по ней тоже заметно возрастание количества событий.

Предстоит выяснить, с какими процессами связано это увеличение, какие источники определяют столь значительный рост количества событий.

Заключение

В 2014 г. осуществлено тестирование и внедрение в практику текущего инфразвукового мониторинга методики автоматизированной локализации инфразвуковых событий с использованием данных нескольких инфразвуковых станций, составляющих сеть инфразвуковых станций в Центральной Азии. Методика применяется в Центре сбора и обработки специальной сейсмической информации ИГИ РК, результатом чего являются бюллетени инфразвуковых событий, полученные при автоматизированной обработке данных трех станций: IS31-Актюбинск, IS46-Залесово и Курчатов. Методика использует четвертое поколение программного детектора PMCC (Комиссариат атомной энергии Франции) и программу локализации «Locinfra».

1. Проведено картирование локализованных инфразвуковых источников. Только по инфразвуковым данным локализованы на территории Казахстана и в прилегающих районах эпицентры как ранее известных (запуски ракет-носителей с космодрома Байконур, карьерные взрывы, взрыв болида в атмосфере и др.), так и никогда ранее не детектировавшихся источников. Дальнейшее использование метода при обработке данных сети станций позволит решить несколько новых задач: оптимизировать параметры локализации событий, найти и классифицировать значимые источники инфразвука на территории Казахстана.

2. Первые результаты имеют методическое и практическое значение для Международной системы мониторинга. Они демонстрируют возможности систем по детектированию событий, отражают сильную зависимость возможности детектирования от состояния атмосферы, а также от работы станций, составляющих систему наблюдений.

Литература

1. Le Pichon, A. Analyzing the detection capability of infrasound arrays in Central Europe / A. Le Pichon, J. Vergoz, P. Herry, L. // Ceranna ournal of Geophysical Research, 2008. - vol. 113, D12115, doi:10.1029/2007JD009509.
2. Le Pichon A., Vergoz J., Blanc E., Guilbert J., Ceranna L., Evers L., and Brachet N. (2009), Assessing the performance of the International Monitoring System's infrasound network: Geographical coverage and temporal variabilities, J. Geophys. Res., 114, D08112, doi:10.1029/2008JD010907.
3. Дубровин, В.И. Поиск источников инфразвуковых сигналов по данным станций института геофизических исследований / В.И. Дубровин, А.А. Смирнов // Вестник НЯЦ РК, 2014. - Вып. 4. – С. 60-64.
4. Gopalaswamy, B. Infrasound detection of rocket launches / B. Gopalaswamy,A.A. Smirnov / Comprehensive nuclear-test-ban treaty: ISS 09. Book of Abstracts, Vienna, 10-12 June 2009.

ОРТААЗИЯЛЫҚ СТАНЦИЯЛАР ЖЕЛІСІМЕН ИНФРАДЫБЫСТЫ МОНИТОРИНГТІҢ БІРІНШІ НӘТИЖЕЛЕРІ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Геофизикалық зерттеулер институты үздіксіз инфрадыбыстық мониторинг жүргізуде. Қазақстан аумағы мен Орта Азияның жанасқан аумақтарындағы оқиғаларды жергіліктеуі, инфрадыбыстың маңызды көздерін түрлендіруі жүргізіледі. Францияның Атом энергиясы комиссариатымен берілген «Locinfra» программалық жасауы пайдаланылады. Әр инфрадыбысты станциялардың деректерін бірлестіре өңдеудің және ағымдағы инфрадыбыстық мониторингі қызметіне, Орта Азияда инфрадыбыстық станциялар желісін құрайтын бір неше инфрадыбыстық станциялардың деректерін пайдаланып, инфрадыбысты оқиғаларды автоматты жергіліктеу әдістемесін енгізудің бірінші нәтижелері келтірілген.

FIRST RESULTS OF INFRASOUND MONITRING BY CENTRAL ASIA STATIONS NETWORK

V.I. Dubrovin, A.A. Smirnov

RSE Institute of Geophysical Researches, CAE RK, Almaty, Kazakhstan

The Institute of Geophysical Researches conducts continuous infrasound monitoring. The events are located, significant infrasound sources on the territory of Kazakhstan and adjacent regions of Central Asia are classified. "Locinfra" software provided by the Commissariat of Atomic Energy of France is applied. The first results of joint processing of data from different infrasound stations and practical adoption of automated location of infrasound events using data of several infrasound stations forming a network of infrasound stations in Central Asia into the practice of current infrasound monitoring are shown.

УДК 550.344

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ГЛАВНОГО ЧИНГИЗСКОГО РАЗЛОМА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛЛИГОНА

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Изучена историческая и современная сейсмическая активность Главного Чингизского разлома, подтверждена его современная активность на всем протяжении от оз. Алаколь до хр. Муржик. Оценен сейсмический потенциал Чингиз-Алакольской сейсмогенерирующей зоны. Результаты работы имеют большое значение для оценки сейсмического риска на территории бывшего Семипалатинского Испытательного Полигона.

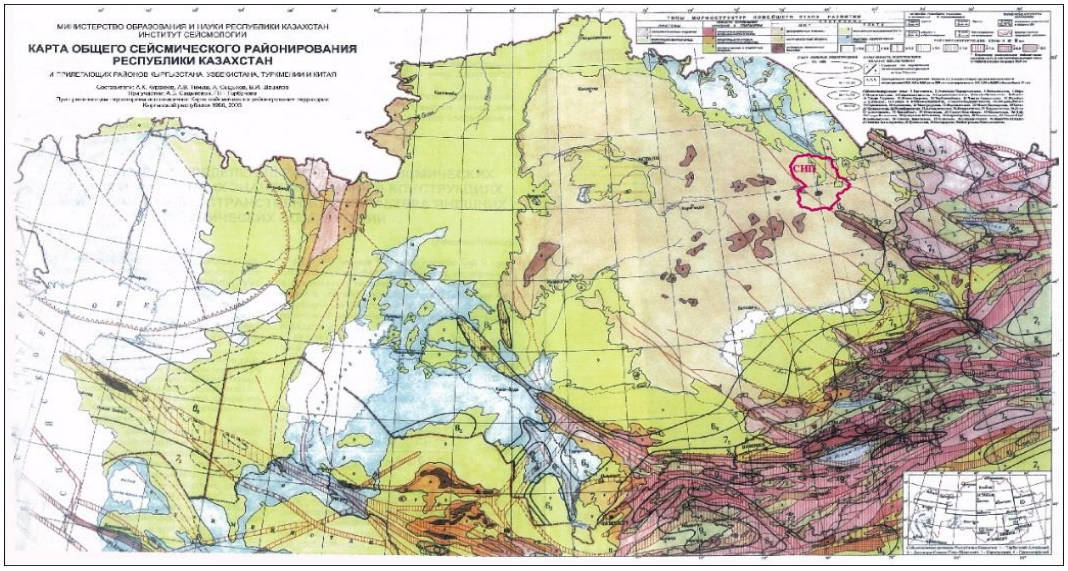


Рисунок 1. Карта общего сейсмического районирования территории Казахстана и сопредельных стран

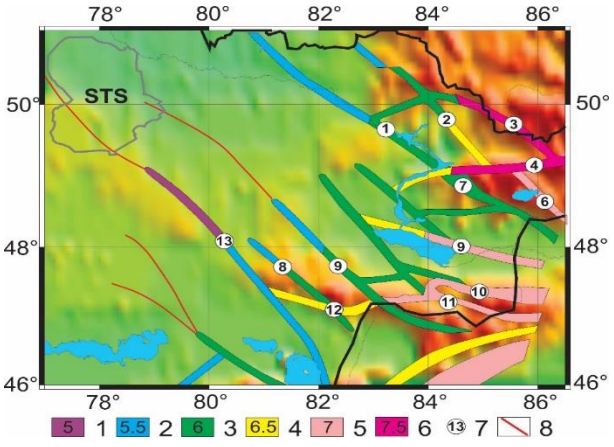
ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время действующей картой общего сейсмического районирования Казахстана является карта, включенная в Строительные нормы и правила Республики Казахстан «Строительство в сейсмических районах» (СНиП РК 2.03-30-2006) [1], составленная коллективом авторов Института сейсмологии Министерства науки – Академии наук Республики Казахстан в 2003г. (рисунок.1). Для её составления использован комплекс материалов, характеризующих геодинамические процессы, происходящие в недрах земной коры и верхней мантии: геолого-тектонические, геофизические, сейсмологические. В результате их совместного анализа выделены основные сейсмогенерирующие зоны, ответственные за возникновение в них очагов сильных землетрясений, оценен их сейсмопотенциал в единицах магнитуд, рассчитаны области возможных сотрясений разной степени сейсмической интенсивности в единицах шкалы баллов MSK –64.

Однако последние данные по регистрируемым землетрясениям показали, что эта карта в ряде случаев не отражает реальную опасность некоторых районов Казахстана. Происходят землетрясения с интенсивностью 6 и 7 баллов в местах, где они не ожидались и которые считались асейсмичными. Такие события, например, произошли в Центральном (2001 г.), Западном (2008 г.) Казахстане. Одним из таких районов, отнесенных согласно карте ОСР к асейсмичным, является территория бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП).

Ближайшие к СИП сейсмогенерирующие зоны – Иртышская, Чингиз-Алакольская и Жарминская, связанные с одноименными региональными разломами имеют сейсмопотенциал по магнитудам M=5-5,5 (рисунок 2), но все эти зоны не доходят до СИП, заканчиваясь на юго-востоке от него. В работах по ОСР, например, в [2], эти зоны описаны очень кратко, так как отсутствуют достаточно детальные сейсмологические данные. Это связано с тем, что на протяжении десятилетий в этом регионе не проводились инструментальные наблюдения сетью сейсмических станций. Данные глобальных сетей наблюдений для этого района также были недоступны. По карте ОСР максимальная ожидаемая интенсивность сотрясений здесь не должна превышать 5 баллов по шкале MSK-64.

Однако следует заметить, что Главный Чингизский и Жарминский разломы прослеживаются и на территории СИП, пересекая его с юго-востока на северо-запад. Задачей настоящей работы было выяснение сейсмической активности Главного Чингизского разлома по историческим и современным данным в обоснование включения его и связанной с ним сейсмогенерирующей зоны в состав сейсмоопасных зон новой карты общего сейсмического зонирования (ОСЗ) Казахстана.



1-6 – сейсмопотенциал; 7 – названия зон: (1) – Иртышская, (2) - Локтевско-Караиртышская, (3) – Рахмановская, (4) – Нарымская, (5) – Маркакольская, (6) - Сарымсактинская, (7) – Северо-Зайсанская, (8) – Калба-Чингизская, (9) - Жарминская, (10) – Северо-Саурская, (11) - Южно-Саурская, (12) - Тарбагатайская, (13) – Чингиз-Алакольская; 8 - тектонические разломы

Рисунок 2. Сейсмогенерирующие зоны Тарбагатай-Алтайского региона

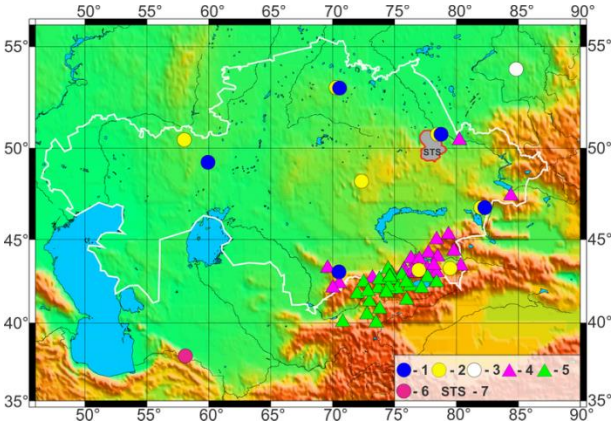
Используемые материалы

В последние десятилетия на территории Казахстана создана и функционирует новая цифровая сеть сейсмических станций РГП ИГИ, основными задачами которой является мониторинг ядерных испытаний и землетрясений во всем мире. Сейсмические станции РГП ИГИ характеризуются отличными условиями регистрации сейсмических сигналов, определяемыми низким уровнем сейсмических шумов в районе их расположения, а также расположением приборов в скважинах. Станции расположены в основном по периметру территории Казахстана (рисунок 3).

Данные этой системы используются для задач глобального мониторинга в Международных центрах данных при составлении мировых сейсмологических бюллетеней (REB, ISC, EMSC, ГС РАН) и проведения научных исследований специалистами разных стран (IRIS/DMC).

Безусловно, результаты работ этой системы используются и в решении задач оценки сейсмической опасности территории Республики, и для оперативного контроля за сейсмической ситуацией. Анализ данных сети станций мониторинга РГП ИГИ позволил установить наличие очагов землетрясений в различных местах, которые традиционно считались «асейсмичными» на территории Казахстана или слабоактивными [3-6].

Первые обнаруженные события заставили более глубоко заняться изучением исторической сейсмичности территории СИП по материалам других центров данных и литературным источникам, что очень важно в аспекте оценки сейсмической опасности. Сотрудниками Центра данных РГП ИГИ проведен анализ ретроспективных исторических и новых данных цифровых станций мира. Наличие в Казахстане огромного архива исторических сейсмограмм с 20-х годов прошлого столетия позволило определить параметры ряда исторических землетрясений из различных районов Казахстана.



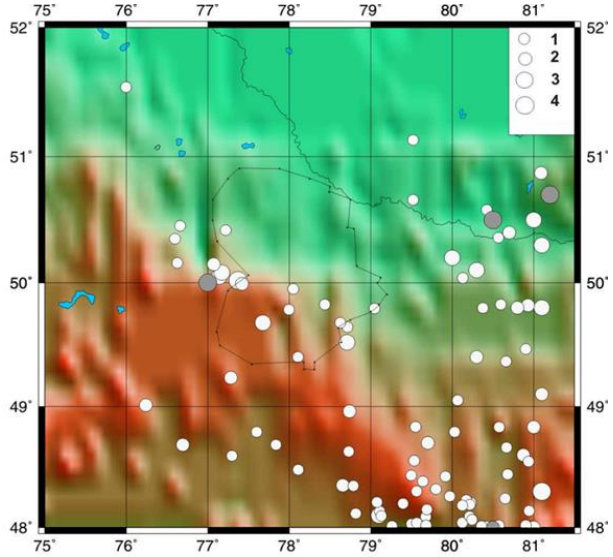
1 - сейсмические группы РГП ИГИ, 2 - трех компонентные стаций РГП ИГИ, 3 - сейсмическая группа Залесово (Россия), 4 - Сейсмические станции СОМЭ МОН РК, 5 - Сейсмические станций КР, 6 - сейсмическая группа Алибек (Туркмения), 7 - территория бывшего СИП

Рисунок 3. Карта сейсмических станций

Результаты изучения сейсмичности, связанной с Главным Чингизским разломом

Были проанализированы данные об исторической сейсмичности района СИП по литературным источникам. В работах [7, 8] приведены сведения о сильных тектонических событиях из района СИП. Событие, которое произошло 28 сентября 1925 года, t0=21:42:40(±20 с), j=50 (±1°), l=77 (±1°) расположено в районе Главного Чингизского разлома. Его магнитуда составила M~5.8±0,5 (рисунок 4). Такое землетрясение способно вызвать в эпицентральной зоне колебания с интенсивностью в зависимости от глубины очага 7 и даже 8 баллов.

В более позднее время также обнаружены очаги землетрясений вблизи Семипалатинского испытательного ядерного полигона. По сейсмическим записям станций ИГИ НЯЦ РК 26 марта 1996 г. были выделены сигналы от землетрясения с магнитудой 4,7. Его эпицентр находился в непосредственной близости от массива Дегелен. Географически эта местность относится к северным склонам хребта Муржик, район глубинного Главного Чингизского разлома. В городе Курчатов это землетрясение ощущалось с интенсивностью 3 балла.



1 – mb <3; 2 – 3≤ mb≤4; 3 – 4≤mb; 4 – mb≥5;
● – эпицентры до 1961 г., ○ – эпицентры после 1961 г.

Рисунок 4. Карта эпицентров исторических землетрясений из района СИП

Это событие вызвало большой интерес среди исследователей, занимающихся проблемами сейсмомониторинга ядерных взрывов, поскольку его эпицентр близок к эпицентрам проводившихся на полигоне ядерных испытаний. Детальный анализ записей позволил зарубежным специалистам убедиться, что это событие является землетрясением, обусловленным глубинными тектоническими процессами в земной коре. Ранее именно в этом районе уже было отмечено аналогичное землетрясение (20.03.1976, магнитуда 5,1 рисунок 5). Оно также подверглось тщательному анализу со стороны зарубежных ученых, направленному на выяснение природы этого события, т.е. на решение вопроса, не является ли это событие ядерным взрывом (например, [9]).

Для более детального исследования сейсмичности этого района с 2005 года в течение нескольких лет на территории СИП проводились полевые сейсмические наблюдения [10]. Было установлено, что наиболее активной зоной является район концентрации очагов землетрясений на западной границе СИП, связанной также с Главным Чингизским разломом. Но эти исследования были прекращены и в настоящее время не проводятся.

Последнее сильное землетрясение в этом районе произошло 20 января 2015 года в 15:30 по времени Астаны. В таблице 1 указаны основные параметры землетрясения по данным двух центров данных – ИГИ и NEIC (USGS). Все станции сети РГП ИГИ записали это землетрясение, самыми близкими к эпицентру землетрясения являлись станции Курчатов и Маканчи (рисунок 6).

Очаг землетрясения расположен в районе Главного Чингизского хребта в Чингиз-Алакольской сейсмогенерирующей зоне. Землетрясение ощущалось на большой территории Казахстана на расстоянии от эпицентра до 300км. В г. Курчатов оно проявилось с интенсивностью 4 балла, в г. Семей 2-3балла, в г. Усть-Каменогорск 2 балла.

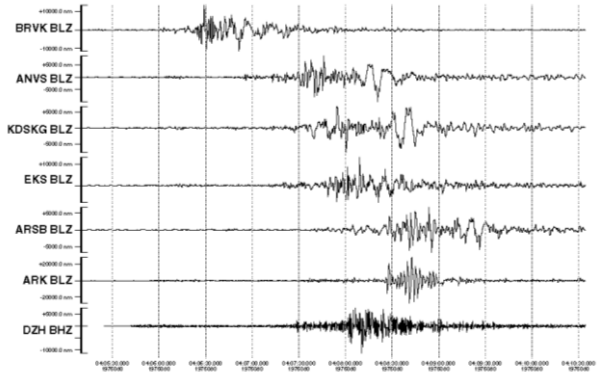


Рисунок 5. Сейсмограмма землетрясения 20.03.1976 г. в районе хребта Муржик. Ms=5.1, I0=5-6

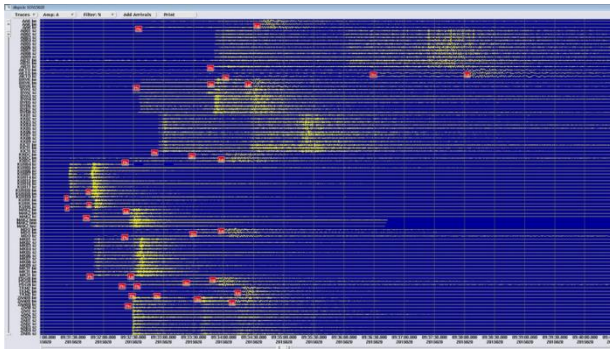


Рисунок 6. Запись землетрясения 20.01.2015 г. по станциям сети РГП ИГИ

Таблица 1. Основные параметры землетрясения 20 января 2015 года

Источник	Дата и время /GMT	с.ш.	в.д.	Глубина, км	mb	K
KNDC	2015-01-20 09:30:56.5	48.98°	78.76°	14.2	5.3	12.2
NEIC	2015-01-20 09:30:55.7	49.02°	78.83°	10	4.8	

22 января на имя руководителя Центра данных было получено письмо от акимата Абайского района с просьбой дать сведения об интенсивности сотрясений в некоторых населенных пунктах (Караул, Кенгирбай, Кокбай, Кундызды, Архат, Каскабулак, Медеу, Токтамыс, Саржал) Абайского района от землетрясения (рисунок 7). Определены расчетные значения интенсивности для перечисленных населенных пунктов (таблица 2) по уравнению макросейсмического поля (1):

$$I=bMs-\gamma\lg\sqrt{\Delta^2+h^2}+c \qquad (1)$$

где Ms – магнитуда землетрясения, Δ – эпицентральное расстояние, h – глубина гипоцентра, b,γ, c – региональные коэффициенты.

Таблица 2. Расчетная интенсивность в населенных пунктах Абайского района от землетрясения 20.01.2015г.

Населенные пункты	Эпицентральное расстояние, км	Баллы, MSK -64
Медеу	25	5-6
Караул	32	5
Кенгирбай	33	5
Токтамыс	42	5
Кокбай	47	5
Саржал	64	4
Кундызды	78	4
Архат	90	4
Каскабулак	96	4

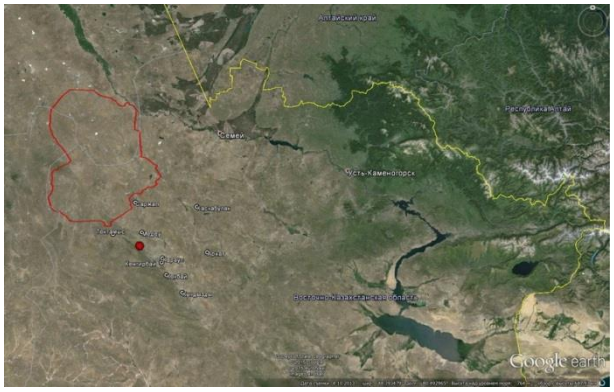


Рисунок 7. Карта расположения эпицентра землетрясения (красный кружок) 20.01.2015 г. и населенных пунктов, для которых определены расчетные значения интенсивности сотрясений

Главный Чингизский разлом и его сейсмический потенциал

Главный Чингизский разлом имеет северо-западное простирание и отличается прямолинейностью простирания. Он прослеживается на расстоянии, равном в общей сложности почти 600 км, протягиваясь от западных предгорий хр. Тарбагатай к восточному краю хр. Муржик. Таким образом, Главный Чингизский разлом пересекает всю территорию СИП. На северо-запад от хр. Муржик он приобретает несколько более меридиональное направление.

На крайнем юго-востоке разлом исчезает под рыхлыми отложениями Алакольской межгорной впадины, в пределах которой геофизическими методами этот разлом прослеживается еще на расстоянии 140 км, почти до границы КНР [12].

Главный Чингизский разлом относится к глубинным разрывным нарушениям первого порядка и имеет взбросо-сдвиговый характер с падением на юго-запад. Угол падения главных сместителей 70° - 80° (рисунок 8). Разлом представлен геоморфологический в виде уступов и разграничивает участки мелкосопочника от мелкогорья. Зона разлома интенсивно рассланцована, некоторые участки окварцованы. Ширина зоны разлома достигает сотни метров [13]. Как показывают экспериментальные данные регистрации событий, Главный Чингизский разлом является активным на большом протяжении.

Главный Чингизский разлом отчетливо выделяется при дешифрировании снимка спутника LandSat (рисунок 9) протяженным и контрастным линеаментом, разделяющим участки разного цвета и мозаичности спек-тра. Это характерно для региональных разломов первого порядка, представляющим собой зону трещиноватости мощностью около 150 м. В горной местности он выражается рельефными уступами с превышением до 10 – 50 м, реже до 100 – 200 м (например, в районе Муржикских гор и хребта Хан-Чингиз).

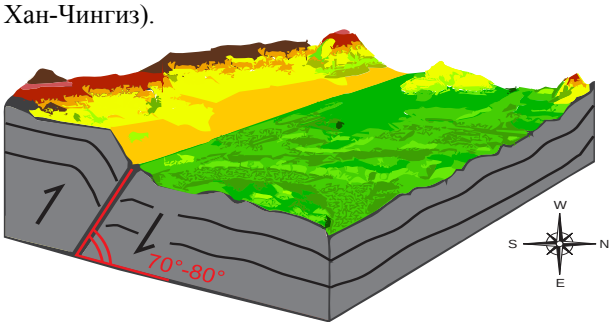


Рисунок 8. Схема Главного Чингизского разлома

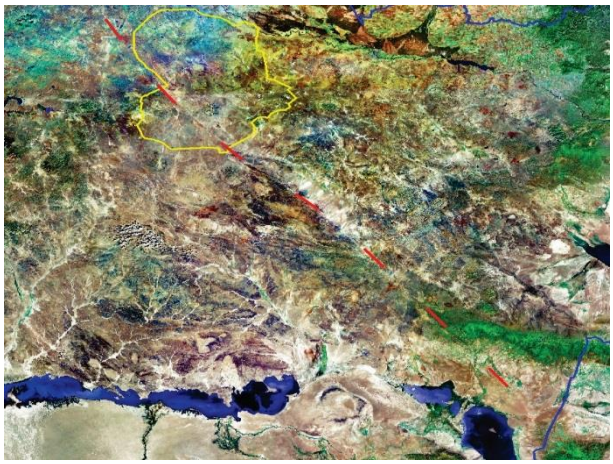


Рисунок 9. Главный Чингизский разлом на спутниковом снимке LandSat

Сейсмическими данными сети станций РГП ИГИ и центра данных показано, что как в историческом прошлом, так и в настоящее время, Главный Чингизский разлом является сейсмически активным на всем своем протяжении. Магнитуда событий может достигать значений 6. Этот факт, безусловно, должен учитываться при прогнозе сейсмических воздействий, что особенно важно в связи с функционированием уже существующих и строительством новых ответственных объектов на территории СИП.

Последние два года Центр данных участвует в создании новой карты общего сейсмического зонирования Казахстана. На этой карте Чингиз-Алакольская сейсмогенерирующая зона будет продлена на северо-запад через СИП (рисунок 9). Сейсмопотенциал этой зоны будет увеличен от 5 – 5,5 до 6 в единицах магнитуд. Это повлечет за собой расчет значений интенсивности и максимальных пиковых ус-

корений грунта, которые надо будет учитывать при строительстве объектов на территории СИП.

Заключение

Комплексные данные по изучению исторической и современной сейсмичности, по дешифрированию космических снимков, тектонике и геологии позволили с достаточной достоверностью установить, что Главный Чингизский разлом представляет собой сейсмически опасный линеамент, который не был учтен на значительном протяжении в действующей карте ОСР Казахстана. Новые данные переданы для учета в новой карте ОСЗ, где будет продлена зона влияния этого разлома, увеличен сейсмопотенциал связанной с ним сейсмогенерирующей зоны. Эти результаты имеют большое значение для оценки сейсмического риска на территории СИП. Необходимо продолжить на СИП прерванные детальные сейсмические наблюдения стационарной сетью сейсмических станций для мониторинга сейсмического режима этой зоны.

Литература

1. СНиП РК 2.03-30-2006. Строительств в сейсмических районах // ТОО «Издательство LEM». Алматы, 2006. - 80с.
2. Сейсмогенерирующие зоны Казахстана / А.В. Тимуш [и др.]. - ТОО «Хай Технолоджи». Алматы, 2012. - 80с.
3. Михайлова, Н.Н. Центральный и Восточный Казахстан / Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году // М.: ГС РАН, 2003. – С. 89-91.
4. Михайлова, Н.Н. Новые данные о землетрясениях в асейсмичных районах Казахстана / Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова, А.И. Неделков // Геофизика XXI столетия: 2002 г.. Сборник трудов Четвертых геофизических чтений имени В.В. Федынского (28 февраля – 02 марта 2002 г. Москва). М.: Научный мир, 2003. – С. 251-255.
5. Беляшова, Н.Н. Центральный и Восточный Казахстан / Н.Н. Беляшова, Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. М.: ГС РАН, 2002. – С. 71-75.
6. Михайлова, Н.Н. Шалгинское землетрясение в Центральном Казахстане 22.08.2001г. / Н.Н. Михайлова, А.И. Неделков [и др.] // Геофизика и проблемы нераспространения – Вып. 2 –Вестник НЯЦ РК, 2002. – С. 78-87.
7. Великанова, А.А. Изучение записей землетрясений с очагами в районе ядерных полигонов Центральной и Южной Азии / А.А. Великанова, А.Н. Узбеков // Вестник НЯЦ РК, 2013. – Вып.3. – С. 28 -136.
8. Чеканинский, И.В. Материалы о сейсмических явлениях в Семипалатинской губернии с 1760 по 1927 г. / И.В. Чеканинский // (по материалам Семипалатинского исторического архива).
9. Кондорская, Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР / Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин // ред. М. 1977 г.
10. Pooley, C.I. The seismic disturbance of 1976 March 20, 08.01.1994 t0= 04h 15m39.659 φ=47.833 λ=67.451 h=20 km east Kazakhstan: earthquake or explosions? / C. I. Pooley, A. Douglas, R. G. Pearce // Geophys. J.R. Soc. -1983. - Vol.74. - P. 621-631.
11. Морговская, М.К. Изучение локальной сейсмичности семипалатинского испытательного полигона / М.К. Морговская, И.Н. Соколова [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2006. – вып.3. – С. 62 -69.
12. Самыгин, С.Г. Чингизский сдвиг и его роль в структуре Центрального Казахстана / С.Г. Самыгин // Труды геологического института АН СССР. М. Наука, 1974. – вып.253.
13. Комлев, А.В. Анализ факторов, способствующих миграции техногенных радионуклидов на территории юго- восточной части СИП / А.В. Комлев // Докл. Междунар. конф. молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии», 6-8 июня. 2012. Алматы, Казахстан, ИЯФ, 2012. – С. 35-50.

СЕМЕЙ СЫНАУ ПОЛИГОНЫ АУМАҒЫ ҮШІН БАСТЫ ШЫҢҒЫС ЖАРЫЛЫМНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ҚАУІПТІЛІГІ

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Басты Шыңғыс жарылымның тарихи және қазіргі кездегі сейсмикалық белсенділігі зерделенген, Алакөл өзенінен Мыржық жотасына дейін қашықтығында оның қазіргі кездегі белсенділігі расталған. Шыңғыс-Алакөл сейсмоөндіру зонаның сейсмикалық әлеуеті бағаланған. Жұмыстың нәтижелері бұрын болған Семей сынау полигоны аумағында сейсмикалық қауіп-қатерді бағалау үшін маңызды болып келеді.

SEISMIC HAZARD OF THE MAIN CHINGIZ FAULT FOR THE TERRITORY OF SEMIPALATINSK TEST SITE

A.S. Mukambayev, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The historical and contemporary seismic activity of the main Chingiz fault was investigated, its current activity at its whole extension from Alakol Lake to Myurzhyk ridge was confirmed. The seismic potential of Chingiz-Alakol seismic generating zone was estimated. The work results are very important for seismic risk estimation on the territory of the former Semipalatinsk Test Site.

УДК 550.344

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ

Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Великанов А.Е., Соколов А.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Проведено уточнение современной сейсмотектонической обстановки района г. Алматы для целей микросейсморайонирования. По новым данным о сейсмичности за последние десятилетия установлено, что на территории города Алматы в его новых границах очаги землетрясений зарегистрированы в южной и юго-западной части. Наиболее сильные из них ощущались на территории города с интенсивностью 4-5 баллов. Выявлены разломы на территории города, с которыми связаны эти землетрясения. Даны рекомендации для дальнейшего изучения сейсмогенерирующих разломов на территории города, организации сейсмического мониторинга на ответственных объектах г. Алматы, организация системы раннего оповещения о землетрясениях.

Введение

Город Алматы является крупнейшим мегаполисом Казахстана. Его население превышает 1.7 млн человек. Город расположен в высокосейсмичном регионе Казахстана, в прошлом он был дважды разрушен сильнейшими землетрясениями – Верненским 1887 г. с магнитудой 7,2 и Кеминским 1911г. с магнитудой 8,2 (по некоторым новым данным магнитуда этого землетрясения составляет 7,9). [1]. Город неоднократно испытывал на себе и менее сильные воздействия. Из последних таких событий можно назвать Жаланаш-Тюпское землетрясение 1978 г. с магнитудой 6,9 и Суусамырское землетрясение 1992 года с магнитудой 7,3. На территории города в разных его частях они ощущались с интенсивностью 5 и 6 баллов.

Сейсмическую опасность города обычно связывают с сейсмогенерирующими зонами Северного Тянь-Шаня. Главные из этих зон, расположенные наиболее близко к городу, - Алматинская, Заилийская и Чилико-Кеминская. Их сейсмопотенциал достаточно велик – возможные магнитуды сильнейших землетрясений с очагами в этих зонах составляют соответственно от 7,5 до 8,5, а интенсивность сотрясений на территории города может достигать от 8 до 10 баллов. Простирание зон совпадает с простиранием хребтов Заилийский и Кунгей Алатау, Чилико-Кеминской зоной разломов.

Учет сеймоопасности этих зон отражен в картах сейсмического районирования разного уровня – общего, детального, микрорайонирования. Так в карте сейсмического микрорайонирования [2], составленной уже более 20 лет назад, оценка исходной сейсмичности на территории города произведена путем учета плавного затухания интенсивности сотрясений от очаговой зоны, расположенной на юге от города Алматы, к северу. На эту изменяющуюся в зависимости от расстояния до очага интенсивность накладываются эффекты инженерно-геологических условий площадок на территории города.

Долгое время существовало твердое убеждение, что очаговых зон землетрясений на территории города нет. Считалось, что существующие на территории города разломы, выделенные и указанные на карте сейсмического микрорайонирования, могут усиливать или ослаблять эффект от проходящих сейсмических волн землетрясений с очагами в других сейсмогенерирующих зонах за пределами города. Проходящие волны могут приводить к вторичным движениям в зонах разломов, провоцировать появление трещин, разрывов и т.д.

В последние годы территория города значительно увеличилась за счет присоединения к нему земель на западе, юге от города. Сейсмологи стали отмечать, что часто жителями мегаполиса ощущаются совсем небольшие по силе землетрясения с интенсивностью 2-3 балла с эпицентрами вблизи границ города или даже в его пределах. Целью настоящего исследования было изучить вопрос, имеются ли очаги землетрясений непосредственно на территории города Алматы в ее новых границах? Существовала ли такая сейсмичность и в прошлом? Каковы главные разломы на территории города, с которыми может быть связана такая сейсмичность? Посмотреть, каковы сейсмические воздействия от таких локальных землетрясений?

Используемые материалы

Изучение сейсмического режима Северного Тянь-Шаня нашло отражение в большом количестве публикаций, однако исследователей больше интересовали источники и проявления сильных землетрясений, способные вызвать масштабные разрушения на большой территории, сейсмический режим зон, в которых могут происходить такие землетрясения [3]. Изучение сейсмичности территории самого города и ближайших его окрестностей на протяжении многих лет оставалось нерешенной проблемой. Это было связано с тем, что для детального изучения сейсмичности и геодинамических процессов в пределах города и его окрестностей необходим высокочувствительный непрерывный сейсмический мониторинг, который должен учитывать специфические особенности регистрации сейсмических событий на фоне высокого уровня техногенных помех. Использование аналоговой аппаратуры без возможности применения частотной фильтрации было затрудни-

тельно для решения этой задачи.

Первая попытка провести такие исследования была предпринята в 70-х – 80-х годах прошлого века. В те годы вблизи города Алматы сотрудниками Комплексной сейсмологической экспедиции Института Физики Земли АН СССР была создана и успешно функционировала сеть из 8 высокочувствительных радиотелеметрических станций, часть из которых находилась в глубоких скважинах [4] (рисунок 1, таблица 1). Погружение сейсмодатчиков в скважины позволило снизить уровень сейсмических шумов большого города. Многолетние исследования показали высокую эффективность аппаратуры и выбранной конфигурации сети, а также использования скважинных станций совместно с наземными станциями. Это позволило не только значительно повысить чувствительность наблюдений, но и добиться высокой для того времени точности определения эпицентров, которая составила ±2 км, точность определения глубины 3-5км.

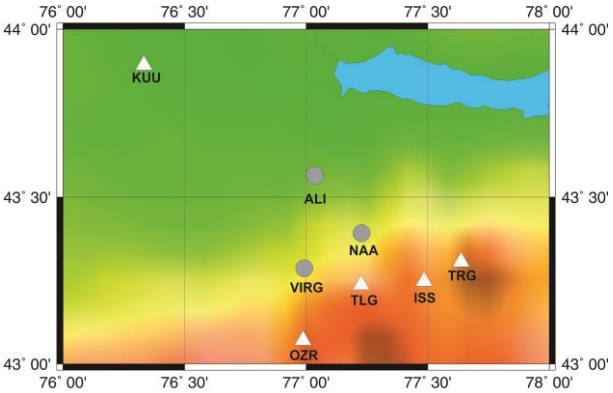


Рисунок 1. Карта расположения скважинных (●) и наземных (△) сейсмических станций ИФЗ РАН [4]

Таблица 1. Параметры сейсмических станций ИФЗ РАН [4]

Название станции	Код станции	Широта	Долгота	h, м	Глубина, м
Талгар	TLG	43,2375	77,22583	1200	
Озеро	OZR	43,07083	76,9875	2960	
Алма-Ата (ВИРГ)	VIRG	43,28717	76,9925	800	1000
Али	ALI	43,56533	77,0355	550	800
Ново-Алексеевка	NAA	43,393	77,22733	700	1200
Тургень	TRG	43,307	77,6375	1500	
Иссык	ISS	43,24833	77,485	1760	
Курты	KUU	43,89333	76,33333	550	

К сожалению, после 1983 г. сеть скважинных станций была законсервирована из-за отсутствия финансовых средств и больше не использовалась для систематической текущей обработки близких землетрясений.

В начале 2000-х годов была модернизирована сеть сейсмических станций, относящихся к СОМЭ МОН РК, находящихся вблизи г. Алматы. На них была установлена цифровая чувствительная аппаратура (таблица 2, рисунок 2), передающая данные в Центр обработки в реальном режиме времени, что позволило провести детальный анализ сейсмического режима города за последние 10 лет. Дополнительно к этой сети начали работу станции Института геофизических исследований НЯЦ РК (сейчас ИГИ КАЭ РК). В настоящее время на территории города действуют три стационарных сейсмических станции – Центральная сейсмическая станция «Алматы» (пр.Аль-Фараби), станция Казахстанского национального центра данных ИГИ – станция KNDC (пр. Достык-ул. Чайкиной), станция Медео. Для локализации гипоцентров и их энергетической параметризации используются и другие станции Казахстана двух организаций, а также станции Кыргызстана.

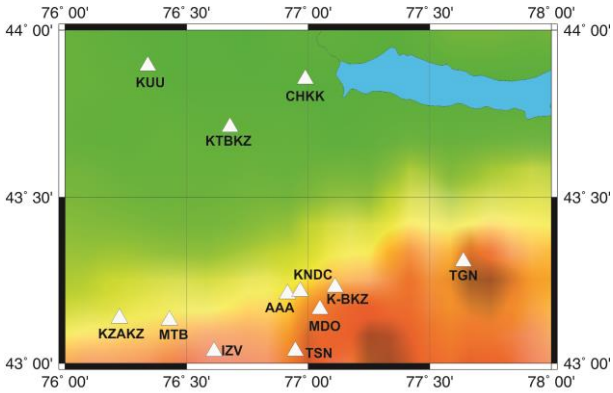


Рисунок 2. Карта расположения современных цифровых станций вблизи г. Алматы

Для выявления новых и уточнения местоположения уже известных разломов проведено дешифрирование космических снимков в пределах площади исследований 100×100 км. При дешифрировании в первую очередь использован материал многоспектральных сканирующих космических съёмок LANDSAT TM с 1989 г. и ETM с 1999 г., скомпонованных для 1990 г. (осень) и для 2000 г. (весна) в единые по геометрической и цветовой коррекции спутниковые изображения с разрешением 28 м на местности. Они представляют собой цветные трехканальные (используется RGB комбинация каналов 7-4-2 GeoCover) мозаики из сцен Landsat TM/ETM+. Цветовая комбинация RGB каналов 7-4-2 GeoCover спутниковых изображений Landsat TM/ETM+ близка к естественному природному визуальному восприятию цветовой гаммы земной поверхности.

Таблица 2. Параметры цифровых сейсмических станций вблизи г. Алматы (СОМЭ МОН РК, РГП ИГИ)

Название станции	Код станции	Открытие цифровой станции	Широта	Долгота	h, км
Алматы	AAA	2004279	43,209	76,915	920
Чушкалы	CHKK	2003218	43,854	76,988	540
Известковый	IZV	1996097	43,036	76,613	1720
Котур-Булак	K-BKZ	2000001	43,23	77,111	1600
KNDC	KNDC	2004134	43,2171	76,9671	1006
Каратобе	KTBKZ	2000275	43,71	76,678	760
Курты	KUU	2004063	43,893	76,34	540
Кзыласкер	KZAKZ	2004127	43,136	76,224	1085
Медео	MDO	2004106	43,163	77,048	1590
Майтюбе	MTB	2004007	43,13	76,429	1050
Тянь-Шань	TNS	2005349	43,037	76,947	3480
Тургень	TGN	2004106	43,307	77,638	1410

Также использована одна сцена 36×42 км многоспектрального изображения территории г. Алматы ориентировочно за 1995 г., включающая видимые и инфракрасные каналы спектра, с разрешением на местности 6 м. Она была использована для выделения и уточнения местоположения тектонических разломов в ситуации, когда город ещё не был подвержен современной интенсивной застройке. Для детального дешифрирования в сложных тектонических узлах в пределах исследуемой площади также использовались спутниковые изображения с высоким разрешением до 5 и до 1 м, скачанные в интернете с помощью поисковых систем Google Earth и SASPlanet.

Визуальное дешифрирование производилось на мониторе компьютера в векторной форме программными средствами MapInfo по растровой подложке спутниковых изображений. В процессе дешифрирования космических снимков отмечались линеаменты линейного характера, интерпретируемые как тектонические нарушения. По мощности линеаментных зон выделялись главные, основные, второстепенные разломы и тектонические трещины. Для исключения техногенных и промышленных помех линейного (дороги, трубопроводы, мощные линии электропередач и другие коммуникации) и площадного характера (границы пашен, лесонасаждений, пожарищ и др.) использовались в качестве растровых подложек изображения топографических карт масштабов 1:500 000 – 1:50 000.

Анализ сейсмического режима территории города Алматы

Результат многолетнего мониторинга сейсмического режима города Алма-Ата сетью радиотелеметрических станций ИФЗ нашел отражение в монографии [4], по результатам обработки был создан каталог сейсмических событий вблизи г. Алматы. Всего в каталог за 1.4.1972- 31.12.1982 включено 983 сейсмических события с энергетическими классами K=5.0-13.0 (рисунок 3). На рисунке 3 представлена карта эпицентров землетрясений в районе г. Алматы с нанесенными на нее современными контурами города (2014 г.). Как видно, эпицентры землетрясений на территории города расположены на обширной территории с юго-востока до северо-запада. На севере, северо-востоке не было зарегистрировано ни одного сейсмического события.

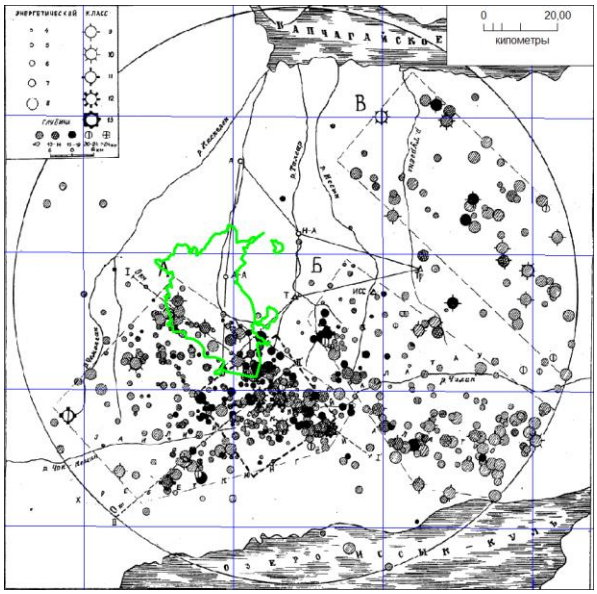


Рисунок 3. Сейсмичность района г. Алматы в контуре 160×160 км за 1972-82 гг. Современная граница города – зеленый контур

Тангенс угла наклона графика повторяемости землетрясений на территории г.Алматы и прилегающих территорий за период 1972 -1982 гг. составил $\gamma = -0.5$.

За период времени с 2005-06.2015 г. на территории города и ближайших окрестностей было зарегистрировано 1347 землетрясений с энергетическими классами K=2.7-11.1. На рисунке 4 приведена гистограмма энергетических классов землетрясений за этот период. Видно, что современной сетью станций регистрируются гораздо более слабые толчки, чем в период 1972-1982 г.г. Многие из них на территории города имеют энергетические классы менее 5. Но точность локализации событий и определения их глубины не повысилась по сравнению с телеметрической сетью КСЭ.

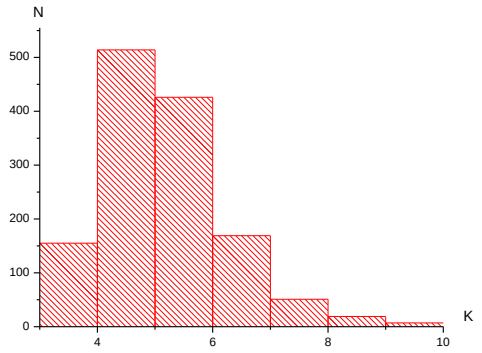
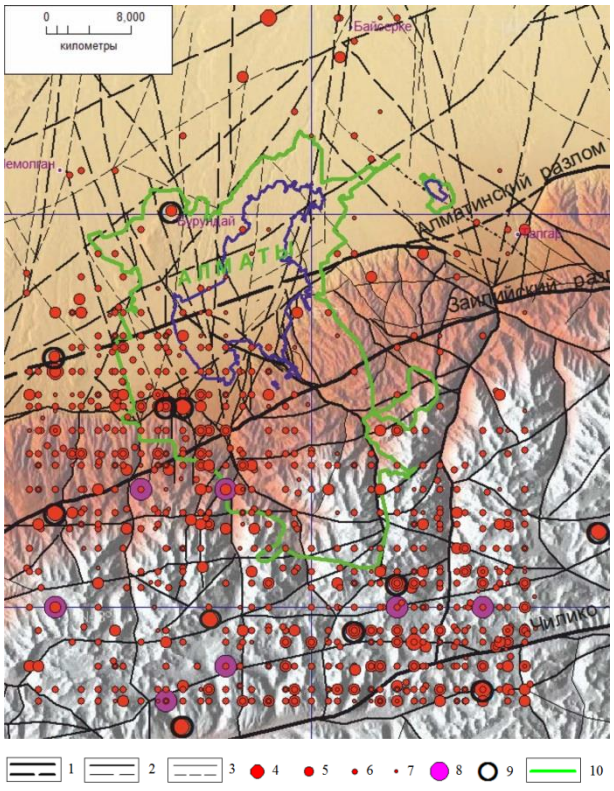


Рисунок 4. Гистограмма землетрясений по энергетическим классам за период 2005-06.2015 гг.

На рисунках 5 и 6 представлена карта эпицентров землетрясений за 2005-06.2015 гг. и тектоника района г. Алматы в контуре 60×70 км на карте рельефа и на топографической основе. Кроме эпицентров современных землетрясений, на карте показаны эпицентры сильных землетрясений с исторических времён с магнитудой 5.5 и более, а также активные разломы.



Тектонические нарушения в коренных породах и перекрытые рыхлыми отложениями (пунктиром): 1 – главные разломы; 2 – основные разломы; 3 – второстепенные разломы; Эпицентры землетрясений с магнитудой Mpv: 4 – с 4 до 4,7; 5 - с 3 до 4; 6 – с 2 до 3; 7 – до 2; 8 - Эпицентры сильных землетрясений с исторических времён с магнитудой 5.5 и более; 9 - Эпицентры ощутимых землетрясений после 2005 года с записями сильных движений; 10 - контур города Алматы 2015 г.

Рисунок 5. Современная сейсмичность (2005-06.2015 гг.) и тектоника района г. Алматы в контуре 60×70 км на карте рельефа

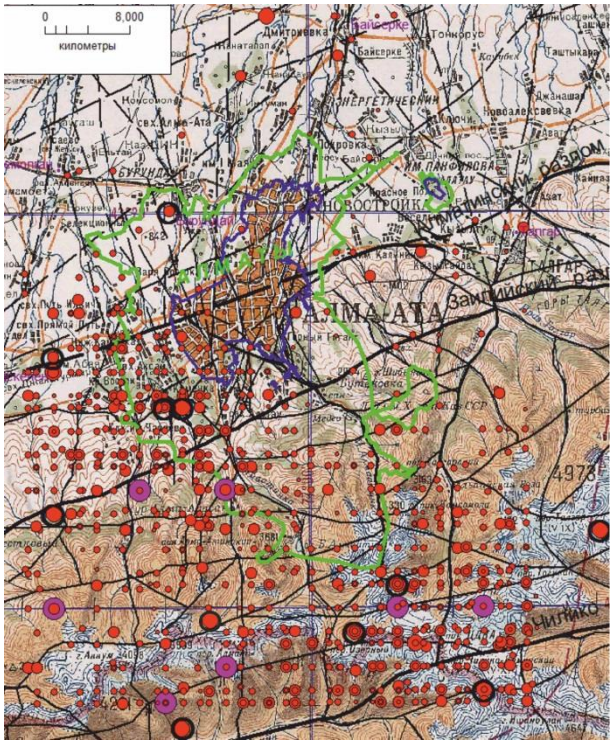


Рисунок 6. Современная сейсмичность и тектоника района г. Алматы в контуре 60×70 км на топографической основе (условные обозначения на рисунке 5)

Очаги сильных землетрясений в основном приурочены к крупным региональным разломам – Заилийскому и Чиликскому. Характер распределения очагов слабых землетрясений за 2005-06.2015 гг. аналогичен распределению эпицентров за период 1972 -1982 гг. Тангенс угла наклона графика повторяемости землетрясений на территории г. Алматы и прилегающих территорий за период 2005-06.2015 гг. совпадает с аналогичным параметром 1972 -1982 гг. $\gamma = -0.52$. На рисунке 7 показано количество землетрясений по годам в рассматриваемом районе, наблюдается тенденция резкого увеличения количества регистрируемых землетрясений. Наблюдается рост количества землетрясений за последние 5 лет, начиная с 2011 г.. Самые сильные землетрясения, которые были зарегистрированы в пределах современного контура города: 22 октября 2011 г., с магнитудой mb=4.1, 24 октября 2014 года с mb=3 и 26 ноября 2014 г. с mb=3.8 (рисунок 5,6, таблица 3).

Итак, видно, что на современной территории города Алматы происходили и происходят в настоящее время землетрясения. Пространственное положение очагов позволяет по данным двух этапов сейсмических наблюдений говорить о разделении территории города условно на сейсмичную и несейсмичную части. Под сейсмичной понимаем ту, где расположены очаги землетрясений. К ней относятся южная и юго-западная части города. Как в 1972-1982 гг., так и в 2005-06.2015гг. разделение происходит по тектоническому разлому, простираю-

щемуся в направлении ЮВ-СЗ, ориентировочно от урочища Медео в сторону оз.Сайран. Ранее на карте СМР этот разлом выделялся только за пределами города в горной местности. Внутри этой сейсмичной части города наиболее сильные землетрясения наблюдаются на границе рельефных уступов тектонического происхождения, территориально приуроченных к пос. Карагайлы, который в 2014 г. включен в состав города.

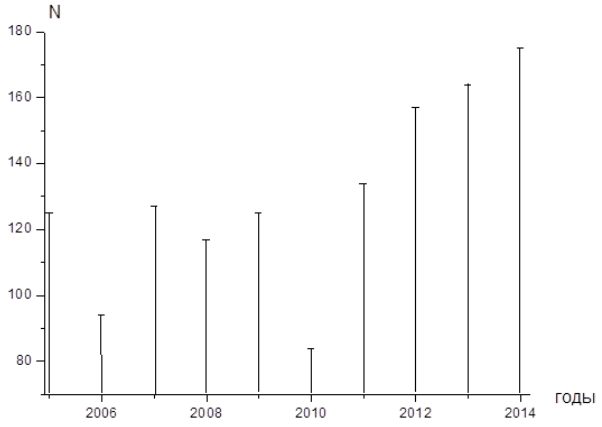


Рисунок 7. Количество землетрясений по годам в рассматриваемом районе

Проходящий через территорию города Алматинский разлом также служит ограничителем сейсмической территории города с северной стороны. Очаги наиболее сильных землетрясений, приуроченных к Алматинскому разлому, находятся за пределами города в сторону г. Каскелен.

ЗАПИСИ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ОЩУТИМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для научных исследований и практики сейсмостойкого строительства большой интерес представляет анализ параметров записей сильных движений. Постоянный мониторинг сильных движений в КНЦД был начат с 2006 г., с этого времени была создана и постоянно пополняется база данных цифровых записей сильных движений [5]. Обработка данных осуществляется при помощи программного обеспечения ViewWave, разработанного Т. Кашимой [6], которое позволяет проводить визуализацию записи, откалиброванной за характеристики прибора в физических единицах, производить расчеты спектра Фурье и спектра реакции для разных значений затухания, производить дифференцирование и интегрирование записей. Созданы каталоги параметров записей и соответствующих спектров реакции. В таблице 3 представлены параметры записей сильных движений по станции KNDC для ощутимых землетрясений на территории города последнего периода наблюдений. Максимальное ускорение соответствует землетрясению 29 декабря 2007 г, на эпицентральном расстоянии 26 км от станции KNDC, оно составило 33.9 см/с^2. Примерно такой же интенсивности было землетрясение 15 марта 2015 года, его очаг располагался близко к очаговой зоне землетрясения 29.12.2007 г., расстояние до станции KNDC 26 км, максимальное ускорение составило 27.2 см/с^2.

В последнее время, начиная с ноября 2014 год, а на территории г. Алматы достаточно часто ощущались толчки от землетрясений, эпицентры которых находились в непосредственной близости от границ города. 23 ноября 2014г. и 26 ноября 2014 г. землетрясения произошли с западной и северо-западной стороны города, 4 декабря 2014г. – с юго-восточной стороны, 15 марта 2015 года – с юго-западной.

На рисунке 8 представлены сейсмические записи землетрясения 15 марта 2015 г. в 14 часов 01 минут.

Отметим, что все спектры реакции разных землетрясений с очагами на территории г. Алматы и вблизи нее имеют сходную форму, являются высокочастотными с периодами колебаний в максимуме спектра от 0.10 до 0.13 с. На рисунке 9 представлены спектральные кривые динамичности β, построенные по записям событий из таблицы 3, зарегистрированных по горизонтальным компонентам станцией KNDC.

Таблица 3 Параметры записей сильных движений по станции KNDC

Годы	мм	дд	t0	φ°, N	λ°, E	mb	Δ, км	I0	A, см/с² E-W	A, см/с² N-S	A, см/с² Z	V, см/с E-W	V, см/с N-S	V, см/с Z	T(A)	T(V)
2007	11	1	18:27:40	42,93	77,2	4,3	27		0,2	0,2	0,3	0,01	0,01	0,01	0,1	0,25, 0,3
2007	12	29	21:27:22.0	42,9	76,85	4,9	26	4	32,1	33,9	17	0,55	1,49	0,48	0,4, 0,2	0,35
2009	4	8	17:15:04.9	43,02	77,1	4	24		0,7	0,7	1,5	0,02	0,02	0,03	0,1	0,1
2011	7	21	18:11:42.2	42,97	77	3,9	32	2	0,9	1,3	0,3	0,02	0,03	0,01	0,1	0,1
2011	10	22	23:17:36.2	43,17	76,86	4,1	18	2-3	0,7	1	0,9	0,02	0,03	0,02	0,15	0,25
2013	1	29	10:03:36.7	43,07	76,69	4,1	28		0,4	0,9	0,5	0,01	0,01	0,01	0,05	0,07
2014	10	24	05:57:26.5	43,18	76,83	3	12		0,5	0,2	0,4	0,01	0,005	0,01	0,09	0,09
2014	11	23	17:53:26.7	43,21	76,7	3,6	22	2	0,4	0,3	0,5	0,01	0,005	0,01	0,12	0,12
2014	11	26	17:57:18.3	43,34	76,84	3,8	17	2-3	0,7	1,4	0,7	0,01	0,03	0,01	0,12	0,12
2014	12	4	05:25:25.3	43,06	77,34	4,4	35	2-3	1,6	1,8	1,1	0,02	0,03	0,02	0,12	0,12
2015	3	15	14:01:00.5	42,99	76,88	5,1	26	4-5	14,6	13,6	27,2	0,21	0,20	0,42	0,12	0,12

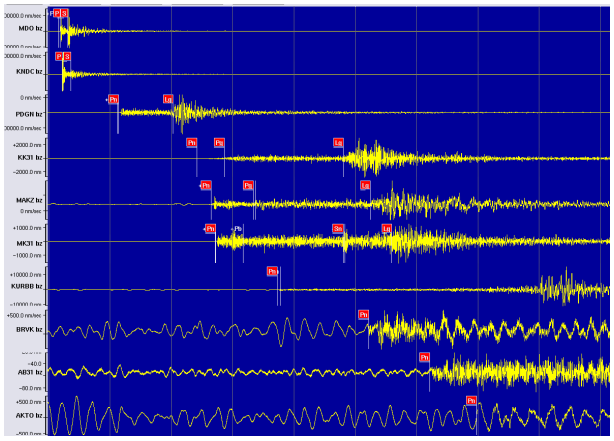


Рисунок 8. Сейсмические записи землетрясения 15 марта 2015 г. 14-01 по станциям РГП ИГИ

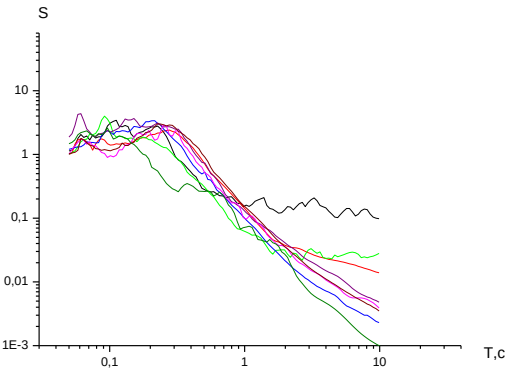


Рисунок 9. Кривые динамичности β, построенные по горизонтальным компонентам записей событий из таблицы 3 по станции KNDC

Выводы и рекомендации

1. По материалам сейсмических наблюдений достоверно установлено, что на территории города Алматы в его южной и юго-западной части происходят землетрясения.
2. Выявлены активные разломы на территории города, с которыми связаны очаги землетрясений, и ограничивающие сейсмически активную его часть.
3. Требуется проведение более детального уточнения современной сейсмотектонической обстановки района г. Алматы для целей микросейсморайонирования, включающее:

– детальное дешифрирование крупномасштабных космических снимков всей исследуемой территории с разрешением до 1-5 м;

– детальный анализ крупномасштабных топографических карт масштабов 1:25 000 и 1:10 000, что очень важно для мало расчленённой предгорной области исследуемой территории.

4. Необходимо изучить сейсмопотенциал разломов на территории города, т.е. установить, какие максимально сильные землетрясения возможны в пределах города.
5. Желательно уточнение глубинного положения очагов на территории города путем организации сейсмического мониторинга территории с помощью расстановки плотной сети полевых сейсмических станций вокруг города, а также организация для города Алматы системы раннего оповещения о происходящих событиях.

Литература

1. Нурмагамбетов, А.Н. Сейсмическая история Алматы. // Издательство "LEM", Алматы 1999, 68 с.
2. Ержанов, Ж.С. Сейсмическое микрорайонирование территории города Алматы / Ж.С. Ержанов [и др.] // “Наука” Казахской ССР, 1982. – 114 с.
3. Сыдыков, А. Сейсмический режим территории Казахстана. Изд-во «Гылым». 2004.168 с.
4. Гальперина, Р.М. Сейсмический режим района города Алма-Аты за 1972-1982 гг. / Р.М. Гальперина, И.Л. Нерсесов, Е.И. Гальперин // М., Наука, 1985. – 248 с.
5. Соколов, А.Н. Использование данных по сильным движениям для прогноза воздействий на площадки строительства ответственных объектов /А.Н. Соколов, Р.Б.Узбеков// Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии. Доклады международной конференции молодых ученых и специалистов. 6-8 июня 2012 г. г. Алматы ИЯФ. С. 97-105.
6. Kashima, T. 2002. ViewWave Help, IISEE, BRI.

АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ АУМАҒЫНДАҒЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕР

Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Великанов А.Е., Соколов А.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Микросейсмоаудандау мақсатында Алматы қаласы ауданының қазіргі заманғы сейсмотектоникалық жағдайын нақтылау жүргізілді. Соңғы он жылдықтағы сейсмикалық туралы жаңа деректер бойынша Алматы қаласының аумағында, оның жаңа шекаларында жерсілкінулер ошақтары оңтүстік және оңтүстік-батыс бөліктерінде тіркелгені белгілі болды. Олардың ішіндегі ең күштілері қала аумағында 4-5 балл қарқындылығымен сезілді. Қаланың аумағында осы жерсілкінулермен байланысты жарылысдар пайда болғаны анықталды. Қаланың аумағындағы сейсмотүрлендіру жарылымдарын ары қарай зерттеуге, Алматы қаласының жауапты нысандарында сейсмикалық мониторинг жүргізуге, жерсілкінулер туралы ерте хабар беру жүйесін ұымдастыруға ұсыныстар жасалды.

EARTHQUAKES ON THE TERRITORY OF ALMATY

N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova, A.Ye. Velikanov, A.N. Sokolov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The contemporary seismic and tectonic setting of Almaty was precised for micro seismic zoning purposes. New data on seismicity received in recent decades show that within new borders of Almaty the earthquake sources were recorded in its south and south-west part. The largest of them were felt on the territory of the city with intensity 4-5. Some faults generating the earthquakes were revealed on the territory of the city. The paper provides recommendations for further investigation of seismic generating faults on the territory of the city, arranging of seismic monitoring at critical facilities of Almaty, establishment of the earthquakes early warning system.

УДК 550.344

О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ БЛИЗ КАРАГАНДЫ 21 ИЮНЯ 2014 ГОДА

Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н., Великанов А.Е., Узбеков А.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

В работе представлены результаты макросейсмического анализа землетрясения с магнитудой mb=5.2, произошедшего близ города Караганды 21 июня 2014 года, и зарегистрированного сейсмическими станциями Института геофизических исследований. На основании данных макросейсмического обследования, включавшего сбор и анализ сведений о повреждениях жилых и производственных зданий, определена интенсивность сотрясения в баллах по сейсмической шкале MSK-64 в 34-х населённых пунктах на территории радиусом ≈100 км вокруг эпицентра землетрясения. Впервые изучены основные параметры, построен механизм очага, составлена карта изосейст сильного землетрясения из района Карагандинской области, который ранее считался асейсмичным. На основе анализа сейсмических записей, механизма очага и геолого-тектонических особенностей района сделано заключение о природе исследуемого сейсмического события.

Введение

21 июня 2014 года все сейсмические станции сети Института геофизических исследований (ИГИ) зарегистрировали довольно сильное землетрясение в Центральном Казахстане [1]. Любое землетрясение в этом регионе – событие редкое, а особенно, если это ощутимое сильное землетрясение. Чаще в Центральном и Северном Казахстане регистрируются промышленные карьерные взрывы, связанные с разработкой полезных ископаемых. Наиболее близкая к эпицентру землетрясения станция ИГИ Ортау находилась на расстоянии примерно 160 км.

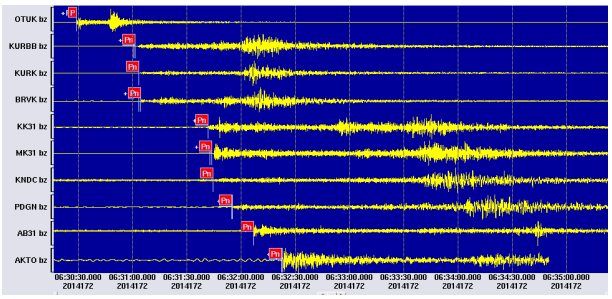
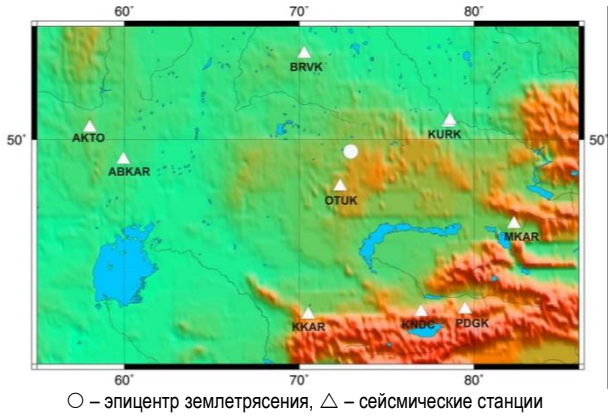


Рисунок 1. Записи землетрясения на станциях ИГИ КАЭ РК



○ – эпицентр землетрясения, △ – сейсмические станции

Рисунок 2. Расположение сейсмических станций ИГИ относительно эпицентра землетрясения 21 июня 2014 года

Записи получены также на станциях Боровое (432 км), Курчатов (426 км), Маканчи и других (рисунки 1, 2), которые входят в мировые глобальные сети станций. Данные станций автоматически передаются в международные центры – Европейский EMSC в Париже, в Американский NEIC, в Международный сейсмологический центр в Англии ISC.

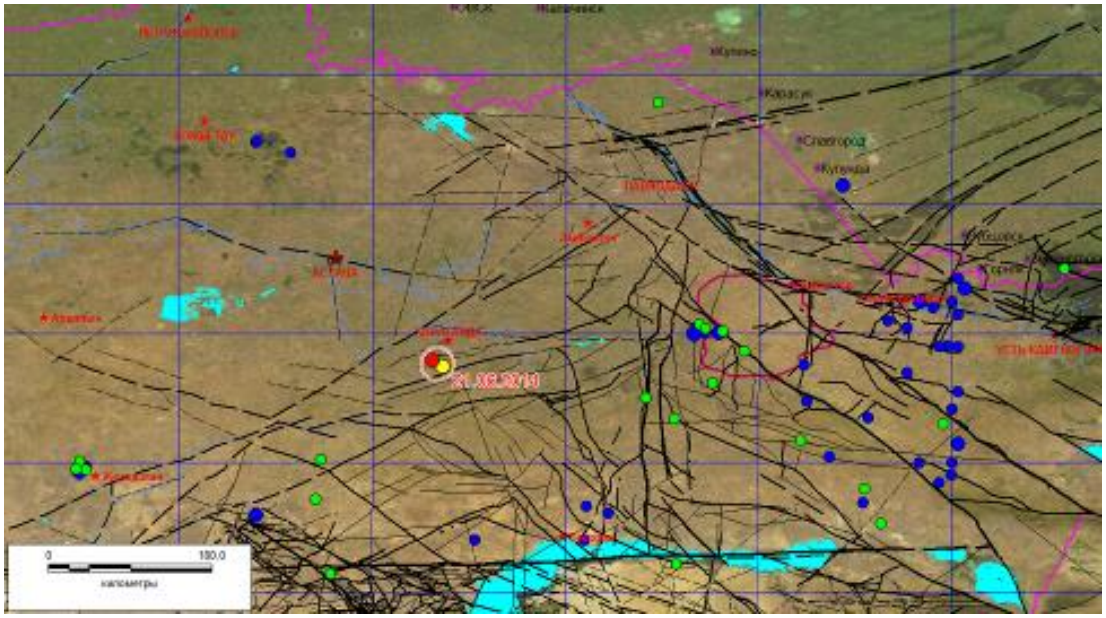
Землетрясение было обработано и в других центрах данных, региональных и международных [2-4]. Решения разных центров практически совпадают. Координаты эпицентра варьируют в пределах сотых долей градуса, магнитуда mb=4.8–5.2, глубина h=9-20 км. Основные параметры землетрясения по данным разных центров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры землетрясения, зарегистрированного близ г. Караганды

Источник	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.	t_0, ч : м : с	mb	K	H, км
EMSC(Франция) [4]	49.57	72.90	6:30:04.3	4.8		17
ГС РАН (Россия) [3]	49,53	72,98	6:30:02.8	5.0	12	20
РК (КНЦД+СОМЭ) [5,6]	49,56	72,97	6:30:03.4	5.2	11,7	9

Сразу же после события стали поступать сведения о том, что землетрясение ощущалось в ряде населенных пунктов. Наиболее близким к эпицентру по предварительным данным оказался г. Абай, расположенный в 10 км на северо-запад от эпицентра, интенсивность толчков здесь составляла 4-5 баллов. В столице Казахстана Астане землетрясение ощущалось с интенсивностью 2 балла. Расчетная интенсивность в эпицентре составляет 4-5 баллов.

Эпицентр землетрясения расположен в пределах Казахского мелкосопочника, вблизи южной границы карагандинского каменноугольного бассейна. В связи с расположением очага в асейсмичной платформенной зоне, подверженной интенсивным техногенным воздействиям, встал вопрос о природе этого сейсмического события. Не связано ли оно с работами на угольных шахтах, интенсивными в этом районе? Является оно тектоническим или техногенным?



● и ● – эпицентры ранее произошедших землетрясений. В ○ – эпицентр 21.06.2014 г. по данным различных центров.
— – граница Семипалатинского испытательного полигона

Рисунок 3. Положение эпицентра землетрясения на тектонической схеме

Анализ тектонической обстановки района очага этого землетрясения показывает приуроченность очага к тектоническим структурам. А именно, эпицентр землетрясения расположен на северной границе Успенской зоны смятия северо-восточного простирания, ограниченной субпараллельными тектоническими разломами того же направления (рисунок 3). Из рисунка видно, что к этой системой разломов приурочены также очаги Джезказганских и Шалгинского землетрясений, магнитуда которых, соответственно, достигала MPV= 4-5 [5-6].

МЕХАНИЗМ ОЧАГА

Механизм очага землетрясения 21 июня 2014 года получен в центре данных ИГИ по первым смещениям Р-волн на записях землетрясения, полученных 15 сейсмическими станциями, данные которых в оперативном режиме поступают в Центр данных ИГИ РК. О надежности решения фокального механизма свидетельствует согласованность знаков, составляющая 100%, а также область разброса определяемых параметров, не превышающая 10°. Стереограмма фокального механизма показана на схеме месторождений полезных ископаемых Казахстана (рисунок 4). Параметры механизма очага приведены в таблице 2.

Из параметров механизма очага следует, что землетрясение реализовалось в условиях системы напряжений, характеризующейся близгоризонтально в северо-восточном направлении ориентированной осью напряжения сжатия, и субширотной осью напряжения растяжения. Механизм очага представляет собой комбинацию пологого северо-восточного сдвига и крутого северо-западного взброса с небольшой сдвиговой составляющей. Сопоставление плоскостей разрыва в очаге землетрясения с тектоникой района показывает, что ориентация северо-восточного сдвига согласуется с направлением Успенской зоны и ограничивающими ее субпараллельными тектоническими разломами, между которыми расположен очаг. Другая возможная плоскость разрыва, представляющая собой крутой северо-западный взброс, согласуется с ориентацией локальных разломов вблизи очаговой зоны, а также с системой региональных тектонических разломов исследуемой территории, секущих его структуры в северо-западном направлении (рисунок 4).

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясения

P	T	N	1 плоскость	2 плоскость
Azm° Pl°	Azm° Pl°	Azm° Pl°	Str Dip Slip	Str Dip Slip
23 17	283 29	140 56	246 57 9	151 82 148

Отметим, что в аналогичной системе напряжений реализовались также очаги Джезказганских и Шалгинского землетрясений, ориентация плоскостей разрывов которых подобна разрывам в очаге рассматриваемого сейсмического события [5-6].

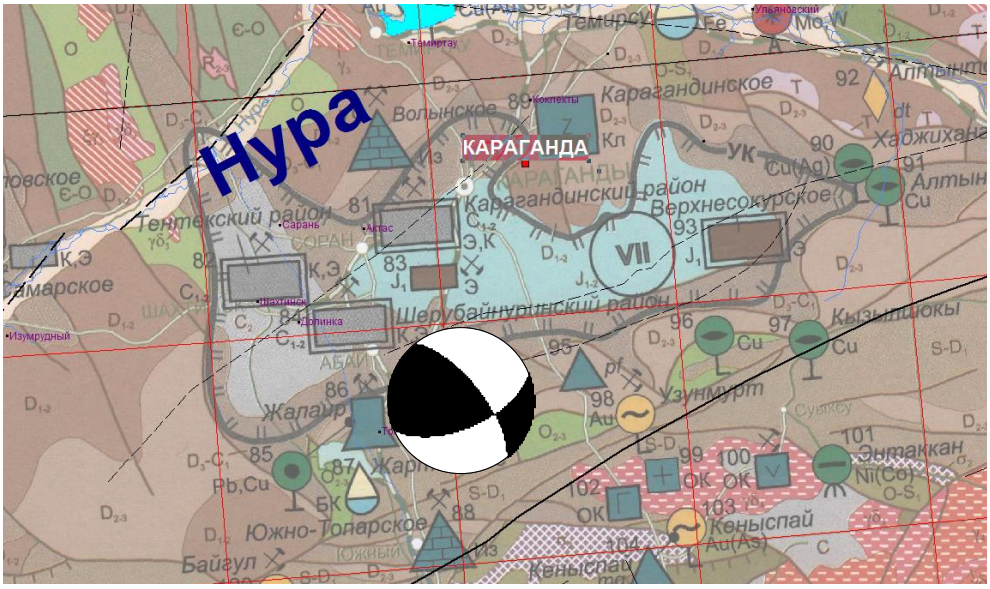


Рисунок 4. Стереограмма механизма очага землетрясения 21 июня 2014 г.

Таким образом, из анализа механизма очага следует, что очаг рассматриваемого землетрясения и очаги Джезказганских и Шалгинского землетрясений реализовался в едином поле напряжений, а ориентация плоскостей разрывов во всех очагах подобна, причем, обе возможные плоскости разрыва в очагах имеют очевидную связь с тектоническими разломами западной части Центрально-Казахстанского мелкосопочника. Данные факты являются аргументами в пользу тектонического происхождения рассматриваемого землетрясения.

АФТЕРШОКОВАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В ОЧАГЕ

Детальный анализ записей ближайшей к эпицентру землетрясения 21 июня 2014 г. станции Ортау, относящейся к сети станций ИГИ, показал, что после основного события примерно через 17 минут в том же очаге произошел еще один слабый толчок. Установить природу этого землетрясения как афтершока первого толчка удалось с помощью корреляционного анализа волновых форм по станции Ортау, а также анализа азимутов на источник по трехкомпонентной станции.

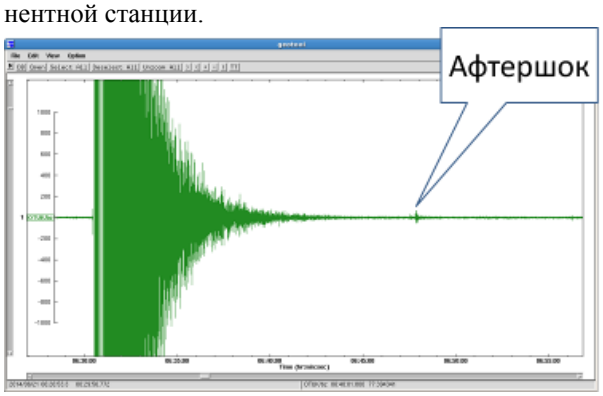


Рисунок 5. Запись станции Ортау, находящейся на расстоянии 160 км от эпицентра, по вертикальной компоненте. В начале рисунка – запись главного толчка

В результате проведенного анализа было доказано, что это событие относится к той же области, где произошел и основной толчок.

Второй толчок был очень слабым (рисунок 5), его энергетический класс составил всего 5,2. Заметим, что энергетический класс главного толчка по оперативным данным оценивался примерно в 12.0. После уточнения он характеризуется значениями К=11,7.

Наличие повторного толчка является еще одним фактором, позволяющим считать, что рассматриваемое землетрясение имеет тектоническое происхождение.

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Макросейсмическое обследование эпицентральной территории землетрясения проведено сотрудниками Института геофизических исследований ведущим геологом Великановым А. Е. и МНС Узбековым А. Н. через неделю после землетрясения с 28 июня по 3 июля. На территории радиусом чуть больше 100 км от эпицентра землетрясения было проведено обследование 34 населённых пунктов с составлением анкетированных опросов для установления фактической интенсивности сотрясений по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 в каждом пункте. Маршруты объезда населённых пунктов совпадали с основными направлениями автодорожных трасс, расходящихся в различных направлениях от областного центра г. Караганды. В начале исследований основное внимание было уделено эпицентральной области в районе пос. Карабас, где в непосредственной близости от эпицентра было посещено пять объектов. По результатам макросейсмического обследования составлена таблица макросейсмических данных и построена карта изосейст (рисунок 6).

Таблица 3. Макросейсмические данные о Карагандинском землетрясении 21 июня 2014 г.

Пункт	Интенсивность MSK64	R, км	φ°, N	λ°, E	Номер опроса
Гора Карабас	5-6	1,6	49.563800	72.921600	5
Админ. здание Карьера	5-6	0,8	49.578800	72.910600	7, 8
Дома Гулаг	5	0,4	49.581400	72.922100	6
п. Карабас, сев-вост.	5	1,1	49.588305	72.921933	24
п. Карабас, запад	5	2,3	49.576000	72.889800	4
Геологич. экспедиция	4-5	5,8	49.587778	73.001889	14
г. АБАЙ	4-5	8	49.637820	72.858901	1, 2, 3
п. Топар	4-5	9	49.519147	72.828746	15
п. Долинка	4-5	21	49.679442	72.676081	11
г. АКТАС	4-5	23	49.779513	72.965853	12, 13
п. Жартас	4	18	49.529069	72.676159	9, 10
г. Шахтинск	4	28	49.717776	72.587841	31-33
п. Южный	4	24	49.358348	72.905905	16, 17
п. Спасск (в/ч)	4	27	49.537100	73.280879	21
с. Жумабек	4	22	49.597553	73.218028	22
мкр. Юго-Восток	4	29	49.792506	73.131076	23
г. Караганда (Нов. Город)	4	31	49.830279	73.084831	41, 42
мкр. Майкудук	4	36	49.856074	73.185112	43
п. Доскей	4	40	49.855256	73.260005	34
г. Темир-Тау	4	52	50.047845	72.986483	25
с. Кызылкой	4	55	49.209829	73.397031	20
п. Изумрудный	3-4	64	49.687437	72.037568	30
п. Ботакара (Ульяновский)	3-4	78	50.058178	73.716163	38, 39
п. С. Сейфулин	3	81	48.859052	72.835332	18
п. Аксу-Аюлы	3	105	48.770809	73.680568	19
с. Тогызкудук	3	59	49.881027	73.584712	35
с. Шешенкара	3	92	49.964282	74.040005	37
п. Байкадам	3	59	50.014987	73.388657	40
п. Токаревка	3	62	50.113312	73.159841	48, 50
Кушокинский карьер	3	84	50.264170	73.395044	47
г. Актау	3	73	50.228522	73.069246	49
с. Шагынды (Крас. Круг)	3	83	50.314200	72.724707	26
п. Кушокы	2-3	80	50.230440	73.402727	44, 45
с. Майозек	2	80	50.244566	73.315143	46
п. Осакаровка	2	112	50.560984	72.563356	27
п. Киевка	не ощущалось	123	50.261869	71.550935	28
с. Алгабас	не ощущалось	99	49.900263	71.615981	29
с. Ынталы	не ощущалось	105	49.690963	74.369529	36

Согласно полученным результатам землетрясение ощущалось с интенсивностью сотрясений от 2 до 5 баллов по шкале MSK-64 на площади 230×190 км. Изосейсты землетрясения имеют форму, близкую к изометричной и чуть вытянуты в ССЗ направлении.

В зоне пятибалльных сотрясений, охватывающих площадь около 500 км^2, оказались г. Абай, посёлки Карабас и Топар, а также полевой лагерь геологической экспедиции. В этой зоне все опрошенные люди ощутили толчки. Многие приняли толчки за последствия сильного взрыва в шахте или в карьере, были напуганы и стремились покинуть помещения, почти оценили длительность колебаний от 5-6 до 10 секунд. Большинство жителей различили фазы сотрясений: два толчка, «сначала 2-3 секунды слабый толчок, затем 2-3 секунды сильный толчок, потом сотрясения».

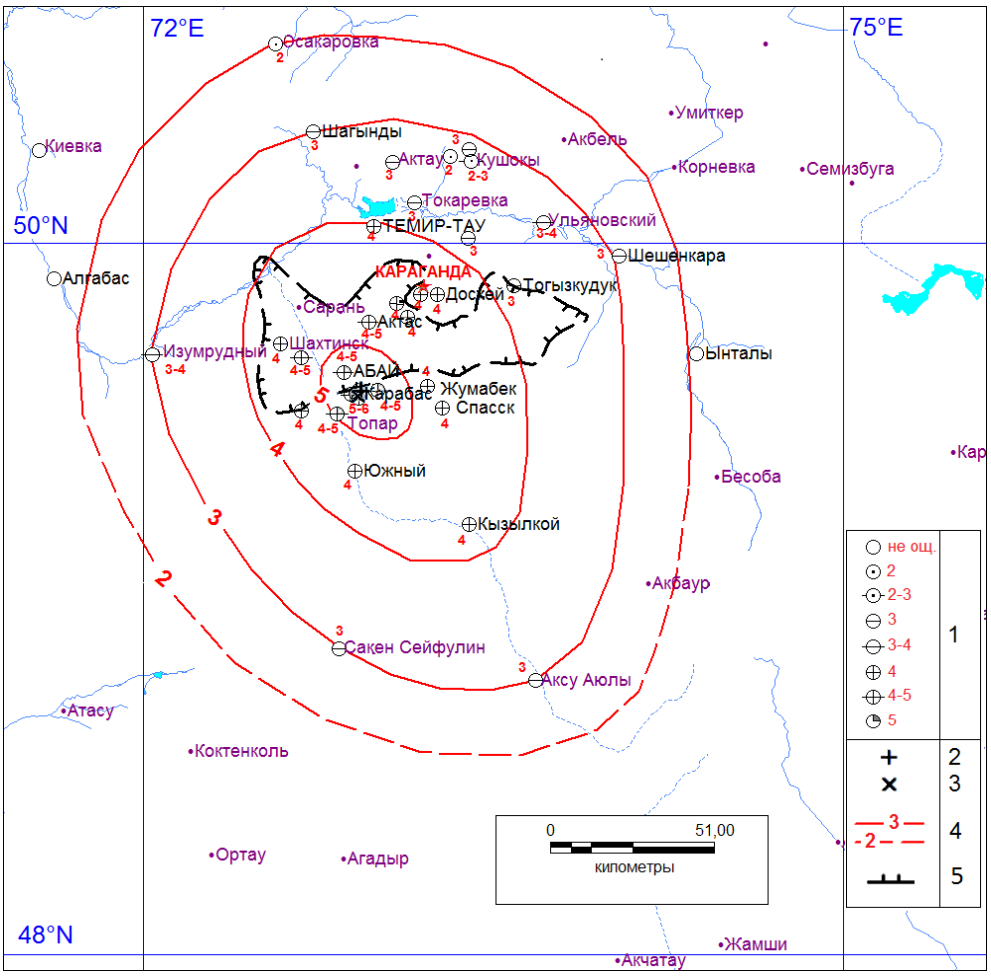
В эпицентральной зоне в радиусе примерно 1-2 км, где наиболее сильно ощущались сотрясения, находился пос. Карабас, восточнее - гора Карабас с относительной высотой до 130 м (абс. отметка 661 м) и Карабасский каменный карьер на западном склоне горы (рисунок 7). Многие приняли толчки за последствия сильного взрыва в карьере, однако, это был субботний день, когда взрывы в карьере не производятся.

На стенах старого административного здания управления Карабасского каменного карьера после недавнего ремонта появились небольшие до 1-2 мм шириной свежие трещины между помещениями (рисунок 8) и осыпалась штукатурка (рисунок 9).

Исходя из собранных данных об ощущениях сотрясений людьми и животными, перемещения предметов, степени повреждения зданий и следов толчка на дневной поверхности, был определен макросейс-

мический эпицентр, имеющий координаты 49,58° с.ш. и 72,92° в.д. Из полученных результатов следует, что макросейсмический эпицентр землетрясения приурочен к месту расположения отвала временного хранения отсева и находится на 1,4 км юг от инструментального эпицентра с координатами 49,59° с.ш. и 72,93° в.д.

В зоне четырёхбалльных сотрясений, охватывающих площадь около 8000 км^2, оказались города Караганда, Темир-Тау, Актас, Шахтинск, а также посёлки и сёла Доскей, Долинка, Жартас, Южный, Кызылкой, Спасск и Жумабек. В этой зоне многие люди ощущали толчки (на верхних этажах – практически все), ощущалось колебание предметов и мебели.



1 – пункты и значения интенсивности сотрясений в баллах по шкале MSK-64; 2, 3 - инструментальный и макросейсмический эпицентры соответственно; 4 – изосейсты и значения балльности; 5 – границы Карагандинского бассейна (Карбасса)

Рисунок 6. Карта изосейст землетрясения 21 июня 2014 г. (составили А.Е. Великанов, А.Н. Узбеков)



Рисунок 7. Карабасский каменный карьер, за ним пос. Карабас и далее правее в 8 км г. Абай



Рисунок 8. Свежие трещины между помещениями после ремонта на стенах административного здания



Рисунок 9. Откол штукатурки на стенах административного здания карьера

В зоне трёхбалльных сотрясений, охватывающих площадь около 20000 км^2, оказались город Актау, Кушокинский угольный разрез, посёлки и сёла Кушокы, Токаревка, Байкадам, Ботакара (Ульяновский), Шешенкара, Тогызкудук, Аксу Аюлы, Сакен Сейфулин, Изумрудный и Шагынды. В этой зоне только немногие люди, находившиеся в покое, почувствовали два толчка в течение 5-10 секунд, некоторые заметили колебания мебели, настенных зеркал или лампочек.

Границы двухбалльной зоны в северной части исследованной территории достоверно установлены по ощущениям сотрясений в населённых пунктах. Положение границы двухбалльной зоны в южной части территории носит условный характер из-за отсутствия населённых пунктов на расстоянии более 80-100 км от эпицентра. Предположительно двухбалльным сотрясениям подверглась территория более 35000 км^2. В зоне двухбалльных сотрясений слабые толчки почувствовали единичные люди, находившиеся в состоянии полного покоя.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИРОДЫ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Таким образом, из проведенного исследования следует:

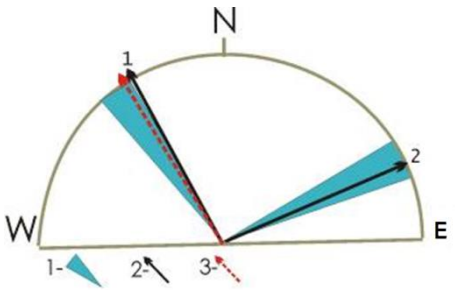
– землетрясение 21 июня не было спровоцировано взрывом, поскольку взрывы в карьере в это время не производились;

– по данным механизма очага, землетрясение не является результатом простого обрушения, поскольку знаки первых смещений Р-волн, зарегистрированных в разных азимутах от эпицентра, имеют квадрантное распределение, свойственное тектоническим землетрясениям, реализующимся под действием двойной пары сил (сжатия и растяжения);

– система напряжений, под действием которых произошло землетрясение, согласуется с полем напряжений, в котором реализовались и другие сильные землетрясения западной части Центрально-Казахстанского мелкосопочника [5-6].

Все эти факторы свидетельствуют, что очага землетрясения имеет тектоническую природу происхождения.

Для выбора из двух возможных плоскостей истинной плоскости разрыва, данные механизма очага сопоставлены со сведениями о главной сети разломов исследуемого района, а также сведениями, полученными в результате макрообследования землетрясения. На рисунке 10 отражены все имеющиеся сведения: направления нодальных плоскостей механизма очага, большой оси эллипса изосейст и диапазоны азимутов главной сети разломов.



1 – диапазон азимутов главной сети разломов; 2 – азимуты нодальных плоскостей очага; 3 – азимут большой оси изосейст

Рисунок 10. Сводные направления азимутов большой оси эллипса изосейст, нодальных плоскостей землетрясения и главной сети разломов

Из анализа рисунка можно отметить:

– согласованность азимутов обеих нодальных плоскостей очага с направлениемя системы разломов, т. е. по этому признаку выбрать наиболее вероятную плоскость разрыва невозможно;

– хорошую согласованность азимута большой оси эллипса изосейст как с нодальной плоскостью северо-западного направления, так и с северо-западным направлением тектонических разломов исследуемой территории.

Результаты анализа свидетельствуют, что с наибольшей вероятностью истинной плоскостью разрыва является плоскость северо-западного простирания с азимутом 331° (обратный азимут 151°).

Таким образом, рассматриваемое землетрясение произошло в результате взбросовой подвижки с некоторой сдвиговой составляющей по крутопадающей плоскости разрыва северо-западного направления, что согласуется с динамикой региональных разломов этого направления.

Заключение

Поскольку из приведенных данных следует, что землетрясение 21 июня не является следствием взрыва или простого обрушения пород, а реализовалось в условиях регионального поля напряжения, под действием которого в очаге произошел разрыв, согласующийся с динамикой и ориентацией главных линеаментов региона, можно сделать вывод, что это тектоническое землетрясение. В то же время, не исключено, что реализации землетрясения могла быть спровоцирована активной взрывной деятельностью в рядом расположенном карьере.

Литература

1. Казахстанский Национальный Центр Данных [Электронный ресурс]. – Сети наблюдений. – Режим доступа: http // www.kndc.kz, свободный.
2. Российская Академия Наук геофизическая служба [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.ceme.gsras.ru, свободный.
3. Европейско-Средиземноморский сейсмологический Центр [Электронный ресурс]: – Режим доступа: , http://www.emsc-csem.org, свободный.
4. Сейсмологическая опытно методическая экспедиция [Электронный ресурс]: – Режим доступа: www.some.kz, свободный.
5. Михайлова, Н.Н. О механизмах очагов землетрясений Центрального Казахстана. / Н.Н Михайлова, Н.Н Полешко. // Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 1. – С. 100-105.
6. Михайлова, Н.Н. Сейсмичность и характер напряженно-деформированного состояния в слабосейсмичных районах Казахстана. / Н.Н Михайлова, Н.Н Полешко. // Вестник НЯЦ РК, 2013. – Вып. 2. – С. 140-154.

2014 ЖЫЛҒЫ 21 МАУСЫМДА ҚАРАҒАНДЫ ЖАНЫНДАҒЫ ЖЕРСІЛКІНУІ ТУРАЛЫ

Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н., Великанов А.Е., Узбеков А.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста, 2014 жылы 21 маусымда болған және Геофизикалық зерттеулер институтының станцияларымен тіркелген, магнитудасы mb=5.2 Қарағанды жанындағы жерсілкінуін микросейсмикалық талдаудың нәтижелері берілген. Тұрғын және өндірістік ғимараттар бұзылу туралы мәліметтерді жинау және талдауын қосатын микросейсмикалық тексерудің деректері негізінде, жерсілкінудің эпиорталығының ≈100 км айналасында, MSK-64 сейсмикалық шкаласы бойынша баллмен, 34 мекенжайларда сілкіністің белсенділігі анықталған. Алғашқы рет негізгі параметрлері зерделенген, ошақтың механизмі салынған, бұрын асейсмикалық болып саналатын Қарағанды облысы ауданынан қатты жерсілкінудің изосейстер картасы құрастырылған. Сейсмикалық жазбаларын, ошақ механизмін және ауданның геология-тектоникалық ерекшеліктерін талдау негізінде зерттелудегі сейсмикалық оқиғаның тегі туралы қорытынды жасалған.

TO THE EARTHQUAKE NEAR KARAGANDA OF 21 JUNE 2014

N.N. Mikhailova, N.N. Poleshko, A.Ye. Velikanov, A.N. Uzbekov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The work shows the results of macroseismic analysis of the earthquake with magnitude mb=5.2 occurred near Karaganda city on 21 June 2014 and recorded by the seismic stations of the Institute of Geophysical Researches. Basing on the data of macroseismic investigation that included acquisition and analysis of information on damaged inhabited and industrial buildings the shake intensity in points by seismic scale MSK-64 was determined for 34 settlements in the radius of ≈100 km around the earthquake epicenter. For the first time the main parameters were studied, focal mechanism was constructed, the isoseismal map for the large earthquake from Karaganda region that earlier was considered as aseismic was made. Analysis of seismic records, focal mechanism and geological and tectonic features of the region allowed making a conclusion on the nature of the investigated seismic event.

УДК 550.344

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И НЕТЕКТОНИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ БЮЛЛЕТЕНЯХ KNDC

Узбеков Р.Б., Рябенко О.В., Сейнасинов Н.А.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Казахстанский национальный центр данных (KNDC) Института геофизических исследований, начиная с 2002 года, проводит мониторинг сейсмических событий разной природы на территории Центральной Азии. В статье приведены характеристики бюллетеней KNDC, различного уровня оперативности, описание работ Центра по распознаванию природы источников, формированию баз данных тектонических и нетектонических событий.

Введение

Казахстанский национальный центр данных ведет круглосуточную работу по мониторингу сейсмических событий разной природы. Источники событий находятся как на территории Казахстана, так Центральной Азии и мира. На постоянной основе ведется обмен данными с национальными, международными центрами: EMSC (Европейский Средиземноморский центр, Франция); ISC (Международный сейсмологический центр, Англия) ГС (Геофизическая служба) РАН. В число регистрируемых сейсмических событий входят землетрясения, взрывы, а также другие явления природного и техногенного характера.

Используемые данные и общий объем событий

В KNDC круглосуточно поступают данные со всех сейсмических станций сети Института геофизических исследований (ИГИ) (рисунок 1). Это сейсмические группы и трехкомпонентные станции, введенные в строй за последние 20 лет. Сбор данных производится в реальном времени по спутниковым и радиотелеметрическим каналам. Кроме того, осуществляется сбор данных с ряда станций стран Центральной Азии – Кыргызстана, Туркменистана, Таджикистана, Узбекистана и России (рисунок 2).

В пост-реальном времени через сутки поступают данные с другой сети станций Казахстана – СОМЭ МОН РК. Все данные обрабатываются совместно, результатом чего являются продукты KNDC разной степени оперативности:

– автоматический сейсмический бюллетень. Готовность через 10 – 30 минут;

– интерактивный бюллетень срочных донесений. Готовность 15 – 20 минут;

– интерактивный оперативный сейсмический бюллетень. Готовность через сутки;

– сводный бюллетень сейсмических событий. Готовность через двое суток;

– окончательный полный бюллетень с идентифицированной природой сейсмических событий (землетрясения, взрывы и т.д.); готовность 2-3 месяца от реального времени событий. Данные представляются на веб-сайт центра www.kndc.kz [1].

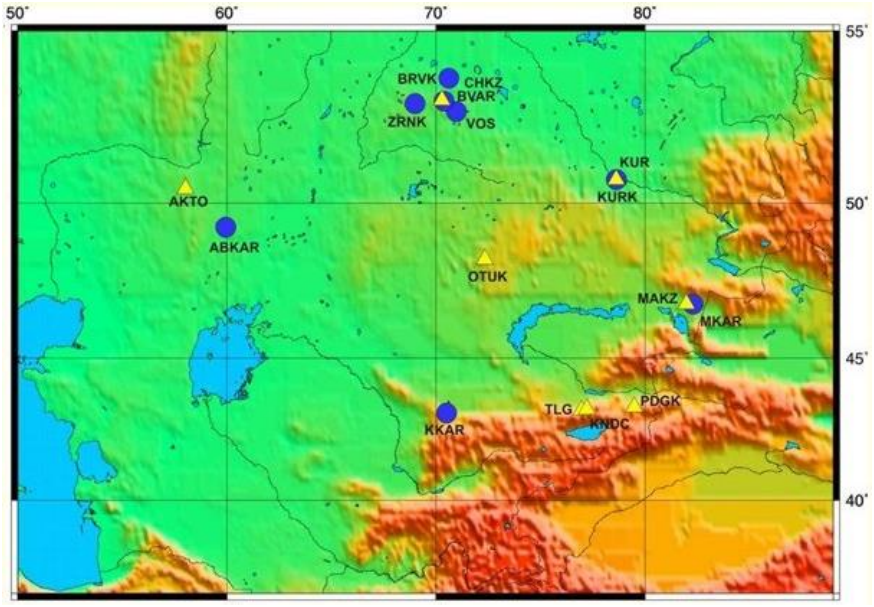
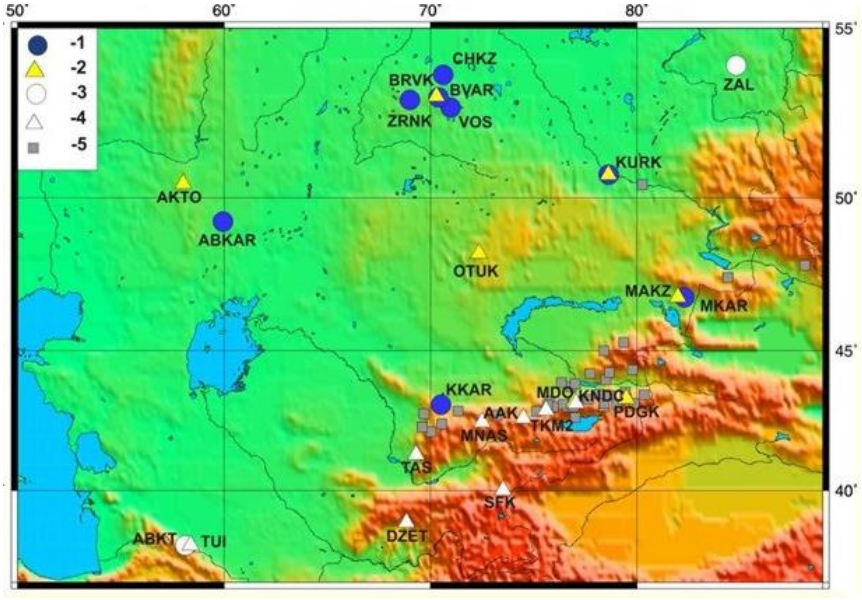


Рисунок 1. Карта расположения сети сейсмических станций ИГИ



● – сейсмические группы ИГИ, △ – трехкомпонентные станции ИГИ и других стран,
■ – трехкомпонентные станции СОМЭ РК

Рисунок 2. Карта расположения сейсмических станций, данные которых используются при составлении бюллетеня ИГИ

Временной диапазон от первого обнаружения сигнала события до составления сводного бюллетеня событий составляет от 10 минут до 2 суток. Распознавание природы событий производится спустя месяцы после регистрации и требует использования различных специальных методик, а также привлечения независимых данных от компаний- разработчиков полезных ископаемых.

Самым первым результатом обнаружения и локализации событий является автоматическая обработка. Для различных событий результат автоматической обработки готов через 10 – 30 минут со времени возникновения события в зависимости от дальности расположения очага от станций регистрации. Обнаружение и локализация в автоматическом режиме происходит по данным четырех сейсмических групп. Эти данные незамедлительно передаются в EMSC [2], где «смешиваются» с другими автоматическими обнаружениями. Затем они уточняются аналитиком при интерактивной срочной обработке. Автоматический бюллетень дает сигнал о происшедшем событии и в первом приближении оценивает, где оно произошло.

Проведено сравнение данных автоматической и интерактивной обработки. За «истинные» координаты эпицентра события принимались данные окончательного сводного бюллетеня. Были созданы выборки для более, чем ста событий, по трем видам бюллетеней разной оперативности. Изучены значения $\delta_1 = (\varphi,\lambda)_{\text{авт}} - (\varphi,\lambda)_{\text{св}}$ и $\delta_2 = (\varphi,\lambda)_{\text{инт}} - (\varphi,\lambda)_{\text{св}}$ – ошибок автоматического (авт) и интерактивного срочного бюллетеня (инт) по отношению к сводному (св). На рисунке 3 показаны графики интегральных распределений δ_1 и δ_2.

Как следует из рисунка 3, этап интерактивной оперативной обработки представляет значительно более точные данные о положении эпицентра, чем автоматический бюллетень. Медиана распределений ошибок составляет почти 80 км для автоматического и 5 км для интерактивного бюллетеня. Эти значения сильно зависят от магнитуды произошедшего события. Более сильное событие регистрируется, как правило, большим количеством станций, что дает возможность более надежной оценки всех параметров.

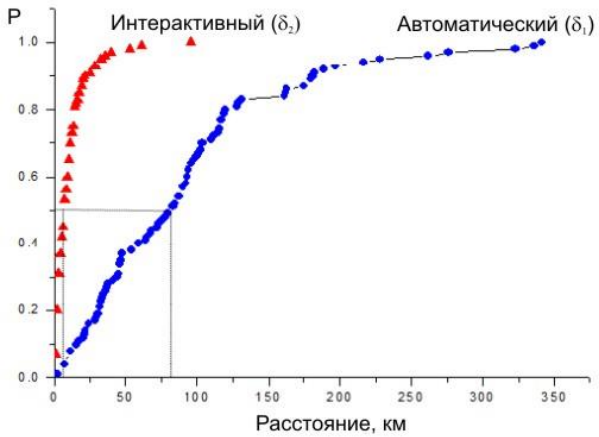


Рисунок 3. Распределение значений ошибок автоматического δ_1 и интерактивного δ_2 бюллетеней KNDC

На рисунке 4 представлена связь значений δ_1 и δ_2 с магнитудой mb произошедших событий. Для автоматического бюллетеня большинство событий с магнитудой более 5,5 имеют ошибку не более 50 км. Для интерактивного бюллетеня при магниту-

дах более 5,0 ошибка не превышает 15 км, а mb более 6,0 – не более 5 км. Таким образом, менее оперативный, чем автоматический, интерактивный бюллетень срочных донесений и интерактивный оперативный бюллетень имеют значительно более высокую точность определения параметров очага, которым можно надежно доверять.

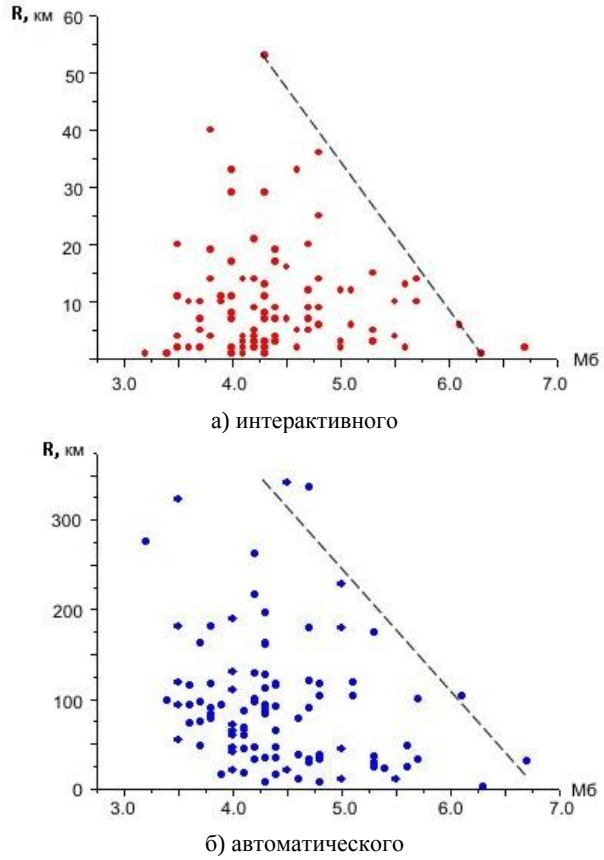


Рисунок 4. Связь значений ошибок бюллетеней с магнитудой событий

Следует отметить, что ошибка в определении координат событий зависит от места, где произошло событие. Например, наиболее плохо определяются события со стороны Алтая, а также в районе Илийской впадины на Северном Тянь-Шане (рисунок 5).

На рисунке 6 представлено общее количество сейсмических событий по данным KNDC с 2004 по 2014 г. Ежегодно регистрируется и обрабатывается от десяти до 20 тысяч событий. Видно, что общее количество событий варьируется год от года, что связано как с изменением количества станций регистрации, так и в большей степени с меняющимся сейсмическим режимом на изучаемой территории.

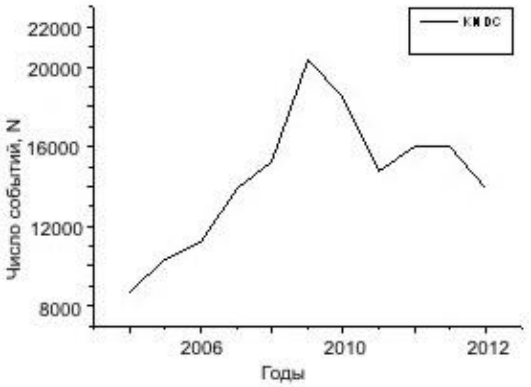


Рисунок 6. Количество зарегистрированных и обработанных событий с 2004 по 2014 гг.

На рисунке 7 показано изменение количества используемых для обработки данных станций в разные годы.

Уменьшение количества станций в последние годы связано с остановкой работы большебазовой группы Боровое с ее подгруппами Зеренда, Восточное, Чкалово, частичным закрытием станций проекта CAREMON в Центральной Азии.

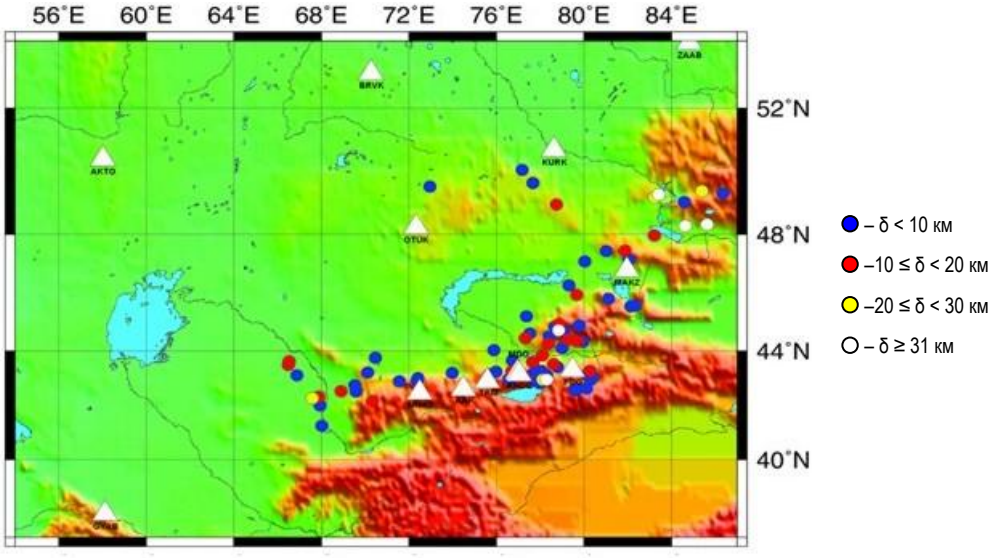


Рисунок 5. Карта эпицентров с указанием ошибок интерактивной срочной обработки

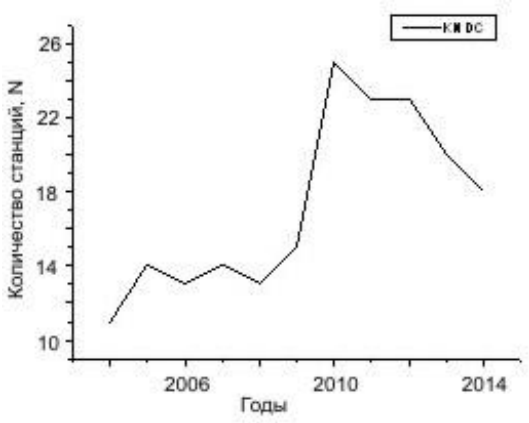


Рисунок 7. Количество используемых станций с 2004 по 2014 гг.

На рисунках 8 и 9 представлены карты эпицентров всех обработанных сейсмических событий. Первая карта (рисунок 5) дает представление о расположении эпицентров наиболее сильных землетрясений с энергетическим классом более 11 (магнитуда примерно более 5) за 11 лет. На второй карте представлены все события, включая слабые, за один наиболее активный год – 2009 г. Даже сравнивая эти две карты, видно, что большая часть Казахстана – западная, центральная, северная – характеризуются почти полным отсутствием сильных землетрясений, в то время как слабые сейсмические события даже за один год составляют несколько тысяч. Эти события не являются тектоническими, а почти полностью представлены карьерными взрывами, производящимися при разработке полезных ископаемых.

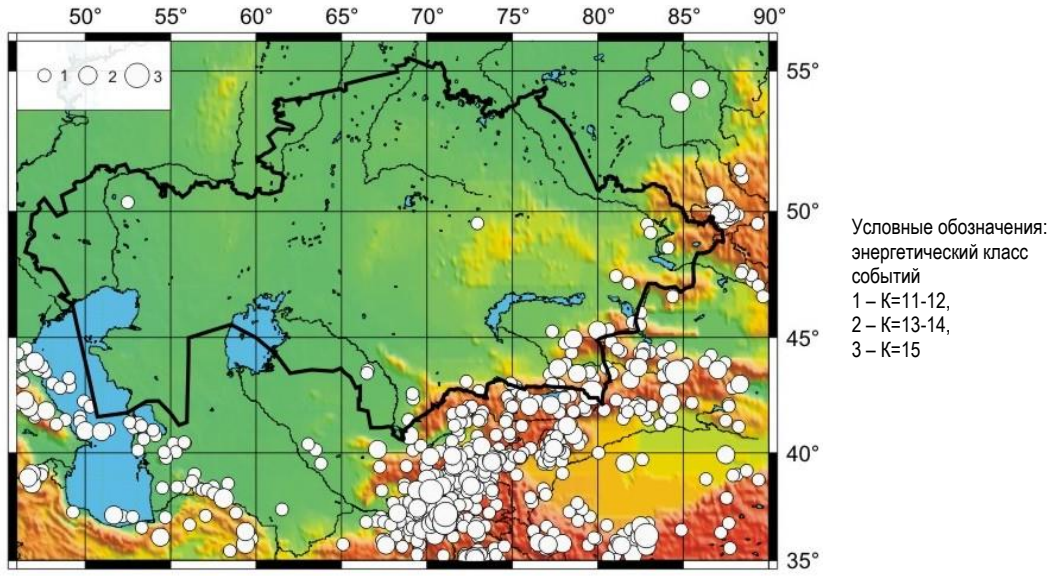


Рисунок 8. Карта расположения эпицентров сильных сейсмических событий с 2004 по 2014 года с К больше 11

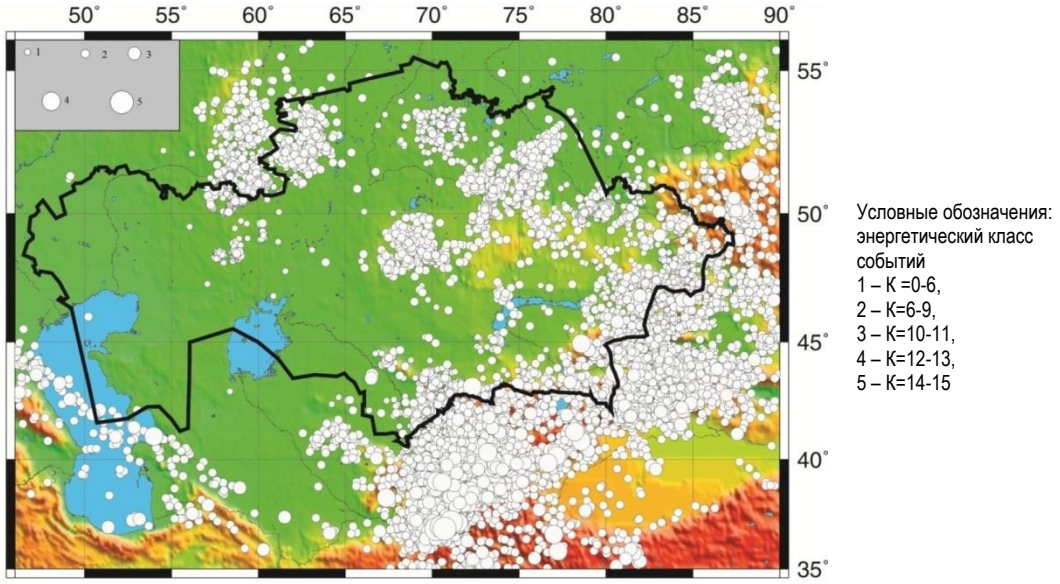


Рисунок 9. Карта расположения эпицентров сейсмических событий 2009 года

Регистрация землетрясений и карьерных взрывов

После проведения работ по распознаванию природы событий в сводный бюллетень вводятся метки, идентифицирующие тип источника. Самыми многочисленными являются тектонические землетрясения и карьерные взрывы. В класс землетрясений входят также нетектонические события – это ледниковые землетрясения [3], техногенные землетрясения, связанные с разработкой полезных ископаемых. На рисунке 10 представлен график общего количества тектонических землетрясений и взрывов в сводном бюллетене по годам.

Как видно из графиков рисунка 10, количество взрывов на всей исследуемой территории может достигать половины количества землетрясений. При этом в некоторых районах Казахстана взрывы составляют почти 100%. На рисунках 11 и 12 показаны карты эпицентров и распределение по магнитудам отдельно для землетрясений и отдельно для взрывов.

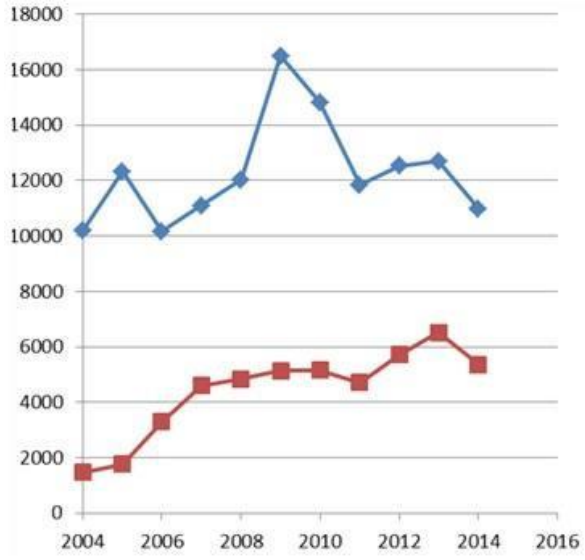
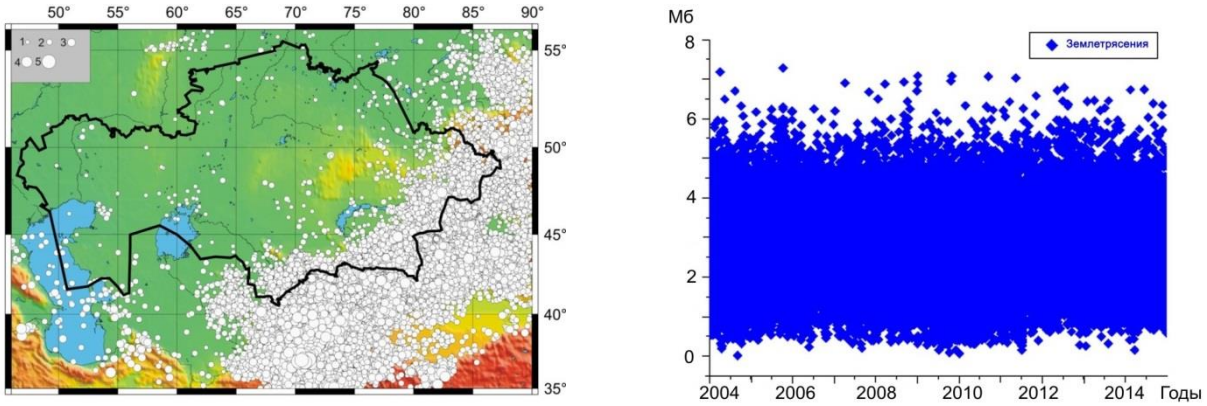
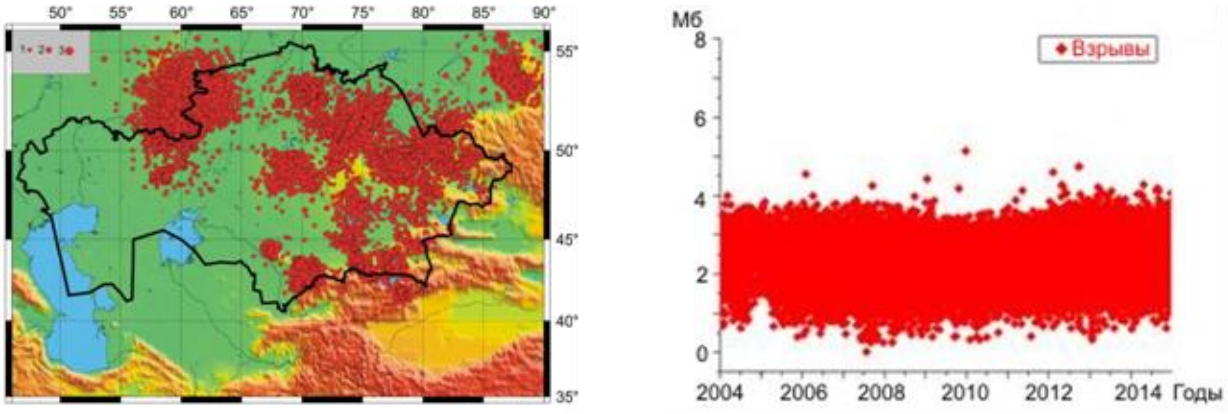


Рисунок 10. Изменение количества землетрясений (синяя линия) и взрывов (красная линия) за 2004 – 2014 гг.



а) б)

Рисунок 11. Карта эпицентров землетрясений (а) и распределение землетрясений по магнитудам (б) за 2004 – 2014 г.г. Всего 135 126 событий



а) б)

Рисунок 12. Карта эпицентров карьерных взрывов (а) и распределение взрывов по магнитудам (б). Всего 48 573 взрыва

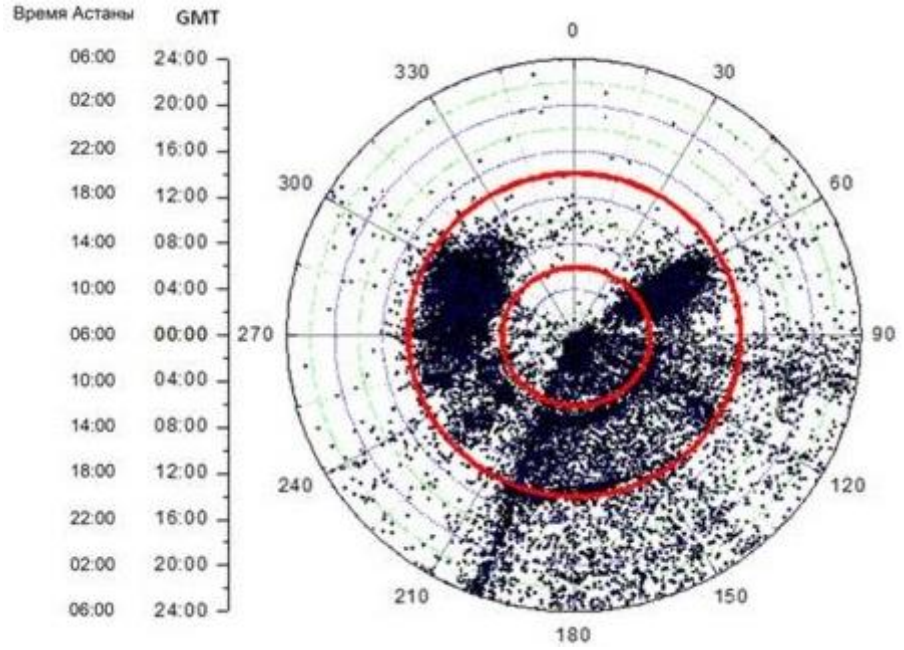


Рисунок 13. Азимутальная диаграмма распределения времени возникновения событий (по станции Курчатов). Красными окружностями выделено рабочее время суток

Взрывы по диапазону магнитуд занимают более узкую полосу. Их энергия соответствует примерно 2,5 порядка энергии – от магнитуды примерно1 до 3,5. Самый сильный взрыв за это время имел магнитуду 5,1. Это взрыв при сооружении плотины Камбар-Ата в Кыргызстане в 2009 г. Пространственно взрывы занимают значительную площадь в той части Казахстана, которая считается слабоактивной. Землетрясения имеют диапазон магнитуд от 0,5 до 7-8. Получается, что все взрывы попадают полностью в тот диапазон магнитуд, который занимают и землетрясения. Но только землетрясения могут иметь магнитуды более 5.5.

По каждой станции сети можно изучить расположение карьеров взрывов для их последующего отдельного рассмотрения от тектонических событий. Для этого построены азимутальные диаграммы времен происхождения событий. Как правило, взрывы происходят только в рабочее время и приурочены к вполне определенной полосе времен. На рисунке 13 представлена азимутальная диаграмма времен для всех зарегистрированных событий по станции Курчатов.

Хорошо видно, что для определенных интервалов азимутов события происходят только в рабочее время суток. Так, например, в азимуте 60-70 градусов большинство событий относится к карьерным взрывам Кузбасса. В азимутах 255 – 330 градусов находятся взрывы карьера Экибастуз. Ряд карьеров расположен от Курчатова в азимутах 230 и 250 градусов. При этом землетрясения занимают в определенных азимутах практически все время суток. Это четко видно по такому высоко сейсмоактивному району, как Памир-Гиндукуш, расположенному в азимуте 200 градусов. В азимуте 100 градусов расположены сейсмоактивные районы Алтая.

В определенных азимутах имеются как районы с тектоническими землетрясениями, так и карьерные взрывы. Например, в азимуте 120 градусов расположены очаговые области землетрясений Синь-Цзяна и карьеры добычи полезных ископаемых.

Точное распознавание природы событий производится с привлечением спектральных, корреляционных методов, а также независимой информации об активных карьерах добычи полезных ископаемых [4].

РЕГИСТРАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Для контроля проведения ядерных испытаний в связи с выполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний мировым сообществом за последние менее чем 20 лет создана Международная система мониторинга (МСМ) с Международным центром данных (МЦД) в Вене. В состав МСМ входят станции, расположенные на территории 90 стран мира. В том числе 5 объектов этой глобальной системы расположены на территории Казахстана. Все станции несут круглосуточную непрерывную службу по регистрации и передаче данных в МЦД, где данные казахстанских станций обрабатываются совместно с данными других станций системы. Казахстанский Центр данных, созданный в 1999г., зарегистрировал за время своей работы три ядерных испытания, проведенных Северной Кореей в 2006, 2009 и 2013 гг. [5]. Но надежность обнаружения сигналов, точность обработки, оперативность передачи информации при этих событиях были различными.

Сейсмические волны от места взрыва до самой далекой от него станции Казахстана распространяются примерно 9 минут. Далее информация по спутниковым каналам поступает в г. Алматы, где накапливается, визуализируется и обрабатывается в автоматическом и интерактивном режимах. Объективно в течение первых 10 минут невозможно оценить ситуацию по источнику и природе события. Но, имея опыт регистрации первых двух взрывов, имея эталонные записи взрывов из района Северной Кореи удалось при обработке третьего взрыва уже через 7 минут передать первую информацию о факте происшедшего сейсмического события на территории Северной Кореи, через 10 минут было опубликовано первое сообщение о сейсмическом событии в Северной Корее на веб-сайте Центра данных. Через 30 минут информация о параметрах взрыва - время в источнике, координаты, магнитуда - передана в вышестоящие организации. Но самое важное, что казахстанские станции весь объем необходимой информации передали в Международный центр данных СТВТО, так как там совместно используются данные станций разных стран, обеспечивающих хорошее окружение источника и, тем самым, высокую точность и достоверность оценок. Станции Казахстана являются одними из лучших по количеству обнаруживаемых и ассоциируемых сейсмических событий в международной системе мониторинга.

Как видно из рисунка 14, станции Казахстана расположены в узком створе азимутов относительно места взрыва. Диапазон азимутов составляет всего 13 градусов. При этом эпицентральные расстояния достаточно велики: от 3700км до 5300км. Практически во всех центрах были использованы казахстанские данные. На рисунке 15 приведен пример записи (а) и локализации (б) третьего северо-корейского взрыва в 2013 году.

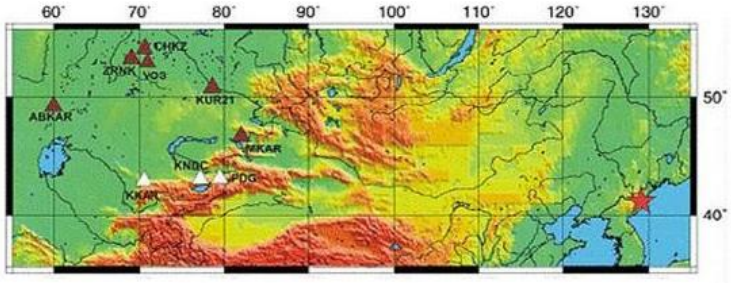
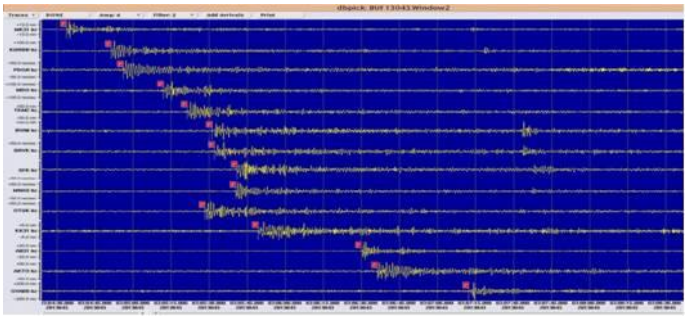
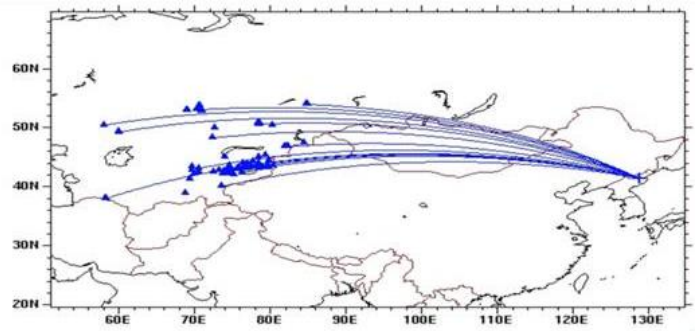


Рисунок 14. Взаимное расположение станций сети НЯЦ РК (треугольники) и эпицентра ядерного испытания в Северной Корее в 2006 г. (звездочка)



а)



б)

Рисунок 15. Записи казахстанских станций (а) и пример локализации (б) третьего северо-корейского взрыва в 2013 г.

Заключение

Центр данных KNDC проводит огромную работу по сейсмическому мониторингу событий разной природы. Данные KNDC успешно используются мировым сообществом при мониторинге ядерных взрывов и землетрясений благодаря налаженному обмену информацией в круглосуточном непрерывном режиме. За последние годы в центре обеспечено оперативное представление информации на веб-сайт www.kndc.kz.

Систематически проводятся работы по распознаванию природы источников, формированию баз данных тектонических и нетектонических событий. Эти данные являются основой всех научных исследований сейсмологической направленности и активно используются учеными мира в своих работах. Об этом свидетельствует количество обращений к данным KNDC в мировых центрах данных.

Важная составляющая деятельности KNDC – это предоставление его данных в Институт сейсмологии РК и СОМЭ МОН РК на постоянной основе. Для Казахстана данные KNDC постоянно используются при проведении работ по прогнозу землетрясений, для составления карт общего сейсмического зонирования территории, а также для новой карты сейсмического микрорайонирования г. Алматы. KNDC является участником этих многолетних совместных проектов, главная цель которых – снижение сейсмического риска и уменьшение ущерба от будущих сильных землетрясений.

Литература

1. Электронный ресурс – Режим доступа: www.kndc.kz.
2. Электронный ресурс – Режим доступа: http://www.emsc-csem.org
3. Михайлова, Н.Н. Комаров И.И. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня /Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2009. - Вып. 3. – С. 120-126.
4. Великанов, А.Е. Изучение источников промышленных взрывов на территории Казахстана // А.Е. Великанов [и др] / Вестник НЯЦ РК. - 2013. - Вып. 2. С. 77-86.
5. Сейнасинов, Н.А. Михайлова Н.Н. Сопоставление записей трех северо-корейских ядерных испытаний по данным казахстанских станций / Н.А. Сейнасинов // Вестник НЯЦ РК, 2014. - Вып. 1. – С. 117-124.

KNDC СЕЙСМИКАЛЫҚ БЮЛЛЕТЕНДЕРІНДЕ ТЕКТОНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕКТОНИКАЛЫҚ ЕМЕС ОҚИҒАЛАР

Узбеков Р.Б., Рябенко О.В., Сейнасинов Н.А.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Геофизикалық зерттеулер институтының Қазақстандық ұлттық деректер орталығы (KNDC), 2002 жылдан бастап, Орталық Азия аумағында әр тегіндегі сейсмикалық оқиғалардың мониторингісін жүргізеді. Мақалада, жеделдіктің әр деңгейіндегі KNDC бюллетендерінің сипаттамалары, көздер тегін тану, тектоникалық және тектоникалық емес оқиғалардың деректер базасын қалыптастыру бойынша Орталықтың жұмысының сипаттамасы келтіріледі.

TECTONIC AND INDUCED EVENTS IN SEISMIC BULLETINS OF KNDC

R.B. Uzbekov, O.V. Ryabenko, N.A. Seynasinov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The Kazakhstan National Data Centre (KNDC) of the Institute of Geophysical Researches has been monitoring seismic events of different nature on the territory of Central Asia since 2002. The work shows the characteristics of KNDC bulletins of different urgency level, describes the Centre works on discriminating of the source nature, forming of a database of tectonic and induced events.

УДК 521.1

МАССАСЫ АЙНЫМАЛЫ ШЕКТЕЛГЕН ҮШ ДЕНЕ МӘСЕЛЕСІНІҢ СЕРІКТІК ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ОРТОГОНАЛЬДІ ОРБИТАЛАРДЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

[1, 2)] Минглибаев М.Ж., [1)] Бекетауов Б.А.

[1)] Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан
[2)] В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы, Қазақстан
E-mail: Beketauov_Baglan@mail.ru

Бұл жұмыста, массасы айнымалы центрлік дененің гравитациялық тартылыс өрісіндегі серіктің қозғалысы массасы айнымалы сыртқы дененің әсерінен ұйытқуын зерттейміз. Осы мәселені зерттеу нәтижесінде ерекше маңызды қозғалыс – серіктің үшінші ұйтқытушы дененің әсерінен центрдегі денеге шектеулі уақыт ішінде құлайтын шарттары анықталынды, ал кей жағдайда құламайтын жағдайы да кездеседі. Табылған шешімдердің ішінен серік орбитасының жазықтық орбитаға көлбеулігі ортогональ бұрышпен орналасқан жағдайын қарастырамыз. Дербес жағдайда, аса қызықты Лидовтың «Айдың жерге құлауы» деген жағдайға келеді. Дербес жағдайда денелердің массасы тұрақты болған кезде уақыттың белгілі бір мезетіне байланысты ұйтқушы дененің әсерінен серік центрлік денеге құлайды. Ал денелердің массалары айнымалы болғанда кейбір жағдайында есептің бұндай қасиеті бұзылады.

Тірек сөздер: *шектелген үш дене мәселесі, айнымалы масса, ғасырлық ұйтқу, ерекше шешім, квазишеңбер орбита.*

КІРІСПЕ

Ғарыштану барысында Жердің жасанды серіктерінің практикалық маңызы бар теорияларын дамытуға космонавтика саласы өте күшті ықпал етті.

Жер серіктерінің динамикалық эволюциясын зерттеу барысында, М.Л. Лидов стационар шектеулі үш дене мәселесін пайдаланып, 1961 – ші жылы ерекше нәтижелер алды және мәселені толық зерттеді [1, 2]. Бұл мәселе массалары айнымалы шектелген үш дене үшін де өте қызықты нәтижелер береді.

Квазиконустық қима бойындағы апериодикалық қозғалысты пайдаланып, шектелген бейстационар массалары айнымалы үш дене мәселесінің ұйтқыған қозғалыс теңдеулерінен зерттеуге қажетті негізгі теңдеулері мына түрде болады [3]:

$$\frac{de}{d\tau} = 10\sqrt{1-e^2}\cdot \sin^2 i \sin 2\omega , \qquad (1)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{2}{\sqrt{1-e^2}}\Big[5\cos^2 i - 5 + 5e^2 + \\ + 5\cos 2\omega(\sin^2 i - e^2) + 4(1-e^2)N\Big] , \qquad (2)$$

Аудан интегралын қарастырайық, ол белгілі интегралмен сипатталады:

$$\left(1-e^2\right)\cos^2 i = c_1 = const = \left(1-e_0^2\right)\cos^2 i_0 , \qquad (3)$$

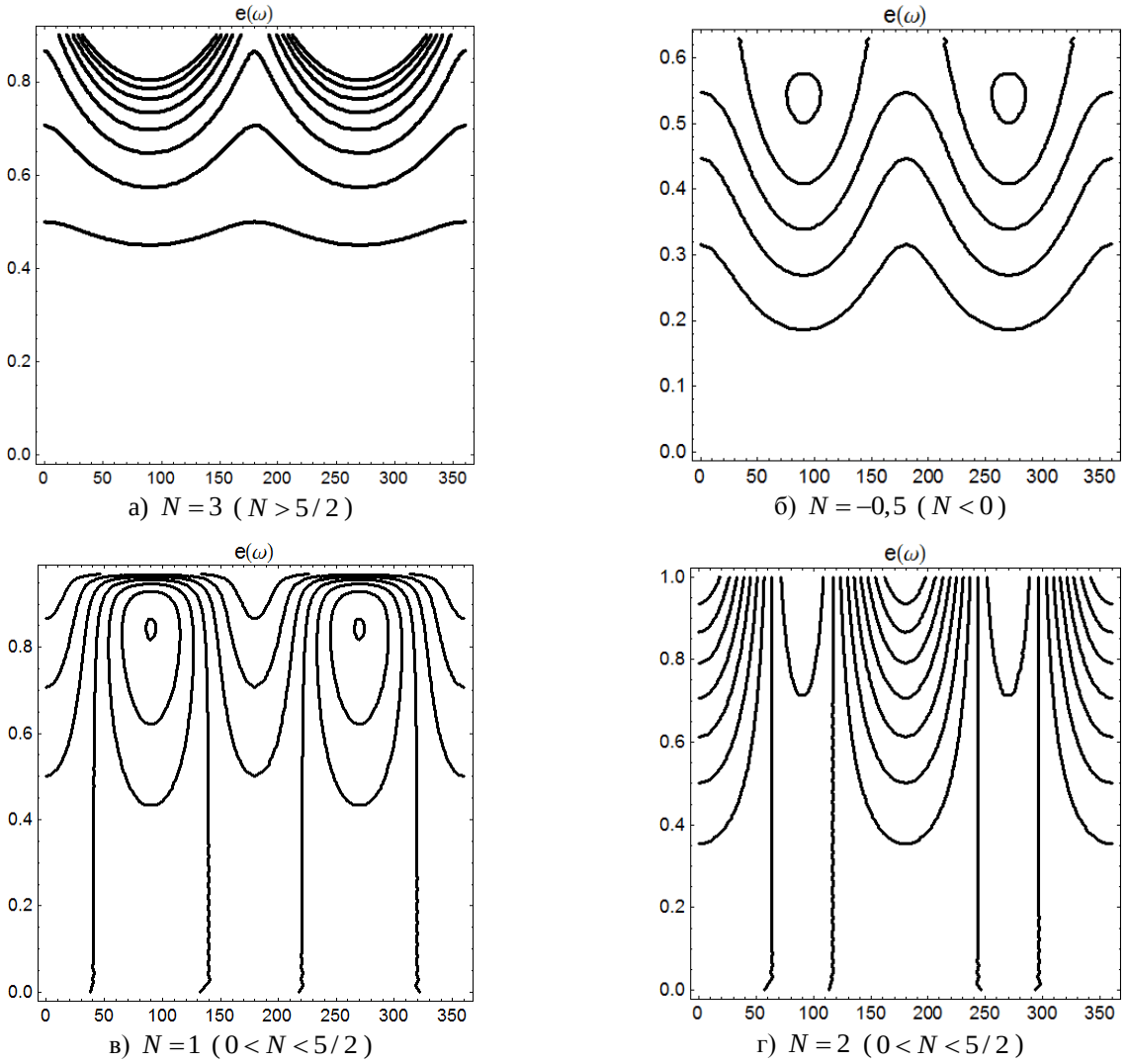
мұндағы c_1 тұрақтысы серік орбитасының e_0, $\cos i_0$ элементтерінің бастапқы мәндерімен анықталады. Бұл (3) интегралдан басқа келесі интеграл бар:

$$e^2\left(\frac{2}{5}N - \sin^2\omega \sin^2 i\right) = c_2 = \\ = e_0^2\left(\frac{2}{5}N - \sin^2\omega_0 \sin^2 i_0\right) = const \qquad (4)$$

мұндағы ω серік орбитасының перицентрін, ал i көлбеулікті анықтайды, сонымен қатар центрлік және сыртқы ұйтқытушы дененің массаларының өзгеруінен туындайтын N параметрі бар. N параметрі мәселеде өте маңызды рөл атқарады. Олай дейтін себебіміз $N=1$ жағдайы [1, 2, 3] қарастырылған, ал N -нің басқа мәнінде физикалық тұрғыдан қызықты жаңа шешімдер алынды. Сонымен $N=1$ болған кезде қарастырған мәселенің дербес жағдай болып табылады. Массаның өзгеру заңдылықтары [3, 4] мен (3) және (4) өрнектегі параметрлерімен жұптастырсақ бірнеше шешімдер аламыз.

Енді N -нің кез келген мәнінде табылған шешімнің фазалық кескінін сипаттайық.

Демек ортогональдық орбита кезінде, яғни $i(\tau) = const = \frac{\pi}{2}$, онда (3) және (4) теңдеуден $c_1 = 0$, $c_2 = e_0^2\left(2N/5 - \sin^2\omega_0\right)$ екені шығады. Алдымен $N \neq 0$ және $N \neq \frac{5}{2}$ қарастырайық. Бұл жағдайда N параметрінің мәндерін $N > 5/2$, $N < 0$ және $0 < N < 5/2$ деп алатын болсақ, онда (3) және (4) өрнектерді ескере отырып келесі $e(\omega)$ жазықтығына қатысты фазалық траекториялардың төменде берілген 1-суреттегі а),б),в) және г) жағдайларынан байқауға болады.



а) $N=3$ $(N>5/2)$ б) $N=-0{,}5$ $(N<0)$

в) $N=1$ $(0<N<5/2)$ г) $N=2$ $(0<N<5/2)$

1-сурет. $e(\omega)$ *жазықтығыдағы фазалық траекториялардың кескіні*

1-суреттен байқағанымыздай, егер серік орбитасы ортогональ $i=\dfrac{\pi}{2}$ болғанда эксцентриситет $e\to 1$ ұмтылатынын байқаймыз. Демек бұл серіктің центрлік денеге құлауын сипаттайды. Ал $N=0$ және $N=\dfrac{5}{2}$ мәнінде кейбір жағдайында бұл заңдылық бұзылады екен, яғни массалары өзгермелі центрлік және серікке әсер етуші сыртқы үшінші дененің серік центрлік денеге құламай орнықтылығын сақтап қалады екен [4]. Табылған бұл шешім жаңа болып табылады. Олай болса, осы айтылған $N=0$ және $N=\dfrac{5}{2}$ жағдайларындағы ерекше шеімдерге тоқталайық.

I-ЖАҒДАЙ

Ортогоналдық орбитаның $\left(i=\dfrac{\pi}{2}\right)$ – массаның өзгеруін сипаттайтын параметр $N=0$ болғанын қарастырайық.

Егер $N=0$ болса, онда (3)-(4) теңдеуден $0\le e\le 1-c_1$, $0\le c_1\le 1$, $c_2=-e^2\sin^2\omega\le 0$ шарттарына сәйкес c_1 және c_2 тұрақтысының арасындағы байланысы келесідей болады:

$$c_1\le\left(1-\sqrt{-c_2}\right)^2 \qquad (6)$$

Бұл (5) өрнектен c_2-нің интервалын табуға болады, демек $\sin^2 i=1\left(i=\dfrac{\pi}{2}\right)$ болса, онда (6) өрнектен $-1\le c_2\le 0$ екеніне көз жеткізуге болады.

Жоғарыдағы (2) дифференциалдық теңдеуіне $\sin^2\omega=\frac{1-\cos 2\omega}{2}$, $\sin^2\omega=-\frac{c_2}{2}$ немесе $\cos^2\omega=\frac{2+c_2}{2}$, түрлендірулерін және берілген шартты ескеріп, келесі өрнекті аламыз:

$$\frac{d\omega}{d\tau}=20\sqrt{1-e^2}\cdot\frac{(-c_2)}{e^2}. \quad (6)$$

Сәйкесінше (1) –теңдеуден e эксцентриситентті табайық

$$\frac{de}{d\tau}=40\sqrt{(-c_2)(1-e^2)(2+e^2)}\cdot\operatorname{sgn}(\sin 2\omega_0) \quad (7)$$

Бұл (7)-ші теңдеудің шешімі, келесідей болады:

$$e^2=-c_2+(1+c_2)\sin^2\left(\operatorname{sgn}(\sin 2\omega)\sqrt{(-c_2)}\cdot\tau+\phi_0\right) \quad (8)$$

мұндағы $\phi_0=\arcsin\sqrt{\frac{z_0-c_2}{1-c_2}}$

Ал (8) өрнекті ескеріп (6) теңдеудің шешімі мына түрде болады:

$$\begin{aligned}\omega=\omega_0+\frac{C_2}{4(1+C_2)}\cdot\\ \cdot\left(\tau+C_2\tau-\csc^2(10C_2\operatorname{sgn}(\sin(2\omega_0)))\cdot\right.\\ \cdot\ln\left(2C_2-\tau-C_2\tau+(1+C_2)\tau\cdot\right.\\ \left.\left.\cdot\cos(20C_2\operatorname{sgn}(\sin(2\omega_0)))-2\varphi_0\right)\right)\end{aligned} \quad (9)$$

c_2-нің $-1\le c_2\le 0$ болу шартынан, $c_2=0$ шеткі нүктесінде (1) теңдеуден келесі өрнекті аламыз:

$$e=e_0=const, \quad (10)$$

алынған бұл (10) теңдеу серіктің центрлік денеге құламайтынын сипаттайды.

Сәйкесінше (2) теңдеудің шешімі:

$$\omega=\omega_0=const. \quad (11)$$

II-ЖАҒДАЙ

Енді серіктің ортогоналдық орбита $\left(i=\frac{\pi}{2}\right)$ бойымен қозғалыс кезіндегі, массаның өзгеруін сипаттайтын параметр $N=\frac{5}{2}$ болғанын қарастырайық.

Бұл жағдайда (3) теңдеуден келесі өрнекті аламыз:

$$c_1=\left(1-e^2\right)\cos^2 i=0, \quad (12)$$

Сәйкесінше (4) теңдеуден

$$c_2=e^2\left(1-\sin^2\omega\right) \text{ немесе } c_2=e^2\cos^2\omega, \quad (13)$$

Алынған (12) және (13) теңдеулерден c_1 және c_2 келесі шарттарды аламыз:

$$c_1=0,\ 0\le c_2\le 1, \quad (14)$$

Осыларды ескере отырып жоғарыдағы (1) теңдеудің шешімі төмендегідей болады:

$$e^2=c_2+(1+c_2)\sin^2\left(20\operatorname{sgn}(2\omega_0)\sqrt{c_2}\cdot\tau-\phi_0\right). \quad (15)$$

мұндағы $\phi_0=\arcsin\sqrt{\frac{z_0-c_2}{1-c_2}}$.

Ал (2) теңдеудің шешімі мына түрде сипатталады:

$$\frac{d\omega}{d\tau}=20\sqrt{1-e^2}\cdot\frac{c_2}{e^2}. \quad (16)$$

Жоғарыдағы (14) шарттан $c_2=0$ мәнінде (1) теңдеудің шешімі:

$$e=e_0=const, \quad (17)$$

Онда (2) теңдеудің шешімі келесі түрде болады:

$$\omega=\omega_0=const. \quad (18)$$

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста массалары айнымалы шектелген үш дене мәселесінің серіктік жағдайындағы ортогональді орбитаның эволюциясы зерттелді. Мәселені шешу барысында Лагранждың ғасырлық ұйытқыған қозғалыс теңдеулерінің шешімі массалары өзгеру заңдылығын анықтайтын параметр – $N=0$ және $N=5/2$ критикалық мәніндегі ерекше шешімдері табылып, серіктің орбита көлбелугі $i=\frac{\pi}{2}$, яғни орбита ортогональ болғанда серіктің центрлік денеге құламайтын жаңа шешімдері алынды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Вашковьяк М.А. Эволюция орбит в ограниченной круговой двукратно осредненной задаче трех тел//Качественное исследование – 1981. – Т.19, – № 1. – С. 5-18.
2. Вашковьяк М.А. О научной деятельности профессора М.Л. Лидова и о развитии его работ по эволюции спутниковых орбит(к 80-летию со дня рождения).Дополнение в кн.: М.Л. Лидов Курс лекций по теоретической механике. – 2-е изд., – М.: ФизМатЛит, 2010. – 496с.
3. Prokopenya A.N., Minglibayev M., Beketauov B. On Integrability of Evolutionary Equations in the Restricted Three-Body Problem with Variable Masses// Computer Algebra in Scientific Computing/CASC2014, V.P. Gerdt, W.Koepf, W. Sieler, E.V. Vorozhtsov (Eds.), LNCS8660.–2014, pp.375-389.
4. Minglibayev M., Beketauov B. Secular perturbations in the three-body problem with variable masses.[8th] International Symposium on Classical and Celestial Mechanics (CCMECH'8). September 25 – 29, 2013, p. 36-37 Siedlce, Poland.

ЭВОЛЮЦИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ОРБИТ В СПУТНИКОВОМ СЛУЧАЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАДАЧИ ТРЕХ ТЕЛ С ПЕРЕМЕННЫМИ МАССАМИ

[1, 2)] Минглибаев М.Ж., [1)] Бекетауов Б.А.

[1)] КазНУ им. аль-Фараби, , Алматы, Қазахстан
[2)] Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Қазахстан

В этой работе рассмотрена эволюция ортогональных орбит в спутниковом случае ограниченной задачи трех тел, когда массы тел P_0 и P_1 меняются со временем в различных темпах изотропно, а их суммарная масса изменяется по объединенному закону Мещерского. Движение точки бесконечно малой массы P_2 относительно точки P_0 описывается в первом приближении в оскулирующих элементах апериодического квазиконического движения и учитывается влияние гравитации на точку этого движения. Долгопериодическая эволюция орбитальных элементов определяется дифференциальными уравнениями, записанные в приближении Хилла, которые осредняются средними аномалиями тел P_0 и P_1. В результате были получены новые особые решения, зависящие от параметра, определяющие закон изменения массы в критических значениях, то есть когда $N = 0$ и $N = \frac{5}{2}$. В частности, когда массы тел постоянные, этот случай интересен тем, что спутник падает на центральное тело из за возмущения третьего тела за конечный промежуток времени. В случае переменной массы такое свойство задачи в некоторых ситуациях нарушается.

Ключевые слова: *ограниченная задача трех тел, переменная масса, вековое возмущение, точные решения, квазиконические движение, квазикруговая орбита.*

EVOLUTION OF ORTHOGONAL ORBITS IN THE SATELLITE VERSION OF THE RESTRICTED THREE BODY PROBLEM WITH VARIABLE MASSES

[1, 2)] M.Zh. Minglibayev, [1)] B.A. Beketauov

[1)] Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Almaty, Kazakhstan
[2)] Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

In this work we consider the evolution of orthogonal orbits the satellite version of the restricted three-body problem when masses of the primary bodies P_0, P_1 vary isotropically with different rates, and their total mass changes according to the joint Meshcherskii law. Equations of motion of the body P_2 of infinitesimal mass are obtained in terms of the osculating elements of the aperiodic quasi-conical motion about the body P_0. Long-term evolution of the orbital elements is determined by the differential equations written in the Hill approximation and averaged over the mean anomalies of points P_1 and P_2. As a result, in the critical values, when $N = 0$ and $N = \frac{5}{2}$ we obtained a new special solution. In particular cases, when the body masses constant, this case is interesting because a finite time interval the satellite falls to the central body of the perturbations of the third body. In the case of variable mass is property of the problem, in some cases, broken.

Keywords: *restricted problem of three bodies, variable masses, aperiodic quasi-conical motion, secular perturbations.*

УДК: 621.039.531:669

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В РЕАКТОРНЫХ СТАЛЯХ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ И ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Максимкин О.П.

Институт ядерной физики РК, Алматы, Казахстан

Обобщены и проанализированы собственные и литературные данные, касающиеся бездиффузионных фазовых γ↔α-превращений, протекающих в аустенитных нержавеющих сталях – конструкционных материалах реакторов на быстрых нейтронах.

Указано на возможность образования α-фазы в результате облучения реакторных сталей высокоэнергетическими частицами. Установлено, что мартенситные превращения играют большую роль в формировании механических, магнитных и коррозионных свойств нержавеющих сталей.

Результаты проведенного изучения могут быть использованы при оценке работоспособности конструкционных материалов во время эксплуатации и длительного хранения отработавших тепловыделяющих сборок атомного реактора.

Введение

В последние годы у специалистов в области радиационного материаловедения возрос интерес к исследованию фазовых γ⇄α-превращений, протекающих в аустенитных нержавеющих реакторных сталях под влиянием внешних интенсивных воздействий (температура, деформация, облучение). Согласно [1] это связано с тем, что фазовые бездиффузионные превращения, обычно относящиеся к эффектам «второго порядка важности», после длительного срока эксплуатации атомных водо-водяных реакторов начинают играть определяющую роль в формировании коррозионных и физико-механических свойств реакторных материалов и поэтому из малозначимых эффектов они переходят в разряд «особоважных».

Настоящая работа посвящена исследованию бездиффузионных мартенситных превращений в конструкционных материалах для ядерно-энергетических установок, облученных высокоэнергетическими частицами.

Основная часть

Известно, что высоколегированные аустенитные нержавеющие стали и сплавы в соответствии с термодинамическими законами (рисунок 1) и диаграммой фазовых состояний (рисунок 2) в результате комплексного воздействия напряжений, деформаций, облучения и температуры проявляют метастабильность, демонстрируя целый ряд фазово-структурных превращений, кардинальным образом изменяющих их физико-механические и эксплуатационные характеристики [2-5].

На рисунке 1 T_0 – температура равновесия исходной аустенитной (γ) и мартенситной (α) фаз, $\Delta\sigma_{M_i}^{\gamma\to\alpha}$ – критическая величина химической движущей силы, необходимой для начала γ→α-превращения при охлаждении без нагрузки. Мартенситное превращение может начаться при температуре T_1, $M_н < T_1 < T_0$, если внешняя нагрузка облегчает образование критического зародыша, т.е. если она снижает на некоторую величину U требуемую химическую движущую силу $\Delta\sigma_{M_{ò1}}^{\gamma\to\alpha}$ $\Delta\sigma_{M_i}^{\gamma\to\alpha}$.

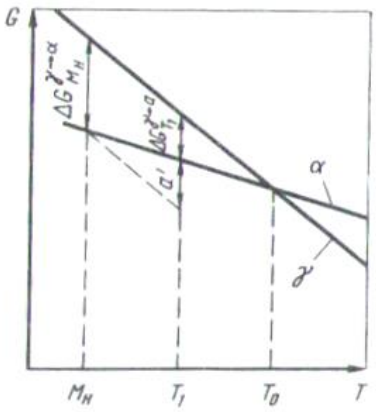


Рисунок 1. Изменение свободной энергии с температурой [3]

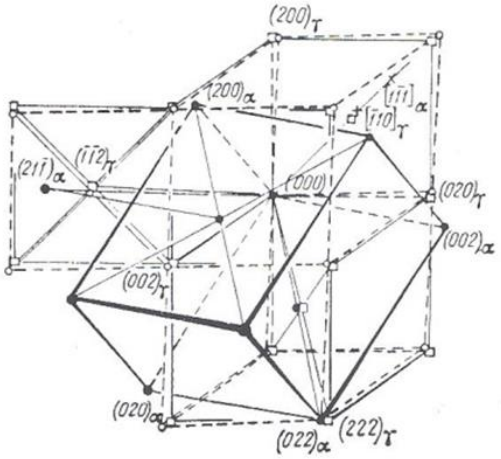
Одной из важнейших характеристик склонности аустенитной стали к структурно-фазовым превращениям является энергия дефекта упаковки ($\gamma_{ЭДУ}$) металлического материала, которая в значительной степени зависит от концентрации в растворе аустенита таких элементов, как C, N и Ni [6]. В общем случае принято считать, что ЭДУ нержавеющих аустенитных сталей возрастает с ростом содержания в них Ni и C, тогда как Cr, Mn, Si и N уменьшают ЭДУ. Попытки установить простые линейные соотношения между ЭДУ и концентрацией элементов в нержавеющих сталях привели, в частности, к следующим выражениям:

γ = −53 + 6,2%Ni + 0,7%Cr + 3,2%Mn + 9,3Mo [мДж/м^2] [7];

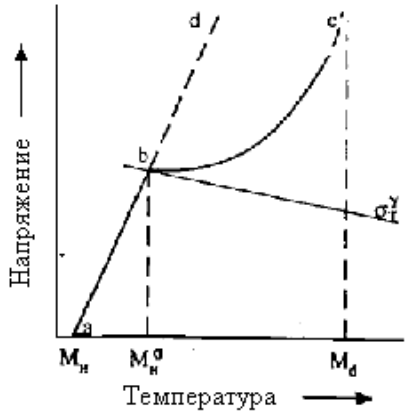
γ = 1,2 + 1,4%Ni + 0,6%Cr + 17,7%Mn −44,7Si [мДж/м^2] [8];

γ = 16,7 + 2,1%Ni − 0,9%Cr + 26%C [мДж/м^2] [9].

В результате мартенситного $\gamma\rightarrow\alpha'$-перехода исходная ГЦК-решетка аустенита (γ-твердый раствор) перестраивается в ОЦК-решетку мартенсита (α-фаза), что происходит бездиффузионно с сохранением стартового элементного состава аустенита и в соответствии с ориентационным соотношением Курдюмова-Закса $(111)_\gamma \parallel (011)_\alpha$, $[\bar{1}01]_\gamma \parallel [\bar{1}\,\bar{1}\,1]_\alpha$ (см. рисунок 2,а). Наиболее детально соотношение температуры начала мартенситного превращения, величины приложенного напряжения (σ) и температурной зависимости предела текучести стабильного аустенита ($\sigma_т$) иллюстрирует схема (см. рисунок 2,б). При температуре $M_н$ первые кристаллы мартенсита возникают без какого-либо воздействия внешней нагрузки. В температурном интервале $M_н<T<M_l^\sigma$ образование мартенситных кристаллов инициируется упругими напряжениями $\sigma<\sigma_т$. Получаемый в этих условиях α-мартенсит был назван «мартенситом напряжения». При $M_l^\sigma<T<M_д$ пластическая деформация аустенита предшествует появлению мартенсита, который был назван мартенситом деформации.



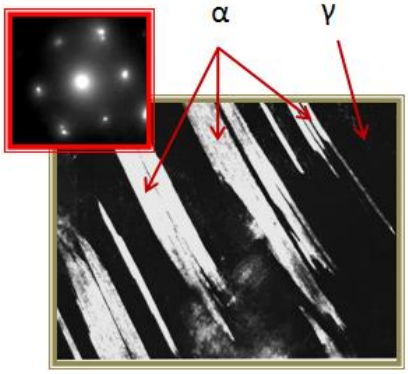
а)



б)

Рисунок 2. Фазовый $\gamma\rightarrow\alpha'$-переход под воздействием напряжений и температуры [4]

В процессе холодной деформации аустенитных сталей, характеризующихся низкой энергией дефектов упаковки, α'-мартенсит зарождается на пересечении расщепленных дислокаций и это происходит в температурном интервале $M_н – M_d$ (см. рисунок 3). Выше температуры $M_д$ вызвать мартенситное превращение путем пластической деформации аустенита не удается. Каждая нержавеющая сталь характеризуется своим значением температурного параметра M_d.



Мартенсит деформации



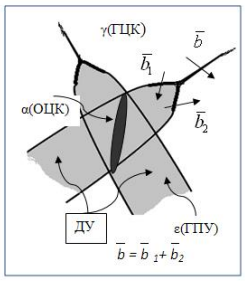


Рисунок 3. Зарождение мартенситной α'-фазы в процессе деформации на пересечении лент дефектов упаковки

В работе [10] предложена эмпирическая зависимость температуры M_d от содержания наиболее распространенных легирующих элементов для хромоникелевой стали типа 18-8:

$$M_d(°C) = 551 – 462(C+N) – 9{,}2Si – 8{,}1Mn – \\ – 13{,}7Cr – 29(Ni+Cu) – 18{,}5Mo – 68Nb$$

Нами установлено, что для стали 12Х18Н10Т температура M_d, выше которой α'-фаза при деформации не образуется, составляет 100°С как в необлученном, так и в облученном нейтронами состояниях, вплоть до флюенса $2\cdot10^{20}$ н/см^2. При энергетическом подходе к рассмотрению процессов образования α-фазы и разрушения метастабильных реакторных сталей нами было предложено новое определение M_d, как температуры, при которой энергия, необходимая для начала $\gamma\rightarrow\alpha$-перехода становится равной

механической энергии, которую надо сообщить материалу, чтобы он разрушился. Таким образом, при температурах деформации, больших, чем M_d, образец разрушается прежде, чем в нем успевает пройти γ→α-превращение (см. рисунок 4).

Наряду с этим нами установлено [11], что мартенситная α-фаза в облученных деформируемых метастабильных сталях, характеризующихся невысокими значениями ЭДУ, образуется лишь только после того, как на определенной стадии эволюции дефектной структуры начинает доминировать ячеистая дислокационная структура. Именно при пересечении стенок ячеек, состоящих из множества расщепленных дислокаций, содержащих ε-фазу (ГПУ), возрастает вероятность образования α-фазы (рисунок 5) по реакции γ→ε→α.

В общем случае при низкотемпературном статическом растяжении α′-мартенсит деформации образуется при некоторых критических значениях деформации $\delta_{кр}$, напряжений $\sigma_{кр}$ или плотности механической работы $A_{кр}^{\gamma\to\alpha}$, причем с ростом дозы нейтронного облучения величины $\delta_{кр}$ и $A_{кр}^{\gamma\to\alpha}$ уменьшаются, а $\sigma_{кр}$ остаются практически неизменными, что нашло свое отражение в полученных экспериментальных данных (см. рисунок 6 и таблицу 1).

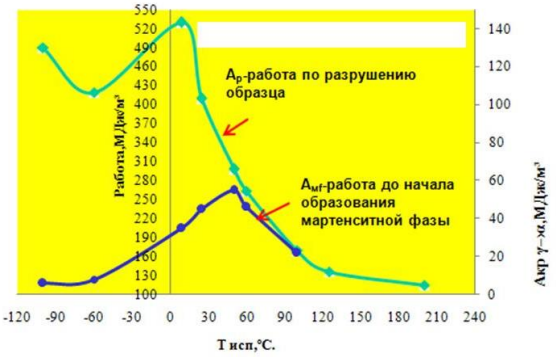


Рисунок 4. Температурные зависимости механической работы, необходимой для начала мартенситного γ→α-перехода и для разрушения необлученного образца стали 12Х18Н10Т при деформации

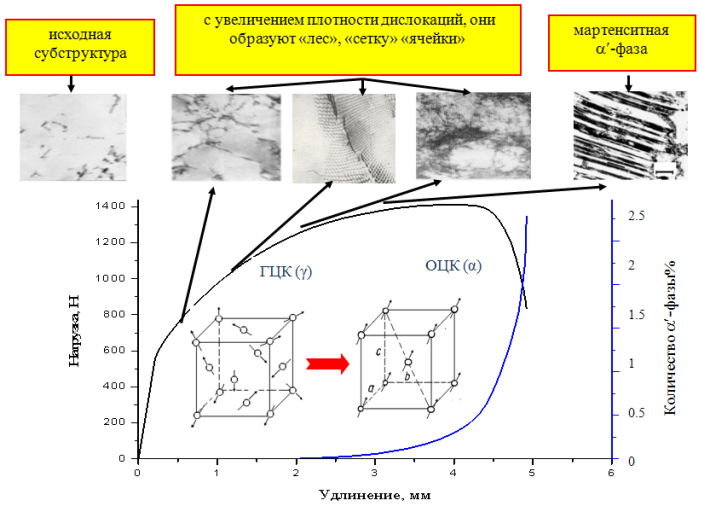


Рисунок 5. Эволюция дефектных структур и фазовое γ→α′-превращение в процессе деформации метастабильных нержавеющих сталей при низких температурах

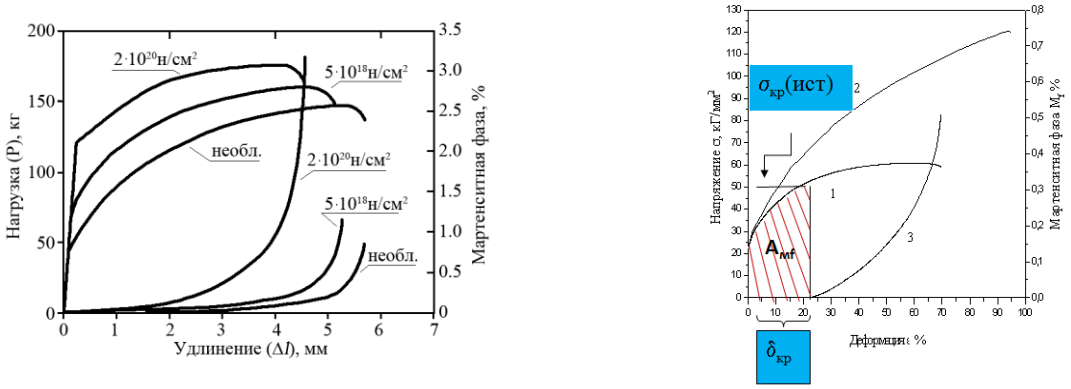


Рисунок 6. Образование и развитие мартенситной α′-фазы при деформации образцов стали 12Х18Н10Т, необлученных и облученных тепловыми нейтронами (ВВР-К)

Таблица 1. Критические параметры зарождения α′-фазы при растяжении необлученных и облученных нейтронами образцов стали 12Х18Н10Т ($T_{исп}$ = 20 °С, v = 0,1 мм/мин)

Номер образца	Флюенс, н/см^2	$\sigma_{кр}$ (ист), кГ/мм^2	$\delta_{кр}$, %	$A_{кр}^{\gamma\to\alpha}$, МДж/м^3
510	0	62	20,8	60
356	$2\cdot10^{18}$	62-63	10,2	55
369	$5\cdot10^{18}$	59	9,1	40
95	$2\cdot10^{20}$	61-65	4	30

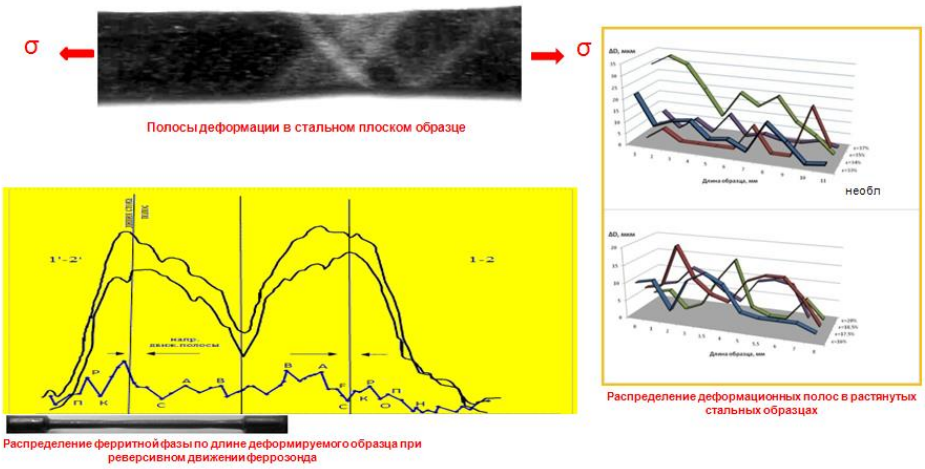


Рисунок 7. Полосы локализованной деформации в стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами

Образовавшись, α-фаза продолжает накапливаться в деформируемом образце и, как оказалось, во всех, произвольно выбранных для наблюдения, участках образца (кроме шейки), накопление $M_ф$ происходит одинаково, по одному и тому же степенному закону. Нами, для описания кинетики фазового γ→α′-превращения, индуцированного деформацией в облученных реакторных сталях, было выбрано простое уравнение Людвигсона–Бергера [12], учитывающее автокаталитичность мартенситного превращения:

$$\frac{M_ф}{1-M_ф} = A\varepsilon^B,$$

где параметр A характеризует склонность деформируемой стали к мартенситному превращению; B – показатель автокаталитичности. В результате установлено, что, экспериментально найденные значения величины B мало различаются для необлученных и облученных нейтронами ($2\cdot10^{20}$ н/см^2) образцов стали 12Х18Н10Т (B≈3,7) [13, 14]. Вероятно, это связано с тем, что нейтронное облучение влияет и, в основном, положительно, на процесс образования зародышей α-фазы, облегчая его за счет создаваемых дефектных мест. Но, в то же время, зародившись, мартенситная линза с трудом развивается в упрочненной дефектами облученной аустенитной матрице, что в итоге приводит к образованию большого количества мелких пластин α-фазы.

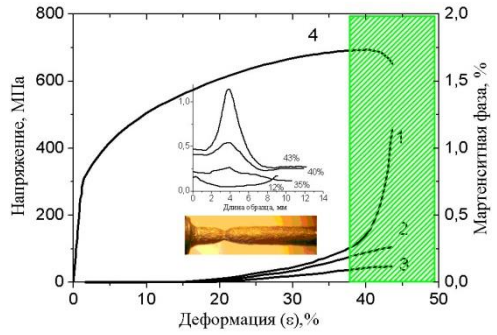
Показано, что развивающееся в деформируемом стальном образце мартенситное γ→α-превращение играет большую роль в процессах локализации пластической деформации. Образующаяся в результате бездиффузионного превращения α-фаза является более прочной, чем аустенитная, что индуцирует макроскопическую неоднородную локализованную деформацию в виде полос, согласованно и быстро перемещающихся по рабочей длине образца (рисунок 7), а затем трансформирующихся в шейку.

Установлено также, что на стадии предразрушения максимальное количество α′-феррофазы содержится в том сечении рабочей части образца, в котором произойдет разрушение. Таким образом, по кинетике выпадения α′-фазы для разных сечений образца возможно следить за процессом локализации и судить о скорости формоизменения. Факт возможности протекания γ→α′-превращения в метастабильных аустенитных нержавеющих сталях при деформации можно использовать для обнаружения ранних признаков и места зарождения шейки в деформируемом образце.

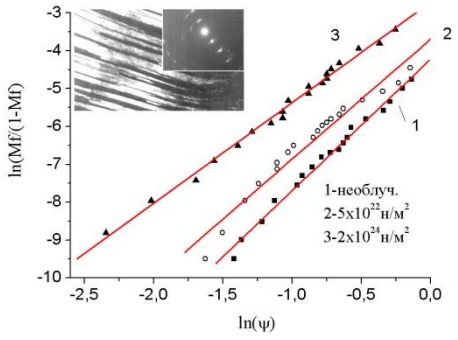
Из рисунка 8 следует, что с учетом локализации деформации кинетика накопления α′-мартенсита в шейке носит возрастающий характер, предсказываемый различными теориями. При этом значение параметра B для облученной нейтронами стали меньше, чем для необлученной. Таким образом, индуцированное деформацией мартенситное γ→α′ превращение может значительным образом влиять на ло-

кальную деформацию в нержавеющих реакторных сталях. Оценка скоростей перемещения полос в необлученном ($V_м$) и облученном ($V_{обл}$) нейтронами ($2\cdot10^{20}$ н/см^2) образцах стали 12Х18Н10Т, деформируемых при 20°С со скоростью 0,5 мм/мин, показали, что при деформациях $\varepsilon_{необл}$ = 33% и $\varepsilon_{обл}$ = 18% скорости полос в облученном образце выше, чем в необлученном и составляют $V_м$ = 6,5 мм/мин, $V_{обл}$ = 12,5 мм/мин. В отдельных случаях, например, при деформации (Т=20°С) высокооблученного (56 сна) образца стали 12Х18Н10Т мы наблюдали перемещение по образцу макроволны деформации, что приводило к достижению аномально высокой пластичности хрупкого после облучения материала [15-18].

При этом первоначально круглые маркеры, нанесенные краской на поверхность образца, эволюционировали в эллипсы, а на диаграмме растяжения фиксировалось плато с неизменным значением истинного напряжения течения (рисунок 9). Установлено, что в этом случае скорость «волны» составила ~0,04 мм/с при скорости перемещения подвижного захвата 0,008 мм/с.



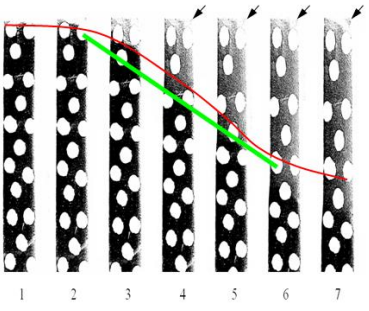
а)



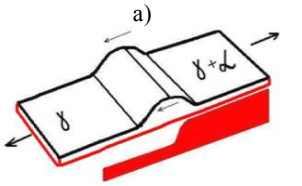
б)

(а) – диаграмма растяжения (4), кинетические кривые образования α′–фазы: 1 – в зоне локализации (M_f); 2, 3 – рядом с шейкой облученной стали до $5\cdot10^{22}$ н/м^2 (на вставке – распределение мартенситной фазы вдоль образца);
(б) – линеаризованные кривые α′–фазы в шейке (вставка – ПЭМ-изображение и электронограмма мартенситной α′-фазы)

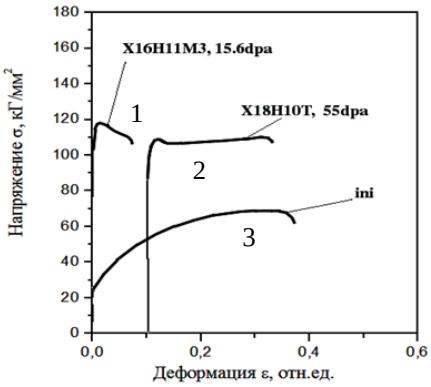
Рисунок 8. Кинетика образования и накопления α′–фазы, индуцированной деформацией в стали 12Х18Н10Т



а)



б)



в)

Рисунок 9. Волна деформации (а), ее схема (б) и инженерные диаграммы растяжения высокооблученных образцов хромоникелевых сталей (в) для случаев «без волны» (1, 3) и «с волной» (2)

Проведенные систематические исследования локализованной деформации обнаружили, что большую роль мартенситное γ→α-превращение играет при образовании и развитии стабильной шейки в деформируемом образце метастабильной аустенитной стали [19, 20, 21].

На основе анализа результатов многочисленных экспериментов, выполненных с целью исследования влияния дозы нейтронного облучения на механические и энергетические характеристики реакторных аустенитных сталей, нами было установлено, что после облучения до некоторого критического значения флюенса нейтронов Фt=$3\cdot10^{22}$ н/см^2, γ→α-переход в сталях, содержащих радиационные дефекты, может начаться самопроизвольно, без всякой дополнительной холодной деформации (рисунок 10).

Ранее мы неоднократно регистрировали, что образцы аустенитной нержавеющей стали, вырезанные с различных уровней стенок чехлов отработавших тепловыделяющих сборок атомного реактора БН-350, обнаруживали наличие в них α′-фазы (см. рисунок 11).

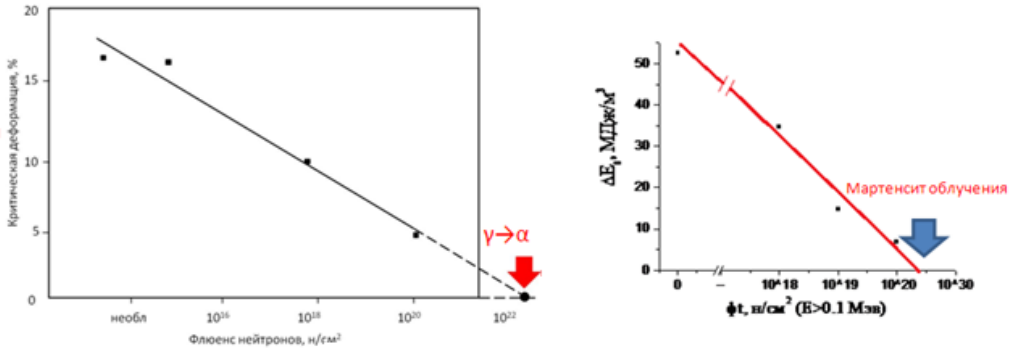
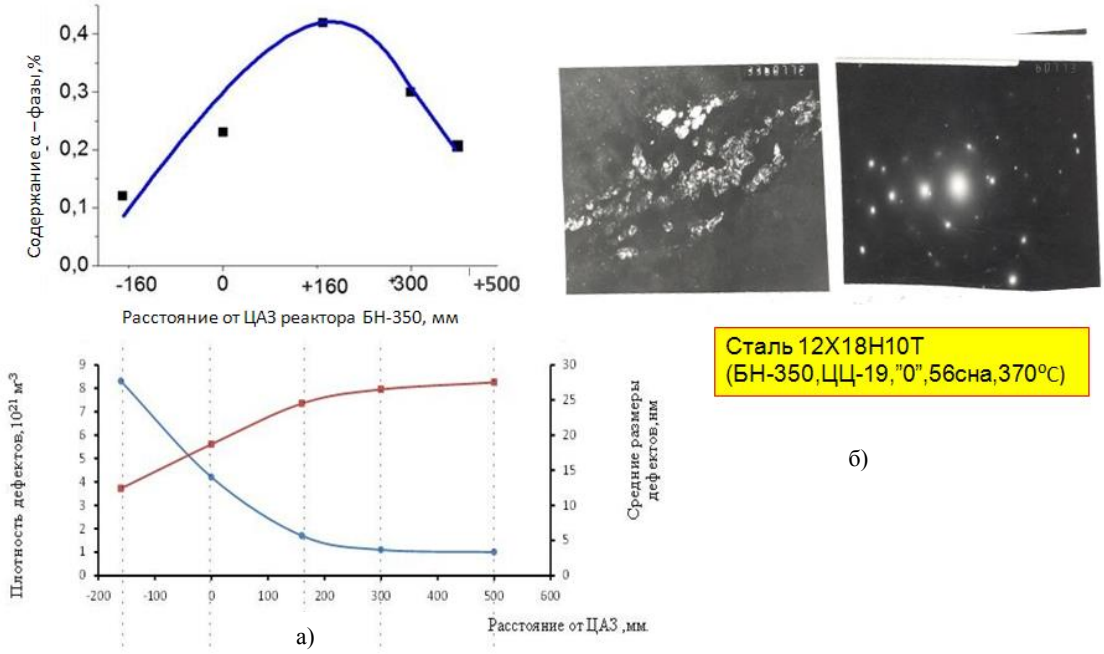


Рисунок 10. Зависимость критической деформации и плотности энергии, необходимой для γ→α′-перехода в стали 12Х18Н10Т от флюенса нейтронного облучения (Е>0,1 МэВ)



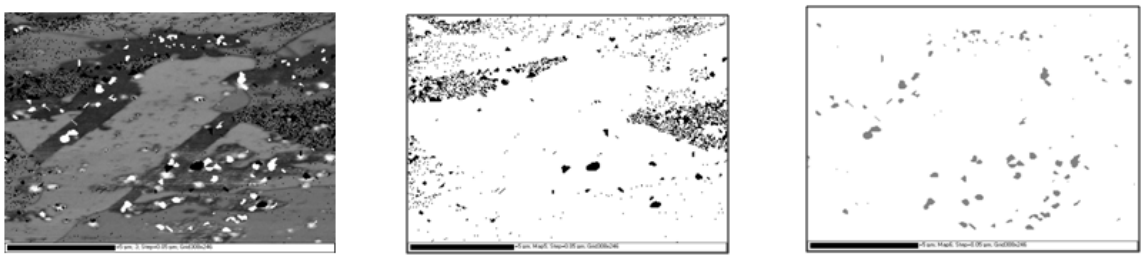
Сталь 12Х18Н10Т, БН-350, ЦЦ-19, «0мм», 56 сна, 370°С) (а); петли Франка, х50000 (б)

Рисунок 11. Образование α′-фазы при облучении аустенитной стали быстрыми нейтронами

Мы предположили, что ее образование связано с петлями Франка, т.к., согласно ПЭМ исследованиям, это были основные радиационные дефекты в облученном материале. Этот результат, в частности, подтверждается данными, полученными в ORNL(США) при облучении быстрыми нейтронами (до 12 сна) в реакторе БОР-60 нержавеющей стали типа 304 с различным содержанием кремния [24].

На основании анализа многочисленных экспериментальных данных было высказано предположение, что в аустенитной нержавеющей хромоникелевой стали типа 18-10 может образовываться ферромагнитная мартенситная α-фаза только лишь под воздействием нейтронного облучения без дополнительного деформирования. По-видимому, в этом проявлении эффекта большая роль отводится запасаемой при этом энергии, по достижении критической величины которой в материале происходит фазовое γ→α-превращение. При таком подходе α-фаза в аустенитной матрице должна образовываться не только в случае нейтронного облучения, но и при использовании более дефектообразующего облучения заряженными частицами. Действительно, как было установлено в [25], в результате облучения стали 12Х18Н10Т тяжелыми ионами криптона с энергией 1,56 МэВ/нуклон при флюенсе 10^{16} част/см^2 в ней с применением метода EBSD обнаружена α-фаза (рисунок 12), которую было предложено называть «мартенситом облучения» по аналогии с установившимися в литературе понятиями: «мартенситом деформации», «напряжения» и «термообработки» [26].

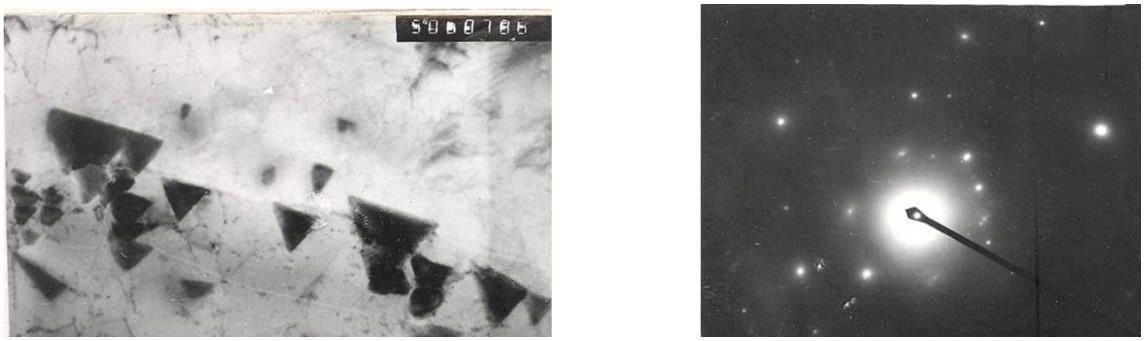
Необходимо отметить, что образование α-фазы в аустенитных американских сталях наблюдали ранее в [27-30], а в российских сталях этот эффект был обнаружен и описан в работах [31, 32].



аустенит | α-мартенсит | ε-мартенсит
а) | б) | в)

количество α-мартенсита (ОЦК-решетка) – 9%; ε-мартенсита (ГПУ-решетка) – 2%.

Рисунок 12. α-мартенсит облучения в стали 12Х18Н10Т после облучения тяжелыми ионами на ускорителе DC-60 (Kr 1,56 МэВ/нуклон) ~10^{16} част/см^2



БН-350, Н-214(II), «0мм», 15,6 сна, $T_{обл}$=337°С, 9·10^{22} н/см^2.

Рисунок 13. Тетраэдры дефектов упаковки и α-фаза в микроструктуре аустенитной нержавеющей стали 08Х16Н11М3, облученной быстрыми нейтронами

Принимая во внимание имеющиеся на сегодняшний день сведения, мы пришли к выводу, что фазовый переход γ→ε→α может происходить под облучением при эволюции дефектной структуры непосредственно в дислокационных петлях Франка по механизмам, предложенным в [33], которые накладывают ограничительные условия на размер петли или, другими словами, на энергию дефекта упаковки стали. Это наше предположение нашло еще большее подтверждение при обнаружении в структуре стальных образцов, облученных быстрыми нейтронами, аномально больших тетраэдров дефекта упаковки (рисунок 13), с появлением которых, также как и с петлями Франка, связано наличие ферромагнетизма. В самом деле, если принять во внимание общепринятый механизм образования тетраэдра, в каждой плоскости которого развивается дефектная дислокационная петля, а на ребрах может иметь место пересечение петель, т.е. реакция ε→α.

На основе анализа экспериментальных данных нами предложена [26] следующая схема образования α-фазы в метастабильной аустенитной стали, облучаемой нейтронами при различных температурах до различных степеней повреждающей дозы (см. рисунок 14).

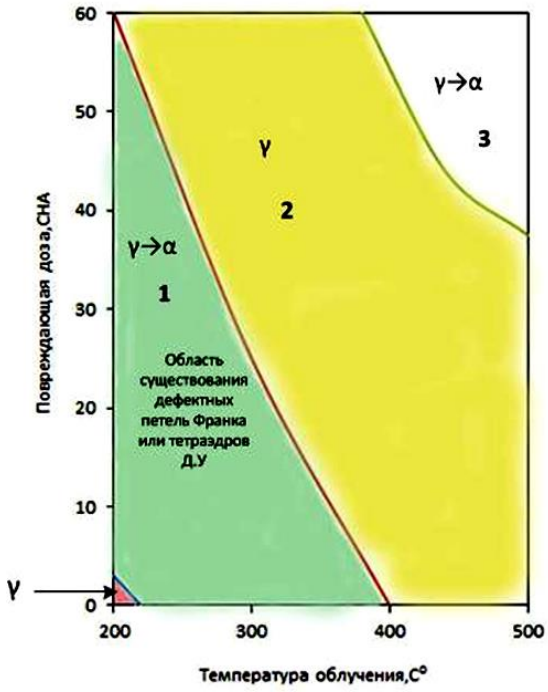


Рисунок 14. Влияние параметров нейтронного облучения на возможность образования α-фазы в нержавеющей стали типа Х18Н10Т (схема)

Мартенсит облучения образуется в области 1, характеризующейся сравнительно низкими значениями повреждающей дозы (10-60 сна) и температуры облучения (200-400°С). В области 3 также образуется α-фаза, но ее природа в данном случае другая – это, вероятнее всего, мартенсит деформации (напряжения). Поскольку структура α-фазы – это ОЦК-решетка, которая сама по себе рыхлая и потому распухает меньше, чем ГЦК-структура, то в двух температурно-дозовых областях 1 и 3 мы вправе ожидать, что и распухание в них будет сравнительно меньше. Некоторым подтверждением сделанным выводам являются экспериментальные данные, полученные в [34].

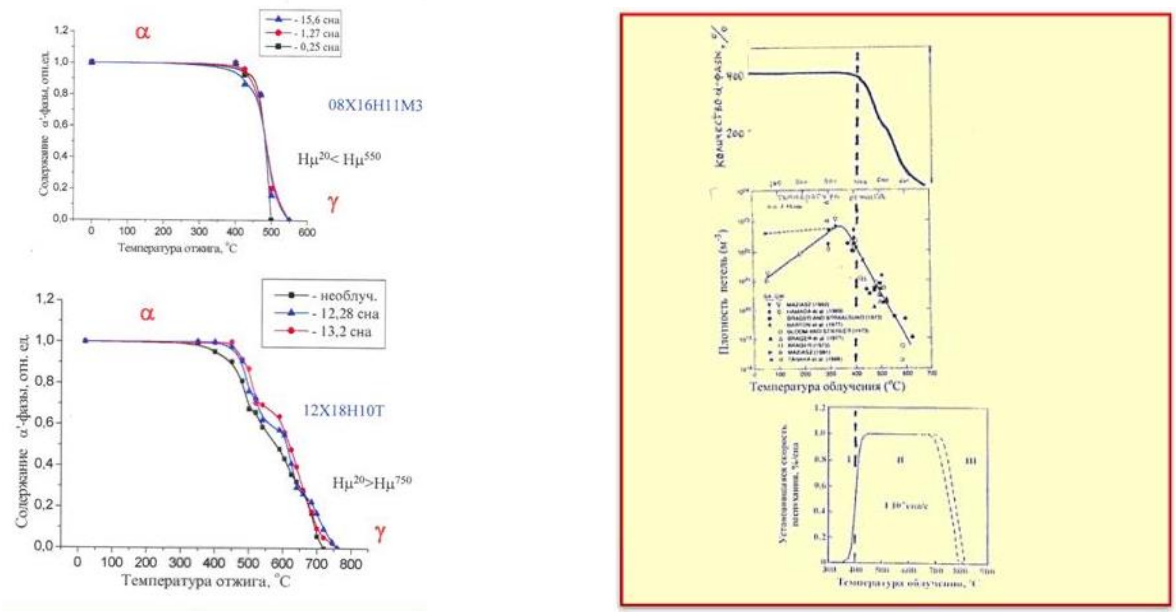
Все сказанное ранее относилось к α-мартенситу, индуцированному деформацией или облучением аустенитных реакторных сталей. Образовавшись, α-фаза может существовать в кристалле до тех пор, пока температура материала не увеличится до Т=350–400°С. Начиная с этой температуры количество α-фазы будет непрерывно уменьшаться по мере роста Т и по достижении Т= 700-800°С отожжется полностью (рисунок 15, а) с образованием фазонаклепанного аустенита [35]. При этом процесс α′→γ-перехода является стадийным, а в спектре возврата намагниченности проявляются 3 или 4 максимума (пика), положение которых на температурной шкале зависит от дозы облучения [36].

Анализ полученных данных с привлечением результатов мессбауэровских, рентгеноструктурных и ПЭМ-исследований позволяет предположить следующую последовательность изменений структуры, элементного и фазового состава, протекающих при отжиге холоднодеформированных нержавеющих сталей в выявленных стадиях.

В районе 400°С увеличивается подвижность атомов хрома, что приводит к расслоению твердого γ-раствора с образованием концентрационных неоднородностей – сферических зон Гинье-Престона, обогащенных хромом.

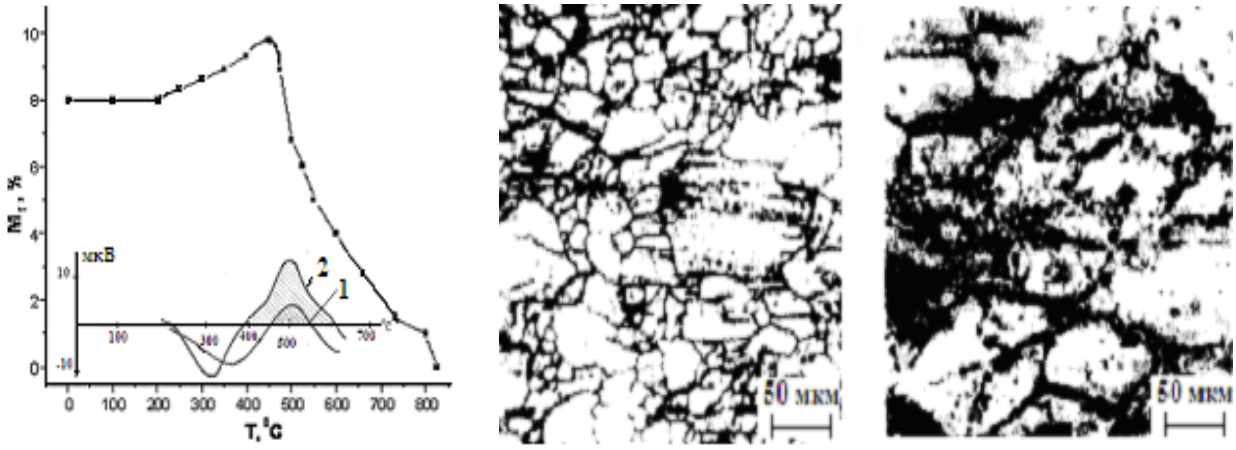
Обращает на себя внимание тот факт, что при температурах 400-450°С не только начинает отжигаться α-фаза, но и петли Франка, а скорость распухания достигает величины 1% /сна. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что в некоторых случаях при отжиге холоднодеформированных или облученных стальных образцов в районе температуры 400°С мы наблюдали не уменьшение, а предварительное увеличение количества α-фазы и этот эффект сопровождался также увеличением микротвердости и тепловыми эффектами (см. рисунок 16) [37].

В интервале 400-475°С, по-видимому, происходит отжиг этой вновь образовавшейся α′-фазы, имеющей микроскопические размеры. Эта стадия отжига является атермической. В интервале температур 450-675°С происходит обратное α′→γ-превращение, которое осуществляется кооперативной перестройкой атомов по мартенситному механизму. Этот процесс сопровождается уменьшением объема материала. Завершается α′→γ-переход формированием в аустените сетчатой дислокационной структуры.



а) б)

Рисунок 15. (а) – обратное α′→γ мартенситное превращение в нержавеющих сталях, облученных нейтронами (БН-350); (б) 400 ℃ – температура начала обратного α→γ-перехода, отжига петель Франка и распухания со скоростью 1% /сна



а) б) в)

Рисунок 16. (а) – обнаруженный эффект прироста количества α′-фазы при отжиге деформированного образца стали 12Х18Н10Т, облученного нейтронами до повреждающей дозы 55,7 сна (на врезке – тепловые эффекты, сопровождающие α′-мартенситный переход: 200-400 ℃ – поглощение тепла, 400-600 – выделение тепла); (б, в) – микроструктура стали 08Х16Н11М3 (БН-350, ТВС Н-214(II), «−1200 мм», 0,25 сна: б) до отжига; в) после отжига при 800°С (1 час).

Замедление скорости отжига намагниченности в районе 550-700°С связано с возрастанием объемной доли α′-фазы вследствие того, что нагрев при температурах 400-700°С вызвал старение стали, образование карбидных и интерметаллидных фаз и привел к дестабилизации аустенита и образованию вторичного α′-мартенсита вследствие обеднения твердого раствора по аустенитостабилизирующим элементам – C, N, Ni.

В районе 550-800°С уменьшается намагниченность стали, связанная с отжигом вторичных α′-мартенситных образований. Эта третья стадия превращение мартенсита в аустенит протекает по механизму, контролируемому диффузией.

Проведенные многочисленные исследования облученных и деформированных аустенитных нержавеющих сталей показали уменьшение сопротивления конструкционных материалов атомных реакторов на быстрых нейтронах к локальной коррозии в результате образования и роста объема индуцированной деформацией и облучением α-мартенсита [37]. Так установлено, что образцы стали 12Х18Н10Т, облученные нейтронами (10^{19} н/см^2) в реакторе ВВР-К и деформированные при -60°С на 30% и более, помимо структурной неоднородности характеризуются фазовой гетерогенностью и появлением крупных коррозионных питтингов, сосредоточенных вблизи деформационных полос и границ зерен, где, в основном, образуется и накапливается мартенситная α-фаза.

В работе [38] приведены данные по сопротивлению коррозии облученных до высоких повреждающих доз (~59 сна) образцов стали 12Х18Н10Т, вырезанных из стенок чехлов отработавших эксплуатационный срок тепловыделяющих сборок реактора БН-350. Оказалось, что образцы, вырезанные с различных уровней от центра активной зоны реактора, содержали неодинаковое количество магнитной α-фазы, что коррелировало с особенностями дефектной структуры (наличие петель Франка и тетраэдров дефектов упаковки).

Установлен межкристаллитный характер коррозионного повреждения внутренней поверхности стенки чехла экранной ТВС Н214(1) на отметке «+75 мм» от центра ЦАЗ, где радиационные повреждения особенно заметны.

На рисунке 17 приведена деформационная зависимость потерь массы образцов стали 12Х18Н10Т в агрессивном растворе (10% $FeCl_3$, 500 часов), которая демонстрирует неоднозначные изменения коррозионного повреждения от степени холодной деформации.

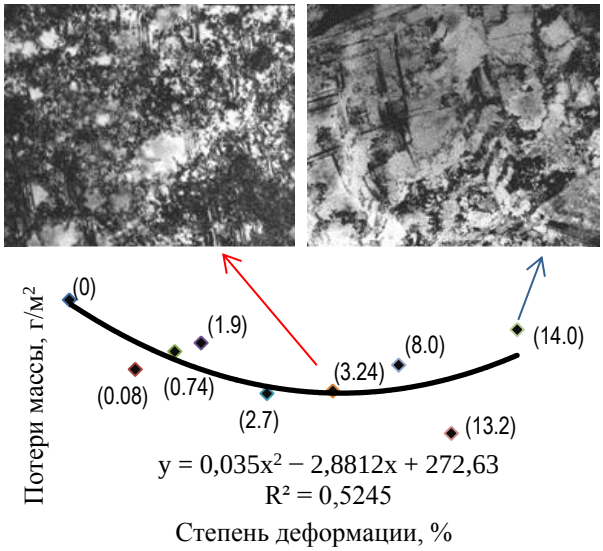


Рисунок 17. Влияние мартенсита деформации на сопротивление питтинговой коррозии холоднодеформированной стали 12Х18Н10Т (в скобках приведено объемное содержание мартенситной α-фазы в %)

Заключение

Проведены комплексные материаловедческие исследования конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах и термоядерных установок и представлены результаты анализа полученных данных.

Показано, что в сложнолегированных аустенитных нержавеющих сталях в результате интенсивных внешних воздействий (облучение, деформация, температура) возможно протекание фазово-структурных превращений и в том числе прямых ($\gamma\rightarrow\alpha$) и обратных ($\alpha\rightarrow\gamma$) мартенситных переходов, во многом определяющих эксплуатационные характеристики этих материалов.

Рассмотрены некоторые особенности образования и развития мартенсита деформации (напряжения) и мартенсита облучения. Установлено влияние $\gamma\rightarrow\alpha$-перехода на локализованную деформацию в виде полос и стабильной шейки. Полученные данные позволяют утверждать, что α-фаза, образующаяся в аустенитных нержавеющих сталях может существенным образом сказаться на коррозионных свойствах и сыграть важную роль при длительном (>50 лет) хранении отработавших тепловыделяющих сборок быстрых реакторов.

Литература

1. Gussev, M. N. / M. N. Gussev, J. T. Busby, F. A. Garner //17-th International Conference on Euvizonmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors. – August 9-12, 2015. – Ottawa, Canada.
2. Филиппов, М. А. / М. А. Филиппов, В. С. Литвинов, Ю. Р. Немировский //М.: Металлургия. – 1988. – 255 с.
3. Tamura, I. / I. Tamura //Material Sciences. – 16. – 1982. – PP. 245-253.
4. Olson, G. B. / G. B. Olson, M. Cehen //Less-Common Metals. – 28. – 1972. – N1. – PP. 107-118.
5. Wayman, C. M. / C. M. Wayman //Prog. 7-th Int. Conf. Montreal 12-16 Aug. – 1985 – 3. – PP. 1779-1805.
6. Максимкин, О. П. /О. П. Максимкин /Дефекты упаковки, их энергия и влияние на свойства облученных металлов и сплавов. – Алматы. – 2010. – 70 с.
7. Schvamm, R. E. / R. E Schvamm, R. P. Read //Metall Trans A. – 1975. – 6. – PP.1345.
8. Rhodes, C. G. / C. G. Rhodes, A. W. Thompson //Metall Trans A. – 1977. – 8. – PP.1905.
9. Brofman, P. J. / P. J. Brofman, G. S. Ansell //Metall Trans A. – 1978. – 9. – PP. 879.
10. Kijohiko, N. /N. Kijohiko, O. Yutaka, M. Nabuo //J.Iron and Steel Inst., Japan. – 63. – 1977. – N5. – PP. 772-782.
11. Максимкин, О. П. / О. П. Максимкин, Э. С. Айтхожин //Известия НАН РК. – 2006. – №6. – С. 77-88.
12. Ludwigson, D. C. / D. C. Ludwigson, J. D. Berger //J.Iron and Steel Inst. – 1969. – 207. – N.1. – PP. 63-78.
13. Максимкин, О. П. /О. П Максимкин, А. Налтаев, Б. К. Рахашев //Докл.НАН РК. – №1. – 2009. – С.37-45.
14. Максимкин, О. П. /О. П. Максимкин, А. И. Емельянов, А. Налтаев, Д. Т. Бердалиев, Б. К. Рахашев //Вестник КазНУ, серия физическая. – 2008. – № 1(25). – С.58-67.
15. Максимкин, О. П. / О. П. Максимкин, М. Н. Гусев, Д. А. Токтогулова //Вестник НЯЦ РК. – № 4. – 2008. – С. 27-33.
16. Максимкин, О. П. /О. П. Максимкин, С. В. Рубан, М. Н. Гусев, С. В. Рыбин //Вестник НЯЦ РК. – 2. – 2010. – С. 25-30.
17. Gusev, M. N. / M. N. Gusev, O. P. Maksimkin, I. S. Osipov, N. S. Silniagina, F.A. Garner //Journal of ASTM international. Paper JA 1020262. – 2010. – 7. – N.1. – PP. 210-219.
18. Gusev, M. N. /M. N. Gusev, O. P. Maksimkin, F. A. Garner //J. Nucl. Mater. – 2009. – 386-388. – PP. 273-276.
19. Максимкин, О. П. / О. П. Максимкин, А. М. Такиева, А. Налтаев, Н. Маженов, Д. Т. Бердалиев, Б. К. Рахашев //Вестник Карагандинского университета, Серия: «Физика». – 2013. – № 4(472). – С.34-42.
20. Максимкин, О. П. /О. П. Максимкин, А. М. Такиева //Вестник НЯЦ РК. – 2014. – 1. – С.45-52.
21. Тиванова, О. В. Процессы локализации деформации, сопровождаемые структурно-фазовыми изменениями в металлах (Ni, Mo) и сплавах (12Х18Н10Т, 08Х16Н11М3, 03Х20Н45М4БРЦ), облученных нейтронами и альфа-частицами: дисс… канд. физ.-мат. наук. / О. В. Тиванова. – 2008. – Алматы. – 139 с.
22. Максимкин, О. П. / О. П. Максимкин, Д. Г. Бердалиев //Известия МОН РК, сер. Физ.-мат. – 2009. –№2. –С.19-25.
23. Максимкин, О. П. / О. П. Максимкин //Вестник НЯЦ РК. – 2013. – 3. – С. 17-26.
24. Gussev, M. N. /M. N.Gussev, J. T. Busby, L.Tan, F. A. Garner //Journal of Nucl. Mat. – 2014. – 448. – PP. 294-300.
25. Alontseva, D. / D. Alontseva, O. P. Maksimkin, A. Russacova //Materials science. – 2014. – 20. – N.1.– PP.15-20.
26. Максимкин, О. П. /О. П. Максимкин //Вестник НЯЦ РК. – 2015. – 1. – С.17-26.
27. Porter, D. L. / D. L. Porter //J. Nucl. Mater. – 1979. – 79. – PP. 406-411.
28. Stanley, J. T. / J. T. Stanley and L. F. Hendrickson //J. Nucl. Mater. – 1979. – 80. – PP. 69-78.
29. Reynolds, M. B. / M. B. Reynolds, J. B. Zow and Z. O Sullivan //J. of Metals. – 7. – 1955. – N4. – PP. 555-559.
30. Iton, M. / M. Iton, Sh. Onose and Sh. Yuhara //J.Japan Inst. Metals. – 1987. – 51. – N.12. – PP.1101-1107.
31. Воронин, И. М. / И. М. Воронин, С. И. Порollo // Атомная энергия. – 1989. – Т.66. – 1. – С. 33-37.
32. Чукалкин, Ю. Г. / Ю. Г. Чукалкин, В. В. Петров, В. Р. Штирц, Б. Н. Гощицкий // Атомная энергия. – 1988. – Т.65. – 4. – С.254-257.
33. Кащенко, М. П. /М. П. Кащенко, В. П. Верещагин //Рукопись, депонированная в ВИНИТИ 12.03.97. РЖ Мет. – № 730-В-97. – 10. –1997.
34. Baron, J. G. /J. G. Baron, R. Cadalbert, J. Delapace. //Journal of Nuclear Mater. – 1974. – 51. – PP. 266 –268.
35. Малышев, К. А. Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железоникелевой основе. / К. А. Малышев, В. В. Сагарадзе, И. П. Сорокин //М.: Наука. – 1982. – 260 с.
36. Рахашев, Б .К. дисс… канд. физ.-мат. наук. / Б. К. Рахашев.– Алматы. – 2010. – 116 с.

37. Рубан, С. В. / С. В. Рубан, О. П. Максимкин, С. В. Рыбин //Вестник НЯЦ РК. – 2011. – 3. – С. 98-101.
38. Максимкин, О. П. /О. П. Максимкин, А. В. Яровчук, К. В. Цай, С. В. Рубан //Вестник НЯЦ РК. – 2014. – № 1. – С. 38-45.
39. Maksimkin, O. P. / O. P. Maksimkin, K. K. Kadyrzhanov [at al] //Safety Related Issues of Spent Nuclear Fuel Storage, Springer. – 2007. – PP. 329-349.

ЗАРЯДТАЛҒАН БӨЛШЕКТЕРМЕН ЖӘНЕ НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН, РЕАКТОРЛЫҚ БОЛАТТАРДАҒЫ ТУРА ЖӘНЕ КЕРІ МАРТЕНСИТТІК ТҮРЛЕНУЛЕР

Максимкин О.П.

ҚР ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Шапшаң нейтронды реакторлардың конструкциялық жадығаттарында – аустенитті тотықпайтын болаттарда жүретін, диффузиясыз фазалық $\gamma \rightarrow \alpha$ түрленулерге қатысты, меншікті және әдебиеттік мәліметтер жинақталды және талдау жасалды.

Реакторлық болаттарын жоғарыэнергетикалық бөлшектермен сәулелендіру нәтижесінде α-фазаның туындауы мүмкіндігіне меңзелген. Тотықпайтын болаттардың механикалық, магниттік және коррозиялық қасиеттерінің қалыптасуында мартенситті түрленулер үлкен рөл ойнайтыны анықталды.

Жүргізілген зертеу нәтижелері эксплуатация кезінде конструкциялық жадығаттардың жұмыс істеу қабілеттілігін бағалау және атомдық реактордың жұмыс істеп болған жылубөлгіш құрастырылымдарын ұзақ мерзім сақтау кезінде қолданылуы мүмкін.

DIRECT AND REVERSED MARTENSITIC TRANSFORMATIONS IN REACTOR STEELS IRRADIATED WITH NEUTRONS AND CHARGED PARTICLES

O.P. Maksimkin

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

Experimental data and literature review on diffusionless $\gamma \leftrightarrow \alpha$ phase transformations in austenitic stainless steels – structural materials of fast nuclear reactors – were summarized and analyzed.

The paper shows that irradiation with high energy particles results in α-phase development in reactor steels. It was found that martensitic transformation plays an important role in mechanical and magnetic properties and corrosion resistance of stainless steels.

The obtained research results could be used to assess the operation characteristics and long-term storage parameters of the structural materials for used fuel assemblies.

СПИСОК АВТОРОВ

Алещенко И.Б., 72
Аскербеков С.К., 9
Ахметшарипова Т.К., 17
Бакланов В.В., 5
Бекетауов Б.А., 109
Бекмулдин М.К., 21
Великанов А.Е., 87, 94
Великанова А.А., 72
Вурим А.Д., 46
Гановичев Д.А., 21, 59
Даулеткелдыев А.Д., 5
Дерявко И.И., 5
Дубровин В.И., 78
Ермоленко М.В., 32
Захаров М.А., 51
Зуев В.А., 21, 59
Иданова Д.С., 26
Карпиков А.Н., 39
Кенжина И.Е., 9
Кислицин С.Б., 39
Козырева М.С., 39
Колодешников А.А., 59
Конырова К.Б., 5
Котов В.М., 26, 65
Кульсартов Т.В., 9
Курбанбеков Ш.Р., 5
Максимкин О.П., 51, 113
Микиша А.В., 21
Минглибаев М.Ж., 109
Миниязов А.Ж., 5
Михайлова Н.Н., 82, 87, 94
Мукамбаев А.С., 82
Мухамеджанова Р.М., 5
Надырова А.Р., 32
Немкаева Р.Р., 9
Оразымбеков Б.Т., 5
Полешко Н.Н., 94
Райханов М.Б., 46
Рахадилов Б.К., 59
Рубан С.В., 51
Рябенко О.В., 101
Садыков А.Д., 55
Садыкова М.С., 55
Сейнасинов Н.А., 101
Скаков М.К., 55
Смирнов А.А., 78
Соколов А.Н., 87
Соколов И.А., 59
Соколова И.Н., 87
Сохорева В.В., 17
Степанова О.А., 32
Сураев А.С., 65
Туленбергенов Т.Р., 59
Узбеков А.Н., 72, 94
Узбеков Р.Б., 101
Чектыбаев Б.Ж., 46
Чихрай Е.В., 9
Шаповалов Г.В., 46, 55
Шестаков В.П., 9

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2…) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается аннотация к статье на русском языке, ключевые слова и основной текст. В конце статьи, после списка литературы, повторяются блоки «название, авторы, организации, аннотация, ключевые слова» на казахском и английском языке.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием ключевых слов, названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.jpg, *.wmf с разрешениями 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- 2 рецензии высококвалифицированных специалистов (докторов наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

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, электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. У.П. Козтаева
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: KOZTAEVA@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б
http://www.nnc.kz/vestnik

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2015

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000 г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б

